Р. Шаффферт

ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЯ

РЕМОНТ И
ОБСЛУЖИВАНИЕ
ОФИСНОЙ
ТЕХНИКИ

Алексей
Воеводин

сервисный инженер

моб. тел.:
8-097-56-36-777
E-mail: toner@ukr.net
ICQ # 343-047-727

ELECTROPHOTOGRAPHY

R. M. Schaffert, M.A., Ph.D

THE FOCAL PRESS
LONDON AND NEW YORK
1965

Р. Шаффert

ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЯ

Перевод с английского

Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук, профессора В. М. ФРИДКИНА,
канд. техн. наук А. Б. ДРАВИНА

АЛЕКСЕЙ ВОЕВОДИН
Ремонт, техобслуживание
офисной техники. Заправка
картриджей.
Пейджер:
тел. 0-54, абонент ТОНЕР

002534

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» • Москва 1968

УДК 621. 385. 833.

Электрофотография — сравнительно новая область техники, в основе которой лежат современные достижения в исследованиях фотоэлектрических явлений в полупроводниках и диэлектриках. В ряде технических применений она успешно вытеснила галоидосеребряную фотографию.

Книга написана известным американским специалистом. Она охватывает все области современной электрофотографии: механизм и кинетику образования скрытого изображения, вопросы проявления, сенситометрию и область технических применений электрофотографии. Большое внимание автор уделяет природе чувствительности электрофотографических слоев.

Книга полезна не только для тех, кто ведет исследования по электрофотографии, разрабатывает и использует электрофотографическую аппаратуру, но и для широкого круга научных и инженерно-технических работников, занимающихся фотографией, физикой полупроводников и диэлектриков, электроникой, вычислительной техникой, картографией и полиграфией.

Редакция литературы по новой технике

Инд. 3-3-11

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрофотография — новый фотографический процесс, который является своеобразным физическим аналогом фотографии на галоидосеребряных слоях. Впрочем, слово «новый» в наше время интенсивного развития научных исследований, пожалуй, не совсем уместно. В 1968 г. исполняется 30 лет с момента открытия Ч. Карлсоном ксерографии — одного из основных вариантов электрофотографического процесса, развитие которого шло наиболее интенсивно. За это время электрофотография получила широкое распространение и оформилась в самостоятельную физико-техническую дисциплину. Этому способствовало успешное применение методов электрофотографии в технике — оперативной полиграфии, рентгенографии, аэрофотографии, вычислительной технике и т. д. Значительный вклад в развитие теоретических основ электрофотографии и ее практических приложений внесли работы советских авторов.

Предлагаемая вниманию советского читателя книга по электрофотографии написана крупнейшим американским специалистом в области электрофотографии, одним из первооткрывателей рентгеновской электрофотографии, внесшим своими оригинальными исследованиями крупный вклад в развитие этой новой области научной и прикладной фотографии.

От других монографий, посвященных этому предмету, книгу Шафферта выгодно отличают две особенности. Во-первых, она универсальна, т. е. излагает предмет в целом, охватывая все разделы современной электрофотографии: механизм и кинетику образования скрытого изображения, вопросы проявления, сенситометрию и область технических применений электрофотографии. Во-вторых, книга написана физиком, что само по себе не могло не сказаться на характере и уровне изложения материала. Природе чувствительности электрофотографических слоев, механизму образования скрытого и проявленного изображения и другим принципиальным вопросам автор уделяет главное внимание. Вместе с тем книга не является специальной физической монографией и доступна широкому кругу читателей.

Здесь не лишне напомнить, что электрофотография — это совокупность процессов, а не одно физическое явление. Так, изложение теории скрытого электрофотографического изображения, базирующееся на современных представлениях физики высокоомных фотопроводников, не имеет ничего общего с изложением теории электрофотографического проявления, т. е. с вопросами статической электризации, образования двойных электрических слоев и т. д. Что касается очувствления (т. е. зарядки) электрофотографических слоев, то этот материал целиком относится уже совсем к другой области — физике газового разряда. Вероятно, поэтому до последнего времени не появилось обзоров или монографий, посвященных изложению физических основ всего электрофотографического процесса в целом. Так, например, один из редакторов перевода в своей последней книге по электрофотографии [1]) ограничился изложением основ теории скрытого электрофотографического изображения. Недавно вышедшая под редакцией Дессауэра и Кларка превосходная книга по электрофотографии [2]) является скорее сборником статей, чем систематическим изложением предмета с единой точки зрения. Таким образом, книга Шафферта представляет собой первую удачную попытку изложения предмета в целом.

Книга состоит из двух частей. В части I автор излагает основы научной и прикладной электрофотографии, дает классификацию известных вариантов этого процесса. В соответствии с этой классификацией он последовательно рассматривает ксерографию, электрофотографию на фотоэлектретах, электрофотографию, основанную на фотостимулированной проводимости (так называемый процесс Каллмена), электрофотографию с использованием электрохимических и термопластических материалов и другие процессы. Здесь же изложены основы цветной электрофотографии, электростатической печати, а также вопросы промышленного применения электрофотографии. Самостоятельный раздел посвящен рентгеновской электрофотографии.

Часть II книги представляет собой анализ физических основ процесса в целом. Она состоит из пяти разделов, посвященных изложению теории отдельных стадий процесса. Первые два раздела можно было бы объединить, так как в них содержится описание механизма и кинетики образования скрытого изображения. К сожалению, приведенный здесь большой и интересный материал, на наш взгляд, страдает некоторой односторонностью, поскольку автора интересуют только два основных объекта —

[1]) Фридкин В. М., Физические основы электрофотографического процесса, изд-во «Энергия», 1966.

[2]) Dessauer J., Clark H., *Xerography and related Processes*, *Focal Press*, 1966.

слои аморфного селена и поликристаллической окиси цинка, для которых в основном и проводится теоретическое рассмотрение. Авторам этих строк импонирует другой подход — более общее рассмотрение механизма и кинетики, из которых можно было бы вывести заключение об общих и индивидуальных свойствах электрофотографических слоев.

В конце книги приведены библиография и перечень американских патентов. В общей сложности библиография содержит свыше 500 литературных ссылок и, по-видимому, является одной из самых полных. Приятное впечатление оставляют многочисленные ссылки на работы советских авторов; эти работы подробно разбираются и их результаты широко используются в книге. Что касается патентного материала, то мы сочли целесообразным не включать его в русский перевод, так как перечень и аннотацию патентов можно найти в других изданиях.

Мы надеемся, что книга Шафферта будет с интересом встречена специалистами в нашей стране, где электрофотография интенсивно и успешно развивается на протяжении последних десяти лет. Помимо того, книга представляет интерес для широкого круга читателей — специалистов в области полупроводников и полупроводниковой техники.

Перевод выполнен Аватковой Н. А. (ч. I, гл. IV, X; ч. II гл. III), Ионовым П. В. (ч. II, гл. I), Кузнецовой Г. И. (ч. I, гл. V, IX; ч. II, гл. IV, V), Почтарь Э. И. (ч. I, гл. I, II, VII, VIII), Носовым В. Н. (ч. I, гл. III, IV; ч. II, гл. II).

В. М. Фридкин, А. Б. Дравин

Часть I

ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы нехимические (сухие) фотопроцессы произвели революцию в области репродукционной техники. Наиболее важными среди них являются те, в которых для формирования электростатического изображения используют фотоэлектрические явления. К этим процессам относится и электрофотография.

Электрофотография на современном этапе ее развития представлена целым рядом методов, отличающихся друг от друга технологией создания скрытого изображения, а также технологией превращения его в видимое, или способом печати. В принципе, однако, существуют только три известных метода электрофотографии: 1) ксерография, которая основана на использовании электростатического изображения в виде поверхностного распределения зарядов; 2) устойчивая внутренняя поляризация, в которой скрытое изображение принимает форму электрической поляризации; 3) устойчивая проводимость, которая является скрытым электропроводящим изображением. Первые два метода сходны между собой в том, что скрытое изображение можно проявлять одинаковыми способами. Третий метод не обязательно основан на применении электростатических зарядов и не может быть поэтому отнесен к электростатическим процессам.

В настоящее время ксерография является наиболее совершенным методом электрофотографии. В ксерографии электростатическое изображение образуют путем зарядки фотопроводящих слоев и последующего проецирования на них светового изображения. Последнее проявляют заряженным порошком и переносят на бумагу, а затем оплавляют на ней.

Фотопроводящий слой может быть использован неоднократно. Эта же последовательность операций применена и в хорошо известных ксерографических копировальных машинах. Разновидностью ксерографического способа является процесс, в котором применяют электрофотографическую бумагу. Этот процесс получил название «электрофакс». На основе этого процесса создан ряд копировальных машин, выпускаемых в США и других странах.

Промышленное копировальное оборудование, основанное на использовании устойчивой внутренней поляризации, до настоящего времени еще не создано. Однако принцип устойчивой фотопроводимости с успехом использован в серийной установке «Филмак» (комбинированное устройство для чтения микрофильмов и печати с них).

Так электрофотография в различных формах стала играть важную роль в области фотокопирования. Уникальные свойства электрофотографии позволяют говорить о ее большом будущем, которое не ограничивается одной лишь репродукционной техникой. Несмотря на это, было бы преждевременным утверждать, что электрофотография заменит достигшую высокого совершенства и получившую значительное распространение галоидосеребряную фотографию. Однако нужно признать, что новые электрофотографические процессы находят широкое использование в специальных областях и применяются как дополнение к существующим способам репродуцирования.

1.1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

К первым попыткам разработки электрофотографического процесса, по-видимому, нужно отнести использование явления фотопроводимости для активации электрочувствительной бумаги [1]. Такой процесс описан в патенте, выданном в 1922 г. Бронку [2]. Электрочувствительную бумагу помещают между фотопроводящим слоем и проводящей подложкой. Между фотопроводящим слоем и подложкой прикладывается напряжение и одновременно на фотослой проецируется изображение. Освещенные участки становятся проводниками, и проходящий через них ток вызывает изменение цвета бумаги. Подобное устройство было описано в работе [3]. Позже изобретения, основанные на аналогичных принципах, были запатентованы Гольдманом [4], Шмишеком и Клюцке [5]. Эти почти забытые изобретения сейчас упоминаются только в патентной литературе и относятся к начальному периоду истории электрофотографии.

Активное развитие электрофотографии начинается с изобретения Карлсона [6], сделанного в 1938 г. Карлсон предложил использовать фотопроводящие слои для создания скрытых электростатических изображений. Его изобретение легло в основу первой практической электрофотографической технологии. Интересно отметить, что бельгийский инженер де Меленэр в патенте [7], выданном ему в 1932 г., был близок к аналогичному открытию. Он использовал селеновые пластины и лейденскую банку для формирования изображения при помощи порошка на поверх-

ности, соприкасающейся с селеновой пластиной. Его изобретение, однако, не получило практического применения. В некоторых работах по истории электрофотографии есть ссылки на ранние работы Селеньи [8, 9]. Однако его изобретения не были связаны с фотопроцессами. Он создавал потенциальный рельеф на поверхности диэлектрика при помощи электронного луча или электрического разряда и затем проявлял изображение окрашенным порошком. Это изобретение Селеньи может быть классифицировано скорее как электрографический, чем электрофотографический процесс.

Первые эксперименты в области электрофотографии были выполнены Карлсоном и Корнейем в 1938 г. Именно в этот период они получили первое электростатическое изображение на фотопроводящей поверхности, которое было проявлено порошком и перенесено на бумагу. Светочувствительная пластина состояла из слоя серы на металлической подложке. Она заряжалась при натирании поверхности сукном, а электростатическое изображение получали при контактном экспонировании через приготовленный вручную прозрачный оригинал. Данные об этих ранних работах и изобретениях Карлсона были приведены в ряде работ [10, 11].

Дальнейшие работы в области электрофотографии проводились лабораторией научных исследований Института имени Баттела (Колумбус, шт. Огайо). С осени 1944 по 1948 г. усилия лаборатории были направлены на экспериментальные исследования [12]. Именно в этот период были достигнуты наиболее важные технологические успехи. Этот период принес ценные открытия, усовершенствования и новые изобретения, которые сделали возможным реализацию изобретений Карлсона и в конечном итоге успешное применение ксерографии на практике. Именно в этот период были изобретены каскадный способ проявления и двухкомпонентный трибоэлектрический проявляющий состав [13].

К другим важным изобретениям этого периода относятся зарядка короной, разработанная совместными усилиями исследователей Института имени Баттела, среди которых необходимо отметить Рейнфрэнка и Уолкапа; применение напыления в вакууме для изготовления ксерографических пластин, предложенное Оутоном; введение электростатического переноса Шаффертом [14] и идея Биксби [15] использовать пластины, покрытые аморфным селеном. Эти ранние открытия описаны в статье Шафферта и Оутона [16]. Необходимо также отметить, что, прежде чем указанные изобретения легли в основу промышленного оборудования, в них было внесено много дополнений и усовершенствований.

С 1944 по 1946 г. лаборатории Института имени Баттела вели исследования на собственные средства. В 1946 г. соответствующие лицензии были переданы фирме «Галойд» (Нью-Йорк), и с начала 1947 г. от нее были получены дополнительные средства на проведение исследований и разработок, что значительно ускорило темпы работы. В это время лабораторные исследования были ориентированы на развитие фотокопировальных процессов, что составляло основной интерес фирмы «Галойд» в то время. В 1948 г. возможностью применения электрофотографического процесса в военных целях заинтересовались войска связи Армии США и Институт имени Баттела при финансовой поддержке войск связи приступил к разработке проекта применения электрофотографии в военных условиях. Каллмен, работая в то время в одной из служб войск связи, возможно, впервые познакомился с электрофотографией, что привело его впоследствии к идее использования устойчивой проводимости и устойчивой внутренней поляризации для формирования скрытого изображения.

С 1948 г. до начала пятидесятых годов в перечисленных организациях была сосредоточена основная научно-исследовательская деятельность по электрофотографии. Работы этого периода были описаны в статье Дессауэра, Мотта и Богдонова [10], которая характеризует основные пути развития ксерографии до 1954 г.

В 1950 г. фирма «Ксерокс» (в то время фирма «Галойд») изготовила первое серийное ксерографическое оборудование. Оно состояло из устройства для зарядки пластин, камеры для экспонирования, приспособления для сухого проявления (порошком) и устройства для термического закрепления. С тех пор фирма «Ксерокс» изготовила целый ряд фотокопировальных устройств. От ручных копировальных устройств фирма перешла к автоматизированным машинам для копирования в масштабе 1 : 1 и для копирования с увеличением с микрофильмов. Получившее широкое распространение устройство «Ксерокс 914» было разработано в 1960 г.

В конце 1954 г. Юнг и Грейг (фирма «Ар-Си-Эй») предложили видоизмененный вариант ксерографии, так называемый «электрофакс» [17]. В этом процессе фотопроводящий слой, состоящий из порошка окиси цинка, диспергированного в смоляном связующем, наносят на бумажную подложку. Такой материал служит как светочувствительным слоем, так и окончательной копией (после проявления и закрепления изображения). В этом процессе для получения копий расходуют фотопроводящий слой, нанесенный на бумагу, в то время как в ксерографическом процессе фотопроводящий слой, обычно аморфный селен, используют многократно, а расходуют обычную бумагу и проявляющий состав.

С тех пор как стал известен способ «электрофакс», промышленное развитие электрофотографии шло по двум в основном схожим, но технически различным путям, которые связаны с однократным использованием электрофотографической бумаги и многократным использованием фотопроводящих материалов. В последние годы фотокопировальное оборудование с использованием электрофотобумаги разрабатывается фирмами «Чарлз Брунинг», «Американ фотокопи эквипмент» и рядом других. Фирма «Ксерокс» по-прежнему делает упор на методы, связанные с применением фотопроводников, рассчитанных на многократное использование, которые сегодня значительно усовершенствованы.

В 1958 г. фирма «Миннесота майнинг энд мэньюфекчуринг» изобрела новый способ применения постоянной проводимости (предложение Каллмена) в сочетании с электролитическим проявлением. Эти принципы использованы в установке «Филмак».

Применение серийного электрофотографического оборудования началось лишь около 10 лет назад. История промышленного использования электрофотографии только началась. Весьма вероятно, что ко времени опубликования этой книги в лабораториях и конструкторских бюро будут достигнуты новые успехи.

1.2. СКРЫТОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИИ

Возможно, что слово «электрофотография», как и термины, используемые для характеристики других фотографических процессов, будет впоследствии определяться посредством терминов, характеризующих природу скрытого изображения, которое формируется, когда на светочувствительный материал проецируется изображение. В настоящее время существует только три известных способа создания скрытого изображения в электрофотографии: 1) ксерография (электростатическое изображение формируется из статических электрических зарядов на поверхности фотопроводника); 2) получение фотоэлектретного изображения (скрытое изображение сформировано на основе устойчивой внутренней поляризации фотопроводникового материала); 3) получение изображения, сформированного на основе устойчивой внутренней проводимости фотопроводникового материала.

1.2.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ (КСЕРОГРАФИЯ)

Электростатическое изображение в ксерографии обычно формируется на поверхности фоточувствительного слоя, состоящего из фотопроводниковой пленки, нанесенной на проводящую подложку. Это достигается равномерным распределением электри-

ческих зарядов на поверхности пленки и проецированием на нее изображения обычными способами. Во время экспонирования электрическая проводимость возникает в тех местах пленки, на которые воздействовал свет. Это вызывается стеканием поверхностных зарядов через пленку в подложку [16]. Такое электростатическое изображение может быть получено на поверхности нефотопроводящего диэлектрика и некоторыми другими методами. Например, была доказана возможность формирования электростатического изображения на поверхности диэлектрической пленки, в то время как эта пленка находится в контакте с поверхностью фотопроводника. При наложении высокого напряжения на диэлектрической пленке осаждались заряды, прошедшие через освещенные участки фотопроводящего слоя [18]. Этот способ подробно изложен в разделах, посвященных переносу электростатического изображения. Кроме того, электростатическое изображение может быть получено на диэлектрической поверхности нефотографическими методами. Например, игольчатый электрод контактирует с диэлектрической поверхностью или находится в непосредственной близости от нее; если на электрод импульсами подается высокое напряжение, то на поверхности диэлектрика создается электростатический рисунок. Этот процесс использован в электростатических печатающих устройствах. Описанный процесс является электрографическим в отличие от процессов электрофотографических. Электростатическое скрытое изображение проявляется осаждением заряженного порошка на изображение.

1.2.2. ФОТОЭЛЕКТРЕТЫ

Некоторые типы фотопроводниковых материалов могут быть поляризованы при совместном воздействии освещения и сильного электрического поля [19]. Поляризация сохранится и после удаления поля и освещения. Каллмен объяснил это явление устойчивой внутренней поляризацией. В СССР такие материалы получили название фотоэлектретов [20]. Фотоэлектретное состояние может быть получено двумя основными путями. Изображение может быть получено непосредственно выборочной поляризацией освещенных участков или равномерной поляризацией фотопроводникового слоя с последующей деполяризацией выборочных участков при их освещении [21].

Внутренняя поляризация появляется благодаря фотопроводимости при разделении электрических зарядов внутри слоя. Эти заряды остаются разделенными и после окончания действия электрического поля и освещения. Скрытое изображение поэтому представлено в виде поляризованных участков. Если один электрод удалить от фотопроводящего слоя, то изображение может быть

проявлено теми же методами, что и в ксерографии. Отличие этого способа от ксерографического состоит в том, что изображение образуется в объеме пленки, а не на ее поверхности, как в ксерографии. В этом смысле электростатическое изображение в ксерографии может рассматриваться как поверхностная поляризация.

1.2.3. УСТОЙЧИВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

Известно, что некоторые фотопроводящие материалы, когда их освещают, сохраняют устойчивую проводимость относительно длительный период времени после окончания действия света [22]. Так, если на пленку такого материала спроецировать световое изображение, то будет сформировано его скрытое проводящее изображение, причем освещенные участки будут иметь бóльшую электрическую проводимость, чем неэкспонированные. При этом, если слой является высокоомным фотопроводником, то освещенные участки имеют проводимость на несколько порядков выше, чем неосвещенные. Для проявления образованного указанным способом изображения существует несколько способов. Например, после экспонирования фотопроводящий изоляционный слой заряжают как в ксерографии. С предварительно освещенных участков заряд стечет, а на неэкспонированных он сохранится. После этого изображение можно проявить, как в ксерографии [23]. Однако изображение, созданное в слое, обладающем устойчивой проводимостью, может быть проявлено и без сообщения слою заряда. Остроумный способ проявления таких изображений был предложен в работе [24]. В этом способе в фотопроводящем слое и пространстве между слоем и электродом, заполненном электролитом, создают электрическое поле. Проявление осуществляется электролитическим осаждением, например, металлического серебра на предварительно освещенных участках слоя.

1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

В ходе первоначальных исследований и разработок, основывавшихся на изобретении Карлсона, технологические процессы с использованием фотопроводимости и получение электростатических изображений обычно называли электрофотографией. Позднее, в 1948 г., эти процессы были названы ксерографией (сухая печать).

Хотя термин «ксерография» получил широкое распространение, для описания этого же класса процессов были использованы и другие термины, например: «электростатическая фотогра-

фия», «электростатическая электрофотография», «электрография», «электрофотография». Когда Юнг и Грейг [17] предложили новую модификацию ксерографического процесса, в котором использовалась бумага с белым фотопроводящим покрытием, было введено новое слово для обозначения этого процесса —«электрофакс». Над стандартизацией терминов и определений в области электростатических процессов работал комитет Института радиоинженеров (Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике) [25]. Этот комитет определил ксерографию как «ветвь электростатической электрофотографии, в которой используются фотопроводники для формирования с помощью инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучений скрытого электростатического изображения, а последнее служит для получения видимого изображения».

Это определение охватывает и «электрофакс» и процессы, основанные на многократном использовании фотопроводящих слоев. Оно может также относиться и к процессам, основанным на устойчивой внутренней поляризации, если допустить, что поляризованное изображение состоит из электростатических зарядов. В промышленности стало привычным называть процесс, основанный на использовании бумаги с фотопроводящим покрытием, процессом «электрофакс», а процесс, использующий пластины из аморфного селена,— процессом «ксерокс». Термины «ксерокс» и «электрофакс», однако,— фирменные названия и не могут быть поэтому использованы в стандартной терминологии. Существует тенденция использовать названия «ксерография» и «ксерокс» для обозначения одних и тех же процессов. Однако предполагается, что термин «ксерография» охватывает все процессы, включающие использование фотопроводниковых слоев для формирования электростатических изображений.

Не существует пока определения процесса, основанного на устойчивой внутренней проводимости, однако для характеристики процессов, охватывающих этот способ формирования скрытого изображения, использовались такие термины, как «электролитическая фотография» и «фотокондактография».

Так как процесс, основанный на устойчивой внутренней поляризации, не получил еще практического применения, то и нет общепринятого термина для его обозначения. Каллмен и ряд других специалистов относили этот процесс к фотографическим процессам, использующим устойчивую внутреннюю поляризацию.

В Советском Союзе такой способ формирования изображения называется фотографией на фотоэлектретах, а процессы, использующие поверхностные заряды для формирования изображения,— классической электрофотографией.

Стандартизация терминологии и определений станет возможной в результате усилий, которые сейчас успешно предпринимаются Комитетом стандартов по полупроводниковым приборам Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. В этой книге термин «электрофотография» будет использован в качестве общего термина для обозначения уже известных процессов фотографии, а также, возможно, и неизвестных и еще неоткрытых аналогичных процессов, в которых могут использоваться электрические и фотоэлектрические явления.

II. КСЕРОГРАФИЯ

Ксерографический процесс складывается из образования скрытого электростатического изображения, вызванного разрядкой засвеченных участков электрофотослоя, и проявления этого изображения частицами порошка, заряд которых противоположен по знаку заряду скрытого изображения [16].

Ксерография начала развиваться после изобретений Карлсона и стала успешно применяться в промышленности благодаря усилиям Института имени Баттела и фирмы «Ксерокс». Ксерографические процессы положены в основу разработанного копировально-множительного оборудования [26, 27], автоматических машин для фотокопирования [28], аппаратов для печатания с микрофильмов с увеличением [29, 30], для факсимильной печати [31] и регистрации данных электронных вычислительных машин [32].

2.1. ОСНОВЫ КСЕРОГРАФИИ

Ксерография принципиально отличается от других известных фотографических процессов. Она не использует каких-либо химических реакций. Ксерография по существу представляет собой сухой фотографический процесс. В отличие от серебряных эмульсий ксерографические пластины не расходуются в процессе работы. Пластины могут быть использованы многократно (сотни или даже тысячи экспонирований).

Основу технологии ксерографического процесса составляют обычно пять следующих операций:

1) электризация ксерографической пластины;

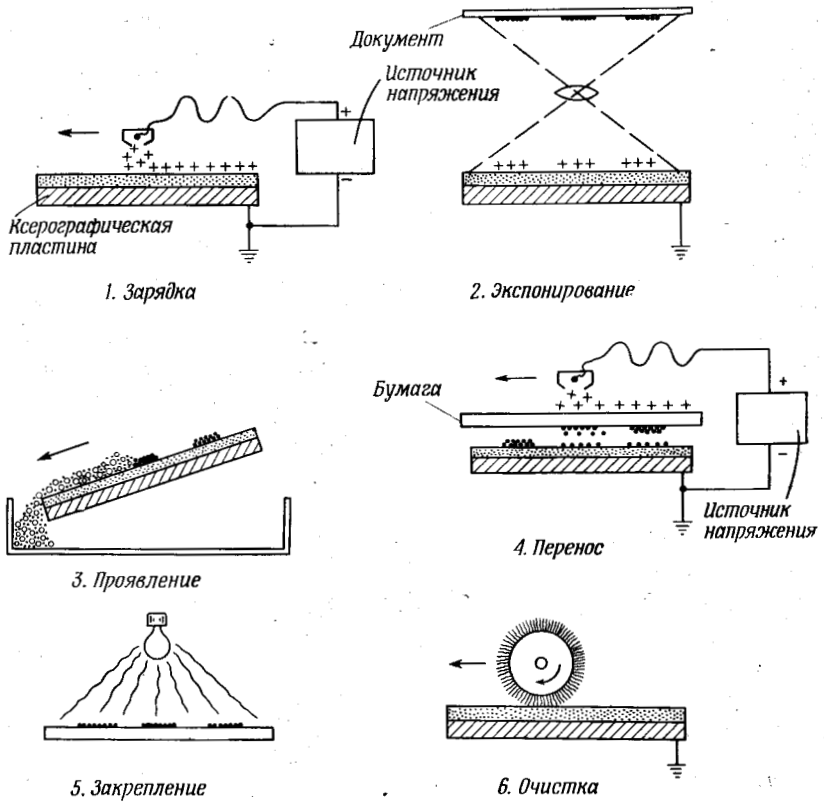
2) экспонирование пластины для создания скрытого электростатического изображения;

3) проявление скрытого изображения проявляющим составом;

4) перенос проявленного изображения на бумагу или другие материалы;

5) закрепление изображения.

Пластину затем очищают, и она может быть использована повторно. Эти операции проиллюстрированы на рис. 1.



Р и с. 1. Основные стадии ксерографического процесса.

В процессе, известном под названием «электрофакс», в качестве пластин используют электрофотографическую бумагу [33], на которой формируют, проявляют и закрепляют изображение. Процесс переноса в этом случае отсутствует.

2.1.1. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ксерографические пластины изготавливают путем нанесения тонкого слоя (20—100 *мк*) фотопроводящего материала на проводящую подложку обычно методом напыления в вакууме [34] или нанесением фотопроводника, диспергированного в связующем [35]. Для сохранения на своей поверхности электрических зарядов фотопроводящие слои должны быть хорошими изоляторами в темноте. Во время освещения фотопроводящего слоя

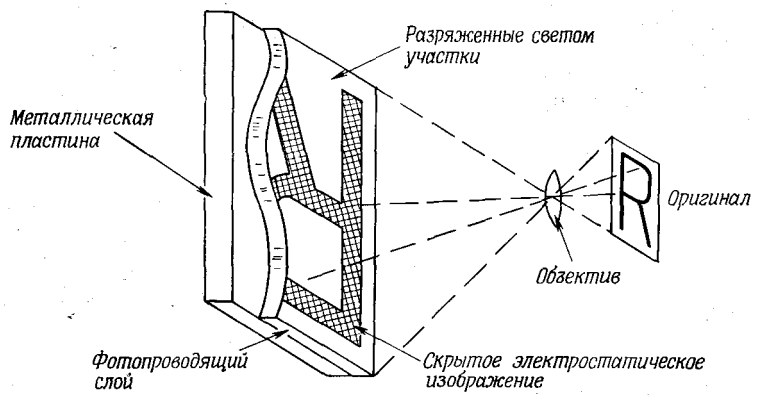
его электрическое сопротивление должно существенно уменьшаться, что обеспечит возможность быстрой нейтрализации поверхностных зарядов.

Удельное темновое сопротивление должно лежать в пределах от 10^{14} до 10^{16} *ом·см*, причем конкретное значение зависит от времени, необходимого для получения изображения. При освещении это сопротивление уменьшается на несколько порядков.

В настоящее время в качестве фотопроводящего материала для ксерографических пластин в основном используют аморфный селен, хотя раньше в этих целях использовались другие материалы, такие, как антрацен и сера. Дисперсию окиси цинка или сенсибилизированной красителями окиси цинка в смоле используют для пластин с бумажной подложкой [33]. Имеются сообщения об экспериментальных ксерографических пластинах с использованием различных фотопроводящих фосфóров [36] и сплавов селена с теллуром [37].

2.1.2. ФОРМИРОВАНИЕ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Получение изображения в ксерографии начинается с электризации фотослоя, которая обычно осуществляется в коронном



Р и с. 2. Образование электростатического изображения на ксерографической пластине [16].

разряде. Коронный разрядник, подключенный к источнику высокого напряжения, движется над поверхностью пластины, равномерно осаждая на фотопроводящую пленку электрические заряды (ионы). Эта операция должна выполняться в темноте, причем вплоть до окончания проявления скрытого изображения пластину

необходимо предохранять от света; в противном случае электрические заряды стекут с ее поверхности. Очувствленная пластина экспонируется либо в камере, либо контактным, либо проекционным способом. Образование скрытого электростатического изображения на ксерографической пластине иллюстрируется рис. 2. На участках, подвергнувшихся действию света, произошла разрядка электрофотослоя. На остальных участках, которые соответствуют темным участкам оригинала, электрические заряды сохранились.

Количество электрических зарядов, оставшихся на какой-либо части пластины, находится в обратной зависимости от ее освещенности. Таким образом, после экспонирования на ксерографической пластине образуется скрытое электростатическое изображение.

2.1.3. ПРОЯВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Проявление скрытого электростатического изображения представляет собой физический процесс, обычно заключающийся в электрическом притяжении мельчайших частиц к участкам скрытого изображения на пластине. Наиболее эффективно это может быть сделано тогда, когда частицы несут электрический заряд, противоположный по знаку зарядам скрытого изображения. Напряженность электрического поля, создаваемого скрытым изображением, резко падает с увеличением расстояния от пластины. Поэтому проявитель должен быть приведен в контакт с пластиной или находиться в непосредственной близости от нее. Незаряженные участки пластины не притянут частиц проявителя, а количество частиц проявителя, осевшего на заряженных участках, будет пропорционально напряженности электрического поля у этих участков.

2.1.4. ПЕРЕНОС И ЗАКРЕПЛЕНИЕ

Ксерографические изображения, проявленные на многократно используемых пластинах, переносят с пластин на бумагу. Это можно осуществить либо в электрическом поле, либо использованием бумаг с адгезионными покрытиями. Электрический перенос осуществляют наложением листа бумаги на пластину со стороны изображения, осаждением на бумагу электрических зарядов той же полярности, что и полярность зарядов скрытого изображения, и затем отделением бумаги от пластины. Осажденные заряды преодолевают притяжение частиц проявителя со стороны скрытого изображения и притягивают их к бумаге.

Адгезионный перенос осуществляют накладыванием под давлением бумаги с адгезионным слоем на изображение и затем отде-

лением бумаги от пластины. После переноса изображение может быть закреплено на бумаге термически или парами органических растворителей, либо применением закрепляющего покрытия.

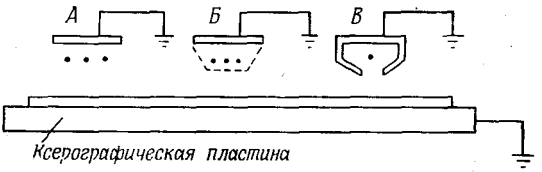
При использовании электрофотографической бумаги перенос не нужен, поскольку проявленное изображение непосредственно закрепляется.

2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

На ксерографическом процессе основан ряд технологических методов фотографирования и репродуцирования оригиналов. Выбор технологии ксерографического процесса зависит от характера оригинала, применяемых материалов и требований, предъявляемых к качеству копии. Существует целый ряд способов проявления, применяемых в ксерографии, и каждый из них дает характерные результаты. Технология, используемая при изготовлении штриховых копий, может существенно отличаться от технологии, применяемой при изготовлении тоновых изображений.

2.3. ОЧУВСТВЛЕНИЕ, ИЛИ ЗАРЯДКА

В настоящее время электризация в коронном разряде является наиболее эффективным и надежным способом очувствления электрофотографических слоев [10]. Когда между проводящей



Р и с. 3. Коронные зарядники, применяемые для электризации ксерографических пластин [10].

А —«трехпроволочный коротрон»; *Б* —«скоротрон»; *В* — «экранированный коротрон».

подложкой ксерографической пластины и тонкими проволочками поддерживается напряжение в несколько тысяч вольт, то возникает коронный разряд и образующиеся в разряде ионы осаждаются на поверхности пластины. На рис. 3 представлены в разрезе схемы трех практически используемых устройств для коронной зарядки.

Устройство *А* состоит из трех параллельных коронирующих проволочек, расположенных между ксерографической пластиной и заземленным экраном, и называется «трехпроволочным коротроном». Устройство *Б* аналогично устройству *А* и отличается от

него лишь тем, что между проволочками и ксерографической пластиной помещена экранная сетка. Это устройство называется «скоротрон». Третье устройство —«экранированный коротрон»— состоит из одной коронирующей проволочки, помещенной в заземленный металлический экран (*В*). Процесс очувствления пластины любым из показанных электризаторов состоит в перемещении электризатора относительно пластины с определенной скоростью для обеспечения требуемой плотности заряда. Скорость зарядки зависит от напряжения, приложенного к коронирующим проволокам. Обычно на коронирующих проволоках поддерживается напряжение около 7000 *в*. Экранная сетка в «скоротроне» обеспечивает более равномерную зарядку и предотвращает нанесение избыточного заряда. На экранную сетку подается напряжение в несколько сот вольт, причем той же полярности, что и напряжение на коронирующих проволочках. Напряжение на сетке подбирают так, чтобы обеспечить требуемое напряжение на пластине. «Скоротроны» употребляются тогда, когда требуется равномерная зарядка пластины, например в случае полутоновых работ и для получения высококачественных ксерографических копий. «Коротроны» обеспечивают высокую скорость электризации и применяются в быстродействующих ксерографических машинах. Коронные электризаторы могут сообщить ксерографической пластине положительный или отрицательный потенциал. Полярность зарядки выбирают в зависимости от специфических характеристик фотопроводящих покрытий. Слои из аморфного селена дают лучшие результаты при сообщении им положительного заряда, а слои из окиси цинка в связующем — при отрицательном заряде.

Экспериментальной проверке были подвергнуты три других метода электризации. В одном из них использовались радиоактивные источники, другой основан на электростатической индукции, в третьем использованы валики из электропроводящей резины. Радиоактивные источники излучают α-частицы, ионизирующие окружающий воздух. Электрическое поле, создаваемое между источником и пластиной, заставляет ионы осаждаться на поверхности ксерографической пластины [10]. Применение электризаторов этого типа требует соблюдения мер предосторожности, необходимых при работе с радиоактивными материалами. Индукционный метод заключается в том, что заряженную пластину подносят близко к поверхности ксерографического слоя с заземленной подложкой. Затем заземление отключают, а пластину удаляют [10]. Согласно третьему методу, ксерографическая пластина заряжается в момент прохождения между двумя полупроводящими резиновыми валиками. Напряжение в несколько сот вольт, приложенное к валикам, электризует слой [38].

Считается, что методы электризации коронными электризаторами более эффективны, чем три последних метода.

Интересно отметить, что изобретатель ксерографии Карлсон применял в своих ранних опытах электризацию трением. Поверхность пластины натиралась сукном или мехом.

2.4. ЭКСПОНИРОВАНИЕ

Условия для репродуцирования штриховых оригиналов не являются критичными. Однако при репродуцировании полутоновых оригиналов интервал экспозиции относительно узок, хотя недодержки и передержки могут быть исправлены при проявлении.

Передержки легко обнаружить на проявленной пластине. Изображение кажется светлым и размытым, а тонкие линии могут быть потеряны. При передержках плотность электрических зарядов недостаточна, так что изображение не может притягивать к себе достаточного количества проявителя.

Недодержки, с другой стороны, ведут к утолщению линий рисунка, вызывают фон на пробельных участках, так как в этом случае эти участки не полностью разряжены и проявитель осаждается и на них.

Одним из специфических преимуществ ксерографии является возможность предварительно определить оптимальную выдержку для данной пластины. Это может быть достигнуто как измерением скорости разрядки слоя при заданной освещенности, так и непосредственным подбором оптимальной экспозиции в камере. Характеристики экспонирования существенно не меняются и, будучи однажды определены, используются на протяжении всего срока службы пластины.

При проецировании изображения оригинала на электрофотографическую бумагу ввиду отсутствия переноса требуется оптическое обращение изображения.

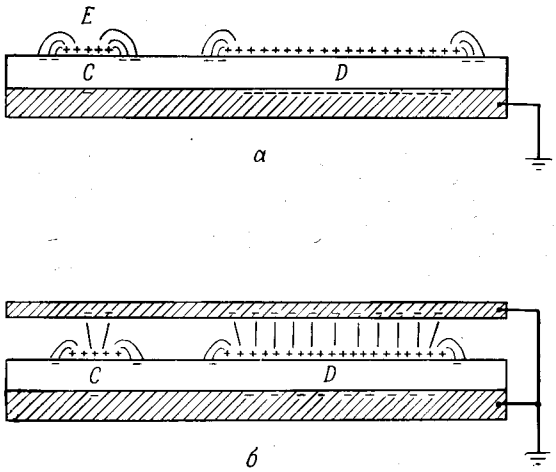
2.5. ПРОЯВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Проявление электростатического изображения может быть осуществлено различными способами: тепловым, каскадным, меховой щеткой, магнитной кистью, порошковым облачком, погружением в жидкий проявитель и разбрызгиванием жидкого проявителя.

Прежде чем перейти к описанию этих способов, рассмотрим проявляющий электрод. Важность этого приспособления станет очевидной из последующего изложения.

2.5.1. ПРОЯВЛЯЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД

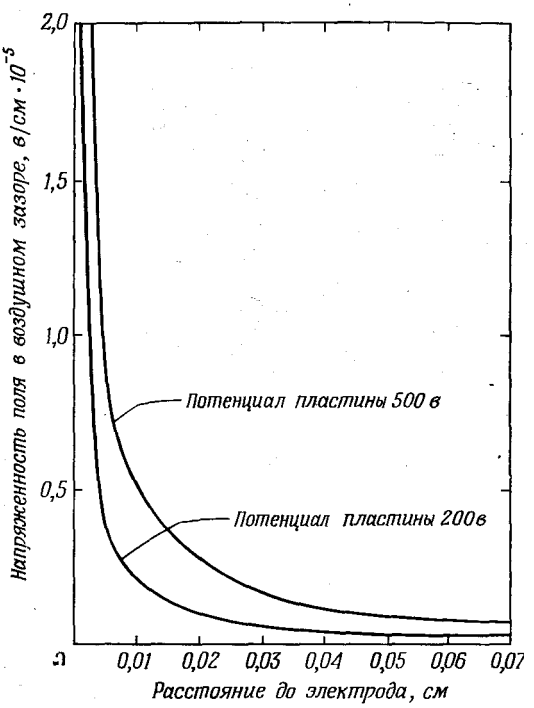
Форма электрического поля над электростатическим изображением играет при проявлении важную роль. Обычно большой электростатический контраст на границе изображения обусловлен полем рассеяния, как это показано на рис. 4, *а*. Если проявить это изображение, нанося отрицательно заряженный проявитель, например каскадным способом, маленькие участки *C* будут проявлены удовлетворительно, но большие площади *D* окажутся проявленными лишь по краям (краевой эффект). Это объясняется



Р и с. 4. Примерная картина поля электростатического изображения на ксерографической пластине.
а — без проявляющего электрода; *б* — с проявляющим электродом.

бо́льшей напряженностью поля или бо́льшим контрастом напряжения на краях электростатического изображения, и, следовательно, там осаждается больше проявителя. В центре больших сплошных участков изображения разность потенциалов между соседними точками мала, и там осаждается мало проявителя. Это обеспечивает репродуцирование штриховых оригиналов, особенно текстов и рисунков, не содержащих больших тоновых участков, так как линии шириной менее 1,5 *мм* проявляются полностью и контрастно. При репродуцировании тоновых оригиналов качество изображения из-за краевого эффекта получается неудовлетворительным. Краевой эффект может быть устранен так называемым проявляющим электродом. В простейшем виде он представляет собой металлическую пластину, расположенную параллельно ксерографической пластине, в непо-

средственной близости от последней. Электрод электрически соединен с подложкой слоя. Действие электрода заключается в изменении конфигурации поля электростатического изображения и в увеличении поля над большими сплошными участками изображения (рис. 4, *б*). При этих условиях качество проявления



Р и с. 5. Усиление поля проявляющим электродом.

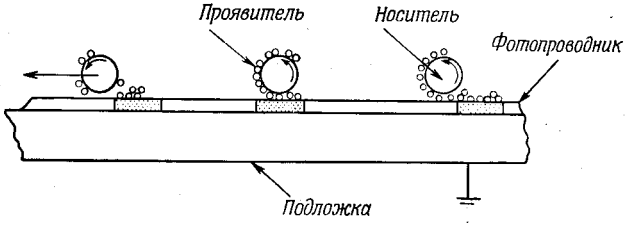
различных участков электростатического изображения будет почти пропорционально количеству электрических зарядов на поверхности пластины.

Проявляющий электрод способствует усилению электрического поля близ фотопроводящего слоя пластины. Напряженность поля в любой точке между поверхностью пластины и проявляющим электродом пропорциональна потенциалу пластины и уменьшается с увеличением расстояния между пластиной и электродом (рис. 5). Следовательно, проявляющий электрод тем более эффективен, чем ближе он расположен к пластине. Проявляющий электрод необходим при высококачественном проявлении растровых изображений и при репродуцировании

сплошных участков. Для исправления ошибок экспонирования, изменения интенсивности осаждения проявителя или для обращенного проявления вместо замыкания электрода и подложки слоя накоротко при проявлении между ними поддерживают разность потенциалов необходимой полярности.

2.5.2. КАСКАДНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Каскадное проявление, основанное на трибоэлектризации, в настоящее время используют в основном для проявления штриховых изображений. Когда два различных материала приводят в контакт, каждый из них становится электрически заряженным, причем их заряды имеют противоположную полярность. Так, когда мелкий порошок, называемый проявителем, смешивают с относительно крупным зернистым материалом, называемым



Р и с. 6. Каскадное проявление электростатического изображения двухкомпонентным проявляющим составом [10].

носителем, происходит трибоэлектризация и более мелкие частицы проявителя удерживаются на поверхности носителя.

При каскадном проявлении электростатических изображений двухкомпонентный проявляющий состав прокатывают (каскадируют) по поверхности электрофотографического слоя. В то время как частицы носителя с проявителем перемещаются по поверхности слоя, электростатические силы скрытого изображения отрывают частички проявителя от носителя, и они осаждаются на поверхности слоя (рис. 6).

При проявлении по схеме позитив — позитив материалы для комбинации носитель — проявитель должны быть выбраны с таким расчетом, чтобы проявитель приобретал электрический заряд, полярность которого противоположна полярности электростатического изображения. Например, если изображение несет положительный заряд, то проявитель должен быть заряжен отрицательно. Простейший вариант каскадного проявления сводится к тому, что ксерографическую пластину помещают слоем вверх в кювету, содержащую проявляющий состав, и легким покачи-

ванием заставляют его медленно перемещаться по пластине. В ксерографической ручной установке пластина служит в качестве крышки кюветы, после ее установки кювету переворачивают и покачивают. В автоматических копировальных машинах типа «Ксерокс» также используют каскадное проявление. В этом случае проявляющий состав непрерывно подается на ксерографический барабан. Когда при каскадном проявлении требуется репродуцировать оригиналы, содержащие растровые изображения или большие сплошные участки, в принципе можно использовать проявляющий электрод. Зазор между электродом и ксерографической пластиной должен быть достаточным для того, чтобы обеспечить свободное перемещение проявителя между этими поверхностями. Практически минимальная величина зазора составляет $\sim$1,5 *мм*. Как видно из рис. 5, усиление поля при этом будет незначительным.

2.5.3. ПРОЯВЛЕНИЕ МЕХОВОЙ ЩЕТКОЙ

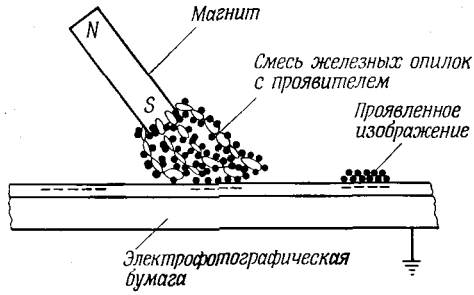
Проявление меховой щеткой по существу мало отличается от каскадного проявления. Мех щетки играет роль носителя, и при смешивании с частицами проявителя последние трибоэлектрически заряжаются. Для цилиндрических щеток используют обычно мягкий мех, например бобровый [39]. Проявитель непрерывно подается на щетку, которая одновременно вибрирует и вращается, слегка касаясь ксерографической пластины.

Электрические характеристики волосков щетки меняются в зависимости от изменения относительной влажности. Поэтому контроль за проявлением меховой щеткой при непостоянной влажности сложен.

2.5.4. ПРОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ КИСТЬЮ

Магнитная кисть состоит из магнита и притянутых к нему железных опилок или других ферромагнитных частиц [33]. Эти частицы образуют цепочки, по виду напоминающие волоски кисти. Если частицы порошкового проявителя смешать с ферромагнитными частицами, то они взаимно электризуются. Например, если железные опилки смешать с пигментированными частицами смолы, стоящими в верхней части трибоэлектрического ряда, то опилки электризуются отрицательно, а частицы проявителя — положительно. Проявление изображения осуществляют проведением кистью по поверхности ксерографической пластины (рис. 7). Эта технология используется в основном для электрофотографической бумаги, при использовании которой электростатическое изображение состоит из отрицательных зарядов.

Однако при соответствующем подборе носителя и проявителя такая технология может служить и для других ксерографических пластин. Преимуществом этого метода является то, что наличие проводимости у носителя (железных опилок) создает эффект



Р и с. 7. Принцип проявления магнитной кистью.

проявляющего электрода, расположенного в непосредственной близости от поверхности пластины. Поэтому этим способом можно проявлять тоновые изображения и сплошные участки.

Механизированные проявляющие устройства, основанные на использовании метода проявления магнитной кистью, применены в целом ряде электрофотографических копировальных машин, в том числе в производимых фирмами «Чарлз Брунинг» и «Американ фотокопи эквипмент».

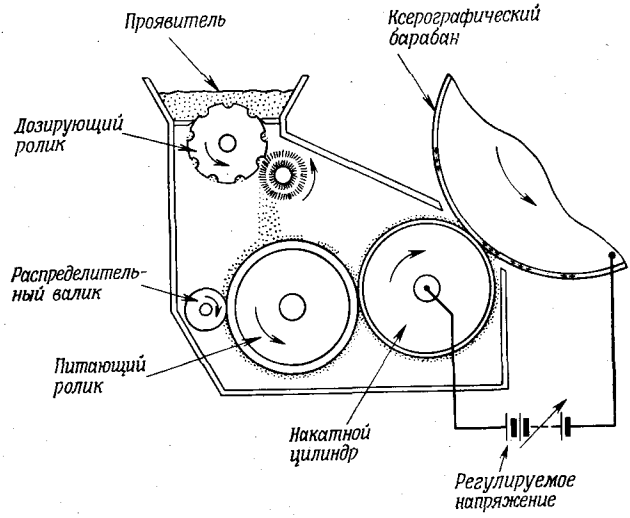
2.5.5. ПРОЯВЛЕНИЕ НАТИСКОМ

В лаборатории фирмы «Ай-Би-Эм» (Эндикот) разработан способ проявления электростатического изображения системой валиков [1]), аналогичной красочному аппарату в печатающих машинах. Основные элементы указанной системы изображены на рис. 8.

Проявитель захватывается дозатором и попадает на валик, покрытый ангорской шерстью, и равномерно распределяется по его поверхности посредством качающегося распределительного валика. Затем проявитель переносится на накатной цилиндр, покрытый бархатом. Бархатное покрытие обладает бóльшим трибоэлектрическим взаимодействием с проявителем, чем шерстяное. Поэтому во время контакта этих поверхностей проявитель переходит на накатной цилиндр. Электростатическое изображение на ксерографической пластине проявляется при осаждении проявителя с бархатной поверхности, когда накатной цилиндр,

[1]) Пат. США 3152012.

вращаясь, находится в контакте с поверхностью изображения. Бархат может вбирать в себя большее количество проявителя, чем другие материалы. Металлический стержень накатного цилиндра служит проявляющим электродом и обеспечивает возможность репродуцирования тоновых изображений и изображений со сплошными участками. Регулируемое напряжение, приложенное между металлическим стержнем и проводящей подложкой



Р и с. 8. Устройство проявления натиском.

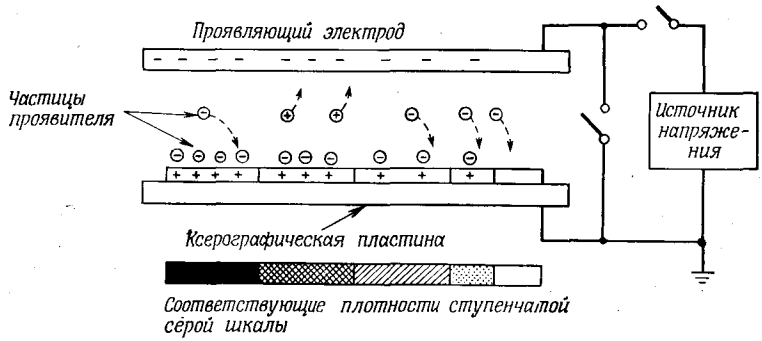
ксерографической пластины или цилиндра, позволяет уменьшать или увеличивать количество осаждаемого проявителя и тем самым контрастность изображения. Если вместо бархата применять покрытие из искусственного меха, то влияние изменяющейся влажности на качество проявления будет незначительным.

Эта система обеспечивает высокие скорости проявления; высокое качество получено при скоростях порядка 75 *см/сек*.

2.5.6. ПРОЯВЛЕНИЕ ПОРОШКОВЫМ ОБЛАЧКОМ

Проявление порошковым облачком [40] обеспечивает высокое качество репродуцирования тоновых изображений [10, 41]. В этом способе в качестве проявителя используют тонко измельченный порошок. Облачко образуется при вдувании в камеру частиц проявителя через металлические трубки малого диаметра. Трубки служат для разрушения агрегатов и контактной

электризации частиц. Облачко продувают между близко расположенными проявляющим электродом и ксерографической пластиной. Степень осаждения проявителя пропорциональна плотности зарядов электростатического изображения. На рис. 9 показан процесс проявления указанным способом серой шкалы. Положительно заряженное электростатическое изображение притягивает отрицательно заряженные частицы проявителя к ксерографической пластине в соответствии с распределением зарядов скрытого изображения. Положительно заряженные частицы облачка притянутся проявляющим электродом. Таким образом



Р и с. 9. Репродуцирование ступенчатой серой шкалы по схеме «позитив — позитив» с проявлением порошковым облаком.

достигается проявление изображения без фона. Проявляющий электрод и проводящая подложка ксерографической пластины электрически соединены, причем включение источника напряжения в эту цепь позволяет увеличивать или уменьшать эффективную плотность зарядов на ксерографической пластине. Отрицательный потенциал, приложенный к проявляющему электроду, увеличивает плотность каждой из ступеней серой шкалы вследствие большего количества осаждаемых частиц проявителя. Наоборот, положительный потенциал на проявляющем электроде уменьшает плотность всех ступеней шкалы из-за уменьшения количества осажденного проявителя. Таким образом, распределение плотностей серой шкалы может быть смещено в любом направлении для исправления ошибок экспонирования.

2.5.7. ЖИДКОСТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ РАЗБРЫЗГИВАНИЕМ

Проявление разбрызгиванием отличается от проявления порошковым облачком лишь тем, что вместо облачка мы имеем дело с туманом [10]. Туман образуется при разбрызгивании красок

или окрашенных растворов пульверизатором. Капельки заряжаются во время распыления под действием электростатической индукции. Преимуществом этого способа является простота переноса изображения на бумагу и исключение операции закрепления.

2.5.8. ЖИДКОСТНОЕ ЭЛЕКТРОФОРЕЗНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Электрофорезное осаждение из жидкой дисперсной среды обеспечивает мелкозернистое проявление ксерографического изображения [42]. Проявитель можно приготовить диспергированием

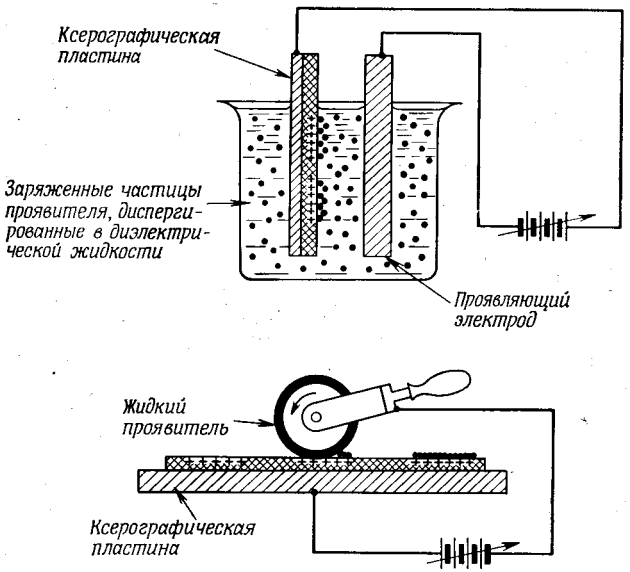


Рис. 10. Два способа жидкостного электрофорезного проявления.

тонко размолотых пигментов в жидком углеводородном изоляторе, например толуоле. Частички пигмента приобретают электрический заряд в процессе диспергирования. Когда ксерографическую пластину с электростатическим изображением погружают в жидкий проявитель, на изображение осаждаются частицы пигмента из проявителя (рис. 10). Это явление известно под названием «электрофореза». Количество осажденного материала определяется плотностью зарядов изображения.

Кроме того, жидкий проявляющий состав можно накатывать [38] или напылять на пластину. В литературе имеются сообщения, что при электрофорезном проявлении могут быть получены

и тоновые изображения высокого качества. Цветные изображения на электрофотографической бумаге получают при последовательном проявлении совмещенных цветоделенных рисунков [42]. В настоящее время жидкостное проявление используется в промышленном электрофотографическом оборудовании, выпущенном фирмой «Эс-Си-Эм».

2.5.9. ТЕПЛОВОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

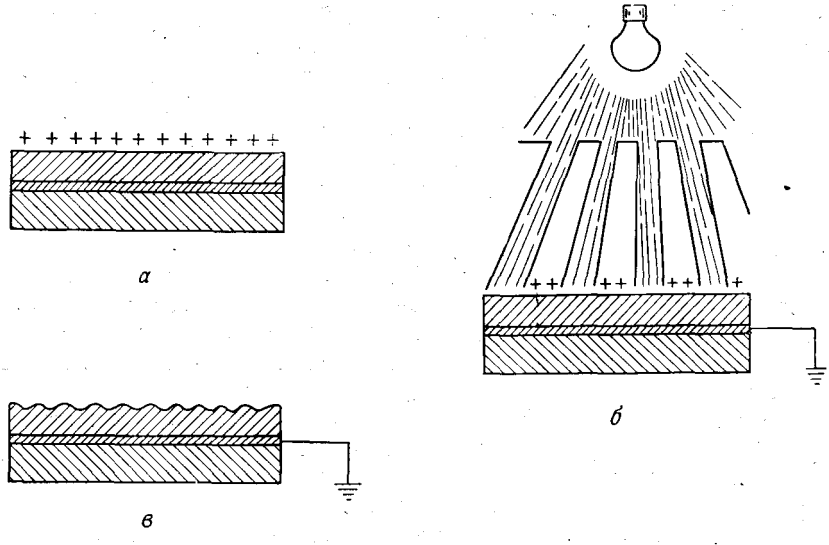
Тепловое проявление электростатических изображений на термопластическом материале было применено Томасом [43] для изучения фигур Лихтенберга. Фигуры становятся видимыми в результате ретикуляции (сморщивания) нагретой пластической основы. Этот эффект применялся также Гленном для термопластической записи [44]. Скрытое электростатическое изображение в этом случае получают на термопластической основе электронным лучом (в вакуумной камере). Пленку затем нагревают для получения деформации в соответствии с распределением зарядов. Метод теплового проявления в ксерографии, включая перенос скрытого электростатического изображения на термопластическую основу, исследуется фирмой «Дженерал электрик» [45]. Гейнор и Афтергут [46] разработали процесс фотопластической записи на термопластическом фотопроводящем материале. В этом процессе методы ксерографии используются в сочетании с тепловым проявлением Гленна [44]. Прозрачную фотопроводящую пленку, нанесенную на прозрачную проводящую подложку, заряжают и экспонируют, проецируя на нее изображение; после этого фотопроводник нагревают, чтобы участки, несущие изображение, деформировались, а затем охлаждают (рис. 11).

Изображение, проявленное теплом, можно наблюдать, применяя шлирен-оптику. При репродуцировании тоновых изображений применяют растр, штриховые изображения репродуцируют без него. При нагревании пленки до точки плавления ее материала изображение исчезает, и после охлаждения фотопроводящие слои могут быть использованы вновь. Число повторных применений зависит от химической стабильности пленки. Фотопластичные пленки получают синтезом фотопроводящего полимера или диспергированием (растворением) органических или неорганических фотопроводников в термопластических смолах.

Гундлах и Клаус [47] провели дальнейшие исследования теплового проявления. Они наблюдали специфическую ретикуляцию, подобную «морозному узору» на стекле, на заряженной термопластической поверхности, когда последняя размягчалась при нагревании. Аналогичная ретикуляция глянцевой поверхности создает светорассеивающее изображение, которое можно

наблюдать в отраженном или проходящем свете, так как рассеивание света уменьшает поверхностное отражение или пропускание пленки. Поверхность с «морозным узором» состоит из микроскопических углублений в виде ячеек, глубина которых тем больше, чем больше плотность поверхностного заряда. Таким образом возможно проявление тоновых изображений, поскольку рассеивание света увеличивается с увеличением глубины ячеек.

Описано два метода (одновременный и последовательный) создания изображения в виде «морозного узора» в ксерографии.



Р и с. 11. Фотопластическая запись [46].

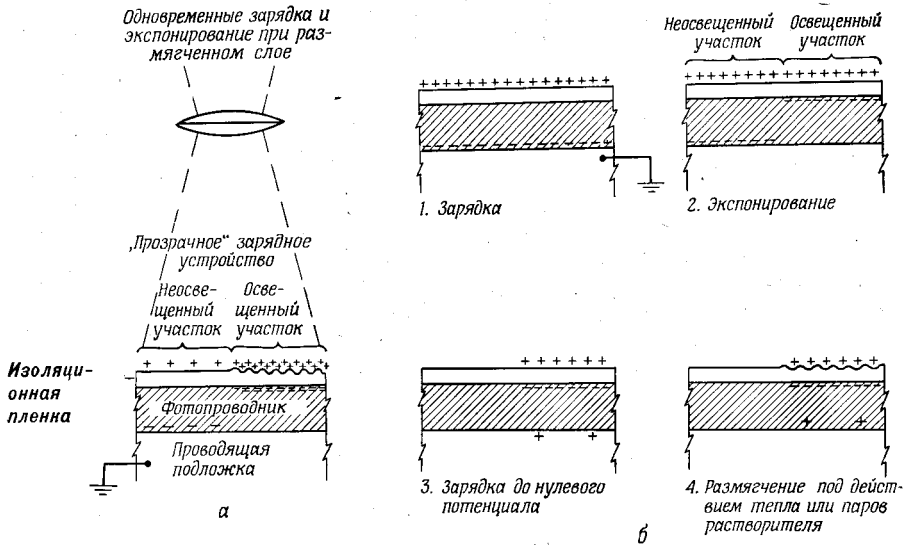
а — зарядка поверхности; *б* — экспонирование; *в* — нагревание с целью деформирования поверхности. Стирание перед повторным использованием осуществляется нагреванием до температуры плавления.

Эти методы иллюстрируются рис. 12. В обоих случаях ксерографическая пластина покрыта смоляной пленкой.

В первом случае смоляное покрытие размягчается подогревом или в результате воздействия концентрированных паров растворителя. Затем одновременно пластину заряжают и экспонируют, проецируя на нее изображение. Так как пленка прозрачная, свет проникает через нее на фотопроводник. Зарядное устройство регулируется так, чтобы оно сообщало поверхности пленки однородный потенциал как на темных, так и на экспонированных участках. Однако на экспонированных участках фотопроводящий слой пропускает заряды к поверхности раздела пленка — фотопроводник. Поэтому на экспонированных участках смоляной

пленки будет создаваться значительно бóльшая плотность поверхностных зарядов, результатом чего явится сильное электрическое поле на этих участках, которое деформирует пленку, вызывая образование на ней «морозного узора».

При последовательном методе в темноте отдельным участкам смоляной пленки сообщается одинаковый заряд. Затем на экспонируемую пластину проецируют изображение. В освещенных



Р и с. 12. Технологические операции проявления ксерографического изображения, полученного в виде «морозного узора» [47].
а — одновременный процесс; *б* — последовательный.

местах заряд проходит к поверхности раздела пленка — фотопроводник. Это уменьшает поверхностный потенциал без уменьшения плотности зарядов на поверхности. Заряды темных участков затем нейтрализуются коронным разрядом, который сообщает всей поверхности пленки нулевой потенциал. Однако на экспонированных участках индуцированные заряды сохраняются, и электрическое поле в этих местах пленки продолжает существовать. Нагревание или действие паров растворителя вызовет появление рисунка в виде «морозного узора». Оба эти метода дают негативные изображения.

Изображения в форме «морозного узора» могут быть получены также на прозрачной органической фотопроводящей пленке.

Особенность «морозного» проявления, как и других тепловых способов проявления, состоит в том, что изображение может быть

удалено после использования путем вторичного подогрева пленки до температуры плавления или каким-либо другим способом. После затвердения пленка вновь становится прозрачной, а ее поверхность глянцевой.

Благодаря светорассеиванию проявленные указанным способом изображения можно рассматривать при использовании обычной оптики, тогда как деформированные изображения, полученные в результате термопластической записи, требуют шлирен-оптики.

2.5.10. ПРОЯВЛЕНИЕ МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКОЙ

Гетманом описан метод проявления электростатического изображения деформированием масляной пленки [48]. Пленка масла наносится на покрытую аморфным селеном пластину. Последняя заряжается и экспонируется обычным способом при одновременном проецировании на нее изображения. Плотно расположенные линии скрытого изображения или растровые элементы создают большую напряженность электрического поля на поверхности раздела масло — селен, вызывая деформацию масляной пленки. Проявленное изображение проецируется и просматривается через шлирен-оптику.

2.6. ОБРАЩЕННОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Ксерография обычно представляет собой позитивный процесс — с позитивного оригинала получают позитивные отпечатки. Однако часто требуется получить позитивное изображение с негативного оригинала. В ксерографии это достигается видоизменением применяемых материалов или технологии. Существует два метода: один состоит в замене проявляющего состава и применяется при работе со штриховыми оригиналами [10]; другой использует проявляющий электрод и дает хорошие результаты при тоновых оригиналах [49].

2.6.1. ОБРАЩЕНИЕ ШТРИХОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

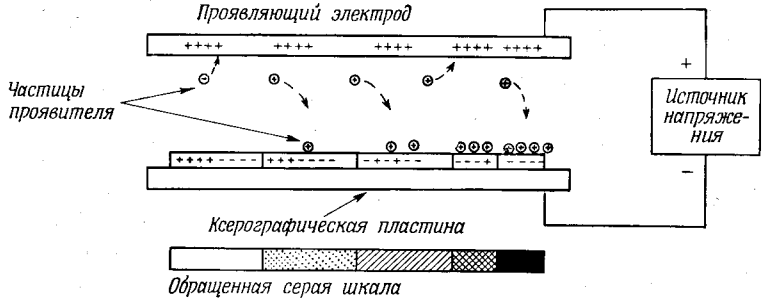
Для того чтобы с штрихового негатива получить позитивную копию, требуется только изменить проявляющий состав. Это можно пояснить рис. 4, *а*. Если спроецировать штриховое негативное изображение на заряженную положительно ксерографическую пластину, участки изображения разрядятся, а пробельные участки сохранят заряд. Однако вследствие «краевого эффекта» отрицательные заряды индуцируются на пластине у краев изображения E (рис. 4, *а*). Если теперь проявить пластину поло-

жительно заряженным проявителем, то его частицы будут притянуты индуцированными отрицательными зарядами и образуют позитивное изображение.

Для отрицательно заряженных ксерографических пластин применяют отрицательно заряженный проявитель. Этот способ применим лишь при наличии «краевого эффекта» и неприменим поэтому для тоновых работ. Обращение штриховых изображений широко используют сейчас в промышленных установках для получения увеличенных позитивных копий с негативных микрофильмов.

2.6.2. ОБРАЩЕНИЕ ПРОЯВЛЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Обращение проявляющим электродом иллюстрируется рис. 9 и 13. На рис. 9 показан результат экспонирования, полученный



Р и с. 13. Репродуцирование тоновой шкалы по схеме «позитив — негатив» при обращенном проявлении.

при проецировании на положительно заряженную ксерографическую пластину нейтральной серой шкалы. Знаки «плюс» изображают плотность зарядов, соответствующую ступеням серой шкалы.

На рис. 13 показано, как проявляющий электрод с регулируемым напряжением может осуществлять обращенное проявление серой шкалы.

Между электродом и пластиной создают напряжение (электрод присоединяют к положительному зажиму). Величину напряжения подбирают так, чтобы на электроде получить потенциал, равный потенциалу пластины в местах, соответствующих черному полю серой шкалы оригинала. При этих условиях отрицательные заряды, индуцированные в ксерографической пластине, нейтрализуют положительные заряды в местах, соответствующих

наибольшей начальной плотности зарядов. В местах, соответствующих белому полю серой шкалы, где нет положительных зарядов, нейтрализации не произойдет, и плотность отрицательных зарядов будет равна начальной плотности положительных зарядов на участке, соответствующем черному полю серой шкалы. Промежуточные поля шкалы будут иметь излишек отрицательных зарядов, тем бо́льший, чем меньшей была начальная плотность положительных зарядов. В результате произойдет полное обращение электростатического изображения серой шкалы в отрицательно заряженное изображение. Процесс обращенного проявления завершается проявлением порошковым облачком с положительно заряженным проявителем.

Эта же методика может быть использована для обращенного проявления отрицательно заряженных ксерографических пластин. В этом случае проявляющему электроду сообщают отрицательный потенциал и используют отрицательно заряженный проявитель. Хотя этот процесс обычно применяют для тоновых работ, он может быть использован также и для обращения штриховых изображений.

2.7. СКОРОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ

Время, требуемое для создания ксерографического отпечатка, в основном зависит от скорости проявления, так как другие стадии процесса обычно занимают мало времени. Проявление порошковым облачком и проявление разбрызгиванием занимает от 1 до 10 *сек*, в то время как на проявление в жидких дисперсиях требуется менее 0,1 *сек*.

Скорость работы автоматических ксерографических машин при проявлении меховой щеткой составляет ~30 *см/сек*. Серийные машины, использующие каскадное проявление, работают со скоростью 10 *см/сек*. В экспериментальных условиях были достигнуты более высокие скорости. Скорости первых моделей ксерографических аппаратов, печатавших с микрофильмов при проявлении магнитной кистью, составляли около 10 *см/сек*. В экспериментальных устройствах были достигнуты более высокие скорости. Как упоминалось ранее, при проявлении валиком зарегистрированы скорости выше 75 *см/сек*.

2.8. ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЯ

Проявленные сухим порошком ксерографические изображения можно перенести на бумагу различными способами. Среди этих способов наиболее известны электростатический и адгезионный перенос. Согласно первому из этих способов, порошковое

изображение переносят на бумагу в результате действия сил электрического притяжения. Лист бумаги накладывают на изображение на ксерографической пластине. Коронный зарядник, аналогичный применяемому при электризации, проходя над бумагой, осаждает на нее электрические заряды, создающие электрическое поле, которое переносит частицы проявителя с пластины на бумагу. После этого бумагу отделяют от пластины, причем перенесенное изображение остается на ней.

При репродуцировании по схеме «позитив — позитив» полярность зарядного устройства для переноса должна быть такой же, какая используется для очувствления пластины. При переносе обращенно проявленного изображения знак заряда короны должен быть противоположен знаку заряда, используемому при очувствлении пластины.

Другой вариант способа электростатического переноса, основанный на использовании цилиндра, обтянутого проводящей резиной, был применен в некоторых автоматических машинах [39]. Между цилиндром и металлической основой ксерографического барабана создается напряжение $\sim$1000 *в*. Бумага проходит между цилиндром и барабаном; для того чтобы обеспечить хороший контакт с барабаном, к цилиндру прикладывается небольшое усилие.

После электростатического переноса на пластине остается тонкий слой порошкового изображения, который необходимо удалить перед повторным использованием пластины.

Адгезионный перенос основан на применении бумаги, покрытой с одной стороны адгезионным слоем. Адгезионный слой должен быть клейким настолько, чтобы удерживать порошковое изображение, но не прилипать к поверхности фотослоя. Бумагу приводят в контакт с порошковым изображением на пластине, прикатывая ее эластичным валиком с целью обеспечения хорошего контакта. При использовании селеновых пластин почти все порошковое изображение может быть перенесено на другую поверхность. Этот метод особенно удобен для переноса тоновых изображений. Увлажненная переводная бумага представляет собой удобный материал для адгезионного переноса. Изображения, проявленные жидкостным способом, могут быть перенесены при использовании натиска тем же путем, каким переносятся с печатной формы обычные красочные изображения. Никаких специальных покрытий для бумаги в этом случае не требуется. Однако перенос необходимо осуществить до того, как изображение высохнет. Ксерографическое изображение можно перенести на деревянные, пластмассовые, керамические, металлические и другие поверхности. Если используют электрофотобумагу, как, например, в методе «электрофакс», то перенос не нужен.

2.9. ЗАКРЕПЛЕНИЕ

Большинство ксерографических проявителей состоит преимущественно из плавких смол. Когда эти проявители переносят на бумагу, изображение можно прочно закрепить на ней нагреванием [50] или действием паров растворителя [51], которые частично расплавляют проявитель, и последний проникает в бумагу. Ксерографическое изображение может быть также закреплено вдавливанием проявителя в поверхность бумаги [39].

Изображения, проявленные неплавкими проявителями, можно закреплять нанесением покрытий из прозрачных пластмасс.

В случае адгезионного переноса изображения проявитель проникает в адгезионное покрытие, и, когда последнее высыхает, изображение оказывается закрепленным.

При проявлении жидким проявителем дополнительного закрепления обычно не требуется.

Недавно были описаны различные способы закрепления при помощи химических реакций [52, 53]. В одном из способов изображение проявляют порошком солянокислого анилина, после чего изображение приводится в контакт с влажной бумагой, содержащей окислитель и катализатор. Реакция образования анилиновой соли вызывает появление на бумаге черного изображения.

В аналогичном способе электростатическое изображение проявляют порошком стеарата железа. Лист бумаги, смоченный спиртовым раствором галлиевой кислоты, приводят в контакт с проявленным изображением, и в результате реакции на бумаге образуется черное изображение.

Другой метод закрепления основан на применении проявителей из микрокапсул жидких красок [54]. Под давлением капсулы раздавливаются, оставляя на бумаге изображение, состоящее из пятнышек краски.

2.10. ОЧИСТКА ПЛАСТИНЫ

Перед повторным использованием ксерографической пластины оставшийся после переноса изображения порошок необходимо удалить. Если проявитель не слишком липкий, его легко можно удалить ватным тампоном. В ксерографических автоматических ротационных машинах применяются меховые щетки. Если остаток порошка с пластины трудно стирается, необходимо применить каскадную очистку гранулированным материалом [55]. Этот материал при каскадном проявлении ведет себя как носитель. Он притягивает частицы порошка вследствие трибоэлектризации. При очистке гранулированным материалом производится его

перемещение по пластине несколько раз. Пластина при этом не повреждается.

Неоднократное повторное использование селеновых пластин или барабанов приводит к образованию на них пленки проявителя, которую необходимо периодически смывать растворителем. Растворитель не должен воздействовать на фотопроводящий слой. Часто для этой цели используют изопропиловый спирт.

Обычно после адгезионного переноса или переноса после жидкостного проявления порошок не заметен на пластине, и она кажется чистой. Однако при работе с тоновыми изображениями желательно промывать пластину растворителем после каждого использования с целью создания чистой поверхности для последующего цикла.

В автоматических машинах с ксерографическими барабанами непрерывная очистка осуществляется при помощи вращающихся меховых щеток и отсасывающей системы. Пластины и барабаны, применяемые в копировальных машинах, также необходимо время от времени промывать жидким очистителем.

2.11. РАЗМНОЖЕНИЕ

Штриховое или растровое ксерографическое изображение можно перенести и закрепить на офсетной бумажной форме [27, 56] и затем печатать с нее тираж на офсетных машинах. Кроме того, изображение может быть перенесено на спиртовые формы [10]. Некоторые виды электрофотографических бумаг могут быть использованы в качестве офсетных форм. С этой целью после проявления и закрепления изображения бумага подвергается химической обработке для гидрофилизации пробельных элементов.

Непосредственно несколько копий можно получить, видоизменив электростатический перенос [10]. Процесс заключается в следующем: изображение проявляют на ксерографической пластине и переносят на бумагу в коронном разряде. Прежде чем отделить бумагу от пластины, производят зарядку бумаги в коронном разряде обратной полярности. Большее количество проявителя при этом отталкивается обратно на пластину. На бумаге же остается достаточное количество проявителя, чтобы обеспечить хорошее качество копии. После отделения листа бумаги от пластины и закрепления получается первая копия. Следующий лист прикладывается к оставшемуся на пластине порошковому изображению, и процесс переноса повторяется. С одного изображения может быть получено этим способом от 10 до 12 копий.

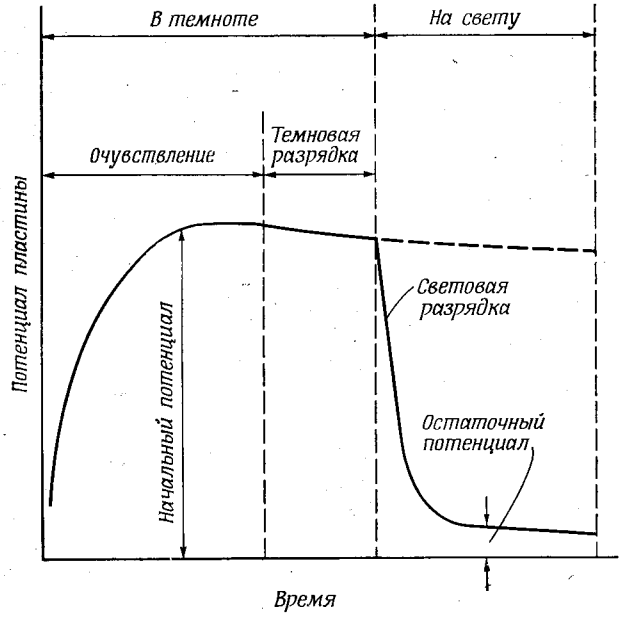
Ксерографические копии, сделанные на прозрачных или полупрозрачных материалах, могут быть использованы как оригиналы для диазокопирования.

2.12. КСЕРОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Важнейшими ксерографическими материалами являются фотопроводящие покрытия пластин и материалы, используемые для изготовления проявляющих составов. Различные типы материалов, применяемых в ксерографии, и их характеристики рассматриваются в следующих разделах.

2.13. ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ПОКРЫТИЯ

Сочетание высокого темнового сопротивления с высокой светочувствительностью не является полной характеристикой фотопроводящих материалов, особенно если из них требуется



Р и с. 14. Зарядка и разрядка ксерографической пластины.

получить тонкую однородную пленку. К важнейшим электрическим и фотоэлектрическим характеристикам ксерографических пластин относятся:

1) фотоэлектрическая чувствительность;
2) спектральная чувствительность;
3) начальный потенциал;

4) темновая устойчивость;
5) остаточный потенциал;
6) усталость.

Некоторые из этих характеристик представлены на рис. 14.

2.13.1. ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Фоточувствительность ксерографических пластин определяется скоростью спада электрического потенциала при освещении пластины. В табл. 1 для ряда фотопленок приведены относительные значения фоточувствительности и соответствующие расчетные значения эквивалентной чувствительности по системе ASA.

Наибольшее распространение в промышленности получили сейчас фотопроводящие слои аморфного селена и окиси цинка

Таблица 1

Относительная чувствительность различных материалов, применяющихся в электрофотографии

Фотополупроводниковые материалы	Относительная фоточувствительность	Расчетная чувствительность по системе ASA
Сера [10]	1	0,002
Антрацен [10]	4	0,008
Поливинилкарбазол [57]	7	0,014
Слой окиси цинка в связующем [33]	100	0,2
Сенсибилизированный красителями слой окиси цинка в связующем [33]	500	1,0—2,0
Слой люминофора из смеси сульфидов кадмия и цинка в связующем [36]	500	1,0
Аморфный селен [37, 10]	1 000	2,0
Сплав селена и теллура [37]	10 000	20,0
Сульфид кадмия, легированный марганцем и кислородом, в связующем [36]	5 000—15 000	10—30,0

в связующем. Другие материалы, приведенные в табл. 1, применялись лишь в экспериментальных пластинах. Значения приведенных в табл. 1 величин нужно рассматривать как приближенные. Различия в толщине пленок, способах изготовления слоев и их составов вызывают изменение величины фоточувствительности; на эквивалентную фоточувствительность влияет также способ проявления изображения. Для некоторых материалов чувствительность зависит от величины начального потенциала.

Можно надеяться, что в недалеком будущем для ксерографии будут созданы новые, более совершенные полупроводниковые материалы. На это указывает большое число патентов, выданных за последние годы, на такие материалы.

Во многих лабораториях исследуют способы увеличения фоточувствительности сенсибилизацией красителями и использованием явления квантового усиления. Поэтому данные табл. 1 нельзя считать предельными показателями чувствительности электрофотографического процесса.

2.13.2. СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Пластины с аморфным селеном чувствительны в основном к сине-фиолетовой части спектра, хотя можно расширить эту область и получить чувствительность к красным лучам при напылении селена на подогретую подложку [37]. Прибавка теллура к селену расширяет область чувствительности за счет красной части спектра [58] (рис. 15). То же происходит и при добавке к селену мышьяка [59].

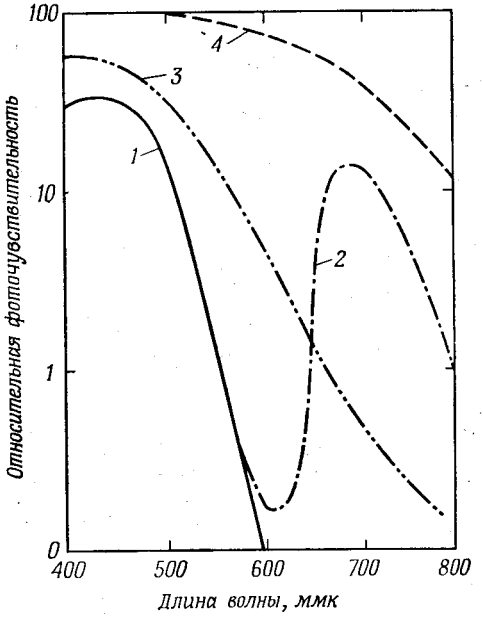
У слоев из окиси цинка в связующем максимум спектральной чувствительности приходится на ближний ультрафиолет, причем они обладают некоторой чувствительностью к фиолетовой видимой части спектра. Сенсибилизация красителями позволяет распространить спектральную чувствительность на различные части видимого спектра (рис. 16).

Сера и антрацен чувствительны к голубой и ультрафиолетовой частям спектра. Сульфид кадмия имеет пик чувствительности в зеленой части спектра, а сульфид цинка — в ближнем ультрафиолете. Таким образом, комбинируя эти два сульфида, можно получать максимум спектральной чувствительности в пределах этих границ.

2.13.3. НАЧАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

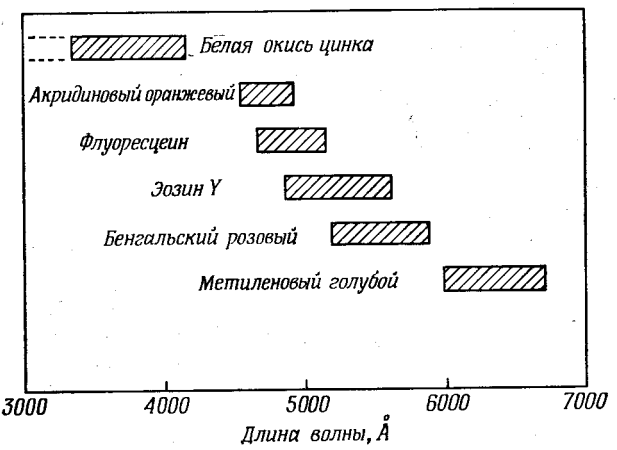
Темновое сопротивление фотопроводящего слоя уменьшается с увеличением электрического поля, приложенного к слою. Так, когда ксерографическая пластина заряжается, то по мере увеличения заряда пластины уменьшается сопротивление слоя. Это уменьшение сопротивления позволяет большему количеству зарядов стечь через слой, и если очувствление продолжается, то процесс достигает равновесия, когда заряды стекают так же быстро, как и осаждаются.

Потенциал пластины при условии, когда количество осаждаемых зарядов равно количеству зарядов, утекающих в подложку, называется начальным потенциалом (см. рис. 14). Его величина



Р и с. 15. Спектральная чувствительность слоев из аморфного селена и сплава селена с теллуром. Кривые построены для равноэнергетического спектра [37].

1 — чистый селен, напыленный при 45° С; *2* — чистый селен, напыленный при 75° С; *3* — селен, содержащий 7% теллура и напыленный при 45° С; *4* — селен, содержащий 7% теллура и напыленный при 75° С.



Р и с. 16. Спектральные характеристики бумаги «электрофакс», сенсибилизированной различными органическими красителями [17].

является важной характеристикой ксерографической пластины, так как она определяет получаемый электростатический контраст. Обычно пластину заряжают до потенциала ниже начального для того, чтобы избежать порчи ее при чрезмерно большом электрическом напряжении.

2.13.4. ТЕМНОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Время, в течение которого на пластине сохраняется скрытое электростатическое изображение, определяется скоростью спада электрического потенциала в темноте (см. рис. 14). Темновой спад — функция темнового сопротивления пластины. Если период между экспонированием и проявлением велик, устойчивость становится важным фактором. Однако, когда экспонирование и проявление следуют непосредственно друг за другом, как, например, в автоматических машинах, темновая устойчивость не имеет существенного значения. Темновая устойчивость определяется свойствами фотопроводящего материала и методами его нанесения. Устойчивость обычно определяется временем, необходимым для достижения в темноте потенциала пластины, равного половине начального. Хотя ксерографическое изображение проявляют обычно сразу же после экспонирования, электростатическое изображение можно сохранить в течение многих часов без значительной потери контрастности и разрешения [16].

2.13.5. ОСТАТОЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Когда очувствленная ксерографическая пластина экспонируется, электрический потенциал сначала быстро уменьшается, а затем следует относительно медленный спад (см. рис. 14). Напряжение пластины в точке, где начинается медленный спад, называется остаточным потенциалом.

Этот потенциал изменяется в пределах от значений, близких к нулю, до значений, составляющих 20—30% начального потенциала. Малый остаточный потенциал позволяет получить больший электростатический контраст. Величина остаточного потенциала важна при получении тоновых изображений, хотя его влияние может быть до известной степени скомпенсировано при проявлении. При штриховых изображениях можно мириться с более высоким остаточным потенциалом.

2.13.6. «УСТАЛОСТЬ» СЛОЯ

Когда ксерографические пластины подвергаются повторным циклам зарядки и экспонирования, приходится иногда сталкиваться с эффектом, известным под названием «усталость» пла-

стины [10]. Этот эффект сказывается в увеличении темнового спада потенциала пластины, т. е. в уменьшении темновой устойчивости. «Усталость» аморфного селена вызывается увеличением в фотопроводящем слое захваченных зарядов, которые создают сильное электрическое поле на границе между слоем и проводящей подложкой. Эти захваченные внутри слоя заряды вызывают также увеличение остаточного потенциала. В слоях, образованных диспергированием фотопроводников в связующем, таких, как слой из окиси цинка, «усталость» проявляется в сохранении проводимости и после освещения.

Если «усталой» пластине дать «отдохнуть» в темноте, она полностью восстанавливает свои первоначальные свойства. «Усталость» не играет большой роли, если период между циклами велик или если пластины можно менять в процессе работы. Однако в автоматических машинах при быстрой смене циклов эффект «усталости» причиняет неприятности. При изготовлении пластины из аморфного селена «усталость» можно уменьшить, контролируя процесс напыления селена в вакууме.

Слои из окиси цинка также обнаруживают «усталость» при многократном использовании, однако в основном они в ксерографии используются однократно в качестве фотопроводящего покрытия бумаги.

2.14. ПРОЯВЛЯЮЩИЕ СОСТАВЫ

Для проявления ксерографических изображений могут быть использованы различные материалы, но они должны удовлетворять требованиям, которые определяются условиями проявления и закрепления, а также назначением изображения. Эти требования относятся главным образом к физическим свойствам проявителей, поскольку химические реакции при проявлении отсутствуют. Вообще материал для проявителей должен быть таким, чтобы его было легко измельчать и диспергировать, кроме того он должен воспринимать и удерживать электрические заряды и не повреждать ксерографической пластины. Средний размер частиц проявителя в порошке или дисперсии для обычных копировальных работ 10 *мк*. Для тоновых работ частицы должны быть менее 0,1 *мк*.

Проявители, используемые при каскадном проявлении, проявлении меховой щеткой и магнитной кистью, обычно изготовляют из смолы или смеси смол, в которых диспергированы пигменты, например сажа. Смолы подбираются с таким расчетом, чтобы обеспечивалась их трибоэлектрическая связь с мехом щетки или частицами носителя и чтобы точка их плавления лежала в пределах температур, создаваемых для закрепления нагрева-

нием (105—150° С), или они должны обладать достаточно хорошей растворимостью в парах закрепителей.

Пример рецепта такого проявителя: 25% поливинилбутираля, 70% модифицированной канифолью фенолформальдегидной смолы и 5% сажи [60]. Были использованы или предложены и другие рецепты [61]. Желательно, чтобы смоляные компоненты проявителя не прилипали к пластине и легко удалялись с нее.

Доказано, что в этом отношении наиболее удовлетворительна смесь полистирола с 5—25% полибутилметакрилата и 5—10% пигмента [62].

Носитель для каскадного проявления состоит из гранул или шариков. Для этой цели используют гранулированный хлористый аммоний или поваренную соль [63]. В настоящее время широко применяются стеклянные шарики с покрытием, просеянные через сито с 1—2 отверстиями на миллиметр. Трибоэлектрические характеристики могут быть изменены покрытием шариков смолой, выбранной так, чтобы обеспечить требуемый знак и величину электрических зарядов частиц проявителя [64].

Если закрепление производят нанесением покровного лака или вдавливанием проявителя в бумагу, покрытую клейким слоем, то можно использовать неплавкие проявители. Пригодны различные типы пигментов, например специальные виды сажи, угля, а также пигменты, используемые для печатных красок.

Если пигменты применяют без смол и пигмент сам является проявителем, можно получить очень мелкие по размеру частички. Эти проявители лучше всего использовать при проявлении тоновых изображений методом порошкового облачка.

В литературе очень мало данных о проявителях, используемых при проявлении, основанном на распылении жидкости. В этом способе проявления используют краски низкой вязкости, например спиртовые. Вероятно, можно использовать и целый ряд окрашенных жидкостей, таких, как чернила и разбавленные печатные краски.

Жидкие электрофорезные проявители представляют собой диэлектрические жидкости, в которых диспергированы мельчайшие частицы проявителя. Большое количество экспериментальных работ в этой области проделано Меткалфом и Райтом в Австралии [42]. Они показали, что жидкость должна обладать высоким удельным сопротивлением (выше 10^{10} *ом·см*) и низкой диэлектрической проницаемостью (менее 2,5). Для этой цели пригодны многие жидкие углеводороды и их хлорзамещенные гомологи. Примером служат нефтяные фракции и четыреххлористый углерод. Примерами пигментов могут служить монолайт красный, голубая фталцианиновая, ганза желтая, нигрозин, окись цинка и сажа.

При соответствующем подборе состава частицам пигмента можно придать либо положительный, либо отрицательный заряд. Например, сажа, растертая в льняном масле и диспергированная в жидком углеводороде, приобретает отрицательный заряд. Этот проявитель применяется для проявления позитивных изображений на селеновой пластине, обычно заряженной положительно. С другой стороны, монолайт желтый приобретает положительный заряд при диспергировании в той же жидкости. Такой проявитель образует позитивное изображение на слоях из окиси цинка, обычно заряженных отрицательно. При предварительном размалывании пигмента со смолой или масляным связующим достигается высокая степень измельчения частичек, и проявленное изображение получается с очень мелким зерном. Введение связующего в проявитель обеспечивает прилипание пигмента к бумаге и исключает необходимость в закреплении изображения.

Отфильтрованный проявитель этого типа дает возможность получить ксерографическое изображение с более мелким зерном и допускает большее увеличение, чем самое мелкозернистое фотографическое изображение [42].

2.15. СЕНСИТОМЕТРИЯ

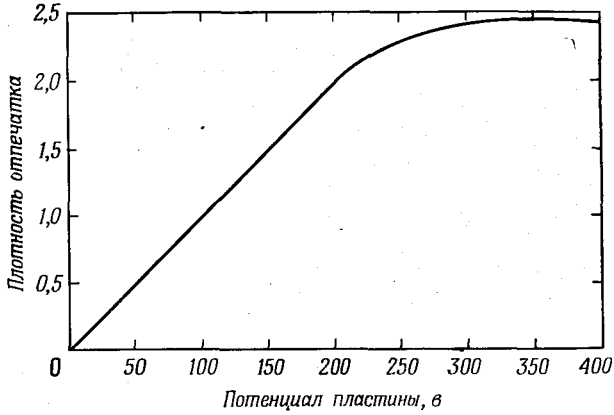
Черно-белые ксерографические изображения образуются на поверхности белой бумаги черным проявителем в виде слоя различной толщины. Максимальная плотность ксерографического отпечатка поэтому определяется белизной бумаги и чернотой проявителя.

2.15.1. ТОНОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПРОЯВЛЕННЫЕ ПОРОШКОВЫМ ОБЛАЧКОМ

Количество проявителя, осаждаемое на определенные участки ксерографической пластины во время проявления, является функцией плотности зарядов или электрического потенциала этих участков. Это относится только к проявлению с проявляющим электродом [1]). Так, если после проявления порошковым облачком построить график зависимости количества проявителя на единицу площади пластины от величины потенциала этой пластины, то получим прямую линию. Однако, если оптическая плотность является функцией потенциала, соотношение будет близким к линейному только до точки, в которой количество

[1]) Строгое рассмотрение показывает, что определяющим фактором при проявлении является электрическое поле, связанное с поверхностными зарядами; теория этого вопроса приведена в части II настоящей книги.

осаждаемого проявителя создает непрозрачный слой [65] (рис. 17). Излишек проявителя не увеличит оптической плотности рисунка. Кривая, изображенная на рис. 17, относится к порошковому проявителю, имеющему плотность 2,4. Для этого порошка пластину не надо очувствлять выше 250 *в*. Насыщение оптической плотности будет достигаться для черных порошков при более высоких потенциалах, а для серых — при более низких.



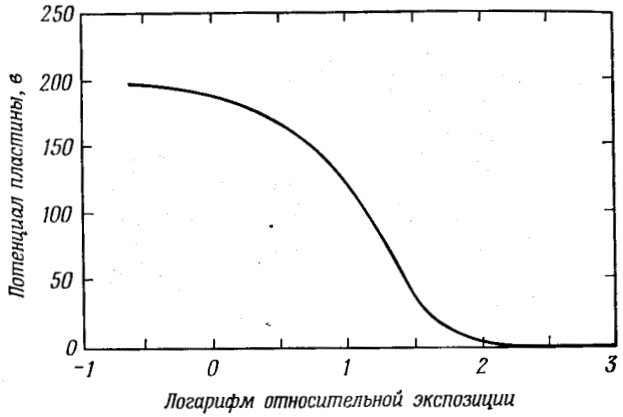
Р и с. 17. Зависимость плотности порошкового изображения от потенциала ксерографической пластины [65].

Количество осаждаемого порошка также определяется электрическим зарядом, приходящимся на одну частичку порошка. Предельное количество проявителя определяется величиной заряда, требуемой для нейтрализации заряда противоположного знака на ксерографической пластине. Так, если частицам сообщен больший заряд, для нейтрализации зарядов пластины их потребуется меньше и насыщение плотности изображения будет наблюдаться при более высоком потенциале.

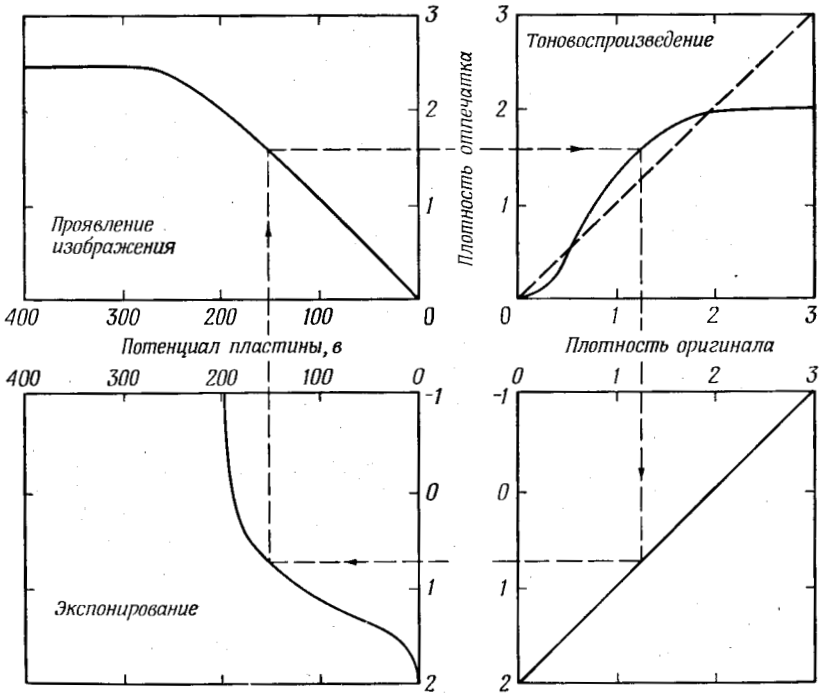
Поскольку известны характеристики проявителя и условия проявления, сенситометрические измерения в ксерографии сводятся к измерениям потенциала пластины как функции освещенности, или экспозиции. На рис. 18 представлена кривая, выражающая зависимость потенциала пластины от логарифма экспозиции для пластин с аморфным селеном.

Данных, приведенных на рис. 17 и 18, достаточно для определения плотностей ксерографического изображения, полученного проявлением порошковым облачком.

На рис. 19 представлен весь процесс — от экспонирования до получения изображения.



Р и с. 18. Зависимость потенциала ксерографической пластины от логарифма экспозиции [65].



Р и с. 19. Схема из четырех графиков, позволяющая установить взаимосвязь различных ступеней ксерографического процесса [65].

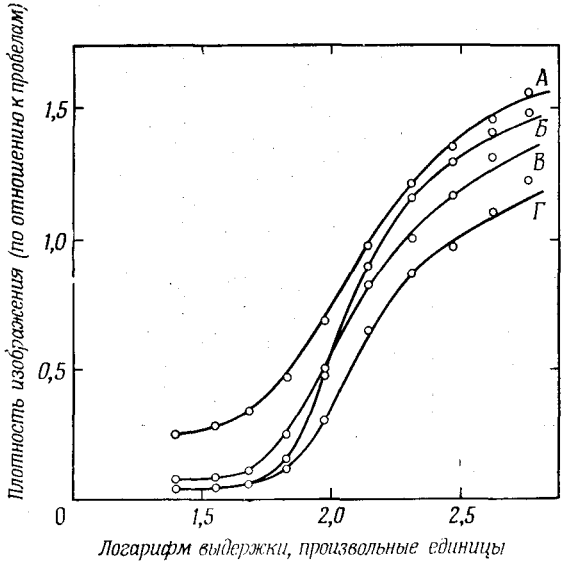
На двух нижних графиках по оси ординат отложен логарифм экспозиции.

Можно заметить, что характер зависимости между экспозицией и потенциалом пластины, представленной кривой на рис. 18, является основным фактором для определения тоновоспроизведения в ксерографии. Если эта зависимость выражена прямой линией, то выбор начального потенциала пластины может обеспечить почти идеальное воспроизведение тонов.

Характер кривой на рис. 18 также определяет допустимый интервал яркостей для этого процесса [65]. Он равен примерно 20 : 1, в то время как прямолинейная зависимость увеличила бы диапазон до 1000 : 1.

2.15.2. ТОНОВЫЕ РЕПРОДУКЦИИ, ПРОЯВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ КИСТИ

На электрофотобумаге тоновое изображение можно получить при проявлении магнитной кистью. Однако такие изображения



Р и с. 20. Характеристические кривые электрофотографической бумаги, проявленной магнитной кистью [66].

А — нормальная кривая; *Б*, *В*, *Г* — кривые с удалением фона различными магнитными носителями.

обычно несколько контрастнее из-за потери ряда градаций в светах. Этот эффект объясняется наличием трибоэлектрического взаимодействия между компонентами проявляющего состава, и поэтому требуется определенная величина силы притяжения для преодоления взаимодействия между проявителем и магнитным

носителем. Недостаточный заряд на светлых участках слоя обычно не способен преодолеть это взаимодействие, поэтому проявитель осаждается только на участках, соответствующих полутонам и теням изображения. Этот эффект показан на рис. 20 [66].

Магнитная кисть при проявлении играет роль проявляющего электрода, поэтому можно исключить этот эффект, наложив напряжение между магнитной кистью и проводящей бумажной подложкой.

Направление приложенного поля выбирается таким, чтобы увеличить общий заряд слоя, то есть к магнитной кисти присоединяют положительный полюс. Приложенное напряжение должно иметь величину, необходимую для преодоления трибоэлектрического взаимодействия в светах изображения.

2.15.3. РАСТРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Как отмечалось выше, при репродуцировании сплошных черных полей или тоновых изображений в ксерографии проявление необходимо вести с проявляющим электродом. При проявлении без электрода из-за краевого эффекта получим лишь контуры черного или полутонового изображения. Это в некоторой степени относится и к репродуцированию печатных растрированных изображений.

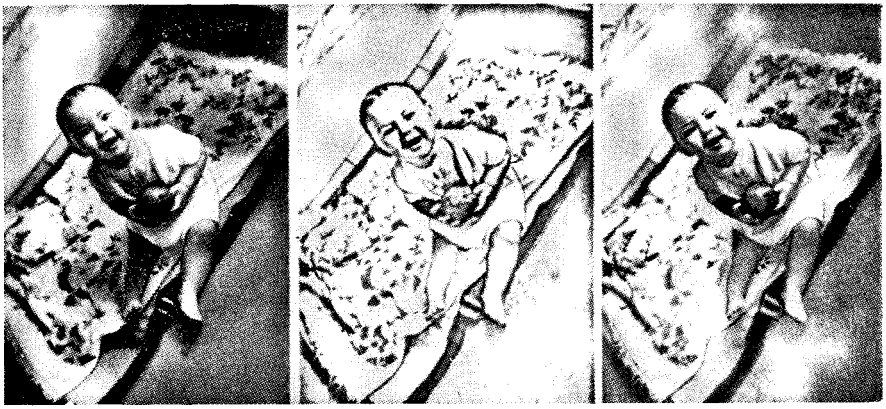
В ксерографии может быть применен обычный фотомеханический метод оптического растрирования, подобный применяемому в офсетной печати. В этом методе эффект передачи тоновых градаций достигается варьированием размеров растровой точки. Так, в светах точки будут маленькими, в полутонах размеры точек больше, а в тенях черные точки сливаются и на темном фоне появляются маленькие белые точки. На участках, соответствующих самым светлым местам изображения, будет чисто белое поле без черных точек, а на участках, соответствующих самым темным местам,— черное поле без светлых точек.

Такое растрирование может быть осуществлено при проявлении порошковым облачком с применением проявляющего электрода или магнитной кистью и в ограниченной степени при каскадном проявлении с электродом [1]).

Однако в общепринятом каскадном проявлении только светлые и серые участки тонового изображения можно репродуцировать без потерь. Более темные участки становятся светлее, чем

[1]) Получение растрированных изображений при каскадном проявлении может быть успешно осуществлено при использовании металлизированного носителя и проявляющего электрода специальной конструкции. См., например, Дравин А. Б., Анохин Ф. А., *Полиграфия*, № 10, 1966.— *Прим. ред.*

на оригинале, а черные становятся почти белыми в середине, оставаясь черными лишь по краям. Так как каскадное проявление главным образом предназначено для репродуцирования штрихового изображения, то резкие края полутонового изображения становятся перепроявленными. Это происходит потому, что при



а *б* *в*

Фото 1. Каскадное проявление тоновых изображений.

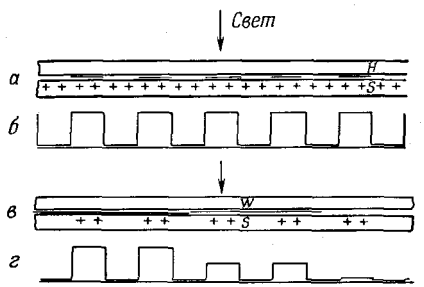
а — оригинал; *б* — репродукция, проявленная обычным каскадным способом; *в* — каскадное проявление с растром. Растр, имеющий 40% непрозрачных точек, экспонировался в контакте с оригиналом.

каскадном способе проявление определяется только полем рассеяния на краях изображения, а в средних частях поле слабее, и оно совершенно отсутствует в центре больших сплошных участков.

Однако с помощью другого способа растрирования можно разбить тоновое изображение на одинаковые растровые элементы, и краевые поля рассеяния появятся по всей площади рисунка. В этом методе все растровые точки электростатического изображения имеют одинаковые размеры, но плотность заряда в каждой точке будет зависеть от оптической плотности, изменяясь от величины, близкой к нулю в светах изображения, до максимальной величины в тенях. Воспроизведение градаций при каскадном проявлении будет осуществляться в результате использования различной оптической плотности растровых точек (фото 1, *в*).

Существует несколько методов получения точек одинакового размера на ксерографической пластине. Один из них описан Нейгебауэром [67]. В соответствии с этим методом растр, состоя-

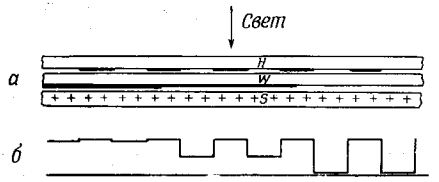
щий из непрозрачных точек одинакового размера, накладывается на заряженную ксерографическую пластину, и после экспонирования на пластине остается изображение, соответствующее точечному растру. Затем на пластину проецируют тоновое изображение. В местах, где воздействие света было интенсивнее, заряд стечет, в затемненных же местах значительная часть зарядов сохранится (рис. 21). Затем изображение проявляют каскадным способом. В этом методе растрирования нельзя получить сплошные черные участки, но воспроизводится бóльшая часть градаций, благодаря чему обеспечивается получение хороших растровых



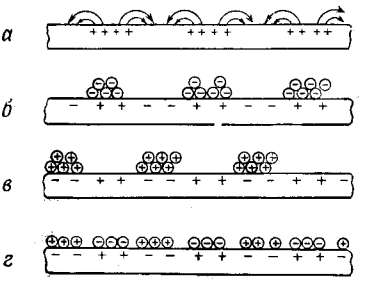
Р и с. 21. Позитивная растровая ксерография [67].

изображений. Негативное или обращенное растровое изображение можно получить одновременным проецированием изображения и растра, как это показано на рис. 22. Рис. 21, *б* и *г*, а также рис. 22, *б* иллюстрируют результат распределения заряда на ксерографической пластине.

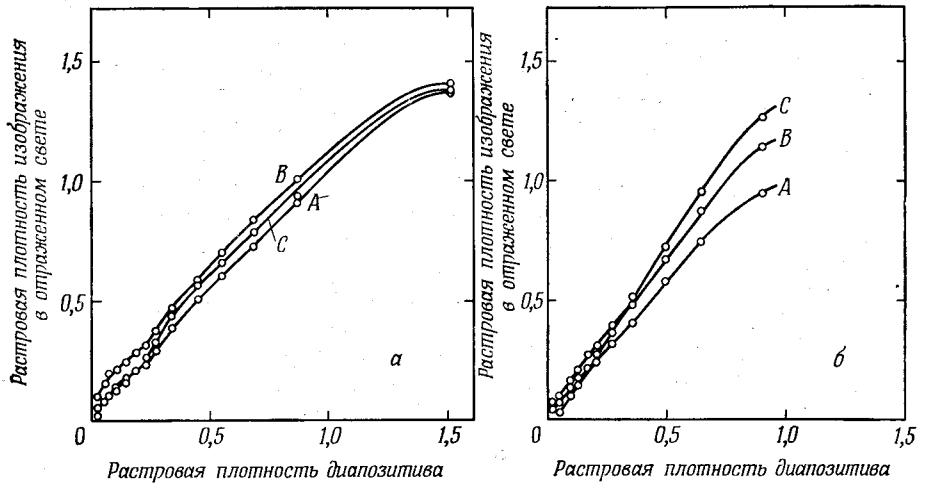
Нейгебауэр нашел, что, используя такой метод растрирования, можно получить полутоновое изображение, применяя для каскадного проявления смесь электроотрицательных и электроположительных проявляющих составов. Этот процесс отражен на рис. 23. На рис. 23, *а* изображено растрированное заряженное изображение и поле рассеяния. На рис. 23, *б* представлено изображение, проявленное электроотрицательным проявляющим составом, на рис. 23, *в* — обращенное изображение, проявленное электроположительным проявляющим составом. Результат одновременного проявления смесью проявляющих составов показан на рис. 23, *г*. Если изображение только тоновое, количество осажденного проявителя и на заряженных участках и между ними зависит от оптической плотности оригинала. Этот способ не создает действительно непрерывного изображения, а дает сетку, что видно при рассмотрении его через микроскоп. Однако без увеличения сетка незаметна.



Р и с. 22. Негативная растровая ксерография [67].



Р и с. 23. Тоновое проявление растрового изображения [67].

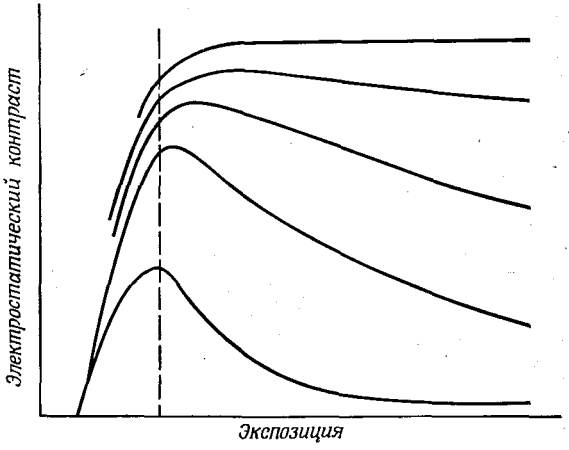


Р и с. 24. Растровая репродукция на электрофотографической бумаге [66].
A и *B* — контактные отпечатки на бумаге двух видов; *C* — глубокая печать; *а* — растр 60 *линия/см*; *б* — растр 120 *линия/см*.

В Японии [66] проводились эксперименты по растрированию тонового изображения на покрытой окисью цинка электрофотографической бумаге. В этих опытах были использованы обычные проекционные растры; изображение проявлялось магнитной кистью, причем применялись специальные меры для удаления фона со светлых участков изображения. Для этого по изображению несколько раз проводили магнитной кистью с железным порошком без проявителя. Очень хорошего качества репродукции были получены при использовании растров 60 и 120 *линия/см*, что видно из рис. 24, где приведены характеристические кривые для одного и того же контрольного изображения, полученные указанным методом с растрами и способом глубокой печати.

2.15.4. РЕПРОДУЦИРОВАНИЕ ШТРИХОВЫХ ОРИГИНАЛОВ

При репродуцировании штриховых оригиналов степень контраста, которую можно получить в ксерографии, зависит от электростатического контраста, созданного на пластине после экспонирования. Это особенно справедливо для каскадного проявления



Р и с. 25. Зависимость электростатического контраста от экспозиции при различном контрасте оригинала.

и проявления меховой щеткой. Пластины, применяемые для штриховых работ, обычно очувствляются до относительно высоких потенциалов (около 600 *в* для пластин с аморфным селеном) с целью обеспечения высокого электростатического контраста. Во время экспонирования электростатический контраст сначала увеличивается, а затем уменьшается (рис. 25). Данные, приве-

денные на рис. 25, служат для определения интервала оптимальных экспозиций при различной контрастности оригиналов [11]; из этих данных видно, что с увеличением контрастности оригинала интервал экспозиции возрастает.

Кривые, показанные на рис. 25, представляют диапазон экспозиций, достижимый для пластин с аморфным селеном. Эти кривые получены измерением спада потенциала при проецировании на пластину белого и черного участков тестообъекта. Разница между этими двумя скоростями спада определяет диапазон экспозиций. На полученные данные влияет величина темнового спада фотопроводящего слоя. Пластины, характеризуемые быстрым темновым спадом, имеют малый диапазон экспозиций.

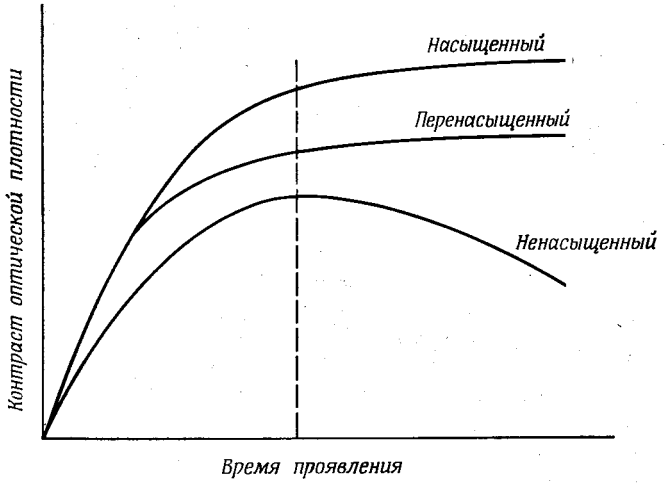
Как видно из рис. 25, при правильно выбранной экспозиции можно обеспечить приблизительно оптимальный электростатический контраст для оригиналов с широким диапазоном контрастов.

Желательно, чтобы фотокопировальные машины могли копировать сильно отличающиеся оригиналы при фиксированном режиме процесса. Исправление ошибок требует много времени. Поэтому очень важно, чтобы допуски на технологические параметры всех стадий процесса были достаточно широки.

Вообще характер репродуцирования штриховых оригиналов (текст, чертеж и т. д.) оказывает большое влияние на фотокопировальный процесс, так как подобные работы составляют основной объем копировальных работ, особенно на предприятиях и в учреждениях.

Важными переменными факторами при каскадном проявлении, кроме механического перемещения по ксерографической пластине, являются концентрация проявителя и время проявления. Когда проявитель смешивают с носителем, частицы проявителя притягиваются к поверхности носителя. Если продолжать прибавлять проявитель, поверхность носителя в конце концов полностью покроется им и наступит момент насыщения. Дальнейшее прибавление проявителя приведет к перенасыщению проявляющего состава, и появятся свободные (не связанные с носителем) частицы проявителя. Если электростатическое изображение проявлять каскадным способом насыщенным проявляющим составом, то проявитель будет осаждаться на изображении до тех пор, пока поле изображения не станет слишком слабым для отрыва проявителя от носителя. Продолжение процесса проявления не увеличит плотность изображения. При проявлении перенасыщенным составом плотность изображения в конце концов достигает максимального значения, но свободный проявитель осядет и на пробельных участках, что вызовет уменьшение контрастности. При проявлении ненасыщенным проявителем плотность изображения будет сначала возрастать с увеличением времени проявления до опре-

деленного максимума, а затем уменьшится в связи с притяжением частиц к свободной поверхности носителя. Зависимость контраста оптической плотности изображения от времени проявления представлена на рис. 26. Из этого рисунка видно, что каскадный способ проявления обеспечивает проведение процесса в достаточно широком диапазоне условий. Естественно, желательно применять насыщенный проявитель или почти насыщенный.



Р и с. 26. Влияние концентрации проявителя на зависимость контраста оптической плотности от времени проявления.

В ксерографическом оборудовании, использующем пластины или барабаны, покрытые аморфным селеном, проявленное изображение переносится на бумагу силами электростатического притяжения. Во время этой операции переносится только верхний слой частиц проявителя, который отделен от селеновой пластины другими частицами проявителя и не так прочно удерживается на пластине. Таким образом, тонкий слой частиц, который создает фон, имеет тенденцию оставаться на пластине во время переноса изображения. Поэтому при электростатическом переносе контрастность изображения отпечатка увеличивается.

В копировальном оборудовании с использованием пластин с аморфным селеном и каскадного проявления описанный выше процесс и факторы, содействующие повышению контрастности, обеспечивают возможность получения высококачественных копий со штриховых оригиналов, причем копии обычно несколько контрастнее оригиналов.

2.15.5. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Разрешающая способность электростатических изображений на ксерографической пластине с покрытием из аморфного селена очень высока благодаря тому, что фотопроводящий слой не содержит зерен. На пластинах, покрытых окисью цинка в смоляном связующем, разрешающая способность электростатического изображения ограничивается размерами частичек фотопроводящего пигмента (*окиси цинка*).

Разрешение ксерографических отпечатков зависит от размера частиц проявителя. Каскадное проявление обычно обеспечивает разрешение от 10 до 15 *линия/мм*, а проявление порошковым облачком — 140—200 *линия/мм* [68]. Высокая разрешающая способность 250 *линия/мм* достигается при жидкостном проявлении (разбрызгиванием) селеновых пластин [42]; недавно сообщалось, что этим способом удалось получить разрешение до 1000 *линия/мм* [69].

Используя специально приготовленные мелкодисперсные проявители и мелкий сферический железный порошок (просеянный через сито с отверстиями размером 0,025 *мм*) в качестве магнитного носителя, в Японии [70] получили разрешающую способность выше 120 *линия/мм* при проявлении электрофотографических бумаг магнитной кистью.

III. УСТОЙЧИВАЯ ВНУТРЕННЯЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ (ФОТОЭЛЕКТРЕТЫ)

Электрофотографический процесс, рассматриваемый с точки зрения устойчивой внутренней поляризации, был описан Каллменом, Реннертом и Сидран [21]. Подобный же анализ был выполнен Фридкиным в его работе «Использование фотоэлектретов в электрофотографии» [71]. Хотя этот процесс еще не изучен в той степени, которая необходима для его промышленного применения, само явление, несомненно, заслуживает того, чтобы его описание было включено в книгу по электрофотографии.

Идея применения устойчивой внутренней поляризации в электрофотографии была впервые высказана Каллменом и независимо от него Фридкиным и его сотрудниками[1]. Следует напомнить, что идею внутренней поляризации, по-видимому, выдвигал еще Карлсон [72]. Его «электрофотографический элемент» и устойчивая внутренняя поляризация Каллмена и Реннерта [73] фактически одно и то же, хотя структура этих моделей несколько различна. Элемент Карлсона состоит из двух слоев изолирующего материала, причем один из них, фоточувствительный диэлектрик, заключен между двумя электродами. Один из электродов прозрачен. Устройство Каллмена и Реннерта имеет такой же вид, но место диэлектрика занимает проводящий слой. Карлсон не пользовался выражением «устойчивая внутренняя поляризация», однако в описании, содержащемся в его патенте, он упоминает о захваченных зарядах внутри слоя.

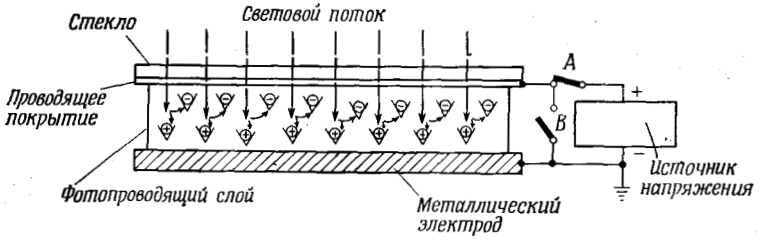
3.1. МЕХАНИЗМ УСТОЙЧИВОЙ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Явление устойчивой внутренней поляризации в фоточувствительном диэлектрике заключается в перераспределении положительных и отрицательных зарядов в образце при одновременном действии освещения и приложенного электрического поля. Попадая в ловушки, эти заряды на какое-то время оказываются захваченными, образуя поле внутренней поляризации в образце (рис. 27). Захваченные электрические заряды (электроны и дырки)

[1]) Фотоэлектреты впервые были открыты Наджаковым Г. С. в 1937 г.— *Прим. ред.*

могут оставаться в этом состоянии в течение определенного времени, которое зависит от глубины ловушек. В случае мелких ловушек заряды могут их быстро покинуть, однако если ловушки достаточно глубоки, заряды могут оставаться в них в течение продолжительного времени (иногда это дни или даже месяцы).

Слово «ловушка» на языке электроники твердого тела используется для описания метастабильного энергетического состояния, расположенного между валентной зоной и зоной проводимости. Если эти состояния расположены вблизи зоны проводимости, то они могут действовать как электронные ловушки. Если же они ближе к валентной зоне, они могут действовать как дырочные



Р и с. 27. Механизм внутренней поляризации. При поглощении в слое фотоны света генерируют пары электрон — дырка. Под влиянием приложенного напряжения электроны и дырки движутся в противоположных направлениях до тех пор, пока они не попадут в ловушки. Значками — и + обозначены соответственно электроны и дырки.

ловушки. Глубина ловушки определяется «расстоянием» в единицах энергии от зоны проводимости (для электронов) и от валентной зоны (для дырок).

При снятии освещения прекращается генерация свободных носителей. Однако, поскольку приложено напряжение, оставшиеся свободные заряды будут двигаться к электродам, электроны к положительному электроду, а дырки — к отрицательному. Часть из них будет захвачена ловушками, а другая часть, достигнув электродов, рекомбинирует со свободными носителями во внешней цепи.

Если снять приложенное напряжение, например с помощью ключа A (рис. 27), то движение зарядов к электродам прекратится и внутренние положительные и отрицательные заряды будут притягиваться друг к другу.

В случае освобождения части зарядов из ловушек они начнут двигаться к зарядам противоположной полярности и рекомбинировать с ними. Таким образом, при этих условиях все захваченные носители в конце концов будут освобождены и рекомбинируют до полного исчезновения внутренней поляризации.

Очевидно, что время деполяризации для глубоких ловушек значительно больше, чем для мелких.

Если выключить свет и снять приложенное электрическое поле, а электроды замкнуть между собой накоротко (замкнуть ключ B в схеме на рис. 27 и оставить разомкнутым ключ A), то на электродах индуцируются электрические заряды, экранирующие поле внутренней поляризации (рис. 28). В этом случае захваченные заряды противоположного знака не будут притягиваться друг к другу и деполяризация, обусловленная освобождением из ловушек, будет замедлена. Таким способом внутренняя поляризация может быть сохранена на более продолжительное время.

Конечно, возможна деполяризация освобожденных зарядов на электродах, но она будет происходить в основном в областях,

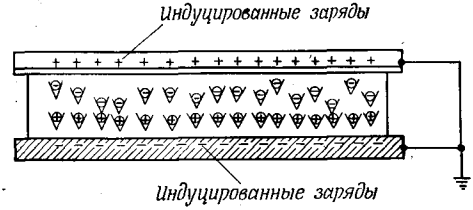


Рис. 28. Действие короткого замыкания между электродами на внутреннюю поляризацию.

прилегающих к электродам, т. е. там, где действует поле между захваченными и индуцированными зарядами. Таким образом, короткое замыкание между электродами способствует сохранению внутренней поляризации.

Удаление одного электрода вызывает появление поля в фоточувствительном слое, в результате чего появляется заряд на поверхности, с которой был удален электрод. Таким образом, заряженные частицы, допустим порошка, могут притягиваться поверхностью, если такие частицы подвести к свободной поверхности фоточувствительного слоя.

Если снять приложенное напряжение, то внутренняя поляризация может быть нейтрализована путем облучения фоточувствительного диэлектрика светом или другим излучением. Захваченные носители будут нейтрализованы свободными носителями, возбуждаемыми в диэлектрике. Добавим, что и часть захваченных носителей будет освобождена при облучении образца проникающим излучением. Инфракрасное излучение, освобождая захваченные носители, также может быть причиной деполяризации диэлектрика. Свободно передвигаясь, эти заряды могут быть нейтрализованы в результате рекомбинации с зарядами противо-

положного знака. Если приложить напряжение, обратное исходному поляризующему напряжению, время деполяризации, естественно, уменьшится.

На рис. 28 продемонстрировано возникновение внутренней поляризации при одновременном действии освещения и электрического поля. На практике вначале диэлектрик освещают, а затем прикладывают напряжение. Заряды, возбужденные освещением, остаются в зоне проводимости еще в течение некоторого конечного времени и после снятия освещения. Если вслед за этим быстро приложить напряжение, то оставшиеся заряды могут, перераспределяясь в объеме вещества, вызвать поляризацию. Если интервал времени между освещением и приложением напряжения достаточно велик, то поляризация будет незначительна, поскольку концентрация свободных зарядов со временем быстро уменьшается.

3.2. ОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Фоточувствительный элемент, способный создавать устойчивую внутреннюю поляризацию, или, иначе, электрофотографическая пластина, состоит из фотопроводящего высокоомного слоя, заключенного между двумя электродами. Один электрод должен быть прозрачным, а другой подвижным.

При получении изображения методом поляризации используется такая последовательность операций:

1. Проекция изображения на прозрачный электрод вместе с одновременным приложением напряжения к электродам.
2. Выключение света, снятие приложенного напряжения и заземление обоих электродов.
3. Удаление одного из электродов.
4. Проявление скрытого электростатического изображения порошковым проявителем; порошок наносится на свободную поверхность фотоэлектрета.
5. Перенос порошкового изображения на бумагу.
6. Закрепление порошкового изображения на бумаге.
7. Очистка поверхности фотоэлектрета от оставшегося порошка.
8. Возвращение подвижного электрода и деполяризация слоя красным светом.

Все эти операции проиллюстрированы на рис. 29. Естественно, что в результате получается позитивное изображение с негативного оригинала или наоборот. Однако, как и в ксерографии, воспроизвести позитив с позитива можно при обращенном проявлении. Поэтому все операции на рис. 29 можно сравнить с операциями на рис. 1, которые относятся к ксерографии. Ряд операций,

представленных на рис. 29, может быть использован для формирования скрытого изображения. Эти операции заключаются в следующем:

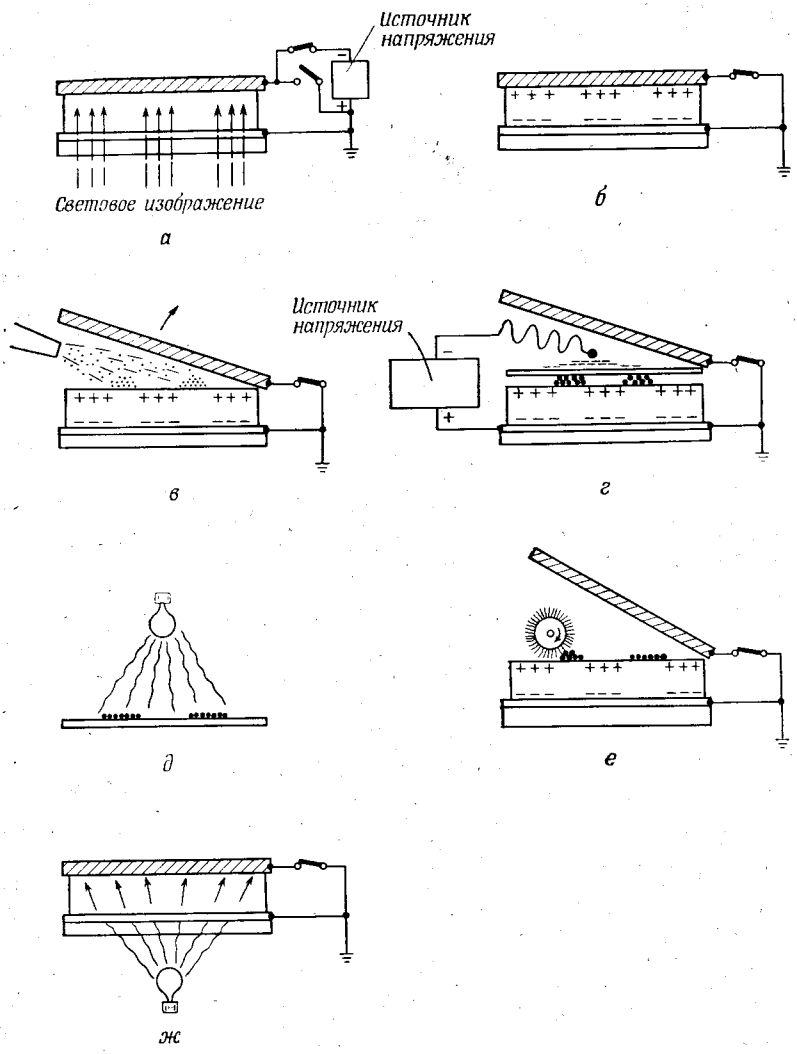
1. В первой операции (рис. 29, *а*) вначале световое изображение проецируется на фотоэлектретный слой, а затем уже прикладывается напряжение к электродам. Проводимость, вызванная световым сигналом, сохраняется в течение некоторого времени после выключения света. Однако проводимость со временем уменьшается, и, следовательно, как уже было отмечено ранее, интервал между выключением света и приложением поля не может быть слишком продолжительным.

2. Если фотоэлектретный слой при наличии приложенного поля подвергается действию равномерной засветки, например ультрафиолетового излучения, то в этом слое возникает равномерная внутренняя поляризация. Приложенное электрическое поле затем снимается, а электроды заземляются, как это показано на рис. 29, *б*. При этих условиях через прозрачный электрод на фотоэлектретную пластину проецируется световое изображение. Экспонирование приводит к деполяризации на тех участках, где свет проникает в пластину. Последние операции заменяют операции, которые указаны на рис. 29, *а* и *в*. Поляризационное изображение, полученное таким способом, является позитивным в фотографическом смысле, и при проявлении требуется, чтобы знак заряда проявителя был противоположен знаку зарядов на поверхности фотоэлектрета.

3. Фотоэлектретный слой равномерно возбуждается поляризующим освещением, а затем на него проецируется деполяризующее изображение. Вслед за этим сразу или спустя некоторое время прикладывается электрическое поле. Эта операция заменяет операцию, указанную на рис. 29, *а*.

4. Пластина однородно возбуждена, как и в п. 3 (см. выше). После этого к электродам прикладывается напряжение, затем на слой через прозрачный электрод проецируется изображение, которое может быть или «возбуждающим», или «гасящим». Возбуждающее освещение будет увеличивать поляризацию и образовывать негативное изображение в фотографическом смысле, тогда как гасящее освещение будет уменьшать поляризацию, формируя позитивное изображение. (У некоторых люминофоров, находящихся в возбужденном состоянии, обнаруживается эффективное гашение в красной или оранжевой области спектра.)

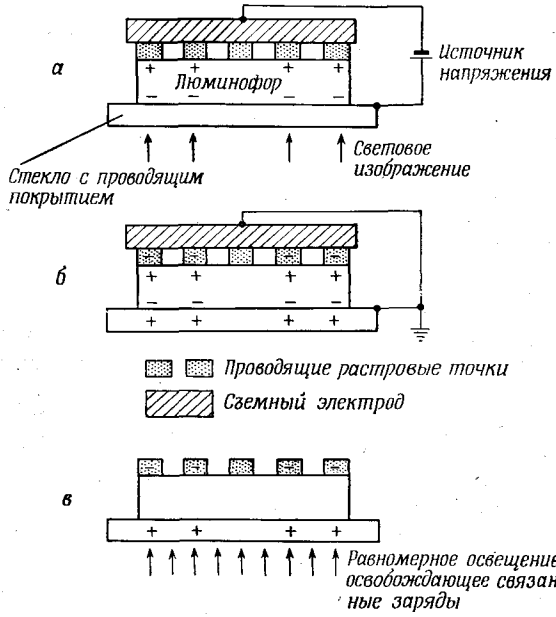
Каллмен [21] и его сотрудники описали интересный случай применения устойчивой внутренней поляризации в электрофотографии. Они нашли, что операция удаления электрода с поверхности люминофора вызывает некоторое нарушение поляризации внутри слоя. Для того чтобы избежать этого эффекта, поверхность



Р и с. 29. Основные этапы получения устойчивой внутренней поляризации в электрофотографии.

а — экспонирование при наличии приложенного напряжения; *б* — заземление обоих электродов; *в* — подвижный электрод поднят, проявление положительно заряженным проявителем; *г* — перенос изображения; *д* — фиксирование; *е* — очистка; *ж* — возвращение подвижного электрода в нормальное положение (деполяризация).

фоточувствительного слоя покрывалась системой проводящих точек размером около 0,05 *см* каждая. Точки наносились серебряной краской через перфорированную маску. Таким образом, каждая точка становилась отдельным маленьким электродом, не связанным механически и электрически со смежными точками.



Р и с. 30. Схема, показывающая отдельные стадии метода поляризации с использованием растра в виде проводящих точек.

а — световое изображение проецируется на фоточувствительный слой до или во время поляризации. В люминофоре образуется скрытое изображение в виде устойчивой внутренней поляризации; *б* — съемный электрод заземлен, а в проводящих растровых точках образовались связанные заряды; *в* — после удаления съемного электрода пластина однородно засвечивается, чтобы освободить заряды, связанные в проводящих растровых точках, и образовать скрытое изображение из свободных зарядов. [Kallman, Rennert, Sidran, *Photog. Sci. Eng.*, 4, 6, 347—348 (1960).]

При образовании на пластине скрытого изображения электрические заряды концентрировались на этих точечных электродах в соответствии с оптическим изображением, используемым при экспонировании. Эти заряды служили для проявления изображения. Таким образом, в действительности поляризационные заряды трансформировались в поверхностные заряды [1]).

Были использованы три способа получения скрытого изображения с помощью точечной сетки. Они отражены на рис. 30, 31

[1]) Более подробный анализ этого метода показывает, что в данном случае существенным является краевой эффект.— *Прим. ред.*

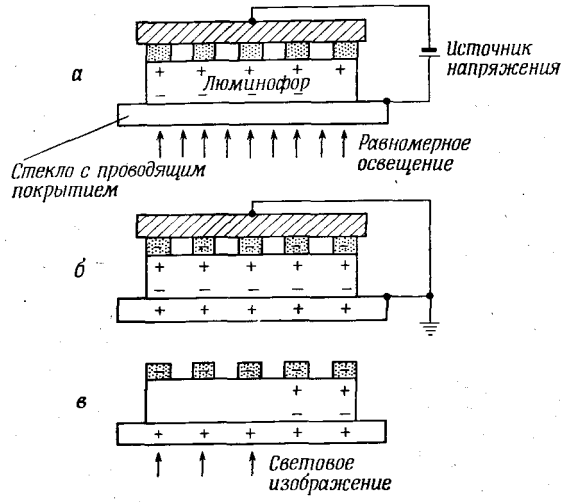


Рис. 31. Схема, показывающая отдельные этапы метода деполяризации при использовании пластин с системой проводящих растровых точек.

а — поляризация пластины; *б* — съемный электрод заземлен, а в проводящих растровых точках образовались связанные заряды; *в* — после удаления съемного электрода проецируемое изображение вызывает поляризацию на освещенных участках. Связанные в точках заряды освобождаются, и из свободных зарядов образуется скрытое изображение. [Kallman, Rennert, Sidran, *Photog. Sci. Eng.*, 4, 6, 347 (1960).]

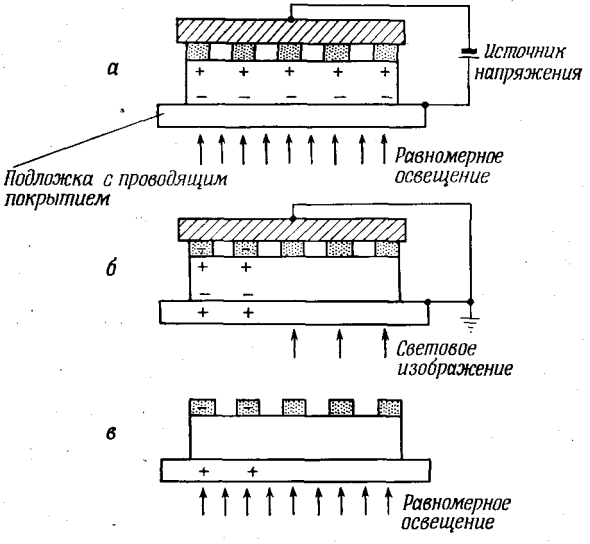


Рис. 32. Схема, показывающая отдельные этапы усовершенствованного метода деполяризации при использовании пластин с системой проводящих растровых точек.

а — равномерная поляризация пластины; *б* — съемный электрод заземлен, а в проводящих растровых точках образовались связанные заряды. Экспонирование пластины при проецировании на нее светового изображения производится без удаления съемного электрода, который находится в контакте с проводящими растровыми точками и заземлен, что позволяет освобождающимся зарядам стекать на землю; *в* — заземленный электрод удаляется, и пластина равномерно засвечивается, чтобы снять поляризацию, превращая остаточные связанные заряды в точках в свободные заряды. Таким образом получается скрытое изображение из свободных зарядов. [Kallman, Rennert, Sidran, *Photog. Sci. Eng.*, 4, 6, 347 (1960).]

и 32. В случае применения первого способа (рис. 30) изображение формируется посредством первоначальной поляризации. В случае применения второго (рис. 31) изображение появляется под действием деполяризации, а в третьем способе (рис. 32) используется сочетание поляризации и деполяризации. Первыми двумя способами получают негативное изображение, тогда как третьим получают позитивное изображение. Отпечатки, полученные этими способами, позволяют передавать растровые изображения.

3.3. ФОТОЭЛЕКТРЕТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Устойчивую внутреннюю поляризацию обнаруживают вещества, которые имеют следующие характеристики:

1) очень высокое сопротивление в темноте (небольшая концентрация свободных носителей — дырок или электронов), т. е. материал должен быть хорошим изолятором при отсутствии освещения, проникающих излучений или частиц высоких энергий;

2) наличие фотопроводимости;

3) высокая концентрация электронных и дырочных ловушек.

Если материал обладает низким сопротивлением, то захваченные заряды быстро нейтрализуются свободными носителями зарядов.

Если в материале нет ловушек, то заряды, возникшие при возбуждающем излучении и затем разделенные приложенным полем, рекомбинируют между собой после снятия поля и, следовательно, поляризация не будет устойчивой.

Если свободные носители заряда не могут быть созданы в материале при освещении, т. е. если материал не является фотопроводником, то никакой сколько-нибудь заметной поляризации в нем не возникает. (Здесь не рассматривается поляризация типа спонтанной поляризации сегнетоэлектриков. Последняя обусловлена дипольной ориентацией в электрическом поле и не связана с явлением переноса свободных носителей заряда.)

Сохранение скрытого изображения в форме устойчивой внутренней поляризации, естественно, требует, чтобы перераспределенные заряды удерживались в глубоких ловушках. Однако, когда фоточувствительный диэлектрик заключен между двумя заземленными электродами, внутреннее поле, вызывающее деполяризацию, в значительной степени экранируется. В таких условиях время жизни скрытого электростатического изображения может быть заметно увеличено, а влияние внешних воздействий уменьшено. Электроды должны иметь хороший контакт с проводящим слоем. Прежде чем использовать электрическое изображение для получения отпечатка, один электрод необходимо удалить.

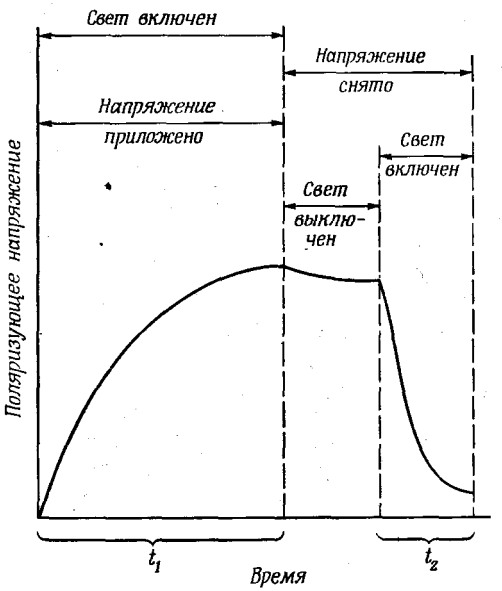
Таким образом, основные требования для получения фотоэлектретного изображения в электрофотографии заключаются в использовании либо быстрой объемной поляризации под действием освещения и приложенного поля, либо быстрой деполяризации фотоэлектрета при освещении. В первом случае фотоответ будет зависеть от квантового выхода фототока, подвижности носителей зарядов (электронов или дырок) в фотопроводнике, а также эффективности захвата и удержания носителей ловушками. Во втором случае эта скорость будет зависеть от квантового выхода, скорости освобождения зарядов из ловушек и подвижности. Высокая плотность состояний ловушек, необходимая для возникновения внутренней поляризации, будет уменьшать подвижность, и как следствие будет уменьшаться скорость фотоответа. В обычной ксерографии желательно работать с фотопроводником, свободным от ловушек; это условие в наибольшей степени выполняется в аморфном селене. Таким образом, в фотоэлектретных материалах получить быстрый фотоответ труднее, чем в обычных ксерографических материалах.

Каллмен и Розенберг [19] методом съемного электрода исследовали потенциал фотоэлектрета из люминофора ZnS : CdS как функцию времени поляризации. В качестве источника света они использовали газоразрядную ртутную лампу с большой интенсивностью излучения. Интенсивность света на пластине равнялась ~ 15 *мквт/см*^{2}. Исходя из этих данных для люминофора ZnS : CdS, было найдено, что для получения потенциала 200 *в* необходимо время поляризации ~ 1000 *сек*, если использовать указанную освещенность и прикладывать к слою напряжение порядка 1000 *в*. Предполагается, что для проявления изображения каскадным методом необходимый потенциал на поверхности составляет не менее 200 *в*.

Для антрацена при тех же условиях время поляризации составляет около 3 *сек*. Это различие, очевидно, обусловлено более медленным темновым спадом поляризации в антрацене.

В случае использования механизма деполяризации время образования скрытого изображения будет другим. Дополнительные исследования, проведенные в работе [74], показывают, что в случае освещения ультрафиолетовым светом при освещенности 15 *мквт/см*^{2} время деполяризации объемнополяризованных слоев ZnS : CdS при начальном потенциале 200 *в* составляет около 2 *сек*. Установлено, что в аналогичных условиях время деполяризации антрацена равно около 25 *сек* при том же начальном потенциале 200 *в*. Таким образом, для люминофора ZnS : CdS деполяризационный механизм обнаруживает бо́льшую чувствительность, чем поляризационный, тогда как для антрацена имеет место обратное соотношение.

В обычной ксерографии с использованием, например, пластины аморфного селена тот же перепад напряжения на слое (200 *в*) достигается при той же освещенности за время 0,005 *сек*. Это показывает, что обычная ксерография на аморфном селене характеризуется в 400 раз большей фоточувствительностью, чем электрофотография на фотоэлектретах при оптимальных условиях,

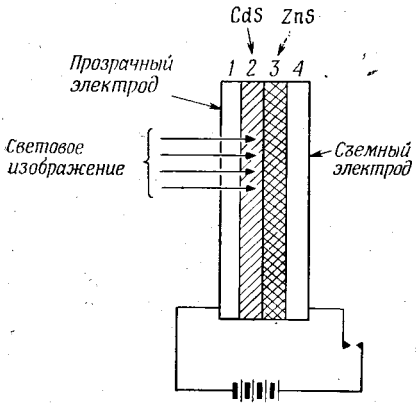


Р и с. 33. Возникновение поляризации и разрядка ($t_1 > t_2$).

например при использовании люминофора ZnS : CdS по способу деполяризации. По данным, приводимым в работе [21], это различие может быть еще большим. Проведенное в этой работе сравнение фотоэлектретов с аморфным селеном показывает, что селеновая ксерография обладает чувствительностью в 1000 раз большей, чем электрофотография с использованием устойчивой внутренней поляризации люминофора. Там же содержится сообщение об устойчивой внутренней поляризации в слое ZnO, являющемся покрытием стандартной ксерографической бумаги, и указывается, что существует много других люминофоров, обладающих устойчивой внутренней поляризацией.

Техника получения изображения с помощью метода деполяризации позволяет надеяться на значительное увеличение скорости формирования изображения. Возможности здесь заключаются

в том, что создание внутренней поляризации в фотопроводящем изоляторе обычно является менее эффективным процессом, чем разрядка возникшей поляризации. В процессе поляризации только захваченные в ловушки заряды эффективно участвуют в образовании внутренней поляризации. Многие из свободных носителей заряда, возникших в результате действия освещения, попадают на электроды, минуя ловушки. Эти заряды исчезают во внешней цепи. В противоположность этому, в процессе деполяризации все заряды, освобождаемые светом, будут участвовать в создании скрытого изображения. Таким образом, при одной и той же освещенности время деполяризации, как правило, много меньше, чем время поляризации. Этот вывод иллюстрируется кривой, приведенной на рис. 33.



Р и с. 34. Слоистый фотоэлектрет.

Как было показано ранее, метод деполяризации включает прежде всего равномерную поляризацию фоточувствительного слоя в присутствии возбуждающего излучения, например ультрафиолетового света, и внешнего поля. После выключения возбуждающего излучения и снятия приложенного поля формируется скрытое электростатическое изображение посредством проецирования светового изображения на фоточувствительный изолирующий слой. Свет освобождает электроны и дырки, которые, перераспределяясь в объеме под действием поля поляризации, нейтрализуют заряды в ловушках. Одновременно свет освобождает заряды из ловушек и в еще большей степени способствует деполяризации.

Фридкиным и Желудевым [20] были описаны эксперименты по созданию электрофотографического изображения в фотоэлектретных слоях серы. По сообщению этих авторов, чувствительность слоев поликристаллической серы примерно в 100 раз ниже чувствительности несенсибилизированных слоев ZnO, которые используются в процессе «электрофакс».

Фридкин и Желудев описывают также многослойную структуру типа сандвича, которая позволяет создать фотоэлектретное состояние при относительно низкой интенсивности освещения (рис. 34). Эта структура состоит из фоточувствительного слоя CdS : Cu : Cl, нанесенного на прозрачный электрод, и слоя ZnS,

который находится в контакте со вторым электродом. Механизм образования скрытого изображения в этом случае заключается в следующем. Постоянное напряжение прикладывается к электродам *1* и *4*. Изображение проецируется через электрод *1* на поверхность слоя *2*. Благодаря фотопроводимости распределение потенциала в освещенных областях изменяется. Это приводит к увеличению напряжения на соответствующих участках слоя *3*. Скрытое изображение, представляющее собой перераспределение устойчивой внутренней поляризации в слое *3*, может быть проявлено обычными электрофотографическими проявителями. Конечно, до проявления электрод *4* должен быть удален.

Поскольку слой *3* (ZnS) обладает высоким темновым сопротивлением и так как он поляризуется в темноте, нет необходимости в том, чтобы он обладал фотопроводимостью. Слой *2* не обязательно должен иметь высокое темновое сопротивление, так как ему не требуется сохранять поверхностные заряды или заряды поляризации. Слои из сульфида кадмия и сульфида цинка были приготовлены из порошка в связующем материале.

Хотя описанная выше методика имела целью увеличение фоточувствительности по сравнению с обычными фотоэлектретными слоями, в результатах, приведенных Фридкиным и Желудевым, данные об увеличении чувствительности отсутствовали.

IV. УСТОЙЧИВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ [1])

В ксерографии и электрофотографии на фотоэлектретах мы имеем дело со скрытым изображением, сформированным статическими зарядами на поверхности или объемно связанными зарядами.

Каллмен [75] предложил другой вариант электрофотографии, в котором скрытое изображение связано с устойчивой электропроводностью фотопроводящих слоев, возникающей в результате предварительного освещения. Скрытое изображение, обусловленное устойчивой проводимостью, может быть использовано несколькими различными способами. Это может быть сделано косвенным путем, например в результате получения электростатического изображения, или с помощью других методов, позволяющих непосредственно проявить изображение путем селективного притяжения или путем электролиза.

4.1. МЕХАНИЗМ УСТОЙЧИВОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Многие фотопроводящие материалы после освещения не сразу достигают исходного значения темновой проводимости [22]. В некоторых фотопроводниках спад фотовозбужденной проводимости до равновесной темновой происходит очень быстро. В других, например в некоторых люминофорах, этот спад может быть очень медленным.

Устойчивая проводимость существует только при наличии мелких ловушек [76]. Поэтому фотопроводящие материалы должны содержать много таких ловушек. Электроны, освобождаемые при поглощении световой энергии, переходят в зону проводимости. Бóльшая часть этих электронов попадает в мелкие ловушки, где они остаются и после прекращения освещения. В дальнейшем эти захваченные электроны могут попасть в зону

---

[1]) Явление, которое названо автором «устойчивой проводимостью», обусловлено длительной релаксацией неравновесных носителей тока в полупроводнике или люминофоре и в отечественной литературе по вопросам электрофотографии называется «эффектом возбуждения».— *Прим. ред.*

проводимости при приложении к слою сильного электрического поля. Электроны, захваченные мелкими ловушками, могут быть освобождены для участия в процессе проводимости нагреванием, например путем освещения слоя инфракрасным светом.

4.2. ОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Фоточувствительный слой в электрофотографии с использованием устойчивой проводимости по своей структуре подобен ксерографической пластине, т. е. он представляет собой слой фоточувствительного изолирующего материала, помещенного на проводящую основу. Эта основа может быть металлической или может состоять из бумаги с тонким металлическим покрытием между бумагой и фоточувствительным слоем.

Скрытое проводящее изображение создается проецированием оптического изображения на фоточувствительную поверхность (рис. 35). Участки, на которые падает свет, становятся в большей или меньшей степени проводящими, что определяется интенсивностью света, падающего на фоточувствительную поверхность во время экспозиции. После прекращения экспозиции проводимость сохраняется, если слой находится в темноте. Неосвещенные участки, напротив, остаются непроводящими.

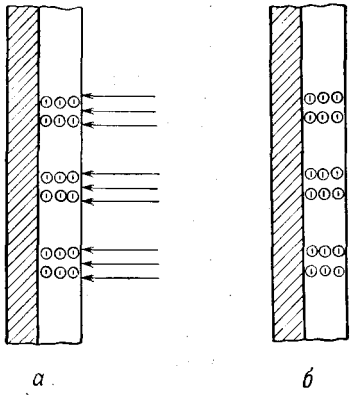


Рис. 35. Образование изображения путем использования явления устойчивой проводимости.

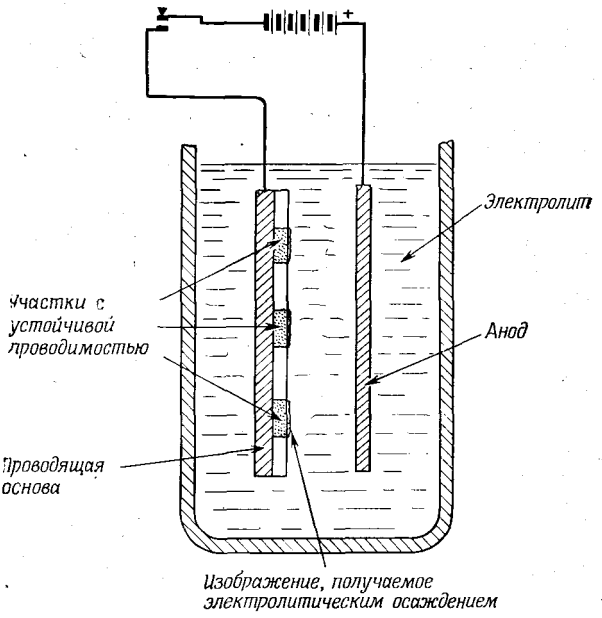
а — возникновение проводящего состояния на участках поверхности, освещенных светом, несущим изображение; *б* — проводимость образца сохраняется после выключения света.

Как уже упоминалось ранее, сразу же после образования проводящего изображения им можно воспользоваться. Каллмен [75] предлагал использовать скрытое проводящее изображение для получения электростатического изображения. Для этого необходимо выполнить следующие операции:

1. На фотопроводящую поверхность спроецировать оптическое изображение с целью образования скрытого проводящего изображения.

2. Сообщить фотопроводящей поверхности электрический заряд, например при помощи коронного разряда. Области скрытой проводимости, будучи проводящими, нейтрализуют поверх-

ностный заряд на ранее освещенных участках, тогда как на неэкспонированных участках поверхности заряд сохранится, что приведет к образованию электростатического изображения, которое будет обратным скрытому проводящему изображению.



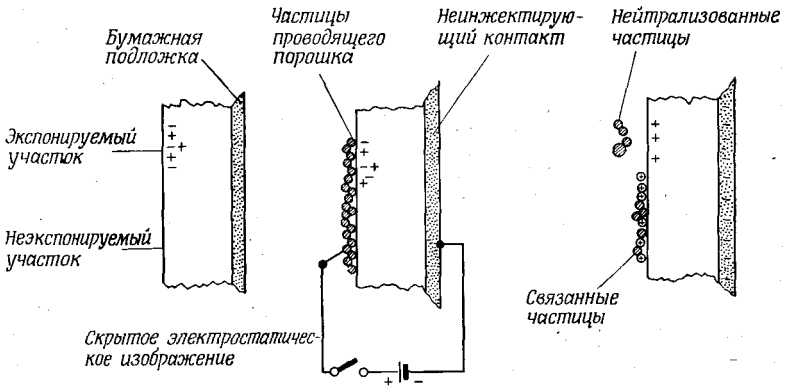
Р и с. 36. Электролитическое проявление проводящего изображения.

3. Электростатическое изображение может быть затем проявлено одним из многочисленных способов, применяемых в ксерографии.

Эти операции аналогичны операциям, отраженным на рис. 1, за исключением того, что операции 1 и 2 здесь поменялись местами. Как уже сообщалось, такая последовательность операций осуществляется медленнее, чем в обычном ксерографическом процессе [36], где вначале происходит зарядка, а затем экспонирование.

Метод образования видимого изображения непосредственно из скрытого проводящего изображения был описан в работе [77]. В этом процессе скрытое проводящее изображение формируется путем проецирования на фотопроводящую пластину оптического изображения. Фотопроводящая пластина, содержащая скрытое изображение, затем используется в качестве катода при электролизе. Этот метод иллюстрируется рис. 36. При приложе-

нии напряжения между катодом и анодом происходит гальваническое осаждение частиц из электролита на проводящие участки изображения, причем количество осаждающегося материала пропорционально степени проводимости соответствующего участка скрытого изображения. На неэкспонированных участках фотопроводящей поверхности, где слой по существу является изолятором, осаждение частиц практически отсутствует. Таким образом, слой металла, осажденный на фотопроводящей поверхности,



Р и с. 37. Последовательность операций при получении позитивного изображения из скрытого проводящего изображения. [A m i c k, *RCA Review*, 20, 765 (1959).]

образует проявленное изображение. В коммерческом варианте, используемом фирмами «Миннесота майнинг энд мэньюфекчуринг», фоточувствительный образец состоит из слоя окиси цинка, нанесенного на бумагу, с тонким электродом из алюминиевой фольги, находящимся между ZnO и бумагой. Слой металлического серебра, осажденный на белое покрытие из окиси цинка, образует окончательный отпечаток. На практике электролитический раствор набирается в губчатую подушку, которой проводят по поверхности окиси цинка во время операции проявления. Процесс получения изображения идет по схеме негатив — позитив или наоборот и не подходит для обращенного проявления, т. е. для прямого получения позитивного отпечатка с позитивного оригинала.

Существует возможность проявления изображения, получаемого на основе явления устойчивой проводимости, с помощью электрофоретического осаждения при распылении жидкости. Для этих целей можно было бы использовать один из ксерографиче-

ских жидких проявителей. Процедура проявления здесь такая же, как и при использовании электролиза.

Роуз [78] предложил методику получения прямого позитивного отпечатка из скрытого проводящего изображения. По этой методике после экспонирования поверхность фотопроводника посыпают металлическим порошком. Затем между металлическим порошком и проводящей основой создают разность потенциалов, причем к слою порошка прикладывается положительный потенциал, чтобы электроны на освещенных участках фотопроводника нейтрализовали положительно заряженный металлический порошок. Нейтрализованные частицы порошка перестают притягиваться к поверхности и могут быть легко удалены потоком воздуха. На непроводящих участках изображения порошок удерживается на поверхности фотопроводника электростатическими силами, и этот связанный порошок при проявлении образует позитивный отпечаток. Эта методика иллюстрируется рис. 37.

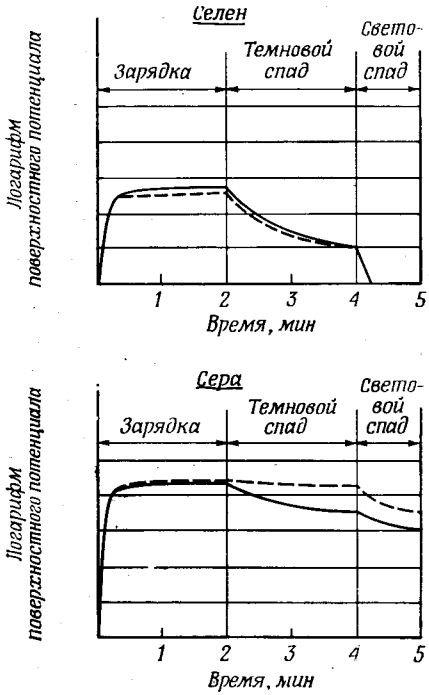
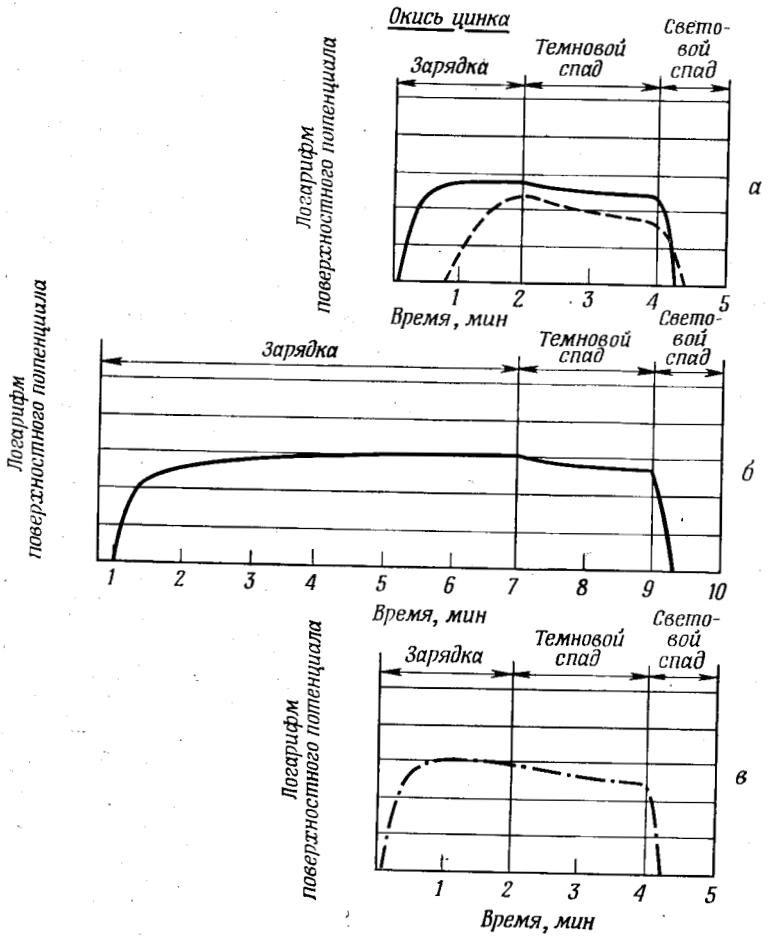


Рис. 38. Образование и спад заряда в селене и сере.

———— после выдержки в темноте; — — — — после предварительной засветки в течение 1 *мин*. [Cassiers, *J. Photog. Sci.*, **10**, 59 (1962).]

4.3. МАТЕРИАЛЫ С УСТОЙЧИВОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Каллмен использовал фотопроводящие слои, состоящие из порошка люминофора в связующем «дюко» (фирма «Дюпон»). В качестве люминофоров использовались сульфид цинка — кадмия и селенид цинка — кадмия. Устойчивая фотоиндуцированная проводимость, по-видимому, является одной из характеристик пленок, образованных фотопроводящими порошками в смоле. Кассирс [79] провел испытания ряда различных проводящих слоев. Он обнаружил, что устойчивая проводимость наблюдается в слоях со связующим на основе фотопроводников типа окиси цинка, цинко-сульфидного люминофора, а также в органических фотопроводниках, например в лейкома-



Р и с. 39. Окись цинка.

а — ———— после выдержки в темноте, — — — — после засветки в течение 1 *мин*; *б* — возвращение образца в исходное состояние продолжительной зарядкой; *в* — возвращение образца в исходное состояние нагреванием его до 70° С в течение нескольких секунд. [C a s s i e r s, *J. Photog. Sci.*, 10, 60 (1962).]

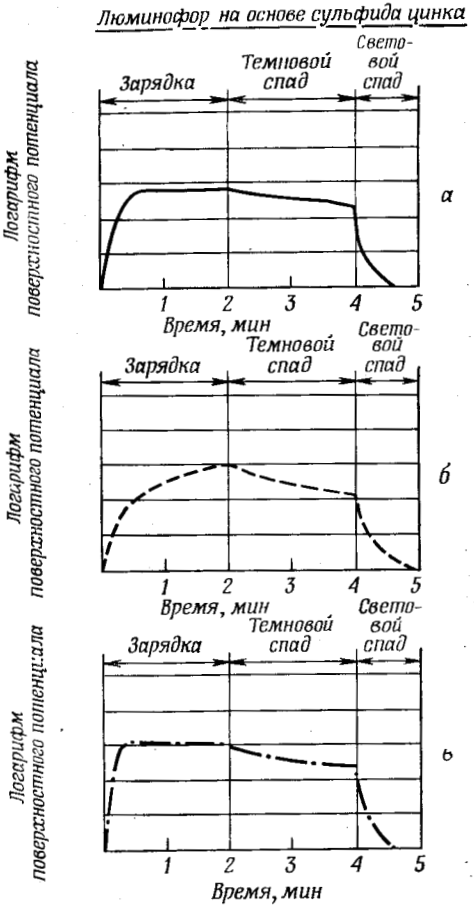


Рис. 40. Сульфид цинка.

а — выдержка в темноте; *б* — после засветки в течение 1 *мин*; *в* — возвращение образца к исходному состоянию после его облучения инфракрасным светом в течение 1 *мин*.

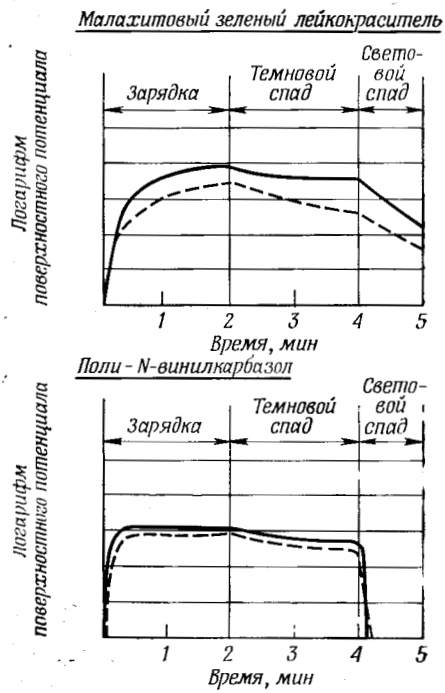


Рис. 41. Образование и спад заряда в двух органических полупроводниках.

——— выдержка в темноте; — — —•— после засветки в течение 1 *мин*. [Cassiers, *J. Photog. Sci.*, **10**, 61 (1962).]

лахитовом зеленом лейкокрасителе (в связующем), и незначительна в полимерных фотопроводниках типа поли-N-винилкарбазол. Было найдено, что в аморфном селене и ромбической сере устойчивая проводимость не проявляется. Испытания Кассирса состоят в следующем: 1) образование на поверхности фотопроводника заряда с помощью коронного разряда в темноте в течение 2 *мин*, 2) наблюдение темнового спада заряда в течение 2 *мин* и 3) экспонирование слоя и наблюдение относительного спада заряда при освещении. Затем слой освещается ртутной лампой типа HP-80 фирмы «Филлипс» в течение 1 *мин* с расстояния 50 *см*, и далее эксперимент повторяется (зарядка и последующее наблюдение темнового спада и спада при освещении). Потенциал поверхностного заряда измерялся электрометром при одновременной регистрации самописцем. Полученные результаты представлены на рис. 38—41.

Кассирс нашел, что при использовании устойчивой проводимости среди всех испытанных материалов слои из окиси цинка обнаруживают наибольшую эффективность. Для случая серы предварительная экспозиция приводит к уменьшению относительного темнового спада вместо его увеличения, как это следует ожидать по методу устойчивой проводимости. Кассирс нашел также, что материалы с устойчивой проводимостью, которую он назвал эффектом памяти, возвращаются к своему первоначальному состоянию после продолжительной выдержки в темноте. Это возвращение к исходному состоянию может быть ускорено путем продолжительной зарядки в коронном разряде с помощью инфракрасной засветки или нагревания.

4.4. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТОЙЧИВОЙ ПРОВОДИМОСТИ

В патенте Эберта [80] описан фоточувствительный слой для получения более или менее длительно сохраняющегося проводящего изображения. Этот процесс он назвал электростатической хемографией, так как в нем участвуют не фотоэлектрические, а скорее фотохимические процессы. Эберт использовал пленки из иодоформа в смоляном связующем, нанесенные на проводящую подложку. Засветка увеличивает проводимость пленки по сравнению с первоначальным состоянием. Проводимость, приобретаемая в этом случае пленкой, является скорее ионной, чем электронной. Эберт использовал эти пленки для многократного копирования, при котором на пленку вначале проецировалось световое изображение, а затем уже она заряжалась в коронном разряде. По существу последовательность операций здесь была

той же самой, что и в ксерографии. Цикл операций можно было повторять для снятия многих копий с одного оригинала.

Кассирс [79] исследовал пленки с постоянной проводимостью, образованные галогенированными углеводородами и диазосоединениями в смоляном связующем. Он назвал эти пленки органическими покрытиями с памятью. Он нашел, что фотоиндуцированная проводимость в этих пленках не восстанавливается до темнового значения при продолжительной коронной зарядке. Он

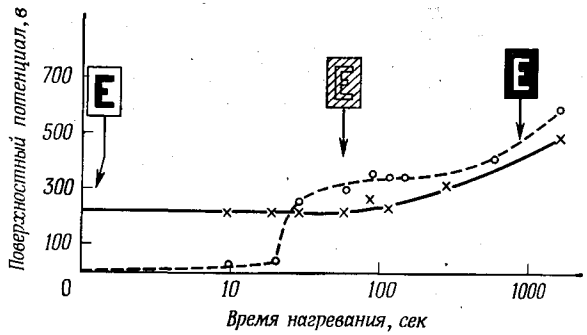


Рис. 42. Обращение изображения в случае пленки органического покрытия с памятью при нагревании до 80° С.

———— заряд сохраняется на неосвещенной поверхности; — — — — заряд увеличивается на освещенной поверхности. [Cassiers, *J. Photog. Sci.*, 10, 63 (1962).]

также нашел, что фотоиндуцированная проводимость не может быть восстановлена нагреванием или облучением видимым или инфракрасным светом. Было обнаружено, однако, что если нагреть пленку, то можно получить обращенное изображение. Этот эффект схематически отображен рис. 42. Кратковременное нагревание уничтожает проводящее изображение, однако продолжительное нагревание уменьшает фотоиндуцированную проводимость до величины, меньшей первоначальной темновой. Таким образом, когда пленка заряжается после нагревания, на освещенных участках остается больший заряд, чем на неосвещенных, что приводит к обращению изображения.

Фоточувствительность этих пленок находится между фоточувствительностями бумаг с диффузным переносом и диазобумаг, причем максимум спектральной чувствительности находится в ультрафиолетовой области.

V. ДРУГИЕ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Успешное развитие ксерографии способствовало тому, что в последние годы сильно возрос интерес к электрофотографическим процессам. Значительно расширился круг ученых, инженеров и изобретателей, работающих в этой области, что, естественно, привело к разработке новых процессов, представляющих собой разновидности электрофотографии. Некоторые из этих процессов существуют лишь в виде первоначальной идеи, ряд других разработан глубже и подкреплен экспериментами.

В данной главе описываются процессы, еще не достигшие такого уровня технологической разработки, при котором становится очевидной возможность их практического применения. Однако при их дальнейшем развитии и усовершенствовании, по всей вероятности, они могут послужить основой для создания новых электрофотографических процессов.

5.1. МЕТОДЫ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЭКСПОНИРОВАНИЕМ И ПРОЯВЛЕНИЕМ

Как известно, первые изобретения в области электрофотографии предназначались для получения проявленных отпечатков при прямом действии фототоков. Таким образом, создание скрытого изображения и его проявление должно было происходить одновременно.

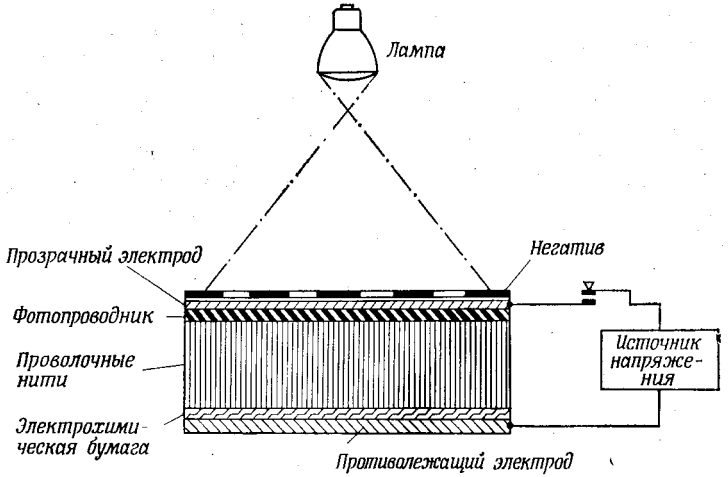
5.1.1. МЕТОД БЕРХТОЛЬДА

Способ активации электрохимической бумаги [1]) с применением фотопроводящего слоя был разработан Берхтольдом [81]. Он использовал систему, состоящую из фотопроводящего слоя, помещенного на пластмассовый лист, сквозь толщу которого проходит множество близко расположенных параллельных металлических проволок. Пластмассовый лист отделяет фотопроводящий слой от листа электрохимической бумаги, которая находится в контакте с концами проволок. Напряжение прикладывалось

[1]) Описание различных видов электрохимической бумаги дано в разд. 9.2, ч. I.

к двум электродам: одному — тонкому прозрачному, покрывающему фотопроводящую поверхность, и другому — металлической пластине, находящейся в контакте с электрохимической бумагой (рис. 43).

В этом устройстве отпечаток получался при подаче напряжения одновременно с началом проецирования изображения. Фототок на освещенных участках фотопроводника протекал



Р и с. 43. Схема получения отпечатков по методу Берхтольда.

по проволочным нитям и через электрохимическую бумагу, в результате чего участки бумаги, соответствующие засвеченным участкам фотопроводника, окрашивались.

Таким способом, используя фотопроводящий слой из кристаллического селена и применяя контактное копирование через диапозитив, Берхтольд смог получить в лабораторных условиях несколько отпечатков. Необходимое время экспонирования при освещенности 600 *лк* составляло 60 *сек*, что для контактного копирования является довольно большой величиной. Используя более эффективные фотопроводники, можно увеличить чувствительность процесса примерно в 100 раз. Однако для создания такой копировальной системы с проекционной оптикой потребуется увеличение чувствительности не менее чем в 1000 раз.

5.1.2. МЕТОД ДЖЕКОБСА — ФРЕРИХСА

Джекобс и Фрерихс [82] предложили метод, аналогичный методу, разработанному Берхтольдом. Основное отличие их метода состоит в том, что прохождение тока через слои обеспечи-

вается сотообразной структурой, составленной из вытянутых фотопроводящих кристаллов. Каждый кристаллический элемент отделяется от других элементов тонкими прослойками из электроизоляционного материала. В остальном используется тот же принцип, что и в методе Берхтольда.

5.1.3. ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ФОТОГРАФИЯ

В работе [83] описан электрофотографический процесс, сходный в некоторых отношениях с процессами Берхтольда и Джекобса — Фрерихса. Данный метод отличается тем, что здесь продукт электролиза образует скрытое изображение, состоящее из ядер — катализаторов, обладающих способностью инициировать реакцию химического проявления в соседнем слое, что приводит к образованию видимого изображения. Скрытое изображение возникает в результате комбинированного действия света и электрического поля. Центры проявления образуются на поверхности контрэлектрода (катода), находящейся в контакте со слоем-реагентом. Электролиз, протекающий в слое-реагенте, приводит к образованию негативного скрытого изображения. После экспонирования при замкнутой электрической цепи слой-реагент с негативным изображением накладывают на слой, воспринимающий изображение. Между этими слоями помещают проявитель. После проявления непрореагировавшие цветные реагенты диффундируют в слой, воспринимающий изображение, образуя позитивный отпечаток.

Аналогичные электрокаталитические процессы были предложены в работе [84].

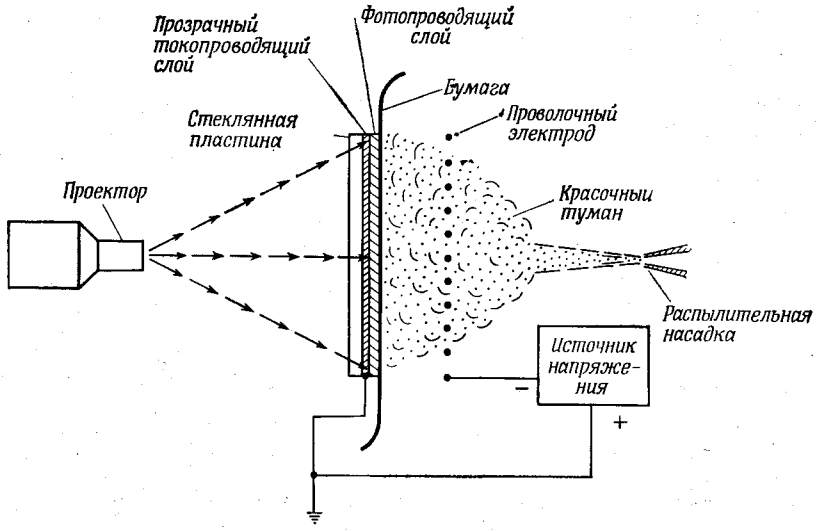
5.1.4. ПЕЧАТАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО «СМОУК ПРИНТЕР»

В работе [85] сообщается о создании экспериментальной электрофотографической машины, получившей названия «Фотроник репродьюсер» и «Смоук принтер». В этой машине при проецировании изображения с микрофильма на фотопроводящую пластину образуется электрическое изображение; одновременно производится проявление изображения ионизованной красочной пылью.

Схема описываемого устройства представлена на рис. 44. Изображение проецируют через стеклянную пластину и прозрачную токопроводящую пленку на фотопроводящий слой. Одновременно к электроду, имеющему вид проволочной сетки, подключают отрицательный полюс источника высокого напряжения. Положительный полюс источника подсоединен к прозрачной токо-

проводящей пленке и заземлен. В пространстве между коронирующим элементом и бумагой распыляется краска. Частицы краски ионизуются в электрическом поле и движутся по направлению к бумаге, где происходит осаждение частиц на те участки бумаги, которые соответствуют освещенным участкам фотопроводящего слоя.

Свет, формирующий изображение, проникая в участки фотопроводящего слоя, повышает их проводимость. Проводимость



Р и с. 44. Принципиальная схема устройства «Смоук принтер».

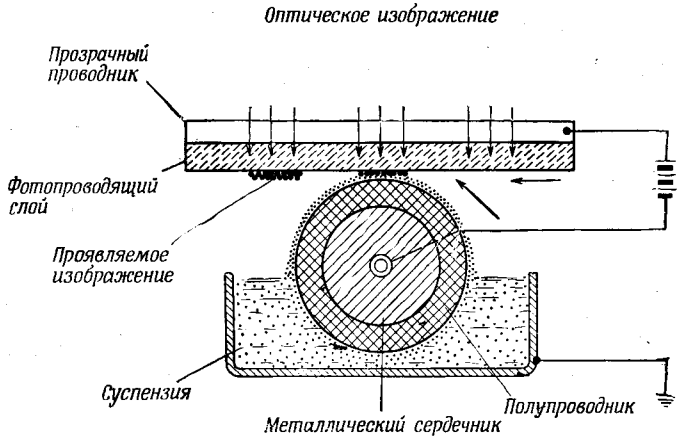
неосвещенных участков по сравнению с освещенными оказывается при этом более низкой. Поэтому, когда к проволочной сетке и прозрачной токопроводящей пленке прикладывается высокое напряжение, поток ионов направляется преимущественно к освещенным участкам пластины. Частицы краски, оказавшиеся в зоне потока ионов, ионизуются при столкновениях и начинают двигаться к пластине. Попадая на лист бумаги, наложенный на поверхность фотопроводящего слоя, частицы остаются на бумажной поверхности.

Одновременное экспонирование, проявление и фиксирование позволяют проводить весь процесс в один прием. Однако разработка этого метода не пошла дальше создания экспериментальной модели.

5.1.5. СПОСОБ «ДЖЕНЕРАЛ ДАЙНАМИКС»

Этот способ, близкий к способу «Смоук принтер», описан в работе [90]. Основное отличие этого способа состоит в том, что вместо красочной пыли используется жидкий проявляющий состав.

Схема устройства, работающего по этому принципу, показана на рис. 45. Фотопроводящий слой изолятора помещен на прозрачную токопроводящую подложку. Жидкий проявляющий состав наносят на поверхность фотопроводника при помощи металлического валика с полупроводниковым покрытием. Одновременно



Р и с. 45. Система одновременного экспонирования и проявления жидким проявляющим составом.

с экспонированием создают разность потенциалов между прозрачным проводником и металлическим сердечником валика. Вследствие фотопроводимости засвечиваемых участков разность потенциалов между поверхностями фотопроводника и полупроводника увеличивается, частицы проявителя вырываются из слоя жидкости и переносятся на фотопроводящую поверхность. В незасвеченных участках разность потенциалов между этими поверхностями будет недостаточна для притягивания частиц из слоя жидкости к фотопроводящему слою. Отпечаток может быть получен путем переноса проявленного изображения на бумагу.

5.2. СПОСОБЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОПРОВОДЯЩИХ ПОРОШКОВ

В патентной литературе имеется описание двух способов, в которых вместо твердых фотопроводящих слоев используют фотопроводники в виде порошка.

«Электрофотографический блок», состоящий из бронзового верхнего и прозрачного нижнего электродов из токопроводящего стекла, разделенных зазором ~3 *мм*, описан в [91]. По верхней плоскости прозрачного электрода равномерно распределяется слой фотопроводящего проявляющего порошка, например иодистого свинца (рис. 46). Затем к электродам прикладывают напряжение. Когда на слой фотопроводящего порошка проецируется изображение, частицы порошка, находящиеся на освещенных

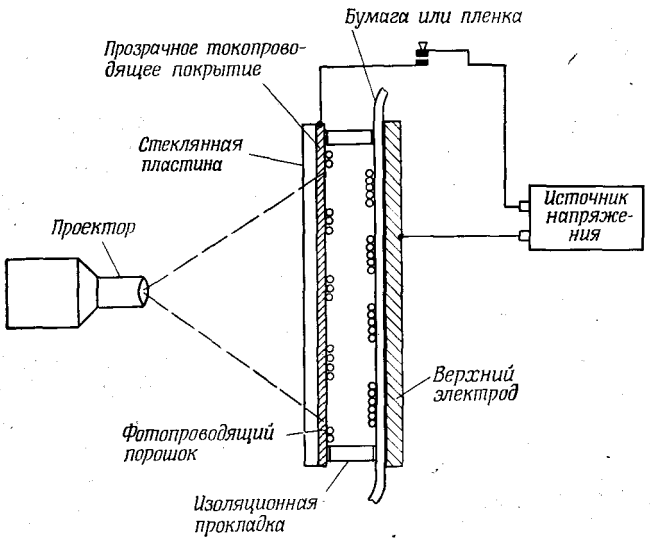


Рис. 46. Электрофотография на фотопроводящем порошке.

участках, заряжаются и отрываются от нижнего электрода. Порошок, оставшийся на нижнем электроде, создает видимое изображение. Отделившиеся частицы порошка могут быть осаждены на лист бумаги или на пленку, помещенную между электродами; при этом образуется второе видимое изображение. Если изображение, оставшееся на нижнем электроде, представляет собой позитив, то изображение на бумаге (пленке) будет негативным и наоборот.

Материалом, создающим изображение на готовом отпечатке, служит фотопроводящий порошок. Для увеличения контрастности изображения в порошок можно ввести краситель.

В работе [92] описано печатающее устройство в виде вращающегося барабана, используемое для печатания изображений фотопроводящей краской.

5.3. ЭЛЕКТРОТЕРМОГРАФИЯ

Способ получения электростатического изображения, в основе которого лежит процесс рассасывания поверхностных зарядов при нагревании, описан в работе [93]. Материалом, чувствительным к нагреву, может служить обычный слой смолы (например, полиэтилена) на бумажной подложке. Эффект рассасывания зарядов объясняется тем, что при повышении температуры удельное сопротивление смол уменьшается (рис. 47). Отметим, что, начиная с температуры ~58° С, наблюдается резкое падение удельного сопротивления. Таким образом, если поверхность

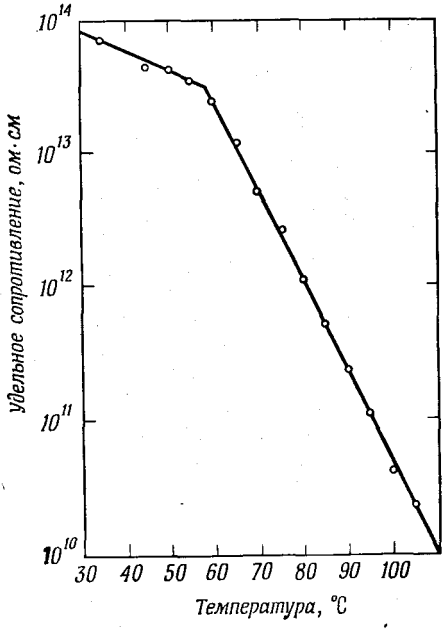


Рис. 47. Зависимость удельного сопротивления от температуры для слоя полиэтилена на бумаге.

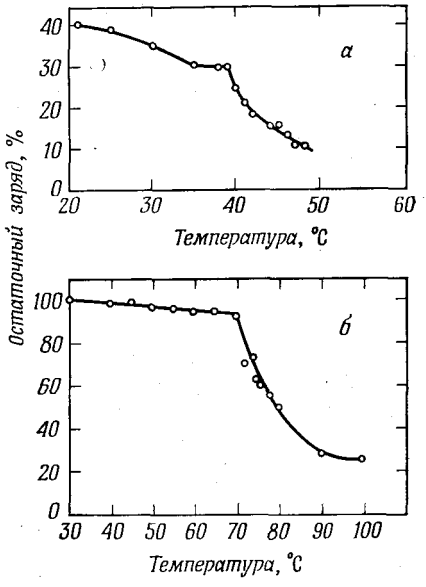
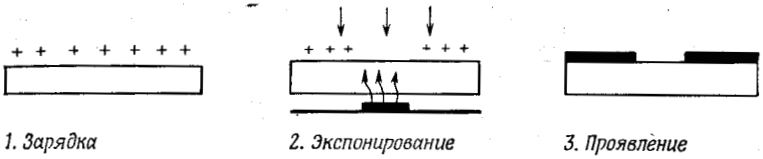


Рис. 48. Зависимость от температуры остаточного заряда через 1 *мин* после зарядки.

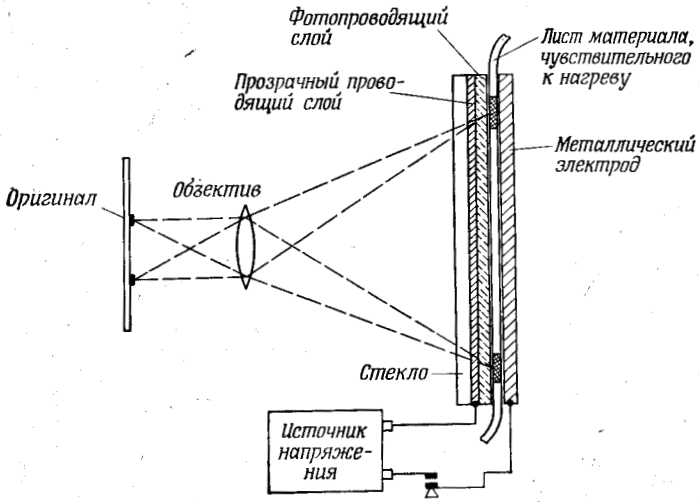
а — полиэтилен на бумаге; *б* — пленка ацетатцеллюлозы.

смолы зарядить в коронном разряде, а затем нагреть до температуры, при которой ее удельное сопротивление мало, то произойдет быстрый спад поверхностного заряда (рис. 48).

Схема использования этого явления в технике копирования документов представлена на рис. 49. Бумага, покрытая слоем смолы, заряжается, накладывается на поверхность копируемого документа и экспонируется источником интенсивного инфракрас-



Р и с. 49. Этапы получения изображения в электротермографии.



Р и с. 50. Фотоэлектрическая термография.

ного излучения. Проникновение инфракрасных лучей в оригинал приводит к нагреванию участков, покрытых краской. Смола в этих участках также нагревается и теряет поверхностный заряд. Затем копию на бумаге со слоем смолы проявляют так же, как в электрофотографии. Обычно после проявления получается негативное изображение, однако, применяя метод проявления с обращением, можно получить позитивную копию.

По контрастности получаемого изображения электротермографический способ сравним с электрофотографией, но разрешающая способность, обеспечиваемая этим способом, по имеющимся сведениям сравнительно низка.

5.4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕРМОГРАФИЯ

В работе [94] предложен электрофотографический способ, в котором тепло, выделяемое фототоком, используется для создания цветного изображения в материале, чувствительном к изменению температуры.

Схема установки для печатания этим способом показана на рис. 50. Светочувствительная пластина состоит из фотопроводящего слоя, осажденного на стеклянную пластину с проводящим покрытием. Между фотопроводящим слоем и металлическим электродом помещен лист материала, чувствительного к изменению температуры. Одновременно с проецированием изображения на фотопроводящий слой между проводящим покрытием и металлическим электродом создается разность потенциалов. Фототок, протекающий в освещенных участках, вызывает их нагрев, достаточный для того, чтобы произошло потемнение или окрашивание чувствительного к изменению температуры материала.

В качестве фотопроводника можно использовать, например, сульфид кадмия, а в качестве материала, чувствительного к нагреву,— бумагу, пропитанную или покрытую лейкорозанилинхлоргидратом.

VI. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Исследования и изобретения в области ксерографии и электростатической печати открыли некоторые интересные свойства фотопроводящих материалов, а также интересные возможности использования электростатических изображений, не укладывающиеся в рамки тех технологических процессов, которые обычно применяются при изготовлении фотокопий. Можно предположить, что некоторые из этих свойств могут, с одной стороны, расширить область применения и возможности использования электрофотографических процессов, а с другой — обеспечить развитие новых направлений исследований в будущем.

6.1. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ В КСЕРОГРАФИИ

Основными стадиями ксерографического процесса являются очувствление, экспонирование, проявление, перенос, закрепление и очистка (рис. 1). Эти стадии необходимы в тех случаях, когда фотопроводящая поверхность должна быть повторно использована в печатном процессе. Если же используется электрофотографическая бумага (как, например, в процессе «электрофакс»), то стадии переноса и очистки, естественно, отпадают.

При повторном использовании таких фотопроводящих материалов, как аморфный селен, можно добиться улучшения процесса введением некоторых вспомогательных технологических операций. В первую очередь к таким операциям относятся изменение полярности зарядки пластины и дополнительное освещение.

6.1.1. ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛЯРНОСТИ ЗАРЯДКИ ПЛАСТИНЫ

В ксерографическом процессе на селеновых пластинах или барабанах для очувствления используется положительный заряд, и образованное изображение состоит из распределения положительных поверхностных зарядов. Экспериментальные данные

показывают, что можно получить некоторые полезные результаты путем введения зарядов обратной полярности (т. е. отрицательной зарядки) перед переносом, очисткой или очувствлением.

При проявлении отрицательно заряженный проявитель притягивается к положительно заряженному изображению. Положительный заряд, нанесенный на бумагу при переносе, преодолевает притяжение верхних слоев проявителя к электрофотослою, и они переносятся на бумагу. Однако слои проявителя, лежащие ближе к селеновой пластине, удерживаются ею сильнее и на бумагу не переносятся. Если на проявитель непосредственно перед переносом нанести дополнительный отрицательный заряд, то будет перенесено большее количество проявителя.

Это обеспечит получение более плотного изображения, чем то, которое обычно получается на отпечатках, и может дать некоторые преимущества, например при переносе на кальку с последующим диазокопированием.

Обычно после электростатического переноса нижние слои порошкового изображения остаются на селеновой пластине и перед повторным использованием пластины должны быть удалены с ее поверхности. Было установлено, что нанесение отрицательного заряда на поверхность селеновой пластины непосредственно перед операцией очистки поверхности способствует ее улучшению, так как проявитель в этом случае удаляется легче [95].

Нанесение зарядов противоположной полярности непосредственно перед повторным очувствлением пластины способствует уменьшению «усталости» электрофотослоя [96].

В обычном ксерографическом процессе, как правило, нет необходимости в этих дополнительных операциях зарядки. Применение их требует особой тщательности. Слишком большая величина заряда другой полярности может неблагоприятно сказаться на качестве изображения, а сильная перезарядка даже может повредить фотопроводящий слой.

6.1.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

В ряде случаев может быть полезным освещение фотопроводящей поверхности интенсивным световым потоком на различных стадиях ксерографического процесса. Наиболее частым случаем использования этой вспомогательной операции является облучение перед очувствлением. При этом интенсивный световой поток удаляет все остатки старого электростатического изображения, а также и посторонние заряды, приобретенные в процессах переноса и очистки.

Засветка фотопроводящей поверхности инфракрасным светом непосредственно перед операцией очувствления может способствовать уменьшению «усталости» электрофотослоя. Однако экспозицию нужно тщательно контролировать, чтобы исключить перегрев поверхности. В случае применения селена перегрев может повредить пластину, так как приведет к кристаллизации аморфного селена. Экспонирование селеновых пластин при их освещении светом инфракрасных ламп перед повторным использованием—стандартная операция ксерорентгенографии. После облучения пластина немедленно охлаждается сильной струей воздуха.

Экспонирование поверхности пластины непосредственно перед операцией очистки может также облегчить удаление проявителя. Несмотря на то что частицы проявителя обычно непрозрачны, некоторое количество рассеянного света все же проникает под частицы проявителя и частично разряжает электрофотослой. Для проявителей с прозрачными частицами, пропускающими свет, применение операции дополнительного экспонирования, естественно, более эффективно.

6.2. ПЕРЕНОС СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В КСЕРОГРАФИИ (TESI-ПРОЦЕСС)

В ксерографии скрытое изображение состоит из поверхностных электростатических зарядов. Уолкап [97] обнаружил, что изображения, образованные поверхностными зарядами, могут быть перенесены на диэлектрические поверхности или воспроизведены на них. Соответствующие способы осуществления переноса заряда получили название «TESI-процессов» (сокращение от английского названия «Transfer Electrostatic Image»— перенос электростатических изображений). Таким образом, ксерография является первым фотографическим процессом, в котором скрытое изображение до проявления может быть воспроизведено на других поверхностях.

Материалы, на которые переносится электростатическое изображение, должны обладать способностью сохранять изображение, т. е. должны являться хорошими изоляторами. Примером могут служить такие пластмассы, как майлар, полистирол и полиэтилен. Электростатические изображения могут быть также перенесены на бумагу с диэлектрическим покрытием.

Для проявления перенесенного изображения могут быть применены те же методы, которые используют для проявления электростатических изображений, образованных непосредственно на фотопроводящих слоях. Ввиду того что на диэлектрической поверхности заряд под действием света не исчезает, нет необходимости защищать от света изображение во время проявления.

Перенос скрытого электростатического изображения можно осуществлять несколькими способами. Некоторые из них описаны ниже. Большое количество способов, дающих тождественные результаты, предлагается лишь в порядке обсуждения. Процессы переноса электростатических изображений можно разделить на два класса:

1. Процессы, в которых электростатическое изображение сначала образуется на поверхности фотопроводящего слоя, такого, например, как ксерографическая пластина, и затем переносится на диэлектрическую поверхность.

2. Процессы, в которых электростатическое изображение образуется в период, когда диэлектрическая пленка находится в контакте с электрофотографической пластиной.

Ниже описаны различные способы переноса электростатического изображения. На некоторых рисунках, иллюстрирующих эти способы, контактирующие поверхности разделены воздушным зазором. Это следует понимать так, что воздушный зазор может быть очень мал и существовать даже тогда, когда поверхности фактически находятся в контакте. Все процессы переноса электростатических изображений требуют осуществления механической операции приведения двух поверхностей в контакт и их последующего разделения. Одна поверхность, на которую переносится электростатическое изображение, является диэлектриком, другая — носителем изображения, на котором оно формируется.

Приведенные ниже описания методов переноса электростатического изображения и иллюстрирующие их рисунки представлены прежде всего для того, чтобы в упрощенной форме показать основные стадии процессов. Поэтому описания ограничены случаем переноса заряда между плоскими поверхностями. В реальных случаях изображение может быть перенесено и с поверхности барабана.

6.3. ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

6.3.1. ПЕРВЫЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

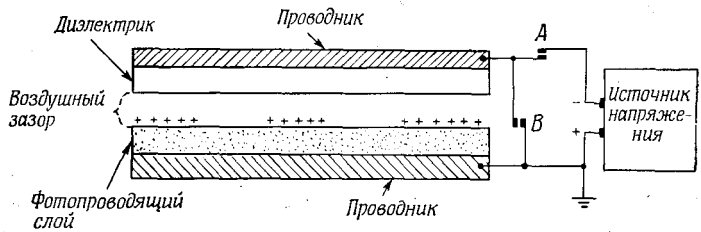
Этот оригинальный способ предложен Уолкапом [97]. Основные элементы, используемые в соответствующем процессе, показаны на рис. 51. Процесс осуществляется следующим образом:

1. Электростатическое изображение образуется на ксерографической пластине обычными методами. В случае когда пластина представляет собой аморфный селен, полярность заряда изобра-

жения должна быть положительной. На рис. 51 изображение показано знаками «плюс».

2. Диэлектрическая пленка, покрытая с одной стороны проводящим материалом, приводится в контакт с поверхностью пластины (примером диэлектрической пленки, которая может быть использована в таком случае, является майлар, алюминизированный с одной стороны).

3. Затем замыкают ключ *A* (рис. 51) так, что к проводящему покрытию диэлектрической пленки прикладывается отрицательное напряжение. Напряжение, действующее между двумя электродами, может быть порядка 1000—2000 *в*.



Р и с. 51. Схема переноса электростатического изображения по первому способу.

4. Затем поверхности отделяют друг от друга, причем во время разделения поддерживают напряжение между электродами. При достижении критического напряжения, непосредственно перед пробоем воздушного промежутка, в области изображения через зазор потечет разрядный ток. В ходе этого процесса на поверхности диэлектрика образуется положительно заряженное изображение, которое будет зеркальным по отношению к исходному электростатическому изображению.

5. После того как поверхности разделены, ключ *A* размыкают, а ключ *B* замыкают, так что проводящая подложка разряжается до потенциала земли.

Вполне очевидно, что подобным же образом могут быть перенесены отрицательно заряженные электростатические изображения. Но при этом полярность напряжения, прикладываемого между проводящей основой диэлектрика и электрофотографической пластиной, должна быть изменена на обратную.

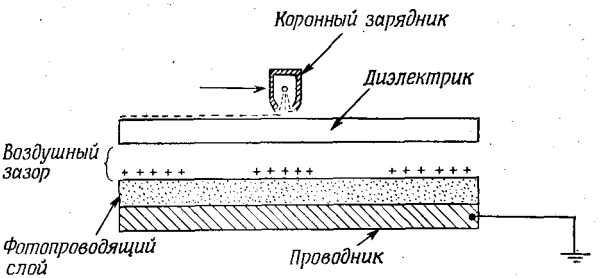
Следует отметить, что, поскольку приложенное напряжение в процессе разделения двух поверхностей остается постоянным, напряженность поля в воздушном зазоре будет уменьшаться по мере увеличения зазора.

Вариант этого способа описан в патенте, заявленном Фотлендом и Маурером [98]. В этом варианте воздушный зазор запол-

няется диэлектрической жидкостью, которая в виде пленки наносится на ксерографическую пластину. Авторы утверждают, что при этом перенесенное изображение имеет более высокое разрешение.

6.3.2. ВТОРОЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот способ описан Карлсоном и Богдоновым [99] и может отчасти рассматриваться как вариант первого способа. Основные отличия его от первого способа сводятся к тому, что может быть



Р и с. 52. Схема переноса электростатического изображения по второму способу.

использована диэлектрическая пленка без проводящей подложки и потенциал сообщается диэлектрику от коронного зарядника. Процесс, показанный схематически на рис. 52, состоит из следующих стадий:

1. Электростатическое изображение создают на ксерографической пластине так же, как и в первом способе.
2. На фотопроводящий слой помещают диэлектрическую пленку.
3. На поверхность диэлектрика коронным зарядником наносят отрицательный заряд.
4. Затем поверхности отделяют друг от друга, и, когда величина воздушного зазора приближается к критической, в области изображения происходит электрический пробой, сопровождающийся переносом заряда.
5. После разделения отрицательный заряд может быть удален с верхней поверхности диэлектрика путем осаждения зарядов противоположной полярности или протиранием этой поверхности влажной тканью.

Этим способом получают изображение того же типа, что и в первом способе, т. е. положительно заряженное позитивное зеркальное отображение того изображения, которое имелось на фотопроводящей поверхности.

Так как заряд, сообщенный верхней поверхности диэлектрика, во время разделения поверхностей остается постоянным, создаваемое этим зарядом в воздушном зазоре поле, по существу, также остается постоянным. Именно это является основным различием между первым и вторым способами.

6.3.3. ТРЕТИЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот способ позволяет обращать изображение, т. е. получать позитивное изображение из негативного, и наоборот.

Метод, демонстрировавшийся в лаборатории «Интернейшенел бизнес мэшинз» (Сан-Жозе, шт. Калифорния), иллюстрирует

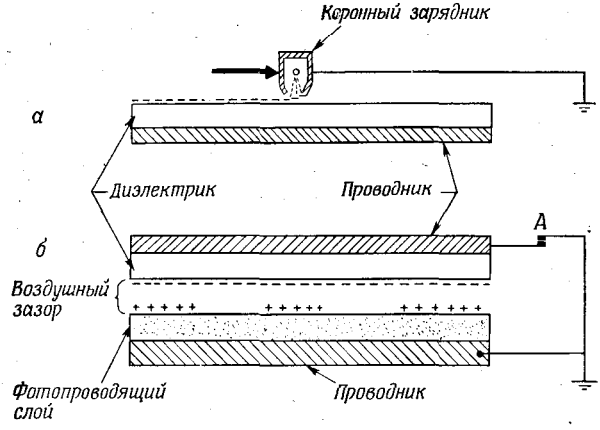


Рис. 53. Схема переноса электростатического изображения по третьему способу.

схема, приведенная на рис. 53. Он подразделяется на следующие стадии:

1. На ксерографической пластине обычным способом создают электростатическое изображение. В данном случае изображение на фотопроводящей поверхности заряжено положительно.

2. Диэлектрическую пленку с проводящей основой равномерно заряжают отрицательными зарядами при помощи коронного зарядника (рис. 53, *а*).

3. Заряженную диэлектрическую пленку переворачивают и располагают на поверхности пластины поверх электростатического изображения (рис. 53, *б*).

4. Затем замыкают ключ *А*, заземляя оба электрода. Так как разность потенциалов между двумя проводящими подложками теперь равна нулю, напряжение в воздушном зазоре в области изображения будет определяться потенциалами положительно заряженного изображения и отрицательно заряженного диэлектрика.

5. Затем поверхности отделяют друг от друга, и во время их разделения происходит перенос изображения. Перенесенный положительный заряд нейтрализует отрицательный заряд на тех участках поверхности диэлектрика, которые примыкают к электростатическому изображению. Таким образом, электростатическое изображение на диэлектрике состоит из нейтрализованных участков, расположенных на отрицательно заряженном фоне. Если это изображение проявляется положительно заряженным проявителем, то получается обращенное изображение оригинала. При соответствующем выборе прикладываемого напряжения, заряда изображения и заряда на диэлектрике можно получить изображение одной полярности и окружающий его фон противоположной полярности.

Очевидно, этот метод может быть применен и для переноса отрицательно заряженных электростатических изображений. В данном случае диэлектрическая пленка должна быть заряжена положительными зарядами.

6.3.4. ЧЕТВЕРТЫЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Другой подход к созданию электростатических изображений на диэлектрических пленках описан в работе [100]. Этот способ в принципе отличается от описанных выше способов тем, что он не является в строгом смысле процессом переноса заряда. Изображение репродуцируется здесь в виде системы зарядов на наружной поверхности диэлектрической пленки. На рис. 54, *а* схематически показаны основные элементы процесса, состоящего из следующих стадий:

1. Сначала на ксерографической пластине образуют положительно заряженное электростатическое изображение.

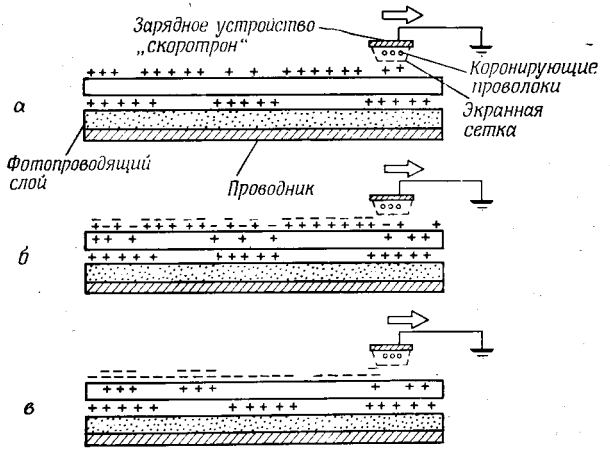
2. Затем диэлектрическую пленку приводят в тесный контакт с поверхностью пластины.

3. После этого коронным зарядником сообщают положительный заряд внешней стороне диэлектрической пленки. На рис. 54, *а* показано зарядное устройство «скоротрон»; устройства такого

типа, по-видимому, являются наиболее подходящими для данного процесса.

4. После этого диэлектрическую пленку отделяют от ксерографической пластины.

Образованное на диэлектрической пленке изображение будет состоять из участков с обедненным зарядом, окруженных равномерным фоном положительных зарядов. Это объясняется следующим образом: электростатическое изображение на фотопроводящей поверхности создает на верхней стороне диэлектрика положительный потенциал, меньший по величине, чем потенциал



Р и с. 54. Схема переноса электростатического изображения по четвертому способу.

изображения на фотопроводящей поверхности. Если «скоротрон» отрегулирован таким образом, что он сообщает всем участкам поверхности диэлектрика одинаковый потенциал, то над изображением будет осаждаться меньший заряд. Достоинством зарядки с использованием «скоротрона» является то, что он позволяет получить на всех участках поверхности одинаковый потенциал, а не однородную плотность заряда. Величину этого потенциала можно регулировать, изменяя напряжение смещения экранирующей сетки.

Предложены два варианта этого способа. Оба они схематически показаны на рис. 54, *б* и 54, *в*. Все стадии процесса на рис. 54, *б* те же, что и на рис. 54, *а*, за исключением того, что сразу же после зарядки положительным зарядом следует зарядка отрицательным зарядом, обеспечивающая на всей поверхности одинаковый потенциал, который достаточен для нейтрализации

положительных зарядов на участках фона. Таким образом, после отделения диэлектрической пленки от поверхности пластины изображение будет состоять из отрицательно заряженных участков на нейтральном фоне.

Стадии процесса на рис. 54, *в* также совпадают с соответствующими стадиями процесса, отраженного на рис. 54, *а*; исключением является лишь то, что вместо положительных зарядов здесь используют отрицательные заряды. При этом участки изображения имеют бóльшую, чем на окружающем фоне, плотность отрицательного заряда.

6.4. ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА, ВКЛЮЧАЮЩИЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Электростатическое изображение на диэлектрической поверхности, находящейся в контакте с ксерографической пластиной, может быть получено несколькими способами. Проецирование изображения производят либо через пленку диэлектрика с прозрачной проводящей основой, либо через подложку ксерографической пластины, если последняя прозрачна. Во время экспонирования между диэлектриком и ксерографической пластиной создается электрическое поле. Ниже описаны известные автору способы.

6.4.1. ПЯТЫЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот способ описан в патенте, выданном Уолкапу [101]. Один из вариантов способа схематично отражен на рис. 55. Процесс состоит из следующих стадий:

1. Прозрачную диэлектрическую пленку с прозрачной проводящей основой помещают поверх ксерографической пластины так, чтобы диэлектрическая поверхность была в контакте с поверхностью пластины.

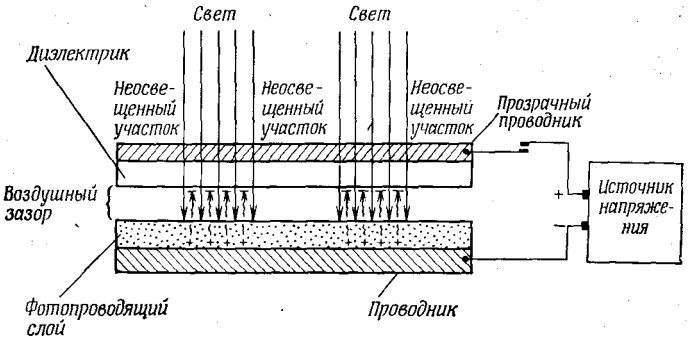
2. Между прозрачной проводящей основой диэлектрика и проводящей основой пластины поддерживают напряжение в несколько тысяч вольт. Одновременно на поверхность пластины проецируется оптическое изображение.

3. После короткого экспонирования и включения электрического напряжения свет выключают. Затем, не снижая электрического напряжения, диэлектрическую пленку отделяют от фотопроводящей поверхности.

Образованное таким путем на диэлектрической пленке изображение состоит из нейтральных участков, соответствующих неосвещенным местам, и зарядов на освещавшихся участках поверх-

ности. Понятно, что в зависимости от полярности прикладываемого напряжения получаемые на диэлектрической пленке заряды могут быть как положительными, так и отрицательными.

Если в качестве подложки применяют прозрачный проводник, например стекло с проводящим покрытием, то оптическое изображение проецируют непосредственно через эту подложку.



Р и с. 55. Схема переноса электростатического изображения по пятому способу.

В описываемом способе фотопроводящий материал не обязательно должен быть хорошим изолятором в темноте, поэтому можно использовать некоторые более высокочувствительные, но менее высокоомные фотопроводники.

6.4.2. ШЕСТОЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот способ описан в патенте, выданном Дрейфусу и др. [100]. Один из вариантов способа схематически отражен на рис. 56. Процесс состоит из следующих стадий:

1. Диэлектрическую пленку помещают на поверхность ксерографической пластины и заряжают (в данном примере положительным зарядом) так, чтобы по всей поверхности она имела одинаковый потенциал.

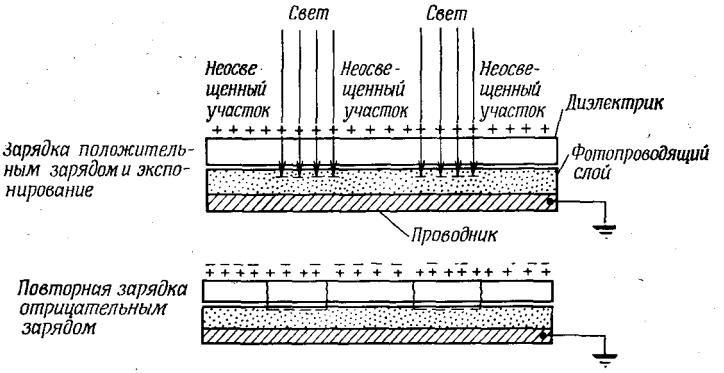
2. Затем на пластину через диэлектрическую пленку проецируют оптическое изображение.

3. После экспонирования поверхность диэлектрика заряжают отрицательным зарядом также до одинакового для всех участков поверхности потенциала.

4. Затем диэлектрическую пленку удаляют с ксерографической пластины.

В таком случае образованное на диэлектрике изображение будет состоять из положительных зарядов на тех участках, где фотопроводящий материал освещался светом, и нейтральных участков на остальных частях поверхности.

После экспонирования фотопроводящий материал станет проводящим и отрицательные заряды будут скапливаться на верхней поверхности фотопроводника, а положительные заряды будут



Р и с. 56. Схема переноса электростатического изображения по шестому способу.

отведены через подложку (рис. 56). Это уменьшает положительный потенциал на верхней поверхности диэлектрика и при последующей отрицательной зарядке диэлектрической поверхности приведет к меньшей нейтрализации положительных зарядов на освещенных участках. В результате на этих участках окажется положительный заряд.

6.4.3. СЕДЬМОЙ СПОСОБ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот способ подобен третьему способу (рис. 55). Его можно рассматривать как комбинацию третьего и пятого способов. Он включает следующие стадии, схематически отраженные на рис. 57:

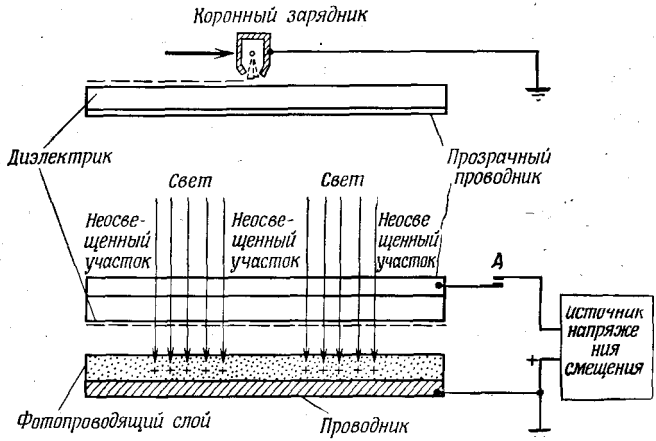
1. Прозрачная диэлектрическая пленка с прозрачной проводящей основой при помощи коронного зарядного устройства заряжается отрицательными зарядами.

2. Затем эта диэлектрическая пленка помещается поверх ксерографической пластины заряженной стороной вниз.

3. Ключ A (рис. 57) после этого замыкают и одновременно на поверхность пластины через диэлектрическую пленку проецируют изображение.

4. После экспонирования диэлектрическая пленка удаляется с фотопроводящей поверхности, и при этом ключ A остается замкнутым.

Образованное на диэлектрике изображение будет представлять собой отрицательно заряженные участки, окруженные более или менее нейтральным фоном, так как в этом процессе с освещенных участков происходит перенос зарядов. Во время экспонирования фотопроводник становится поляризованным



Р и с. 57. Схема переноса электростатического изображения по седьмому способу.

и примыкающая к диэлектрику поверхность становится положительно заряженной. На освещенных участках это увеличивает поле в воздушном зазоре, и перенос заряда приводит к нейтрализации зарядов на поверхности диэлектрика.

Для повышения напряженности поля в воздушном зазоре между проводящими основами включен источник напряжения (рис. 57), однако в нем нет необходимости, если напряженность поля, образованного отрицательным зарядом, велика. В этом случае нужно лишь просто электрически соединить обе проводящие основы между собой.

6.5. ПРЯМОЙ ПЕРЕНОС ПОВЕРХНОСТНЫХ ЗАРЯДОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Автор и Р. Мелин установили, что можно достичь прямого переноса поверхностных зарядов с одной поверхности на другую, если обеспечить хороший контакт между ними. Для получения такого контакта необходимо устранить воздушный зазор, что

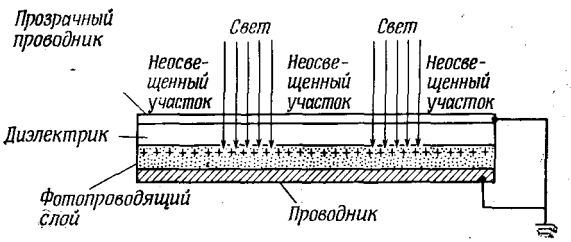
обычно достигают увеличением давления. Процесс состоит из следующих стадий:

1. Поверхности фотопроводящего изолятора, такого, как аморфный селен, сообщают однородный заряд.

2. Как показано на рис. 58, используя давление, лист прозрачного диэлектрика с прозрачной проводящей основой приводят в контакт с фотопроводящим материалом.

3. Затем проводящие основы двух слоев электрически соединяют друг с другом и на фотопроводник проецируют изображение через прозрачный диэлектрик.

4. По окончании экспонирования лист диэлектрика удаляют.



Р и с. 58. Устройство для прямого переноса электростатических изображений.

После разделения поверхностей на каждой из них будет присутствовать электростатическое изображение, причем эти изображения зеркальны одно по отношению к другому. Поверхностные заряды будут разделены таким образом, что напряжения на листе диэлектрика и на фотопроводящем слое сохраняются равными.

Фактически поверхностный заряд до приведения поверхностей в контакт может быть нанесен либо на диэлектрическую поверхность, либо на поверхность фотопроводника, либо на обе поверхности одновременно.

Если фотопроводящий слой нанесен на прозрачную проводящую подложку, то этим способом можно образовать электростатическое изображение на непрозрачном диэлектрическом материале. В этом случае экспозиция должна осуществляться через прозрачную подложку.

В другом варианте заряженный фотопроводящий слой можно экспонировать до того, как поверхности приведены в контакт. В этом случае заряд сообщают только фотопроводящей поверхности.

Этот способ позволяет сохранить очень высокое разрешение электростатического изображения, так как перенос изображения осуществляется при хорошем контакте поверхностей и деформация элементов изображения сводится к минимуму.

VII. ЦВЕТНАЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЯ

Успехи черно-белой электрофотографии способствовали возникновению интереса к цветной электрофотографии. Широкое же применение цвета в графическом искусстве заставляет искать новые методы и новую технологию цветной репродукции. Поэтому не удивительно, что цветной электрофотографии в настоящее время уделяется большое внимание. Была доказана возможность применения цветной ксерографии для печати штриховых оригиналов [102, 103]. Воспроизведение цветных тоновых [104] и растровых [105] оригиналов методом ксерографии успешно осуществляется в некоторых лабораториях.

Природа электрического изображения предполагает много интересных возможностей репродуцирования цвета.

Проявление электростатического изображения в ксерографии осуществляется обычно осаждением частиц проявителя на поверхность изображения. Эти частицы могут быть окрашены в требуемый цвет в процессе изготовления проявителя.

Процессы цветного проявления в ксерографии значительно проще процессов цветной фотографии. Проявление ведется каскадным способом или способом магнитной кисти. Проявитель содержит пигменты, диспергированные в смолах. Они составляют незначительную часть порошка и не оказывают заметного влияния на электрические свойства частиц. Поэтому выбор цветов довольно широк.

В жидком проявителе заряд дисперсных частиц зависит от введенных пигментов. Однако знак их заряда можно контролировать путем добавления поверхностноактивных веществ [69]. Следовательно, при жидкостном проявлении также имеется возможность широкого выбора цветов.

Аэрозольное проявление накладывает некоторые ограничения на размеры частиц материала, так как заряды, приобретаемые частицами, в некоторой мере определяются материалом пигмента, а величина и полярность заряда трудно контролируются. Однако даже при этом способе проявления возможен довольно широкий выбор цветов.

Так как электростатическое изображение можно проявлять различными цветами, то для цветной печати и цветной фотографии применимы принципы ксерографии.

7.1. ПРОЦЕССЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЯ

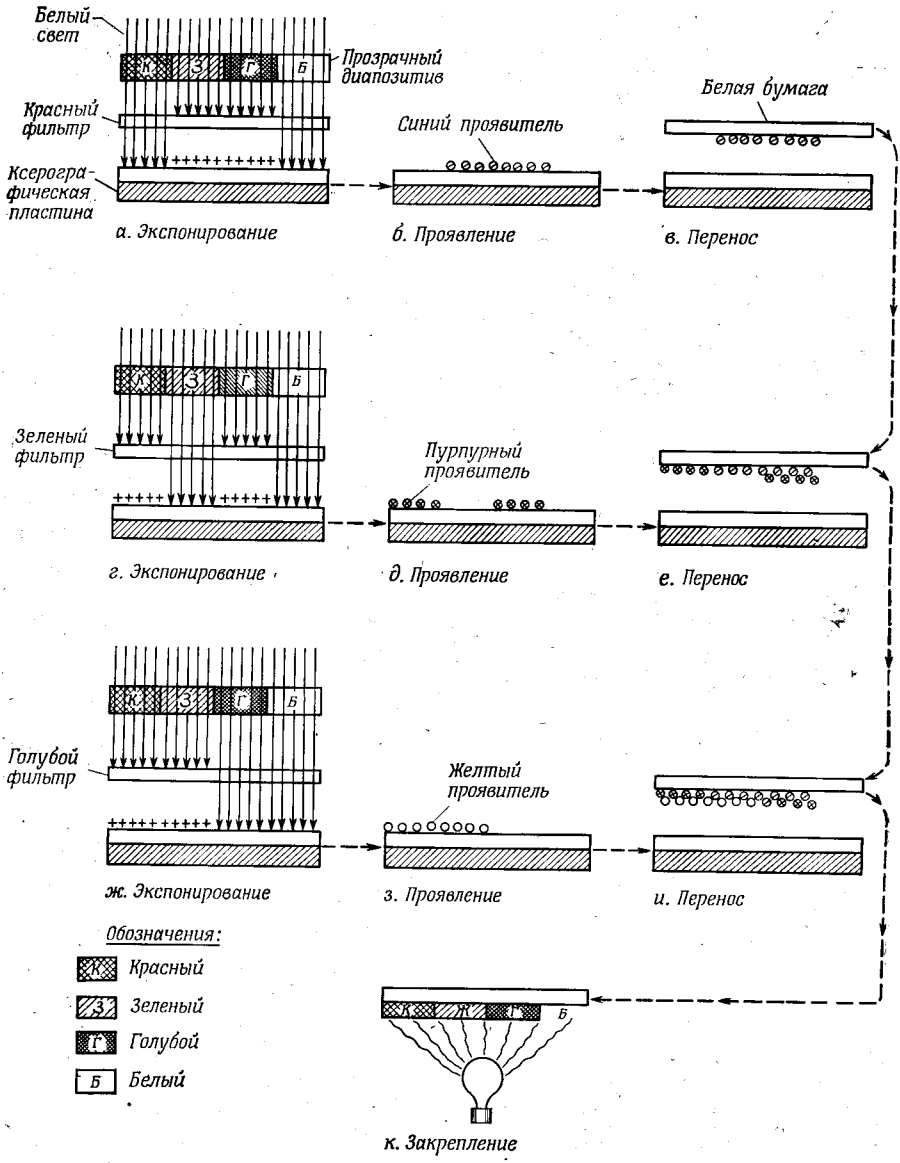
Хорошо известно, что большинство цветов и оттенков можно довольно точно передать правильным подбором основных цветов: красного, зеленого и голубого, или трех дополнительных: синего, пурпурного и желтого. Применяя названные цветные проявители, можно получить цветные ксерографические отпечатки, по крайней мере теоретически. Для этого ксерографическая пластина должна иметь фотослой, чувствительный к красному, зеленому и голубому цветам. Практически это достигается использованием нескольких пластин различной чувствительности или одной панхроматической пластины. При этом требуется три разных проявителя.

Так как ксерография представляет собой обычно позитивный процесс, скрытое электростатическое изображение, полученное при экспонировании через фильтры основных цветов, соответствует дополнительным цветам. Поэтому для трехцветного процесса с прямым проявлением проявители должны быть дополнительных цветов.

Рассмотрим этапы процесса изготовления цветных копий с прозрачного цветного позитива (рис. 59).

1. Зарядка пластины в коронном разряде и проецирование изображения с оригинала через красный фильтр.
2. Проявление пластины синим проявителем.
3. Перенос проявленного изображения на белую бумагу.
4. Экспонирование через зеленый фильтр, проявление пурпурным проявителем и перенос с совмещением на тот же лист бумаги.
5. Экспонирование через голубой фильтр, проявление желтым проявителем и перенос с совмещением с двумя предыдущими изображениями.
6. Закрепление цветного изображения на копии (если это необходимо).

Точность совмещения очень важна во время экспонирования и переноса. Кроме того, условия экспонирования и проявления каждого цвета должны строго контролироваться для обеспечения удовлетворительного цветового баланса. Для нахождения условий экспонирования и проявления необходимо сначала проделать большую экспериментальную работу по определению параметров процесса. Преимущество ксерографии состоит в том, что светочувствительные слои можно использовать многократно.



Р и с. 59. Получение цветных изображений.

Безусловно, все сказанное выше о цветной ксерографии носит несколько упрощенный характер, и, конечно, существует много еще не решенных проблем в сенситометрии и в способах смешения цветов.

В 1947 г. было сделано несколько цветных отпечатков описанным выше способом [106]. Оригиналом служила диапозитивная цветная пленка. Пластина с антраценовым покрытием экспонировалась через зеленый и голубой фильтры, а пластина с покрытием из селена с серой — через красный фильтр.

Для окрашивания проявителей использовались следующие красители: фталоцианин голубой *B* — для синего цвета, литоль мареновый — для пурпурного и ганза желтая *G* — для желтого цвета. При каскадном способе было затруднено проявление тоновых изображений. Однако ксерографические пластины, применявшиеся в то время, имели довольно зернистую поверхность, и это создавало эффект растрирования при проявлении. Полученные отпечатки имели, конечно, недостатки, но они служили подтверждением возможности применения трехцветной ксерографии.

В настоящее время благодаря улучшенным ксерографическим пластинам и более совершенной технике проявления в лабораторных условиях можно получать ксерографические цветные отпечатки довольно хорошего качества.

Трехцветные проявители основных цветов можно использовать при проявлении с обращением. Процесс остается тем же, но при проявлении осуществляется обращение электростатического изображения путем подачи напряжения обратной полярности между проявляющим электродом и подложкой ксерографической пластины. Так как описанный выше ксерографический процесс основан на последовательном переносе и совмещении изображений, цвета можно усиливать повторным проявлением. Например, если на копии желтый цвет оказался недостаточно насыщенным, можно повторить экспонирование через голубой фильтр и проявление желтым проявителем. В этом случае необходимо подобрать экспозицию так, чтобы обеспечить соответствующее добавление проявителя. Передержка служит причиной слабого изображения с очень тонким слоем проявителя.

При репродуцировании растровых иллюстраций в полиграфии принято печатать полутоновые изображения в 4 цвета; причем черный используется для усиления теневых участков и деталей.

В ксерографии также возможно добавление черного цвета при получении аналогичным способом изображения, проявленного черным проявителем.

7.2. ЦВЕТНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКОЙ БУМАГЕ

В работе [105] отмечается, что существующий метод использования электрофотобумаги требует растрирования изображения при цветном репродуцировании. Такие изображения получают, например, с помощью проекционного растра.

Получение цветоделенных изображений на электрофотографической бумаге сопряжено с некоторыми трудностями, которых не было при ксерографическом процессе, описанном в разд. 7.1. После проявления первого цветного изображения проявитель, осажденный на бумаге, может изменить электростатические характеристики следующего скрытого изображения на ней. Применяемые окрашенные проявители содержат смолу и сохраняют заряд во время последующих зарядки и экспонирования. Поэтому нельзя получить правильное изображение для 2-го и 3-го цветов. Для преодоления этого недостатка был разработан специальный тип проявителя [105], который содержит фотопроводящие пигменты, подобные описанным в патенте [107]. Такие проявители после закрепления теряют заряды на освещенных участках при последующем экспонировании и не искажают скрытое электростатическое изображение.

С помощью этих методов были получены цветные копии, аналогичные цветным фотографиям [105]. Вероятно, это были растровые отпечатки, поскольку авторы указывают, что γ процесса была слишком велика для хорошей передачи градаций.

Для улучшения качества были предложены методы модификации характеристических кривых ксерографического процесса [66, 108, 109]. При дальнейшем совершенствовании электростатической сенситометрии можно ожидать, что цветная печать растровых изображений станет также возможной и на электрофотобумаге [1]).

7.3. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ЦВЕТНОЙ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИИ

Ряд способов цветной электрофотографической печати был описан в патентной литературе. Некоторые из них обсуждены в работе [109]. Открытым остается пока вопрос о практическом воплощении этих способов. В настоящее время уже имеются основания предполагать, что электрофотографическая цветная печать с цветных прозрачных и непрозрачных оригиналов займет достойное место в фотографии и полиграфии. Некоторые труд-

---

[1]) В настоящее время метод получения цветных растровых изображений на электрофотобумаге (метод «рэмак») обеспечивает высокое качество и нашел промышленное применение.— *Прим. ред.*

ности вызывает получение необходимых градационных характеристик электрофотографического процесса, а создание подходящих светочувствительных материалов, отвечающих требованиям цветной печати, еще находится в стадии эксперимента. Однако эти трудности преодолимы. Возможность управления сенситометрическими характеристиками уже демонстрировалась в лаборатории. Некоторый прогресс достигнут при создании новых фотопроводящих материалов, особенно органических, а также в использовании сенсибилизаторов для регулировки спектральной чувствительности. Дальнейшие усилия в этом направлении должны привести к созданию технологии цветной электрофотографической печати для промышленного использования в ближайшем будущем [1]). Кроме того, создана 5-красочная машина для печати карт на электрофотобумаге с цветоделенных позитивных микрофильмов шириной 70 *мм* [103]. Теоретически возможна непосредственная цветная электрофотография живых объектов и пейзажа. Однако необходимо еще решить проблемы повышения светочувствительности, а также передачи основных цветов при одном экспонировании, прежде чем этот процесс найдет промышленное применение. Фактически даже черно-белая электрофотография этих объектов еще не вышла за пределы лабораторий.

[1]) См. предыдущую сноску.

VIII. ЭЛЕКТРОРЕНТГЕНОГРАФИЯ

8.1. КСЕРОРЕНТГЕНОГРАФИЯ

На ранней стадии развития ксерографии было обнаружено, что поверхностные заряды электрофотослоя могут нейтрализоваться под влиянием рентгеновских лучей [110]. Это открытие привело к развитию ксерорентгенографии, ставшей важным орудием при исследованиях металлических отливок, сварочных швов и т. д. благодаря быстроте и экономичности расходуемых материалов. Ксерорентгенография получила признание и в медицине, поскольку во время хирургических операций требуется быстро провести рентгенографическое исследование.

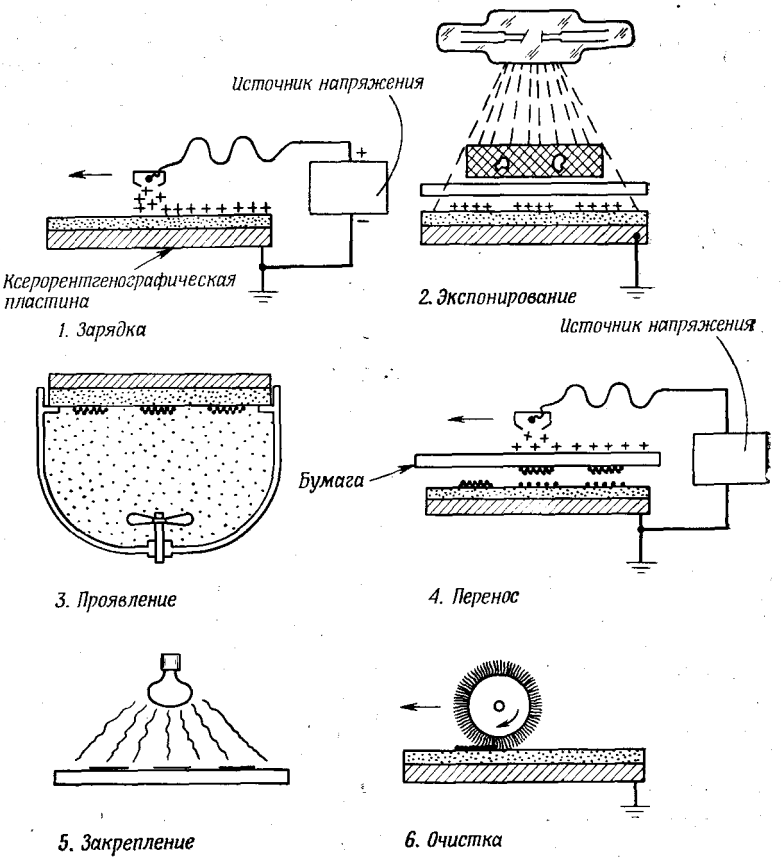
Ксерорентгенография аналогична ксерографии в отношении последовательности операций и применяемых материалов. Ксерорентгенографические пластины сначала очувствляются в коронном разряде. Затем экспонируются рентгеновскими лучами, которые проходят через просвечиваемый объект и проникают в электрофотослой пластины. В результате на пластине образуется скрытое электростатическое изображение, которое проявляется контрастным проявителем. На этой стадии проявленное изображение можно наблюдать непосредственно на пластине или его можно перенести на бумагу для получения копий. Кроме того, с проявленного изображения можно получить фотографию общепринятыми методами. Как и в ксерографии, ксерорентгенографические пластины можно использовать многократно после удаления с них остатка проявителя. Основные этапы процесса показаны на рис. 60. Весь процесс требует не более 1 *мин*.

8.1.1. КСЕРОРЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1.1.1. ПЛАСТИНЫ

Ксерорентгенографическая пластина состоит из слоя фотопроводящего изолятора, нанесенного на металлическую подложку. В промышленных пластинах в качестве фотопроводящего слоя обычно используют аморфный селен, который чувствителен к рентгеновским лучам.

В работе [111] отмечается, что селеновые ксерорентгенографические пластины имеют светочувствительность, эквивалентную чувствительности рентгеновской пленки типа А. В работе [112]



Р и с. 60. Основные операции в ксерорентгенографии.

величину светочувствительности селеновых пластин сопоставляют с чувствительностью рентгеновской пленки класса II. Данные этой работы для различных энергий излучения и поглощения приведены в табл. 2.

Для применяемых в медицине селеновых ксерорентгенографических пластин время экспонирования меньше, чем для нерастрированной пленки [113]. Однако по сравнению с растрированными пленками с флюоресцентным растром время экспонирования

Таблица 2

Соотношение светочувствительностей селеновых пластин и рентгеновских пленок класса II

Энергия излучения (пиковое напряжение, *кв*)	Поглотитель		Соотношение чувствительностей
	тип	коэффициент поглощения, *см*	
Рентгеновское излучение 50	Алюминий (Al)	1,25	6 : 1
» » 100	» »	2,5	3 : 1
» » 150	» »	5,0	3 : 1
» » 250	Сталь (Fe)	2,5	2,5 : 1
» » 1000	» »	5,0	2 : 1
Кобальт-60 1,3 *Мэв*	» »	5,0	1 : 1
Бетатрон 22 *Мэв*	» »	15,0	0,5 : 1

селеновых пластин значительно больше, чем пленок. Использование свинцовых или флюоресцентных растров для ксерорентгенографических пластин практически неприемлемо, так как контакт со светочувствительным слоем разрушает электростатическое изображение [116]. Селеновые пластины, очевидно, пригодны при просвечивании бедер, плеч, лопаток, позвоночника и ребер, но недостаточно чувствительны для просвечивания брюшной полости, таза и т. д. [114]. В работе [115] описаны пластины с мышьяково-трисульфидным подслоем, которые обладают повышенной чувствительностью к рентгеновским лучам.

Ксерорентгенографические пластины можно использовать многократно. Испытания показали, что в среднем селеновые ксерорентгенографические пластины выдерживают более 600 экспонирований [111]. Очевидно, воздействие рентгеновских лучей не разрушает селеновый слой. Срок службы пластины ограничивается в основном механическими повреждениями при ручной обработке пластины, например при чистке ее щеткой.

Хотя рентгеновское излучение и не вызывает каких-либо постоянных изменений, все же в селеновом слое возникает временный эффект, известный под названием «усталость», который состоит в увеличении скорости темнового спада, уменьшении чувствительности и появлении фона [111]. «Усталость» слабо сказывается при малых энергиях и длится всего несколько минут. Однако при напряжении ~ 100 *кв* «усталость», вероятно, устойчива. «Усталость» можно снять коротким экспонированием инфракрасной лампой. При этом температура пластины поднимается до 40—50%. Затем пластину быстро охлаждают струей воздуха, после чего ее первоначальные свойства полностью вос-

станавливаются. Эта операция называется релаксацией и входит в цикл операций ксерорентгенографической технологии. В работе [115] описана ксерорентгенографическая пластина, обладающая уменьшенной «усталостью».

8.1.1.2. ПРОЯВИТЕЛИ

В ксерорентгенографии применяют три типа проявителей [116]: 1) белый, который используют в основном для рассматривания изображений непосредственно на селеновой пластине; 2) голубой, который также может быть использован для непосредственного рассматривания и, кроме того, для переноса изображения на бумагу; 3) флюоресцентный, применяемый для рассматривания в ультрафиолетовых лучах после того, как изображение перенесено на бумагу.

Перенесенное на бумагу изображение может быть закреплено нагреванием. Применяемая бумага имеет термопластическое покрытие [116], которое размягчается при нагревании и фиксирует проявитель на бумаге. Так получают рентгенографические копии для постоянного хранения.

Поскольку проявители не содержат плавкие смолы, можно использовать некоторые из пигментов, применяемых в обычных и печатных красках. Однако проявитель не должен быть абразивным, чтобы не портить пластины при ее очистке. Для этих материалов важны их некоторые электрические и особенно трибоэлектрические свойства.

8.1.2. ОЧУВСТВЛЕНИЕ ПЛАСТИН

Ксерорентгенографические пластины перед экспонированием должны быть очувствлены. Это достигается равномерным осаждением электрических зарядов на поверхность селенового слоя в коронном разряде. Потенциал, до которого заряжается пластина, зависит от толщины селенового слоя. Промышленные селеновые пластины обычно заряжаются до 600 *в* [116]. Зарядка до потенциала выше рекомендованного нежелательна, так как может послужить причиной появления на изображении непроявленных точек. Это объясняется следующим образом. В непроявленных местах возникают участки электрического перенапряжения, вызывающие разрядку еще до начала проявления. По-видимому, это точки локализации «усталости», в которых свойства через некоторое время восстанавливаются. Сильная перезарядка может привести к повреждению селеновой пластины электрическими пробоями.

После того как пластина очувствлена, происходит незначительный темновой спад потенциала. Пластину можно хранить в темноте несколько часов. Однако для получения высококачественных изображений экспонирование необходимо проводить непосредственно после зарядки.

8.1.3. ЭКСПОНИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ

Светочувствительная ксерорентгенографическая пластина может быть проэкспонирована так же, как и рентгеновская пленка. Пластину помещают в кассету с защитной световой шторкой из тонкого алюминиевого листа, который предохраняет

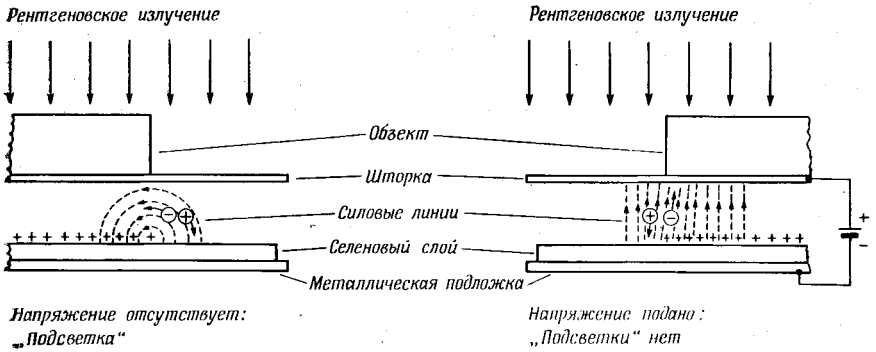


Рис. 61. Устранение «ионной подсветки».

пластину от комнатного света, но не препятствует прохождению рентгеновских лучей. Как и в случае рентгеновской пленки, наблюдается подсветка изображения на пластине вследствие рассеивания излучения. Она может быть уменьшена применением насадок, фильтров, масок и диафрагм, помещаемых между объектом и источником рентгеновских лучей или между объектом и пластиной [116].

Слово «подсветка» пришло, по-видимому, из оптики, где аналогичный эффект наблюдается в фотомеханических процессах. Например, в контактной печати, когда негатив недостаточно хорошо прилегает к фотобумаге, во время экспонирования возникает светорассеивание, или диффузия, выражающаяся в небольшом расширении проецируемых участков. Свет, падая на негатив под некоторым углом к нормали, проникает под непрозрачные участки негатива.

Существует также другой вид подсветки в рентгенографии, с которым не встречаются при использовании пленок. Он вызы-

вается ионизацией воздуха, находящегося между световой шторкой и поверхностью пластины [111]. Рентгеновские лучи ионизуют молекулы воздуха, создавая положительные и отрицательные ионы. Положительные заряды селеновой пластины притягивают отрицательные ионы главным образом в тех местах, где велика напряженность электрического поля, т. е. на границах заряженных участков, что приводит к нейтрализации поверхностного заряда и уменьшению размеров этих участков.

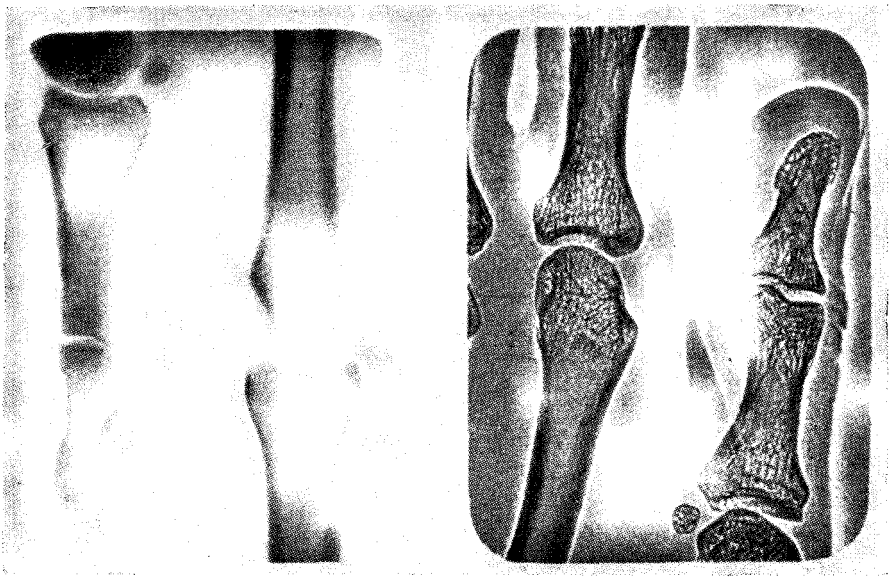
Для устранения эффекта ионной подсветки между металлической подложкой ксерографической пластины и металлическим световым экраном создают поле, направление которого противоположно полю скрытого изображения. Если это поле достаточно велико, отрицательные ионы будут притягиваться к экрану, а не к участкам изображения (рис. 61). Напряжение подается только во время экспонирования рентгеновскими лучами.

8.1.4. ПРОЯВЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Проявление полученного электростатического изображения может быть произведено любым из известных способов, применяемых в ксерографии. Однако при испытаниях лучшие результаты дало проявление порошковым облачком. В этом случае пластину помещают вниз слоем на верхнюю часть закрытой проявляющей камеры. Порошковое облачко вводят в камеру распылительным пистолетом. Порошок, проходя сопло, заряжается [111]. Проявленное изображение отличается по своим характеристикам от изображения, получаемого на рентгеновской пленке. Без проявляющего электрода контрастность изображения увеличивается, края и резкие переходы усиливаются. Этот эффект полезен в одних случаях и нежелателен в других [116]. Он обеспечивает выявление мелких деталей рассматриваемого объекта, но при просматривании *деталей с резкими изменениями толщины*, с трещинами или пустотами соседствующие с уплотнениями разрывы могут стать невидимыми. В медицинской ксерорентгенографии особенно важно обнаружение структурных деталей (фото 2). В работе [117] были получены многочисленные ксерорентгенограммы скелетов и костей и сопоставлены с их рентгенограммами, выполненными на обычной рентгеновской пленке. Оказалось, что ксерорентгенограмма обеспечивает более контрастные изображения, чем обычная рентгеноскопия.

Проявленные ксерорентгенографические изображения можно рассматривать непосредственно на пластине. Для проявления используют белый проявитель, создающий хороший контраст

с темным фоном селеновой пластины. Если копии для постоянного хранения не требуются, порошок, который удерживается



а *б*

Фото 2. Рентгеновский снимок.
а — изготовленный обычным способом, *б* — ксерорентгенографическим способом.

на пластине, удаляется меховой щеткой. Если же необходимо получить копию, изображение можно сфотографировать на обычную пленку или перенести и закрепить на бумаге.

8.1.5. ФОТОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КСЕРОРЕНТГЕНОГРАФИИ

В настоящее время аморфный селен является единственным фотопроводящим материалом, применяемым для изготовления промышленных ксерорентгенографических пластин. Он чувствителен к видимой и ультрафиолетовой областям спектра и к широкому диапазону длин волн рентгеновских и гамма-лучей. Аморфный селен используют также для регистрирования дифракции электронов в электронно-оптических инструментах [118]. Сообщений об использовании в ксерорентгенографии других фотопроводящих материалов пока не было. В Японии [119] опубликованы сообщения о том, что чувствительность пластин

со слоями из окиси цинка составляет лишь сотые доли чувствительности селеновых пластин. В работе [120] описаны эксперименты со слоями, содержащими сульфид фосфора, обладающими устойчивой внутренней поляризацией. Найдено, что их чувствительность к рентгеновским лучам сравнима с чувствительностью обычной рентгеновской пленки без применения растра, но составляет всего $^1/_{10}$ или $^1/_{25}$ чувствительности пленки с применением усиливающего растра. Хотя контрастность, достигнутая при каскадном проявлении, небольшая, зато велика разрешающая способность.

Известно, что ряд фотопроводящих материалов чувствителен к рентгеновским лучам. Органические материалы, такие, как антрацен и стильбен [121], и неорганические материалы, такие, как сернистый кадмий [122] и сернистый цинк [123], а также сера [124] обнаруживают фотопроводимость при экспонировании рентгеновскими лучами. Рентгеновская устойчивая проводимость присуща также полимерам и изоляторам [125—128]. Среди этих материалов можно назвать полистирол, полиэтилен, метакрилатные смолы, политетрафторэтилен, полиэтилентетрафталат, полипарахлорстирол, поливинилхлорид и слюду. В работе [129] были испытаны силиконовые и эпоксидные смолы в качестве материалов для ксерорентгенографических пластин. Наблюдался спад заряда под влиянием рентгеновских лучей, однако светочувствительность была очень низкой. Это объясняется слишком малым поглощением рентгеновских лучей этими смолами.

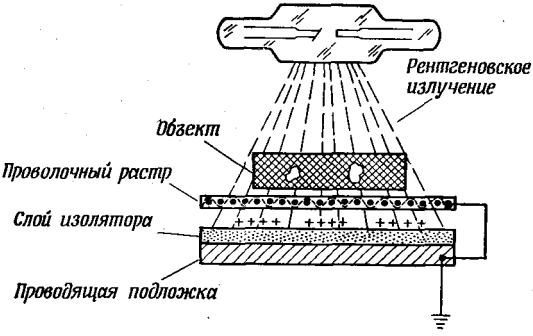
Возможно, что многие материалы, которые обладают фотопроводимостью в видимой области спектра, окажутся также проводниками и в рентгеновской области спектра. Поэтому можно ожидать в результате дальнейших исследований появления новых материалов, чувствительных к рентгеновским лучам. Эти материалы расширят область использования ксерорентгенографии.

Стоит упомянуть возможность использования электрофотографии для записи частиц высокой энергии, например протонов [130].

8.2. ИОНОГРАФИЯ

Электрорентгенографические процессы на основе ионизации воздуха, вызываемой рентгеновским излучением, были описаны в работах [131, 132]. При этом не требовались светочувствительные слои, а пластина, на которой записывалось рентгеновское изображение, была изолятором с проводящим покрытием. Чувствительность к рентгеновским лучам достигалась нанесением электрических зарядов на изолирующий материал и помещением растра из проволочной сетки вблизи его поверхности.

Проволочный растр образует параллельную пластине ионизационную камеру с электрическим полем между пластиной и растром. Рентгеновские лучи проникают в эту камеру и ионизуют находящийся там воздух. Если поверхность пластины заряжена положительно, то отрицательные ионы притягиваются к пластине и нейтрализуют положительные заряды. При отрицательно заряженной пластине притягиваются и нейтрализуются положительные ионы. Противоположно заряженные ионы отталкиваются



Р и с. 62. Образование изображения в ионографии.

от поверхности пластины и притягиваются к проволочному растру. Дополнительная ионизация может быть вызвана эмиссией электронов как растром, так и пластиной. Эти электроны, сталкиваясь с молекулами воздуха, образуют новые ионы [133]. Принцип формирования изображения в ионографии иллюстрируется рис. 62. Ионизация воздуха между растром и пластиной зависит от интенсивности рентгеновского излучения, выходящего из объекта. Так, разрядка пластины будет происходить быстрее в местах, соответствующих полостям объекта, так как интенсивность рентгеновских лучей и возникающая в результате этого ионизация воздуха будут больше именно в этих местах.

Перед экспонированием рентгеновскими лучами пластину заряжают коронным зарядником при удаленном растре. После возвращения растра на место производят экспонирование. При этом образуется скрытое электростатическое изображение, которое может быть проявлено теми же методами, что и в ксерорентгенографии. В работе [233] испытывались различные методы создания ионографического изображения. Найдено, что величина зазора между металлическим растром и пластиной является критичной. Если зазор уменьшить, изображение будет резче, но контрастность уменьшится. Увеличение электрического поля в воз-

душном пространстве приведет к увеличению контрастности изображения в основном за счет увеличения ионизации. Однако при сильном электрическом поле наблюдается ложная разрядка поверхности изолятора, вызывающая появление дефектов изображения, если растр отделяется от пластины.

Чувствительность процесса, очевидно, очень низка. Необходимо дальнейшее исследование по улучшению используемых материалов. Пластмассы в качестве пластин являются не очень хорошими излучателями электронов, но что касается воздействия на них рентгеновских лучей, то разрядка пластины частично происходит как из-за увеличения проводимости пластика, так и вследствие ионизации воздуха [126, 127].

IX. ЭЛЕКТРОГРАФИЧЕСКИЕ ПЕЧАТНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В данной главе рассматриваются нефотографические процессы, в которых для записи печатных знаков и получения факсимильных репродукций используют электрические явления. В основе этих процессов лежат эффекты, получаемые в результате действия электрического заряда, прохождения тока или осаждения статических зарядов.

Несмотря на то что данная книга посвящена главным образом фотографическим процессам, основанным на фотоэлектрических явлениях, небезынтересно остановиться и на электрографических процессах, так как в технологии тех и других много общего.

Электрографический способ печати нашел применение в печатающих устройствах для вывода данных из вычислительных машин, телетайпах и системах факсимильного репродуцирования изображений, передаваемых на расстояние. Разработан также способ, получивший название ксеропечати [12], который можно рассматривать как основу для создания высокоскоростной печатной машины, предназначенной для печатания больших тиражей.

9.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОГРАФИЯ

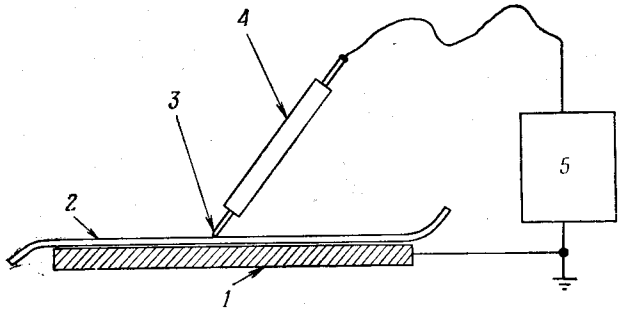
С помощью электродов на диэлектрических поверхностях можно получать различные изображения, образованные электростатическими зарядами. Так, например, пользуясь устройством в виде изолированного карандаша с металлическим наконечником, к которому подводится напряжение, можно писать или рисовать невидимые электростатические изображения на диэлектрической пленке (рис. 63). Полученное таким способом электростатическое изображение можно сделать видимым, посыпая его заряженным порошком или применяя любой другой способ проявления, используемый в электрофотографии.

История нефотографической электростатографии начинается с экспериментов Селеньи [8, 9], который доказал возможность электростатической записи изображения с помощью электрического разряда или электронного луча.

9.1.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Исследования метода электростатической записи, в основе которого лежит действие электрического разряда, привели к разработке высокоскоростных устройств для электростатической печати [135].

Создание изображений, образуемых электростатическими зарядами, при электрическом разряде связано с явлением ионной проводимости газов. Известно, что если к двум близко расположенным проводникам приложить напряжение и повысить его

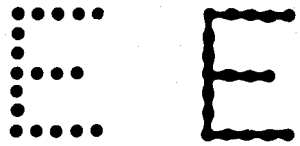


Р и с. 63. Схема устройства для электростатической записи.
1 — металлическая пластина; *2* — лист диэлектрика; *3* — металлическое острие; *4* — изолятор; *5* — источник напряжения.

до величины, при которой происходит пробой воздушного промежутка, то между проводниками возникает электрический разряд. При очень малых расстояниях (порядка нескольких десятых миллиметра) между проводниками разряд может произойти без образования искры. Если между этими двумя проводниками поместить лист диэлектрика с высоким сопротивлением, то во время разряда на поверхности диэлектрика будут скапливаться электрические заряды. Один из проводников может быть металлической пластиной, а другой в виде острия, множества мелких игл или группы знаков различной формы. Разряд происходит за несколько микросекунд. Таким образом, напряжение можно подавать очень короткими импульсами.

Фирмой «Бюрроуз» под руководством Кембриджского научно-исследовательского центра американских ВВС создано электростатическое выводное печатающее устройство «Уиппет». Запись производится при помощи семидесяти двух печатных головок, расположенных в один ряд. Каждая головка представляет собой матрицу из тридцати пяти отдельных электродов, имеющих форму проволочных игл, изолированных друг от друга. Иглы

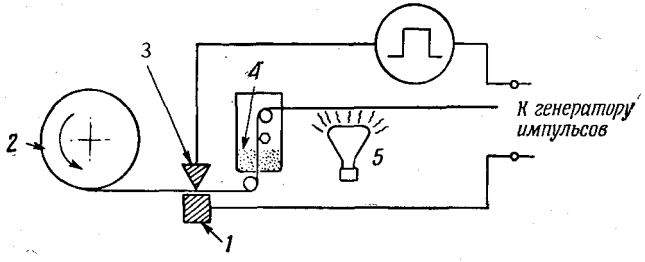
расположены так, что образуют семь горизонтальных рядов по пять игл в каждом. При возникновении импульса каждая игла оставляет на поверхности бумаги, покрытой слоем диэлектрика, электрический заряд в пределах маленькой круглой точки.



Р и с . 64. Матричный способ формирования букв при электростатической записи.
а — точечное электростатическое изображение; *б* — после порошкового проявления.

Одновременное подведение импульсов к различным комбинациям игл позволяет записать все буквы алфавита, цифры и различные специальные символы. Выбор буквы осуществляется с помощью электронной схемы. Данные вводятся с перфоленты, магнитной ленты или непосредственно из электронной вычислительной машины.

«Окрашивание» бумаги с целью получения видимых отпечатанных знаков (букв) близко к технике порошкового проявления,



Р и с. 65. Электростатическая запись.
1 — электрод; *2* — диэлектрическая бумага; *3* — записывающая головка; *4* — окрашенный порошок; *5* — нагревательное устройство для фиксирования изображения.

применяемого в ксерографии. Однако в качестве порошка здесь используют токопроводящий материал, не требующий контактной электризации. Порошок находится в заземленном контейнере. Когда частицы порошка входят в зону действия зарядов, создающих изображение на поверхности бумаги, на них наводятся

заряды противоположной полярности. Электрические поля зарядов, образующих отдельные точки, в некоторой степени перекрываются, поэтому при проявлении точки сливаются и образуют сплошные линии (рис. 64). Принципиальная схема электростатической записи электронным лучом приведена на рис. 65. Печатающее устройство «Уиппет» работает со скоростью до 300 *знаков/сек* [136], т. е. около 2000 *слов/мин*. Однако уже созданы новые модели, работающие со скоростью 3000 *слов/мин*, и достигнуты скорости до 5000 *слов/мин*. Разработаны и другие печатающие устройства, в которых использованы аналогичные принципы [137]. Согласно опубликованным данным, теоретически возможна скорость до 500 000 *слов/мин*.

Описание ряда других методов формирования знаков и рисунков, образованных зарядами, посредством электрического разряда можно найти в работе [139].

9.1.2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

Идея использования электронного луча для создания изображения в виде электрических зарядов на изолированной поверхности была впервые описана Селеньи [8, 9]. Позднее в патентной литературе [140—146] появились описания различных устройств для электростатической записи электронным лучом.

Первая практически работающая система, в которой для электростатической записи на неочувствленной бумаге используют пучок электронов, была создана в Стенфордском исследовательском институте и получила название «Видеограф». Основным элементом системы является печатающая трубка, представляющая собой электронно-лучевую трубку, в переднее стекло (экран) которой вмонтирован один или несколько рядов близко расположенных иголок из тонкой проволоки. Эти иголки изолированы друг от друга и пронизывают экран трубки. При развертке электронный луч пробегает по концам проволочных иголок, и электроны, проходя по иголкам, осаждаются на поверхности бумаги с диэлектрическим покрытием, расположенной в месте соединения экрана электронно-лучевой трубки с заземленным электродом. Так как скорость развертки электронного луча очень высока, бумага может непрерывно передвигаться относительно экрана трубки также с большой скоростью. Принцип действия описанной печатающей трубки показан на рис. 66. После того как на бумаге образуется электростатическое изображение, записанное электронным лучом, бумага проходит через камеры, где происходит проявление изображения и закрепление на бумаге (рис. 67).

Управление модуляцией и разверткой электронного луча осуществляется с помощью видеосигналов точно так же, как в приемной грубке телевизионного приемника. Таким образом,

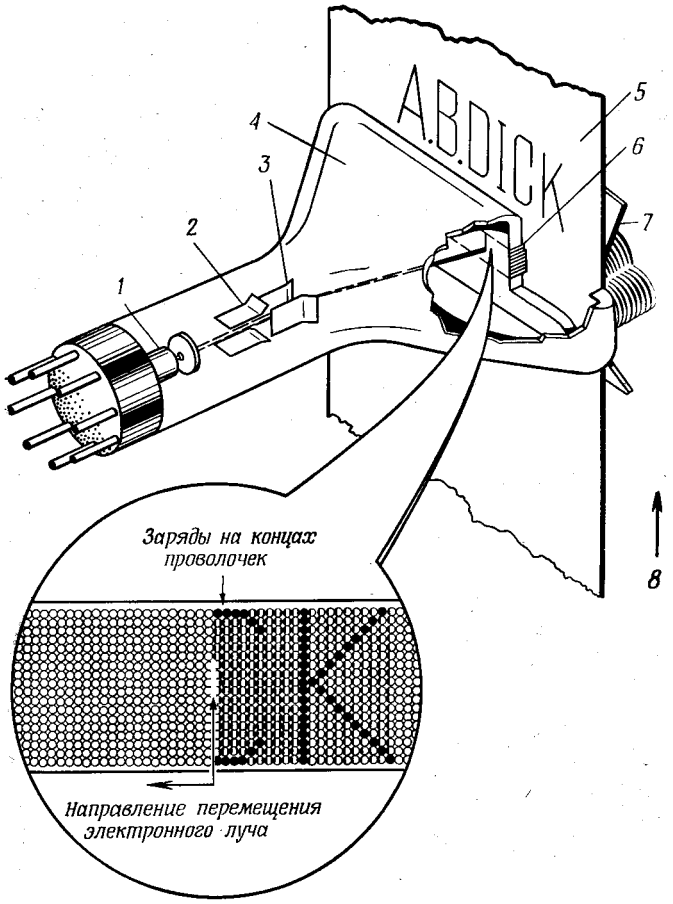
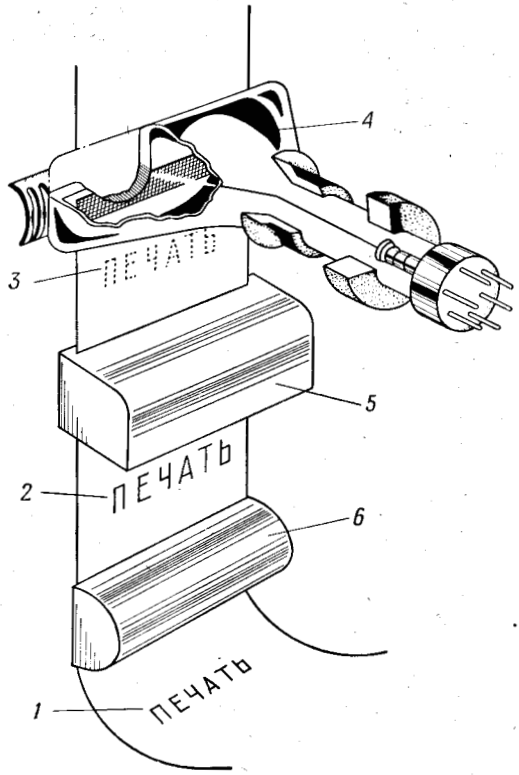


Рис. 66. Схема действия печатного устройства «Видеограф» с электронно-лучевой трубкой матричного типа. [(Stone, *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, 221 (1961).]

1 — электронная пушка; *2* — пластины вертикального отклонения; *3* — пластины горизонтального отклонения; *4* — трубка для электростатической печати; *5* — диэлектрическое покрытие; *6* — проволочная матрица; *7* — заземленная пластина; *8* — направление перемещения бумаги.

данные в печатающее устройство «Видеограф» вводятся в форме видеосигналов, а выводятся либо в графической, либо в цифровой форме [148]. Видеосигналы могут поступать от телевизионной

камеры типа «Видикон», которая может входить в систему печатающего устройства в качестве его компонента или может быть расположена на довольно большом расстоянии от этой системы.



Р и с. 67. Элементы печатного устройства «Видеограф». [С о п е, *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, 183 (1961).]

1 — закрепленное изображение; *2* — видимое изображение; *3* — скрытое изображение, образованное зарядами; *4* — трубка для электростатической печати; *5* — проявочная камера; *6* — лампа для оплавления порошка.

Плотность размещения проволочных иголок в экране печатающей трубки равна ~100 штук на 1 *см* [149]. Это позволяет печатать факсимильные репродукции с тоновых и штриховых оригиналов. Данные могут вводиться также в виде записи на ленте видеомагнитофона.

Если вводимая информация поступает в закодированном виде, например в записи на перфокарте, перфоленте или магнитной

ленте, то ее сначала преобразуют моноскопическим генератором знаков в видеосигналы, которые затем используют для управления электронным лучом печатающей трубки.

Описанный выше процесс находит применение в тех случаях, когда требуется высокоскоростная печать неповторяющихся изображений. Этот способ позволяет печатать со скоростью более 10 000 *строк/мин*, а при изготовлении факсимильных репродукций скорость развертки оригинала достигает 0,3 $м^2/сек$. Известна одна промышленная установка, печатающая ярлыки с адресами подписчиков журналов, производительность которой составляет 5 млн. ярлыков в неделю на каждую машину. Информация вводится в цифровой форме с магнитной ленты. Установка другого типа, проходившая производственные испытания в 1961 г., будет использоваться при передаче документальной информации для обработки в главный вычислительный центр. Передача осуществляется посредством трансляции на сантиметровых волнах.

Разработаны и другие способы использования электронно-лучевой трубки для электростатической печати. Однако они относятся к области электрофотографии, так как для формирования электростатических знаков здесь используют принцип оптического проецирования видимых изображений с экрана электронно-лучевой трубки на барабан с селеновым покрытием или на бумагу «электрофакс» (см. гл. X).

9.1.3. КСЕРОПЕЧАТЬ

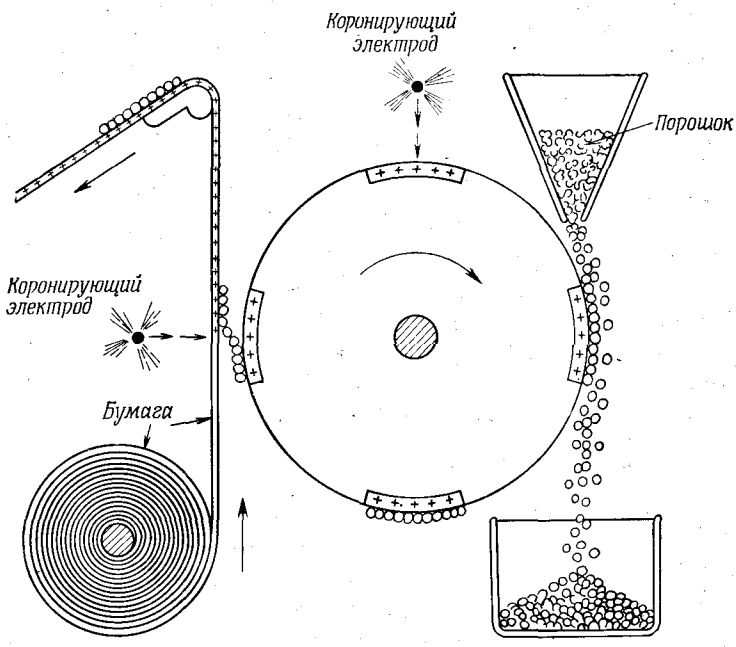
Ксеропечатью называют электростатический печатный процесс, предназначенный для получения большого количества копий какого-либо изображения, документа или страницы с плоской или цилиндрической печатной формы [12, 150, 151].

Печатная форма в этом случае представляет собой металлический лист или цилиндр, на поверхность которого нанесено изображение в виде тонкого изоляционного покрытия.

Печатная форма, проходя под коронным зарядником, получает электрический заряд. При этом заряды, осажденные на участки изображения, остаются на поверхности формы, а заряды, осажденные на участки металла, стекают в землю. Таким путем создается электростатическое изображение. Начиная с этого момента, дальнейший ход операций по изготовлению отпечатка аналогичен соответствующим этапам электрофотографического процесса: порошковое проявление, перенос на бумагу и фиксирование порошка на бумаге. Принципиальная схема системы,

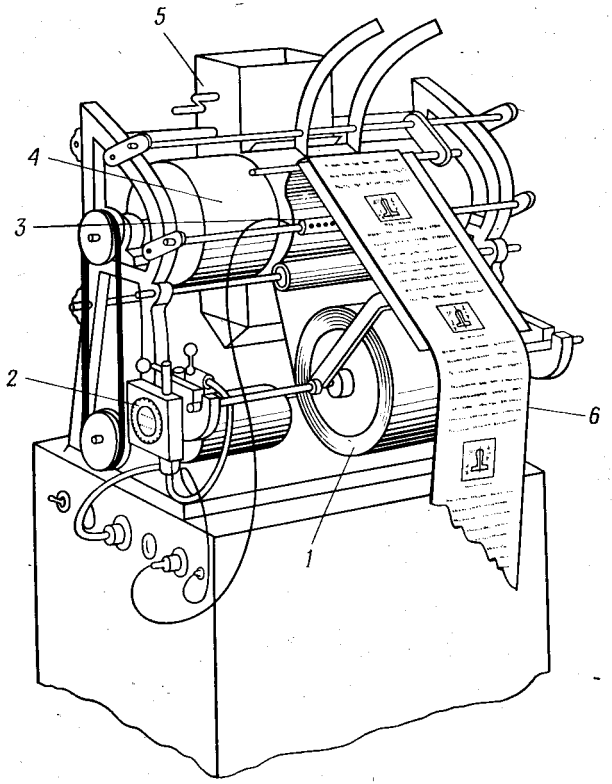
в которой в качестве печатной формы используется цилиндр, представлена на рис. 68.

Для изготовления печатной формы можно использовать обычные фотомеханические способы [152]. На пластину сначала наносят слой светочувствительного материала. После сушки слоя пластину экспонируют через негатив при помощи дуговых фонарей,



Р и с. 68. Основные принципы ксеропечати. [*Fortune*, 122, Juin (1949).]

закатывают тонким слоем краски и проявляют. При проявлении происходит вымывание незадубленных участков копировального слоя. После проявления пластина посыпается легкоплавким изоляционным порошком, частицы которого прилипают к краске. Избыток порошка удаляется с пластины (сдувается). Оставшийся на изображении порошок нагревается и оплавляется. Если в качестве копировального слоя используют изоляционный материал, то операции закатывания краской и запудривания не требуются. Еще более простым методом создания изображения на форме является электрофотографический способ. В этом случае после проявления порошковое изображение переносится на пластину и оплавляется.



Р и с. 69. Экспериментальное устройство для ксеропечати.
1 — рулон бумаги; *2* — электродвигатель; *3* — коронный зарядник; *4* — формный цилиндр; *5* — красочный резервуар; *6* — отпечатанная копия.

На рис. 69 показана схема экспериментальной машины для ксеропечати, созданной в 1948 г. Эта машина работала со скоростью 360 *м/мин*.

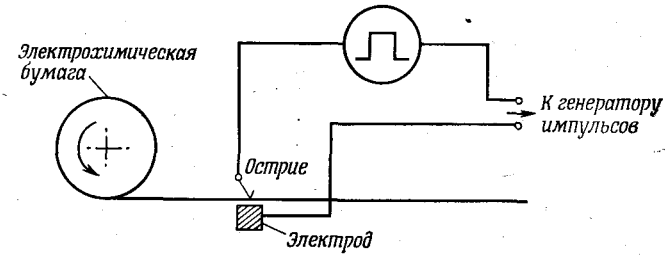
9.1.4. ЭЛЕКТРОТРАФАРЕТНАЯ ПЕЧАТЬ

Способ электростатической печати через трафаретную сетку был разработан Чилдрессом и Кэбеллом [153]. Печатная форма в этом случае представляет собой сетку из нержавеющей стали, отверстия которой в пробельных участках закрыты, а в участках изображения открыты. Эта форма аналогична формам, применяемым для печатания трафаретным способом на изделиях из стекла, и формам так называемой шелкотрафаретной печати.

К основным элементам печатного устройства следует отнести сетку, несущую изображение, вращающуюся щетку для нанесения на сетку порошка и металлическую пластину. Щетка и пластина располагаются по обе стороны от сетки. В процессе печатания между сеткой и металлической пластиной помещают лист бумаги. Затем между сеткой и металлической пластиной создают напряжение ~1500 *в*. Щетка, вращаясь, подает на сетку порошок, который заряжается и под действием электрического поля проходит через отверстия сетки, соответствующие элементам изображения, и осаждается на бумаге. Затем порошок закрепляется на бумаге путем оплавления. Описанный способ позволяет печатать на шероховатых и гофрированных бумагах и на предметах неправильной формы [154].

9.2. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОГРАФИЯ

В основе способа электролитической печати лежит процесс электролиза. Отпечаток получается при пропускании тока через очувствленную бумагу. Очувствление бумаги производится путем



Р и с. 70. Схема устройства для электролитической печати.

пропитки ее химическими веществами, которые при электролизе реагируют с образованием цветных компонентов. Лист такой бумаги помещается между электродами. Один из электродов может иметь форму острия. С противоположной стороны устанавливается другой электрод, размеры которого должны быть равны размерам запечатываемого участка. Так как электролиз может протекать только в жидкой среде, бумага в момент записи должна быть влажной. К электродам прикладывают напряжение, и в бумаге начинаются реакции образования цветных веществ. Схема записывающего устройства приведена на рис. 70.

Электролитический метод в течение многих лет применялся для записи факсимильных изображений, передаваемых по радио и по линиям проводной связи. Этот метод более удобен в тех случаях, когда быстроте получения видимого изображения при-

дается большее значение, чем качеству отпечатка. Электролитическая запись нашла применение в различных устройствах для записи данных и в системах связи, требующих выдачи видимых изображений.

9.2.1. ХИМИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

В работе [156] указывается, что существуют по крайней мере четыре взаимосвязанных механизма, обусловливающих возникновение реакций образования красящего вещества при воздействии электрической энергии на электрохимическую бумагу:

1) внедрение в бумагу посторонних ионов;

2) разрядка ионов на электроде, находящемся в контакте с бумагой;

3) процессы окисления и восстановления на поверхности электрода, находящегося в контакте с бумагой;

4) увеличение концентрации определенного вида ионов у поверхности электрода, находящегося в контакте с бумагой.

В одном и том же листе электролитической бумаги может одновременно или в быстрой последовательности протекать несколько процессов с различными механизмами. В связи с тем что образование красящих веществ в бумаге является в большинстве случаев результатом побочных реакций, Грейг [156] предпочитает классифицировать процессы электролитической записи в соответствии с механизмом инициирования основной реакции.

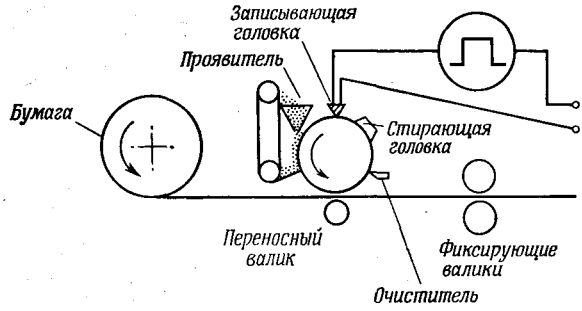
В качестве примера приведем типы электролитической бумаги, для которых характерны перечисленные выше механизмы реакции образования красящего вещества.

1. *Внедрение посторонних ионов.* Для окрашивания по этому способу можно использовать бумагу, обработанную раствором пирокатехина (промежуточное соединение органического красителя) и хлористым натрием. Посторонние ионы появляются в результате растворения материала анода (железного острия). В результате реакции железа с пирокатехином образуется черное внутрикомплексное соединение железа. Это вещество обеспечивает хорошую контрастность и довольно высокую устойчивость отпечатка. Бумага такого типа обеспечивает среднюю скорость записи. К недостаткам данного способа относится интенсивное разрушение анода, приводящее к частым заменам последнего.

2. *Разрядка ионов.* Среди бумаг этого класса наибольшую известность получила бумага, очувствленная крахмалом и иодистым калием. Процесс электролиза протекает с образованием свободного иода, выделяющегося на аноде. Иод реагирует с крахмалом, образуя крахмально-иодный комплекс с характерной

Проявляющее (окрашивающее) вещество может иметь вид сухого порошка или суспензии.

Запись изображения производят записывающими головками, состоящими из небольших электромагнитов. Записывающий элемент в простейшем варианте может представлять собой кусок проволоки или острие из мягкого железа, обмотанное изолированной медной проволокой. В тот момент, когда острие подводится



Р и с. 73. Схема установки для магнитной печати.

близко к поверхности, на которой производится запись, импульс тока, пропускаемый через медную обмотку, создает намагниченный участок. Такое острие или ряд близко расположенных остриев могут быть использованы для записи магнитных факсимильных изображений. Магнитные изображения в виде букв могут быть записаны с помощью полюсных наконечников соответствующей формы или матриц, составленных из остриев.

Проявление осуществляется путем нанесения на поверхность, несущую изображение, магнитного порошка или суспензии. Техника нанесения проявителя зависит от скорости печати и режима печатного процесса.

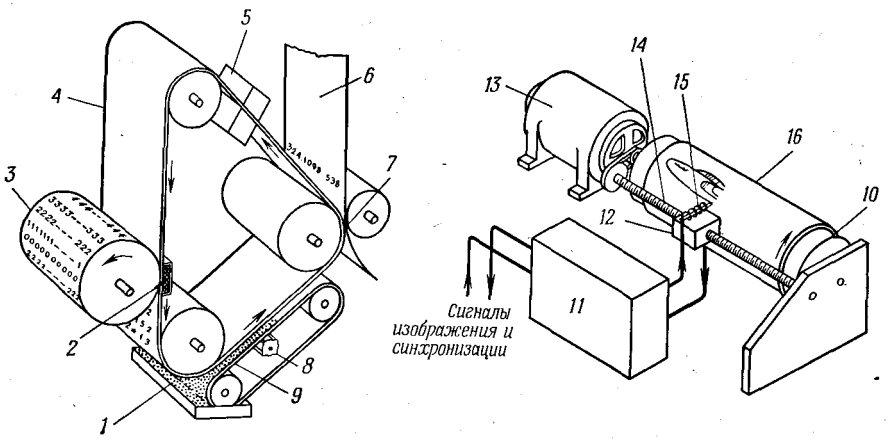
Перенос производят под давлением на обыкновенную бумагу, на бумагу, покрытую клеевым слоем, или используя магнитное притяжение. Для бумаги с клеевым слоем фиксирование не требуется. В остальных случаях частицы порошка покрывают термопластической смолой, которая прилипает к бумаге во время нагревания или под давлением.

На рис. 74 показаны схемы магнитного печатающего устройства с барабаном и устройства для факсимильной записи.

Для магнитной печати характерны очень высокие скорости. На одной из экспериментальных установок была получена скорость, равная нескольким тысячам строк в 1 *мин*. Автор наблюдал процесс печатания буквенно-цифровой информации на бумаге со скоростью до 3 *м/сек* при довольно хорошем качестве изображения.

Однако никаких сведений о создании промышленной системы магнитной печати к моменту написания данной книги не имелось [1]).

Основное различие между магнитным и электростатическим печатными процессами заключается в способе притяжения про-



а *б*

Рис. 74. Один из видов установки для магнитной печати (*а*) и установка для факсимильной магнитной записи (*б*). [Berry, Hanna, *General Electric Rev.*, 55 (1952).]

1 — порошок окиси железа; *2* — импульсная запись; *3* — магнитный формный барабан; *4* — намагниченная лента; *5* — размагничивающее устройство; *6* — бумага; *7* — перенос на бумагу; *8* — вибратор; *9* — полотно, несущее магнитные частицы, покрытые слоем смолы; *10* — вращающийся барабан; *11* — приемник; *12* — каретка; *13* — электродвигатель; *14* — ходовой винт; *15* — записывающие острия; *16* — намагниченный лист.

явителя к скрытому изображению. В электростатической печати между заряженными частицами проявителя и противоположно заряженным изображением возникают довольно большие силы притяжения. В магнитной печати частицы порошка, попадая в зону действия поля изображения, становятся маленькими магнитными диполями. Один конец диполя притягивается к изображению, а другой отталкивается. Результирующая сила притяжения невелика, в частности, из-за того, что магнитное поле изображения в тонком слое поверхности для записи никогда не бывает очень сильным. Этим можно объяснить некоторые из тех трудностей, которые возникают при создании практически применимых устройств для магнитной печати.

[1]) Процессы ферромагнитной печати в нашей стране подробно исследовались, и созданы практически используемые машины (см. Арутюнов М. Г., Патрунов В. Г., Феррография — магнитная скоростная печать, изд-во «Энергия», 1964).— *Прим. ред.*

X. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИИ

Ценность всякого нового процесса в конце концов определяется возможностями его практического использования, а это в свою очередь связано с производством соответствующих оборудования и материалов. Практическое использование электрофотографии началось сравнительно недавно. Первое управляемое вручную ксерографическое оборудование было выпущено фирмой «Ксерокс» в 1950 г.; с тех пор разработано много новых копировальных машин, которые имеются в продаже и сдаются в аренду. Принцип работы большинства из них основан на использовании ксерографии или каких-либо вариантов ксерографического процесса.

Электрофотография широко применяется для фотокопирования, где она быстро заняла доминирующее положение. Помимо копирования с оригиналов на бумаге или микрофильмов, электрофотография также нашла применение в печатном процессе и репродуцировании, а также и в рентгенографии. В настоящее время разрабатывается оборудование, которое позволит применить электрофотографию для получения факсимильных изображений, хранения и последующего восстановления микроизображений, для обработки и отображения данных, а также и в ряде других специальных приложений.

В течение многих лет разработка электрофотографических процессов проводилась в основном в США. Не удивительно поэтому, что и промышленное использование этих процессов в США значительно опередило другие страны. Однако в последние годы интерес к электрофотографии проявляется и во многих других странах и частях света. Об этом говорит объем опубликованной по данному вопросу технической литературы, особенно в Японии и СССР [166]. Имеются свидетельства того, что вопросами электрофотографии активно занимаются в Англии и в нескольких западноевропейских странах.

10.1. РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ В США

Первое коммерческое электрофотографическое копировальное оборудование было сконструировано с применением многократно используемых пластин из аморфного селена [26]. Это оборудование состоит в основном из трех устройств: 1) устройства для зарядки и проявления, 2) фоторепродукционной камеры и 3) устройства для термического закрепления (см. фото 3).

Селеновая пластина вмонтирована в кассету с выдвигаемой непрозрачной шторкой. Многие операции на этом оборудовании

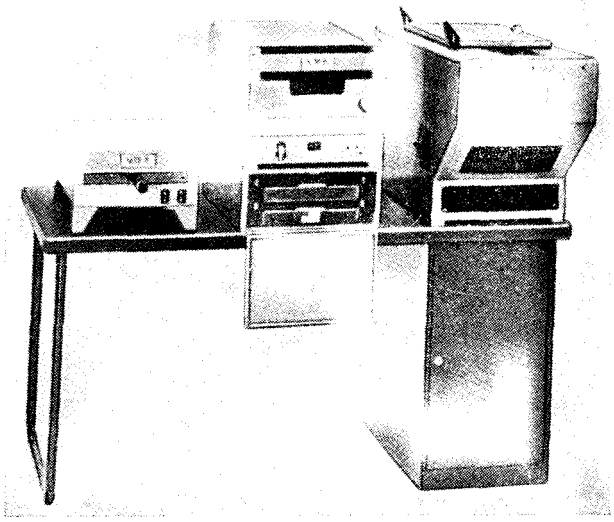


Фото 3. Серийное неавтоматическое ксерографическое оборудование. Слева направо: устройства для закрепления, зарядки, контактного экспонирования, проявления и переноса; репродукционная камера.

выполняются вручную. Сначала кассету с удаленной шторкой помещают в зарядное устройство. Включают коронный разрядник, который перемещается над пластиной в прямом и обратном направлении. После зарядки вдвигают шторку и помещают кассету в камеру. Затем в камеру вводят предназначенный для копирования документ, удаляют шторку и производят экспонирование, управляемое реле времени. После этого вдвигают шторку и пластину помещают лицевой стороной вниз в светонепроницаемую кювету для проявления. Шторку опять удаляют, а кювету для проявления несколько раз покачивают для того, чтобы проявляющий состав, каскадируя, попадал на все участки

поверхности пластины. Для переноса проявленного изображения на бумагу лист бумаги кладут на поверхность пластины и повторно устанавливают кассету в зарядное устройство. После переноса бумагу отделяют от пластины и помещают в устройство для закрепления. Перед повторным использованием с пластины удаляют остатки проявителя, протирая ее ватой.

Большое число выполняемых вручную операций делает такой процесс довольно медленным. Для изготовления одной копии при таком процессе требуется около 2 *мин*. Однако это оборудование очень удобно для изготовления офсетных форм, служащих для размножения документов. Проявленное изображение переносят непосредственно с ксерографической пластины на офсетную бумажную пластину. После закрепления оплавлением бумажную форму устанавливают на цилиндр множительной офсетной машины. Таким способом за короткое время можно получить сотни и даже тысячи оттисков копируемого документа. Такое оборудование широко используется уже в течение некоторого времени. Позднее фирма «Ксерокс» выпустила специальное оборудование под названием «Литмастер» и фоторепродукционный аппарат для увеличения и уменьшения изображения.

Каждая такая операция, как зарядка, экспонирование, проявление, перенос и закрепление, требует всего нескольких секунд. Поэтому после автоматизации этих операций и их выполнения в одном и том же устройстве электрофотографическое копирование превратилось в быстрый процесс.

10.2. КОНТОРСКИЕ КОПИРОВАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ МАСШТАБА

10.2.1. КОПИРОВАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО «КСЕРОКС 914»

Копировальное устройство «Ксерокс 914» представляет собой машину (см. фото 4) размером с письменный стол, в которой автоматизированы все операции, кроме установки документа или другого предназначенного для копирования оригинала. Светочувствительным материалом является барабан с селеновым покрытием. Устройства для зарядки, экспонирования, проявления, переноса и очистки расположены соответствующим образом вокруг барабана, и все эти операции последовательно выполняются по мере его вращения. Проявляющий состав представляет собой смесь носителя и проявителя, которая каскадирует по поверхности барабана и затем собирается и снова направляется в проявочное устройство. Листы бумаги поступают из бумагоподающего устройства в устройство переноса изображения

и затем проходят через устройство для закрепления и выводятся на приемный лоток (см. рис. 75).

На машине можно копировать книжные и журнальные страницы, как и документы в виде отдельных листов. От бумаги,

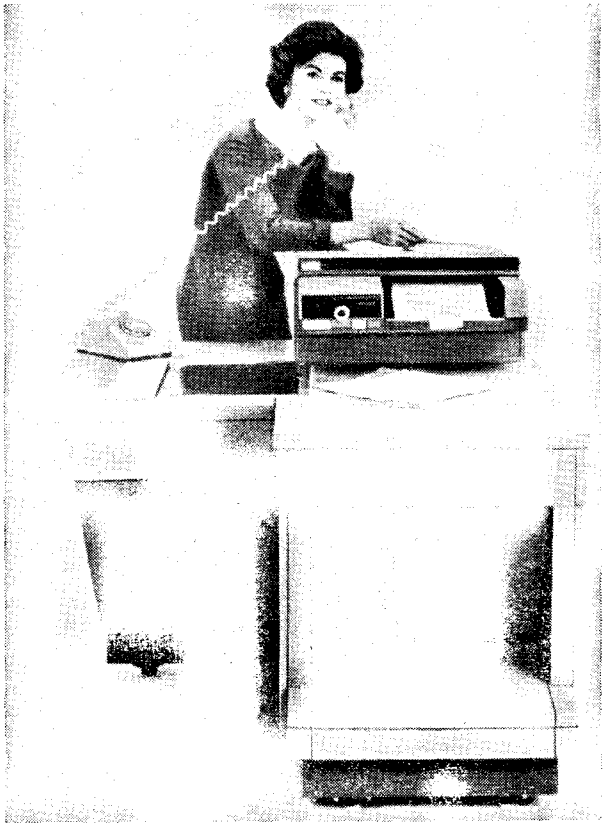
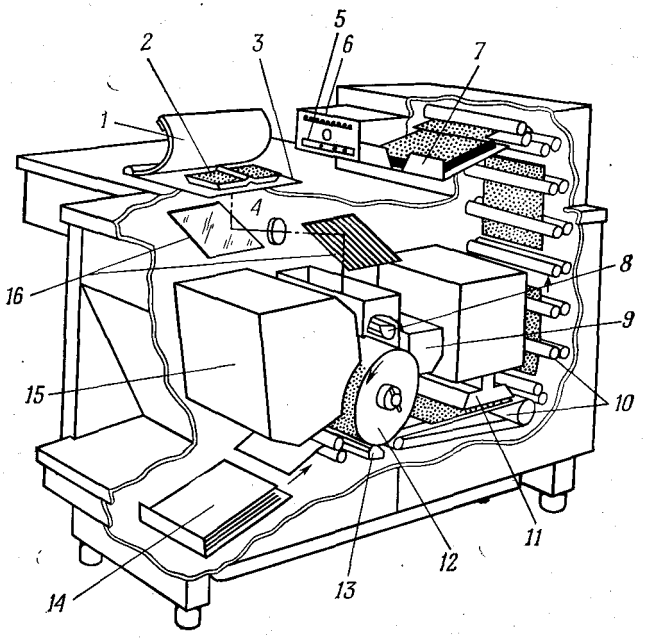


Фото 4. Копировальное устройство «Ксерокс 914».

на которой получают копию, не требуется никаких специальных свойств. Копии могут быть получены на обычной бумаге или кальке или бумажной офсетной пластине. Можно применять бумагу размером от 200 × 140 *мм* до 250 × 390 *мм*. Максимальный размер копии 230 × 355 *мм*. Время копирования после непродолжительного периода прогревания устройства равно 30 *сек* для первого оттиска, а затем производительность машины

составляет 6 *оттиск/мин*. Оператору, управляющему машиной, не нужно иметь специальной квалификации. Копируемые книги или документы укладываются лицевой стороной вниз на развертывающее стекло, поворотом специальной ручки устанавливают нужное число отпечатков, и машина приводится в действие нажатием кнопки управления печатающим устройством. Оригиналы



Р и с. 75. Схема устройства «Ксерокс 914».

1 — держатель оригинала; *2* — книга или документ; *3* — развертывающее устройство; *4* — объектив; *5* — кнопка включения печатающего устройства; *6* — шкала печатающего устройства; *7* — лоток; *8* — зарядник; *9* — щетка и очищающее устройство; *10* — система проводки бумаги; *11* — устройство для закрепления; *12* — ксерографический барабан; *13* — устройство для электростатического переноса; *14* — бумага; *15* — проявочное устройство; *16* — зеркала.

всех цветов, включая красные и синие, могут быть скопированы и воспроизведены как черно-белое изображение.

Машина «Ксерокс 914» не воспроизводит большие сплошные участки (плашки) и тоновые изображения. Однако если между копируемым оригиналом и развертывающим стеклом поместить растр на прозрачной пленке, то можно обеспечить хорошее воспроизведение полутонов и плашек.

10.2.2. «КОПИТРОН 2000» ФИРМЫ «БРУНИНГ»

Это также автоматическая копировальная машина размером с письменный стол (фото 5). Светочувствительным материалом является бумага, покрытая слоем фотопроводящей окиси цинка, диспергированной в связующем на основе смолы. Для проявления изображения, которое создается непосредственно на бумаге,

Фото 5. «Копитрон 2000».

использована магнитная щетка. Принцип действия машины в основном базируется на процессе «электрофакс».

Для получения копии оригинал вставляется лицевой стороной вниз в ту часть машины, которая на фотографии расположена справа. В результате этого автоматически начинается копировальный процесс. Лист электрофотографической бумаги автоматически проводится через устройство зарядки и затем проходит через зону экспонирования. В то же самое время синхронно с электрофотобумагой движется оригинал, так что свет, отраженный от оригинала, фокусируется на поверхности бумаги. Затем бумага проходит через устройства для проявления и закрепления и выходит на приемный лоток с левой стороны машины. Оригинал возвращается в другой приемный лоток, расположенный в передней части машины. На этом цикл операций завершается (рис. 76).

Машина «Копитрон 2000» сконструирована для копирования оригиналов в виде отдельных листов, хотя можно копировать и оригинал в виде брошюры-раскладки. Копирование книг и журналов не предусмотрено. Максимальный формат оригинала 280 × 430 *мм*. Машина позволяет копировать плашки, растровые изображения и изображения всех цветов, что обычно вызывает трудности. Скорость копирования довольно высока. Для

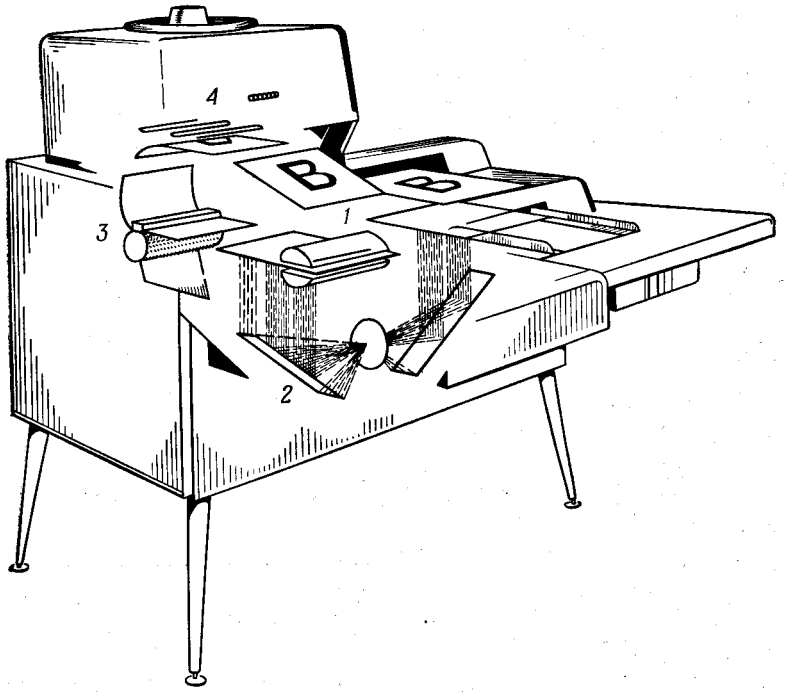


Рис. 76. Схема устройства «Копитрон 2000». Оригиналы вставляются через нижнюю щель справа. После этого последовательно производятся: *1* — зарядка; *2* — экспонирование; *3* — проявление изображения; *4* — закрепление.

получения первого отпечатка требуется 17 *сек*; скорость получения остальных копий размером 215 × 280 *мм* составляет 15 *копия/мин*. В настоящее время выпускается два вида бумаги «копитрон» — стандартная бумага для изготовления обычных копий и более дорогая бумага для изготовления высококонтрастных копий и офсетных форм.

В машине предусмотрена возможность регулирования экспозиции, что позволяет увеличивать или уменьшать оптическую плотность изображения на оттиске.

10.2.3. «ЭПЕКО ЭЛЕКТРОСТАТ» (ФИРМА «АМЕРИКЕН ФОТОКОПИ ЭКВИПМЕНТ»)

В этом копировальном устройстве настольного типа использован электрофотографический процесс «электрофакс» (см. фото 6). Используемая здесь бумага состоит из бумажной основы, на которую нанесена окись цинка, диспергированная в смоляном связующем. Бумага имеет почти панхроматическую чувствительность, что позволяет копировать оригиналы с цветными изображениями и воспроизводить их в черно-белом виде.

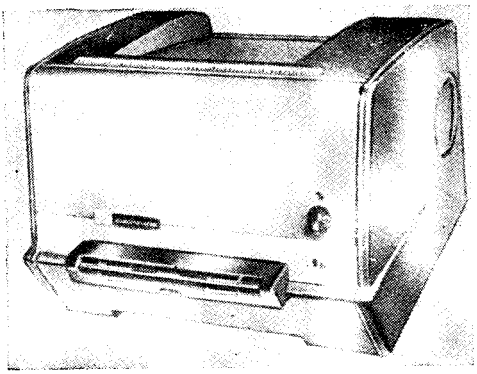


Фото 6. Копировальное устройство типа «Эпеко электростат».

Схема устройства этой машины показана на рис. 77. Электрофотобумага и оригинал вводятся одновременно в две отдельные щели, расположенные на лицевой стороне. Бумага проходит через устройство зарядки коронного типа и затем наверх через зону экспонирования. В то же самое время оригинал подается вниз, где свет, отраженный от его поверхности, фокусируется на поверхности электрофотобумаги. Затем копировальная бумага проходит через проявочное отделение с магнитной щеткой и наконец через закрепляющее устройство с инфракрасным нагревателем. Готовый отпечаток выводится на лоток в верхней части машины.

При работе на «Электростате» для получения первой копии требуется 20 *сек*, а последующие отпечатки изготавливают со скоростью 6 *копия/мин*. Растр и плашки могут воспроизводиться без какой-либо регулировки машины. Копии могут быть использованы в качестве офсетных форм. Выпускается электрофотобумага всех стандартных форматов вплоть до размера 280 × × 430 *мм*.

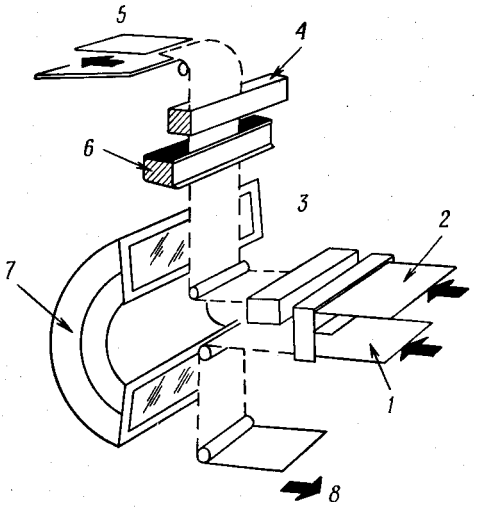


Рис. 77. Схема устройства «Эпеко Электростат». [Sugarman, *J. Photog. Sci.*, **10**, 208 (1962).]

1 — оригинал; *2* — электрофотобумага; *3* — устройство зарядки; *4* — устройство для закрепления; *5* — копия; *6* — проявочное устройство; *7* — оптическая система; *8* — оригинал.

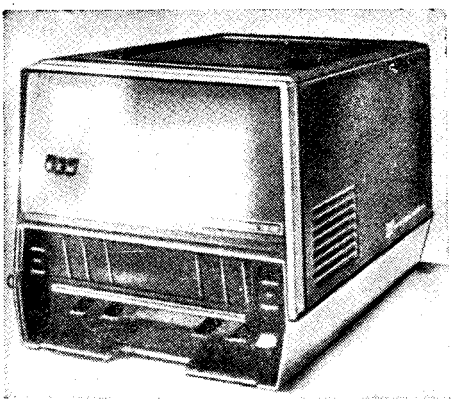
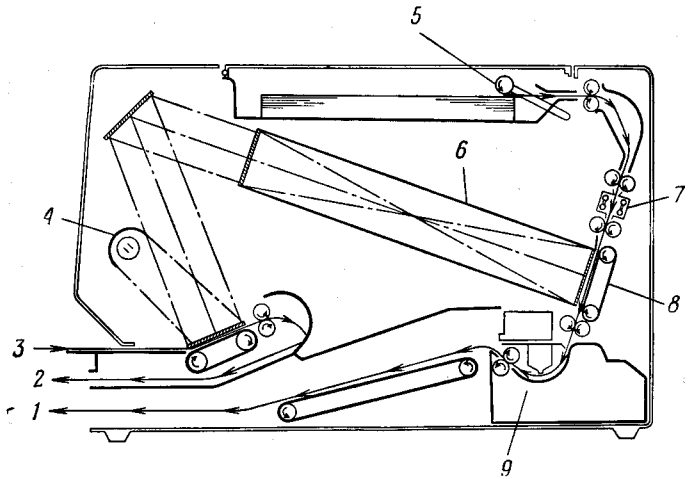


Фото 7. Копировальное устройство «SCM», модель 33.

10.2.4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ КОПИРОВАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО «SCM», МОДЕЛЬ 33

Это копировальное устройство настольного типа (см. фото 7) является первым серийным электрофотографическим копировальным устройством, в котором используется жидкий проявитель. Светочувствительный материал представляет собой бумагу, на которую нанесен слой связующего с окисью цинка.

Операции копирования осуществляются автоматически, причем процесс начинается после того, как копируемый оригинал вставляется в щель, расположенную в передней части машины. Предварительного прогревания прибора не требуется. Электрофотобумага автоматически подается из хранилища, расположенного в верхней части машины. Бумага проходит сначала через



Р и с. 78. Схема электростатического копировального устройства «SCM», модель 33.

1 — вывод копии; *2* — вывод оригинала; *3* — ввод оригинала; *4* — источник света; *5* — устройство для автоматической подачи бумаги (на 250 листов); *6* — проекционная система; *7* — зарядное устройство; *8* — зона экспонирования; *9* — проявочное устройство.

зарядную зону и затем через зону экспонирования, где скорость прохождения бумаги синхронизирована со скоростью прохождения оригинала. Затем бумага пропускается через жидкий проявитель (типа «Микростатик дисперсант»), где на электростатическое изображение осаждаются самозакрепляющиеся микроскопические частицы. Готовый оттиск проходит затем через нагретую камеру для ускорения испарения оставшейся на нем диэлектрической жидкости и выходит из окна в передней части машины

(см. рис. 78). Копировальная машина SCM, модель 33, может размножать оригиналы шириной до 280 *мм* при любой их длине. Нормальная производительность машины составляет 10 копий размером 245 × 405 *мм* в 1 *мин*. Можно копировать цветные оригиналы, плашки и растровые изображения.

10.2.5. ДРУГИЕ КОПИРОВАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, РАБОТАЮЩИЕ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ МАСШТАБА

Усовершенствование серийных конторских множительных устройств происходит столь быстро, что обзор оборудования, используемого в этой отрасли промышленности, легко может устареть раньше, чем он будет опубликован. Со времени подготовки приведенного выше обзора был выпущен ряд новых электрофотографических копировальных устройств. В том числе о новых машинах в этой области объявили фирмы «Деннисон мэньюфекчуринг» и «Севин бизнес мэшинз». О разрабатываемых электрофотографических машинах сообщили и другие фирмы. Некоторые из поставщиков машин, упомянутых в данном обзоре, также продемонстрировали новые модели оборудования настольного типа. К этим новым машинам относятся: «Дайл-а-копи» фирмы «Американ фотокопи эквипмент», «Электростатик 44» фирмы «SCM» и «Ксерокс 813» фирмы «Ксерокс».

10.3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОПИЙ НА БУМАГЕ С МИКРОФИЛЬМОВ

Первое электрофотографическое автоматическое устройство непрерывного копирования было предназначено для печати с микрофильмов. В 1953 г. фирма «Ксерокс» разработала по заказу Военно-морского флота США ксерографическую машину для получения увеличенных отпечатков с микрофильмов. С тех пор эта фирма выпустила серию моделей автоматических копировальных машин, известных под названием «Копифло». Для выполнения большого объема работ созданы специальные машины большой производительности.

10.3.1. МАШИНЫ «КСЕРОКС КОПИФЛО»

Машина «Копифло», модель 1, воспроизводит отдельные позитивные копии с рулонного микрофильма шириной 35 или 16 *мм* с пятнадцатью различными ступенями увеличения в пределах от 7 до 24. Предельная ширина готовой копии 280 *мм*. Ксерографический процесс, использованный в этой машине, подобен процессу, примененному в машине «Ксерокс 914», и отличается от него только тем, что здесь используется рулонная бумага,

а полученные копии сматываются также в рулон. Отдельные оттиски на бумажной ленте можно разделять перфорируемыми строчками отверстий, что облегчает резку ленты на отдельные копии. Машина позволяет получать позитивные отпечатки как с негативных, так и с позитивных микрофильмов. При переходе от копирования с негативного микрофильма к копированию

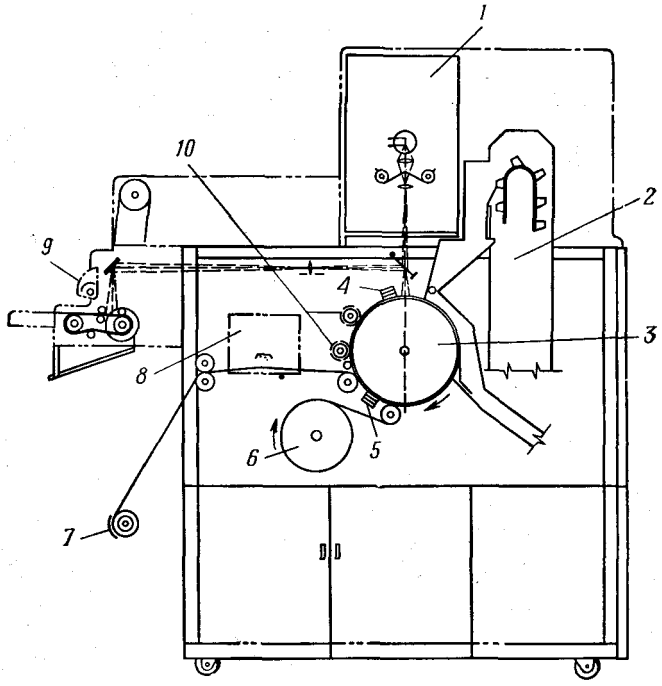


Рис. 79. Схема основных узлов машин «Копифло».

1 — проектор микрофильма; *2* — проявочное устройство; *3* — ксерографический барабан; *4* — зарядка; *5* — перенос изображения; *6* — рулон бумаги; *7* — приемный бумажный рулон; *8* — устройство для закрепления; *9* — проецирование непрозрачного оригинала; *10* — очищающие щетки.

с позитивного меняется проявляющий состав. При копировании с негативного микрофильма используют проявляющий состав, работающий с обращением, а для копирования с позитивного микрофильма — прямой позитивный проявляющий состав.

Машина «Копифло», модель 2, в основном подобна модели 1. Однако у нее другое назначение. Эта модель служит для получения увеличенных или уменьшенных копий с непрозрачных или прозрачных оригиналов. Машина позволяет уменьшать раз-

изображение на экране, используемом для чтения. Оттиск может быть получен простым нажатием кнопки (фото 11). «Филмак 100» позволяет получать оттиски размером 215 × 280 *мм* с 16- и 35-миллиметровых микрофильмов на пленке, а модель «Филмак 300» дает отпечатки размером 215 × 280 *мм* или 215 × 355 *мм*. Эта модель позволяет также плавно изменять увеличение в пределах от 8 до 20. Устройство «Филмак 200» является более крупноформатной машиной. Эта модель производит отпечатки с 35-миллиметровой микропленки с увеличением до размера 455 × 610 *мм*. Копировальная бумага состоит из бумажной основы, на которую сначала нанесен металлический слой алюминия, а затем окись цинка, диспергированная в смоляном связующем. Бумага поставляется в виде рулонов, которые загружаются в машину с задней стороны. Проявляющий состав в виде жидкого электролита (активатор) заливается в кювету, где также находится подушка из губки, по которой во время проявления скользит копировальная бумага. Подробная инструкция по эксплуатации устройств «Филмак» для чтения и копирования микрофильмов приведена в работе [168].

Недавно фирма «Поли репро интернэшнл» объявила о двух моделях электрофотографического устройства для чтения и копирования микрофильмов типа «Полидекс М16» и «Полидекс М35». В этих машинах используется метод «электрофакс», и они позволяют получать отпечатки с негативных или позитивных микрофильмов.

10.3.4. УВЕЛИЧИТЕЛЬ «КЕКОФАКС К-105-1»

Фирма «Кьюфл и Эссер» разработала большой электрофотографический увеличитель, который позволяет получать на бумаге с покрытием, содержащим окись цинка, отпечатки размером до 860 × 1220 *мм* со 105-миллиметровой пленки. Оборудование представляет собой большую камеру под названием «Кекофакс К-105-1».

10.4. ПЕЧАТАНИЕ И РАЗМНОЖЕНИЕ

В течение уже многих лет фотографические и фотомеханические процессы играют важную роль в производстве печатной продукции. Газетные, журнальные и другие полиграфические предприятия при изготовлении печатных форм для воспроизведения иллюстрационного материала почти всегда применяют фотомеханические процессы. Позднее фотомеханические методы были также использованы при изготовлении офсетных печатных форм на бумажной основе для конторских множительных машин и для малотиражной печати. Естественно, что необходимо исследовать каждый новый фотографический процесс, в том числе и электро-

фотографию, с целью определения возможности использования его для печатания и размножения.

10.4.1. РАЗМНОЖЕНИЕ КОПИЙ

В случаях, когда требуется несколько экземпляров конторского документа, обычно используют один из процессов размножения. Наиболее известны три таких процесса: 1) размножение офсетным способом; 2) мимеографирование, где в качестве печатной формы используют трафарет на покрытой воском бумаге; 3) спиртовое размножение, при котором на печатную форму наносится краситель и копии получают в результате последующего переноса красителя на бумагу. Четвертым процессом, который часто используют для размножения, является фотокопировальный диазопроцесс, для которого требуется форма, изготовленная на прозрачной или полупрозрачной бумаге, например кальке.

Одним из первых промышленных применений ксерографии было ее использование при изготовлении бумажных офсетных форм для множительных машин [26, 27]. Для этой цели используют оборудование, подобное изображенному на фото 3. Порошковое изображение переносят с селеновой пластины на бумажную офсетную пластину (форму) и закрепляют на ней нагреванием. После обычной химической обработки бумажной формы ее устанавливают на цилиндре множительной машины. С такой формы можно отпечатать тысячи оттисков.

Принципы плоской печати требуют, чтобы печатающие участки формы были олеофильными (воспринимающими краску) и гидрофобными (отталкивающими воду) и чтобы фон, или непечатающие участки, были гидрофильными (воспринимающими воду) и олеофобными (отталкивающими краску). Ксерографический проявитель, содержащий высокий процент гидрофобной смолы, оказался подходящим для изготовления офсетных печатных форм на бумажной основе.

Применение ксерографии позволило разработать быстрый метод изготовления бумажных офсетных форм. При этом исключаются традиционные стадии фотографической обработки негативов и копировальный процесс. Простота, быстрота и гибкость этого метода позволили широко использовать его при размножении и переиздании документов и других материалов, что выходит далеко за пределы обычного конторского размножения. Старые документы могут быть перепечатаны с требуемыми исправлениями и добавлениями.

Бумажные офсетные формы можно получать на любой ксерографической копировальной машине, в том числе и на больших копировальных автоматах. Некоторые слои из окиси цинка

в связующем можно сделать гидрофильными, вводя в них соответствующий химический состав [170]. Таким образом, сейчас имеется возможность получать офсетные бумажные печатные формы на копировальных машинах, работающих на бумаге типа «электрофакс», а также на машинах с селеновыми пластинами или барабаном.

Ксерографические методы можно, кроме того, использовать для изготовления печатных форм, применяемых в спиртовой печати [171]. Метод довольно прост. Полученное на селеновой пластине порошковое изображение переносят на лист, покрытый красящим составом. Этот лист затем помещают в устройство для закрепления парами растворителя, где порошок становится липким. После этого под давлением порошковое изображение вместе с находящимся под ним слоем красителя переносят на бумагу. На полученной таким образом форме обычно достаточно красителя для получения на множительной машине примерно 150 копий. Этот способ, разработанный фирмой «Ксерокс», позволяет получать растровые и другие иллюстрационные изображения. Для осуществления этого процесса может быть использовано обычное ручное копировальное оборудование, подобное изображенному на фото 3, с добавлением специального устройства, которое делает изображение липким и переносит его на материал бумажной печатной формы.

Изготовление печатной формы для множительных устройств, в которых используется диазопроцесс, состоит в переносе ксерографического изображения с селеновой пластины или барабана на полупрозрачный или прозрачный лист. Этот процесс может быть осуществлен на любой из копировальных машин «Ксерокс». Закрепленное порошковое изображение создает достаточный контраст для получения диазокопий.

Пока еще не найдено практически применимого электрофотографического способа изготовления шаблонов для мимеографии.

10.4.2. ОФСЕТНЫЕ ПЕЧАТНЫЕ ФОРМЫ

Успешное применение ксерографии в офсетном множительном процессе стимулировало разработку способов использования ксерографических методов для промышленной плоской печати. Офсетные печатные формы на бумажной основе, полученные путем переноса изображений с селеновых ксерографических пластин или изготовленные непосредственно на бумаге типа «электрофакс», рассчитаны на небольшие тиражи — до 10 тысяч оттисков. Для больших тиражей и многокрасочных работ требуются более стабильные металлические пластины.

Методы переноса ксерографических изображений на зерненые

цинковые пластины были описаны в работе [172]. В этой работе было показано, что порошковое изображение может быть непосредственно перенесено с селеновой пластины на цинковую пластину или же сначала на бумагу, а затем с бумаги на цинковую пластину.

Процесс преобразования ксерографической пластины в офсетную печатную форму был изложен в работе [173]. Авторы этой работы применяли металлические пластины, покрытые слоем фотопроводящего пигмента в связующем на основе смолы. После очувствления в коронном разряде пластина экспонировалась в обычной фотокамере. Затем производилось проявление и закрепление, обеспечивающее сцепление смолистого порошка с поверхностью пластины. Для придания фотопроводящему материалу гидрофильных свойств пластина помещалась в специальный химический раствор. После такой обработки пластина готова для установки в офсетную печатную машину. Офсетный способ печати требует, чтобы на печатной форме было прямое изображение, т. е. оно должно быть размещено так же, как и на оригинале. Следовательно, при экспонировании пластины в фотокамере необходимо применять оптическое обращение.

Изготовление офсетных печатных форм ксерографическим путем широкого промышленного применения пока не получило. В полиграфической промышленности качество оттиска имеет первостепенное значение. Поэтому новые процессы найдут широкое использование в полиграфии только после того, как они обеспечат получение оттисков, отвечающих принятым стандартам.

Ксерографические методы успешно применяются в случае средних по тиражу работ, промежуточных между крупнотиражными печатными работами и малотиражным множительным копированием. В течение многих лет ощущалась необходимость создания экономичного промышленного способа, который можно было бы использовать для печатания некоторых типов малотиражных книг, брошюр и других видов печатных изданий, а также для перепечатывания в небольшом объеме уже распроданных изданий. Изготовление печатных форм для такого вида работ обычными способами может оказаться слишком дорогим и требует больших затрат времени. Именно в этой области метод изготовления офсетных печатных форм ксерографическим способом является многообещающим вкладом в полиграфию.

Для изготовления офсетных печатных форм разработаны специальные оборудование и материалы. Фирма «Ксерокс» выпускает комплект пооперационного оборудования для изготовления печатных форм нескольких размеров. «Робертсон фотомеханикс» производит оборудование, в котором фотокамера и процессор объединены в единое целое, при этом использован принцип «элек-

трофакс». О выпуске машины для изготовления офсетных печатных форм ксерографическим способом на основе использования принципа «электрофакс» также объявила фирма «Пластик коатинг». Фирма «Эзоплейт» заявила об изготовлении алюминиевых офсетных пластин, покрытых органическим фотопроводящим слоем и предназначенных для использования в установках «Ксерокс».

10.4.3. ФОТОЦИНКОГРАФИЯ

При изготовлении печатных форм для высокой печати фотоцинкографским способом сначала на металлической поверхности получают изображение из фоторезиста [1]). Обычно это достигается нанесением на металлическую поверхность светочувствительного материала, например желатины, содержащей раствор бихромата, которая под действием интенсивного ультрафиолетового излучения становится нерастворимой. Пластину с нанесенным на нее слоем после высушивания в течение нескольких минут освещают дуговыми лампами через фотографический негатив. Неэкспонированные растворимые участки слоя вымываются затем водой или другим растворителем, и на пластине остается изображение из резиста. После обжига, обеспечивающего дополнительное задубливание, пластина помещается в травящий раствор с целью образования на металлической пластине рельефного изображения.

В лабораторных условиях было продемонстрировано, что ксерографическое изображение, полученное на металлических пластинах или перенесенное на металлические поверхности, может иметь кислотоупорность, соответствующую требованиям цинкографского травления [174, 175]. Во время нагревания порошковое изображение оплавляется, образуя сплошной кислотоупорный слой. Последующее травление можно затем выполнять обычными цинкографскими методами. Был также описан способ изготовления фотоцинкографских клише на металлических пластинах, покрытых слоями, содержащими окись цинка, диспергированную в смоляном связующем [170]. Для образования на покрытой таким слоем пластине изображения из резиста были использованы обычные ксерографические способы. Затем пластина обрабатывалась растворителем, который удалял фотопроводящий слой с непечатающих участков, где отсутствует ксерографическое изображение, обнажая металл основы, но не затрагивая изображения из резиста. После этого пластину можно было травить обычным путем. Имеются сведения, что этим способом

[1]) Светочувствительный кислотоупорный материал.— *Прим. ред.*

были получены качественные штриховые и растровые клише на цинковых, медных и магниевых пластинах.

До настоящего времени применимость таких методов была проверена лишь в лабораторных условиях. Для того чтобы ксерографическая техника стала инструментом фотоцинкографии, необходимо ее дальнейшее усовершенствование.

10.4.4. ПРЯМАЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ПЕЧАТЬ

Машины «Копифло» фирмы «Ксерокс» можно рассматривать как печатные машины без печатной формы, в которых она заменена диапозитивом, куском микрофильма или листом бумаги, содержащим и материал для размножения. При обычных тиражах скорость печатания 6 *м/мин* является слишком малой. Однако, когда требуется относительно небольшое число копий, применение этих машин становится вполне целесообразным, особенно

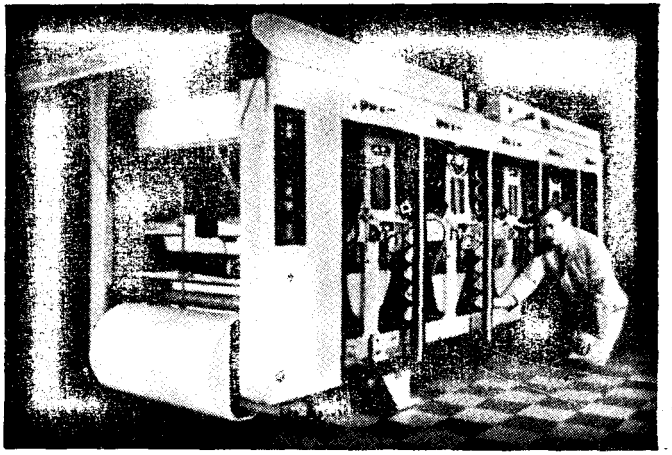


Фото 12. Пятикрасочная электростатическая печатная машина фирмы «Харрис-интертайп» (экспериментальная модель).

для перепечатки уже разошедшихся материалов. Например, вполне возможно отпечатать одну или несколько копий целой книги непосредственно с экземпляра книги или с ее микрофильма. По-видимому, для выполнения подобного рода печатных работ могут быть применены и фотокопировальные машины, в которых используется бумага с покрытием, содержащим окись цинка.

Фирма «Харрис-интертайп» разработала электростатическую машину, предназначенную для прямого печатания на бумаге типа

«электрофакс» [176]. Эта машина может печатать машинописный текст, штриховые рисунки или фотографии с 70-миллиметрового микрофильма и имеет производительность 2000 *лист/час* при размерах листа 570 × 760 *мм*. На ней можно печатать черно-белые и цветные материалы. Более ранняя экспериментальная модель машины была однокрасочной (печатала одновременно только один цвет), и для печати каждого следующего цвета необходимо было перематывать бумагу и снова пропускать ее через машину. Более поздняя модель позволяет последовательной печатью получать 5-цветные изображения (фото 12).

Прототип аналогичной машины разработан фирмой «Рэйдиокорпорейшен оф Америка» [177] и явился предшественником электростатической печатной машины фирмы «Харрис-интертайп».

10.5. СЕРИЙНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КСЕРОРЕНТГЕНОГРАФИИ

Ксерорентгенография, т. е. процесс изготовления рентгеновских снимков с использованием методов ксерографии, была описана в одном из предыдущих разделов. Полный комплекс серийного оборудования вместе с материалами для обработки ксерорентгенограмм выпускается и поставляется отделом рентгеновских материалов фирмы «Дженерал электрик».

10.5.1. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Основное оборудование состоит из устройства для зарядки, циклического устройства, очистителя, хранилища и устройства проявления (фото 13). Вспомогательное оборудование включает устройство для просмотра изображений, которое может быть оснащено камерой для непрерывной фотографической записи, переносное устройство и устройство термического закрепления для непрерывной регистрации изображений на специальной бумаге, релаксационную установку для уменьшения времени, необходимого для «отдыха» пластин между экспонированием, и устройство для предотвращения «подсветки» изображения, предназначенное для уменьшения бокового подсвечивания ксерорентгенограмм при экспонировании при большой интенсивности излучения. Из всех этих вспомогательных приспособлений на фото 13 показано только устройство для просмотра. Устройство для зарядки, циклическое устройство, очиститель и хранилище заключены в один корпус.

Устройство для очистки пластины (очиститель) состоит из вращающейся меховой щетки с электроприводом, которая заключена в кожух из листовой стали; в устройстве имеются салазки, позволяющие вручную вставить пластину и привести ее в контакт

с очищающей щеткой. Реле давления автоматически включает и выключает привод щетки, когда пластина соответственно вставлена или удалена. Фильтр и жалюзи расположены так, чтобы в них собирался порошок, который удаляется с пластины. Циклическое устройство для последовательного использования пластин состоит из листового металлического контейнера, который может содержать шесть ксерорентгенографических пластин. Оно устроено таким образом, что пластины, вставленные в верхнюю щель,

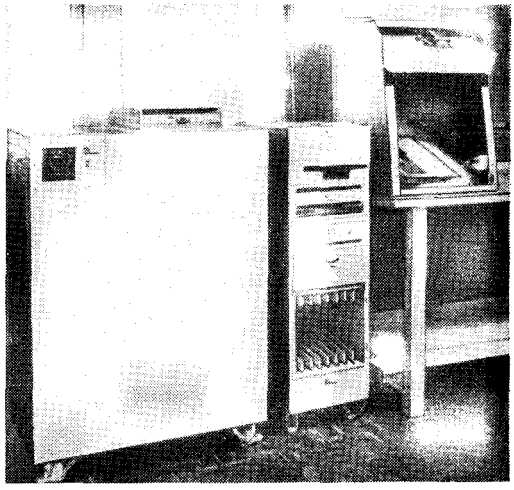


Фото 13. Ксерорентгенографическое оборудование.
Слева — устройство для проявления; в центре — шкаф, содержащий устройства для зарядки и очистки, а также циклическое устройство для последовательного использования пластин и хранилище; справа — просмотровое устройство.

могут быть последовательно изъяты через нижнюю щель. Устройство для зарядки пластин состоит из высоковольтного источника выпрямленного напряжения, тонкой проволочной зарядной сетки (зарядника) и электропривода, перемещающего зарядную сетку над ксерорентгенографической пластиной. Процесс зарядки включается нажатием кнопки. О работе зарядной сетки и механизма для ее перемещения сигнализирует индикаторная лампочка. Устройство для зарядки заключено в кожух из листового металла, имеющий салазки для ввода пластины. Хранилище состоит из металлического кожуха с пазами для установки запасных ксерорентгенографических пластин.

Устройство для проявления пластин заключено в металлический кожух, в котором находятся камера для проявления, пистолет для распыления порошка, фильтры, воздушный ком-

прессор, хронирующее устройство и воздушный клапан. Проявочная камера имеет отделение с пылезащитным кожухом для приема ксерорентгенографической пластины. Камера снабжена пистолетом для распыления порошка с соплом специальной конструкции. Для зарядки порошка в камере имеется также отделение со сменными пылеулавливающими фильтрами. Управление продолжительностью цикла проявления осуществляется при помощи хронирующего устройства, которое может регулировать цикл в пределах от 2 до 60 *сек*. Воздушный клапан, работающий в пульсирующем режиме через заданные промежутки времени, прерывает воздушный поток, поступающий в распылитель. Воздушный компрессор с электроприводом имеет мощность, достаточную для работы в непрерывном режиме.

10.5.2. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Устройство для просмотра имеет наклонную поверхность для приема ксерографической пластины в кассете. Источник света из двух 15-ваттных люминесцентных ламп расположен по отношению к пластине так, чтобы было удобно наблюдать изображение (фото 14). В просмотровое устройство можно установить фотографическую камеру «График» фирмы «Графлекс» размером 65 × 90 *мм*, с помощью которой осуществляют непрерывную фотографическую запись. Имеется светозащитная бленда, так что экспонирование можно производить при комнатном свете.

Устройство для переноса представляет собой камеру, выполненную из листового металла, в котором содержатся нажимные ролики с электроприводом, принимающие ксерорентгенографическую пластину и специальную бумагу. Пластину и бумагу, расположенную на направляющих, помещают между роликами. Когда ручка подачи давления будет опущена, автоматически включается привод роликов, который перемещает пластину и бумагу под роликами; при этом изображение с пластины переносится на бумагу. В конце хода давление ослабляется и бумага с пластиной удаляются. Бумага с перенесенным изображением может быть затем снята с пластины.

Устройство для термического закрепления представляет собой изолированную печь с термостатическим регулированием, снабженную сменным асбестовым подносом и ручкой для приема ксерорентгенографической бумаги.

Устройство для предотвращения подсветки изображения состоит из источника постоянного тока, создающего напряжение между подложкой ксерорадиографической пластины и шторкой кассеты во время экспонирования рентгеновскими лучами. Оно выполнено в виде контейнера высотой в 150 *мм*, в который

помещены повышающий трансформатор, выпрямитель, ограничитель тока и контактный переключатель, на который устанавливают ксерорентгенографическую пластину.

Релаксационное устройство состоит из направляющих, которые удерживают пластину над шестью инфракрасными лампами,

Фото 14. Ксерографическое изображение сварной детали, как оно выглядит непосредственно на пластине в просмотровом устройстве.

установленными в специальных алюминиевых отражателях, двух вентиляторов и релейного шкафа, содержащего реле и переключательные схемы, выполняющие необходимую коммутацию (включение инфракрасных ламп; их выключение, когда пластина достигла требуемой температуры; включение трех ламп на низкое напряжение для того, чтобы удержать требуемую температуру в течение времени, задаваемого хронирующим устройством; полное выключение ламп и включение вентиляторов, охлаждающих пластину до комнатной температуры). По окончании цикла загорается индикаторная лампочка.

10.5.3. МАТЕРИАЛЫ

Ксерорентгенографическая пластина состоит из алюминиевой подложки, покрытой тонким однородным слоем фотопроводящего материала. Рабочая поверхность пластины составляет 230 × × 355 *мм*. Пластина вставлена в деревянную кассету с алюминиевой шторкой, которая закрывает пластину в промежутке между различными операциями и во время хранения. Кассета позволяет удалять пришедшую в негодность ксерорентгенографическую пластину и заменять ее новой.

Для проявления ксерорентгенографических изображений применяют три специальных проявителя. Разработана рецептура белого, синего и белого флуоресцирующего проявителей, каждый из которых предназначен для специфического типа изображения (рассматриваемого или репродуцируемого). Все три проявителя можно применять для проявления негативных оптических изображений с целью их непосредственного просмотра на ксерорентгенографической пластине. Белый проявитель предназначен только для прямого просмотра, синий и флуоресцирующий проявители можно перенести и закрепить на специальной бумаге с целью регистрации изображения. Синий проявитель создает на бумаге позитивное изображение, которое можно рассматривать при обычном свете. При использовании флуоресцирующего проявителя перенесенное изображение можно рассматривать при ультрафиолетовом освещении, создающем негативное изображение.

Перенос производят на специальную бумагу с белым пластиковым покрытием, формат бумаги 250 × 380 *мм*. Для этого бумагу располагают на ксерорентгенографической пластине и приводят в контакт с последней при помощи роликов переносного устройства. Бумага обладает таким свойством, что перенесенный порошок может надежно закрепляться на ней при легком нагревании в закрепляющем устройстве.

10.6. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ

Электрофотография обладает множеством замечательных особенностей, которые позволяют применить ее в ряде специальных случаев для записи информации, а также в других процессах. Ниже описаны некоторые из последних достижений в этих направлениях.

10.6.1. МИКРОКСЕРОГРАФИЯ

Фирмой «Белл энд Хоуэлл» было разработано и построено устройство для получения микроизображений с применением ксерографии [178]. Хотя первые машины были предназначены для библиотек, сам подход интересен для многих областей.

При пользовании такой машиной оператор вставляет документ в оригиналодержатель для его экспонирования, затем вставляет карту, на которой получают изображение, и нажимает кнопку. Через 30 *сек* появляется карта с уменьшенным по размеру изображением оригинального документа, готовая для немедленного использования.

На фото 15 показан общий вид машины. Оригиналодержатель расположен в верхней части машины. Для копирования могут быть использованы односторонние или двусторонние оригиналы, а также оригиналы типа периодических изданий или книги в переплетах.

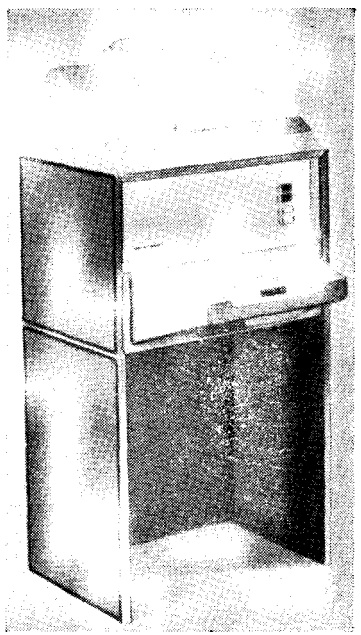


Фото 15. Микроксерографическое записывающее устройство фирмы «Белл энд Хоуэлл».

Карту, на которой получают изображение, помещают на горизонтальный стол, расположенный в центральной части машины. Формат карты может меняться от 75 × 130 *мм* до 130 × 200 *мм*. Карта может быть либо из прозрачного, либо из непрозрачного материала. Оператор помещает карту так, чтобы изображение располагалось на определенном участке карты, а именно там, где его требуется получить. Приемником изображения может быть не только карта, как было описано в данном случае, но и материал в виде рулона.

При нажатии кнопки выполняется полный ксерографический цикл. После того как селеновая пластина очувствлена, она передвигается в положение для экспонирования, где на поверхность селеновой пластины проецируется уменьшенное оптическое изображение копируемого документа. В этих устройствах для различных случаев использования можно уменьшать изображение по диаметру в 12 и 18 раз. Затем пластина проходит через узел проявления и оттуда к позиции, на которой осуществляется перенос изображения.

В зоне переноса проявленное порошковое изображение переносится на карту и затем закрепляется на ней. Карта выходит из машины, готовая к немедленному использованию. Если на одну и ту же карту требуется скопировать документ или статью из нескольких страниц, карта повторно вставляется

в машину и располагается так, чтобы последующее изображение переносилось на участок, примыкающий к первому изображению. Подобным же образом карта, на которой уже имеется полученное ранее изображение, может быть повторно пропущена через

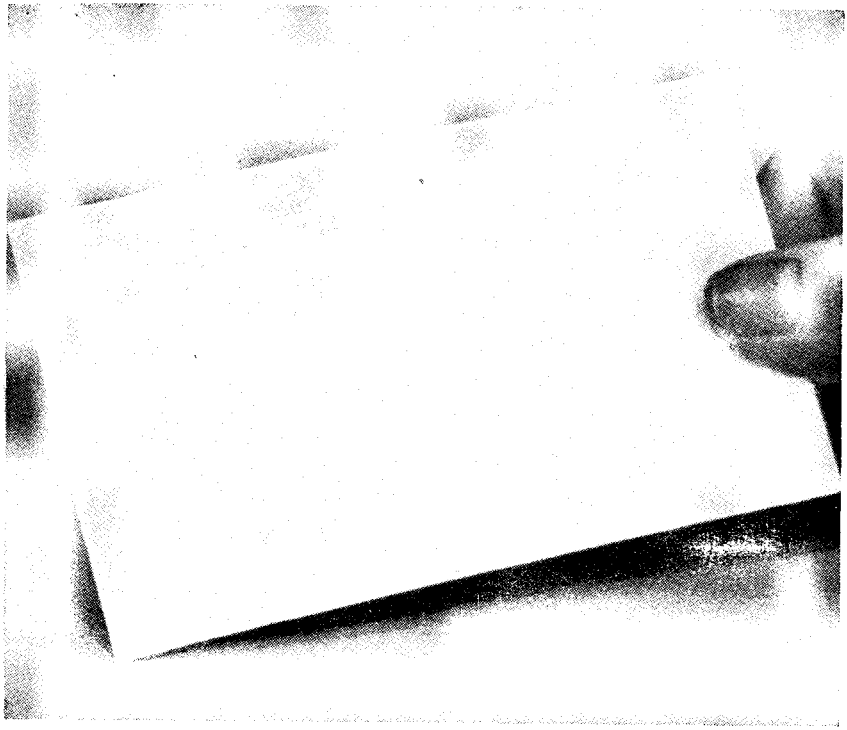


Фото 16. Непрозрачная микроксерографическая карта, полученная по принципу записи дополнительной информации, которая содержит 3 изображения, уменьшенные в 12 раз.

машину для записи на нее информации, которая дополняет ту, что уже имеется на карте. Эта возможность записи дополнительной информации имеет особую ценность при обслуживании предметных картотек или картотек личного состава, где к уже имеющимся сведениям требуется добавление новой информации.

На фото 16 показана непрозрачная карта размером 75 × 130 *мм*, на которой размещены три последовательно нанесенных изображения, каждое из которых уменьшено в 12 раз. Хотя на непрозрачной карте изображение выглядит как миниа-

тюрная печатная страница, прозрачная карта имеет то преимущество, что она может быть легко использована в качестве оригинала для получения дополнительных копий с отдельных изображений на карте или с карты в целом при использовании диазографии или другого аналогичного процесса. К тому же проблема освещения в аппаратах для чтения прозрачных микроизображений решается значительно проще, чем в аппаратах для чтения непрозрачных изображений, где требуется обеспечивать такую же яркость.

Для чтения микроксерографических изображений и получения с них увеличенных копий могут быть применены те же методы и оборудование, которые используются для чтения или копирования обычных микрофильмов.

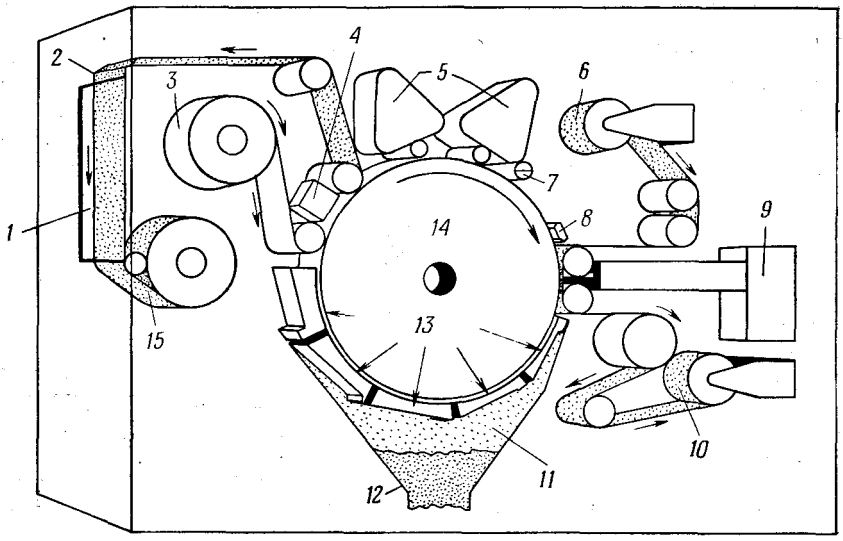
Как и обычная аппаратура для работы с микроизображениями, микроксерографическая система создает определенные удобства для тех, кто ею пользуется и, кроме того, позволяет экономить площадь для хранения информации и средства. Кроме того, микроксерография имеет дополнительные преимущества, так как она дает возможность записать информацию и сразу же осуществить проверку записи; записанная информация готова к немедленному использованию. А представляемая этой системой возможность в любое время записать на готовые карты дополнительную информацию являетя уникальной.

10.6.2. КСЕРОГРАФИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОПИРОВАНИЯ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

Фирма «Ксерокс» разработала для ВВС США автоматическое ксерографическое печатающее устройство, которое позволяет получать полутоновые позитивные отпечатки с фотографических негативов [179]. Машина печатает с рулонной 230-миллиметровой пленки на белую, неочувствленную бумагу и обладает производительностью, равной 1 оттиску размером 230 × 230 *мм* каждые 2,25 *сек*. В машину можно загрузить рулон негативной пленки длиной в 152 *м*. Первоначально машина предназначалась для скоростной печати с аэрофотографических пленок, причем полученные отпечатки использовались для составления карт и в качестве данных разведки.

На рис. 81 показана схема узлов машины. Светочувствительным элементом является ксерографический барабан с селеновым покрытием. Все операции последовательно осуществляются на позициях, расположенных вокруг барабана. Экспонирование очувствленной в коронном разряде поверхности барабана производят через негативную пленку, движущуюся в контакте с барабаном. Для получения необходимых градаций тонов изображения

проявление производят порошковым облачком с помощью системы проявляющих электродов. Затем проявленное изображение переносится электростатическим путем на бумагу, которая подается с рулона, расположенного внутри машины. Затем производится закрепление изображения на бумаге. Можно использовать обычную бумагу, но, когда применяют гладкую мелованную



Р и с. 81. Схема устройства «Ксерокс» для печатания рисунков. [*Phot. Sci. Eng.*, 3, 246 (1959).]

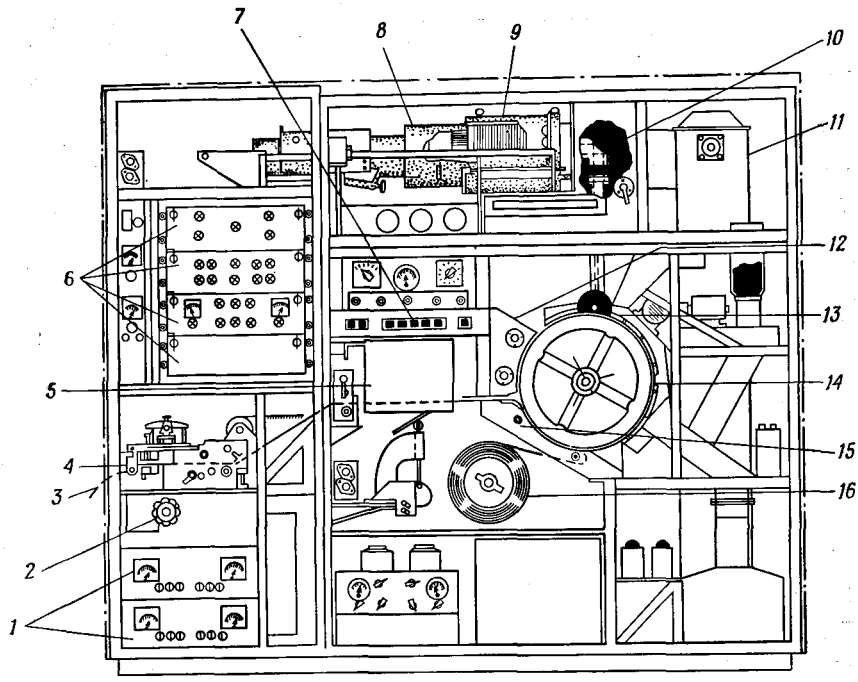
1 — просмотровое окно; *2* — закрепление; *3* — бумага; *4* — электростатический перенос; *5* — щетки; *6* — подача негативной пленки; *7* — разрядная лампа; *8* — зарядник; *9* — источник света и контроль экспонирования; *10* — перемотка негативной пленки; *11* — проявочная камера; *12* — подача проявителя; *13* — 5 проявляющих электродов; *14* — ксерографический барабан; *15* — приемный бумажный рулон.

бумагу, полученные рисунки выглядят как глянцевые отпечатки. С помощью простой настройки машина позволяет получать позитивные отпечатки с позитивной пленки. Во время работы машины можно осуществлять быстрое изменение контраста и экспозиции.

В 1959 г., когда было объявлено об этом устройстве, сама машина находилась еще в стадии разработки и не предназначалась для серийного производства. Однако уже тогда было очевидно, что после дальнейшего усовершенствования она получит широкое распространение в качестве быстрой, экономичной машины для печатания фотографических изображений.

10.6.3. РЕГИСТРАЦИЯ ДАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Несколько лет назад отделение «Стромберг — Карлсон» фирмы «Дженерал дайнамикс» выпустило высокоскоростное печатающее устройство, служащее в качестве устройства вывода ЭЦВМ. В этом устройстве был использован ксерографический



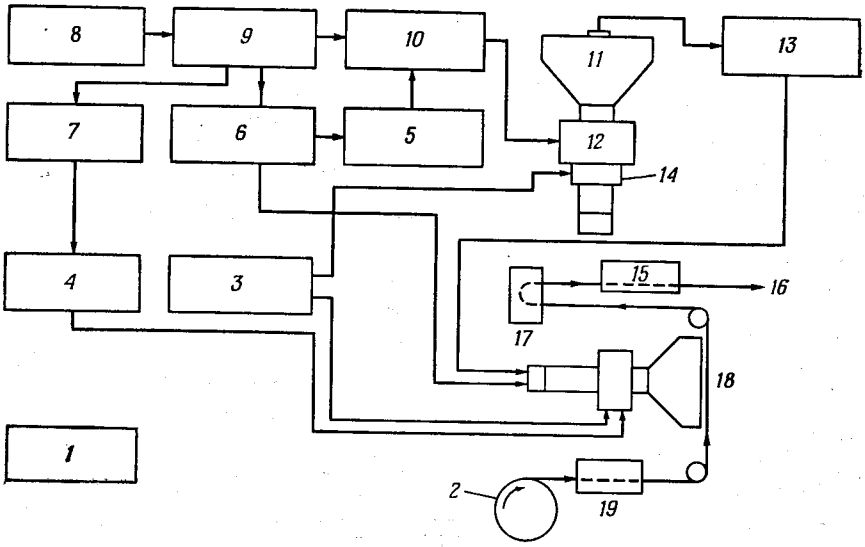
Р и с. 82. Высокоскоростное электронное печатающее устройство «SC-5000» (внутренний вид).

1 — источник питания; *2* — приемный бумажный рулон; *3* — отпечатанная копия; *4* — устройство для резки бумаги (вспомогательное); *5* — закрепление; *6* — схема управления ЭЛТ; *7* — кнопки управления; *8* — металлический экран; *9* — «Характрон» (диаметр 18 *см*); *10* — призма; *11* — проявочное устройство; *12* — камера очистки; *13* — зарядник; *14* — ксерографический барабан; *15* — перенос изображения; *16* — бумажный рулон.

принцип в сочетании со специальной электронно-лучевой трубкой для регистрации данных в кодово-импульсной форме [180].

Эта машина, получившая название «SC-5000», была охарактеризована как самое быстрое устройство вывода. Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), известная как «Характрон» [181], формирует знаки, направляя луч от электронной пушки на тонкий металлический шаблон, содержащий 64 различных

знака, собранных в матрицу 8 × 8. За металлическим шаблоном поперечное сечение электронного луча приобретает форму того знака, через который он прошел. Выбор знака в матрице осуществляется соответствующим отклонением электронного луча. Профилированный электронный пучок затем может быть отклонен в требуемое положение на покрытом люминофором экране



Р и с. 83. Блок-схема опытной установки с вводом двоичных данных, используемой совместно с экспериментальным печатающим устройством «Электрофакс» фирмы «Ар-Си-Эй». [O l d e n, *RCA Review*, 18, 586 (1961).]

1 — источник питания; *2* — рулон бумаги «электрофакс»; *3* — вертикальное отклонение букв; *4* — горизонтальное отклонение; *5* — горизонтальное отклонение букв; *6* — гашение обратного хода; *7* — запускающее устройство; *8* — устройство считывания с ленты; *9* — коловый регистр; *10* — селектор отклонения; *11* — моноскоп; *12* — основная отклоняющая система; *13* — видеоусилитель; *14* — вспомогательная отклоняющая система; *15* — закрепление; *16* — вывод отпечатков; *17* — проявление; *18* — ЭЛТ; *19* — двустороннее зарядное устройство.

ЭЛТ, создавая при соответствующей фокусировке светящееся изображение этого знака. Полученные таким способом знаки фокусируются затем оптической системой на покрытый селеном барабан ксерографического печатающего устройства.

Данные, поступающие в импульсной форме электронным путем, превращаются в соответствующие аналоговые сигналы, управляющие отклонением луча. Импульсный код может быть получен от электронной вычислительной машины, автоматических устройств по обработке данных, информационных систем или по сети дистанционной связи.

Печатающее устройство «SC-5000» подобно машинам типа «Копифло». Оно печатает на обычной бумаге, и, согласно сообщениям, его производительность достигает одного миллиона буквенно-цифровых знаков в минуту. На рис. 82 показана схема этого печатающего устройства. Имеются сообщения, что в настоящее время эксплуатируется несколько таких печатающих устройств.

Недавно «Рэйдиокорпорейшен оф Америка» построила опытную модель высокоскоростного выводного печатающего устройства, на котором используется специальная электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) для контактной печати на бумаге «электрофакс» [182].

В этом устройстве (рис. 83) знаки сначала формируются на экране трубки моноскопа и затем через видеоусилитель передаются на специальную трубку с окном из тонкого стекла. Бумага «электрофакс», перемещаясь относительно окна ЭЛТ, постоянно находится в контакте с ним и экспонируется в результате непосредственной засветки светящимися знаками. Последние формируются на внутренней стороне окна, имеющего покрытие из люминофора.

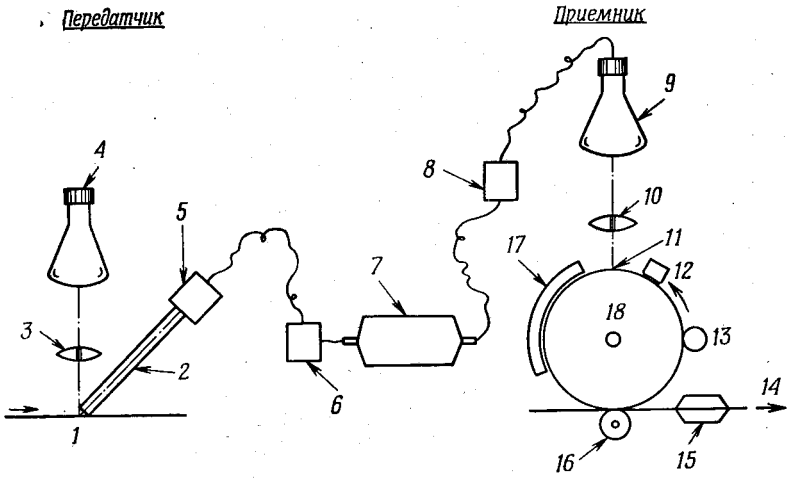
Это печатающее устройство может записывать 600 000 знаков в минуту. Такая скорость была продемонстрирована, когда аппарат работал с факсимильным вводом, однако она значительно снижается, когда вводом служат выходные данные ЭЦВМ.

10.6.4. ПОЛУЧЕНИЕ ФАКСИМИЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ КСЕРОГРАФИИ

Термин «факсимильный» сейчас широко используется для обозначения способов передачи рисунков или копий документов по радио или по проводам.

Различные методы получения факсимиле используются на практике уже в течение многих лет, особенно для передачи изображений в отдаленные районы. Недавно появились устройства для факсимильной передачи машинописных текстов, эскизов, карт и т. п. Эти системы имеют серьезные ограничения по скорости и качеству, так как они были рассчитаны на использование телефонных каналов. Для передачи одной страницы требуется около 6 *мин*, поэтому стоимость передачи на большие расстояния с помощью этих систем слишком велика. Теперь, когда стали применяться передающие системы СВЧ, снова появился интерес к использованию дистанционной передачи факсимильных изображений. СВЧ каналы имеют большую пропускную способность и тем самым обеспечивают более высокие скорость и разрешение при факсимильной передаче документов.

Приемное устройство факсимильной системы содержит печатающее оборудование, которое регистрирует сигналы, поступающие от передающей системы. Для печатающего устройства можно применять фотопленку, фотобумагу или электрочувствительную бумагу. Недавно фирма «Ксерокс» продемонстрировала



Р и с. 84. Схема, поясняющая работу факсимильного устройства фирмы «Ксерокс».

1 — документ; *2* — светопровод; *3* — объектив; *4* — сканирующая ЭЛТ; *5* — фотоумножитель; *6* — электронные преобразователи; *7* — передающее устройство; *8* — электронный приемник; *9* — ЭЛТ; *10* — объектив; *11* — экспонирование; *12* — зарядка; *13* — очистка; *14* — выход копии; *15* — закрепление изображения на бумаге; *16* — перенос изображения на бумагу; *17* — проявление; *18* — селеновый барабан.

высокоскоростную факсимильную систему, где в приемном блоке использовано ксерографическое копировальное устройство [183]. Указывают, что новое оборудование имеет в 24 раза более высокое быстродействие, чем большинство моделей выпускаемого серийного оборудования. Упрощенная схема этой системы показана на рис. 84. Она предназначена для совместной работы с передающими системами, имеющими большую пропускную способность, и будет передавать и печатать копии со скоростью до 16 *документ/мин* при размере документа 215 × 280 *мм* и разрешении порядка 40 *линия/см*. При повышении разрешающей способности до 100 *линия/см* скорость машины снижается до 3,5 *документ/мин*. Более высокая разрешающая способность, конечно, позволяет получить и репродукцию более высокого качества. Переданная информация может быть отпечатана на обычной бумаге или на офсетной пластине. В случаях, когда за короткое

время требуется отпечатать большое число копий одного и того же переданного материала, возможность получать копии непосредственно на офсетных пластинах имеет важное значение.

В настоящее время фирма «Ксерокс» еще проводит производственные испытания нескольких экспериментальных моделей факсимильных систем.

10.6.5. СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ С БЫСТРОЙ ВЫБОРКОЙ ИНФОРМАЦИИ

При управлении боевыми системами и хозяйственными предприятиями в тех случаях, когда требуется без промедления принять решение, необходимо быстро находить, а затем отображать информацию. Обычно такого рода информация должна быть предоставлена группе людей. Эта информация может храниться в виде таблиц или диаграмм или в запоминающем устройстве ЭЦВМ, а иногда может поступать по каналам связи от удаленного источника. Каков бы ни был источник, данные должны быть быстро обработаны и спроецированы на экран для просмотра. Такая необходимость стимулировала значительное число исследований новых способов сбора и отображения данных.

Мотт, Кларк и Дессауэр [184] изобрели ксерографический способ быстрого отображения информации. Созданный ими новый тип проецирующей системы получил название «Прокси». В этой системе использована поверхностная отражательная способность селеновых ксерографических пластин. Начальные стадии соответствующего технологического процесса такие же, как и при ксерографическом печатании. Селеновая пластина заряжается, освещается оптическим изображением (например, изображением, которое дает ЭЛТ) и затем проявляется порошком. Проявленное изображение проецируется на экран в отраженном свете. Свет, отраженный от чистого селена, фокусируется на экране оптической системой, в то время как свет, рассеянный и поглощенный порошковым изображением, на экран не попадает. В результате на экране образуется черно-белое изображение. обладающее яркостью, которая сравнима с яркостью, получаемой при проецировании диапозитивов. Порошковое изображение не требует закрепления и после проецирования может быть удалено очисткой. Затем селеновая пластина может быть повторно использована, как в обычном ксерографическом процессе. Если необходимо получение устойчивого изображения, порошок может быть перенесен на бумагу или пленку и там закреплен.

Несколько модифицированных систем «Прокси» разработано для непрерывного отображения одних и тех же или меняющихся

данных. Одна из таких систем схематически показана на рис. 85. Как сообщают, этот способ проецирования отраженного ксерографического изображения характеризуется временем выборки информации, меньшим 1 *сек*.

Для проецирования на большие экраны, где требуются интенсивные источники света, используют другой метод. В этом случае

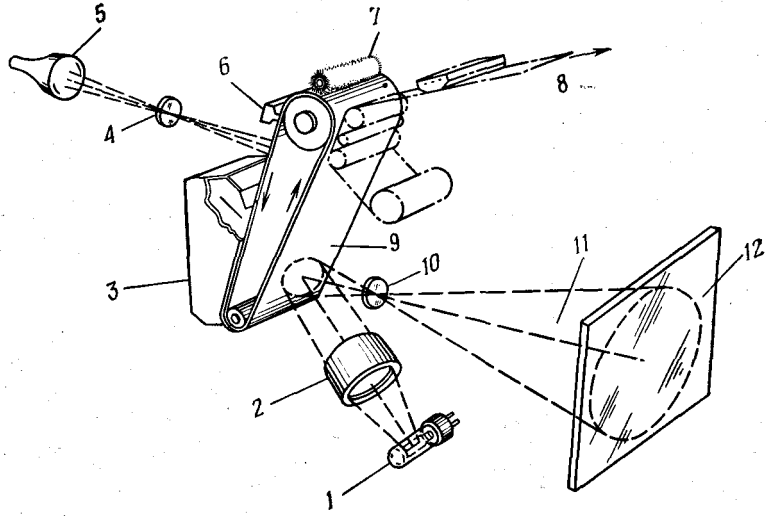


Рис. 85. *Устройство на основе системы «Прокси» для быстрого отображения информации, полученной на экране ЭЛТ.* [Mott, Klark, Deissauer, *Phot. Sci. Eng.*, 5, 90 (1961).]

1 — источник света; *2* — конденсор; *3* — проявочная система; *4* — объектив; *5* — «Характрон»; *6* — зарядка; *7* — очистка; *8* — перенос и закрепление (при необходимости); *9*—гибкая селеновая лента; *10* — объектив; *11*—проецирование; *12* — экран.

порошковое изображение переносят на прозрачную пленку и затем используют обычные проекторы для диапозитивов. В этом варианте время выборки информации возрастает приблизительно до двух секунд. Коэффициент отражения аморфного селена составляет только около 27%. Этого достаточно для обеспечения хорошей видимости на небольших и средних по размеру экранах без повреждения поверхности селена. Однако высокий уровень освещенности, необходимый при проецировании на большие экраны, может вызвать повреждение селеновых пластин в результате перегрева, если экспонирование длится достаточно долго.

Фирмы «Филко» и «Ксерокс» разработали скоростное ксерографическое устройство для записи полутоновых изображений, образованных на экране ЭЛТ с линейным растром [185]. В этом

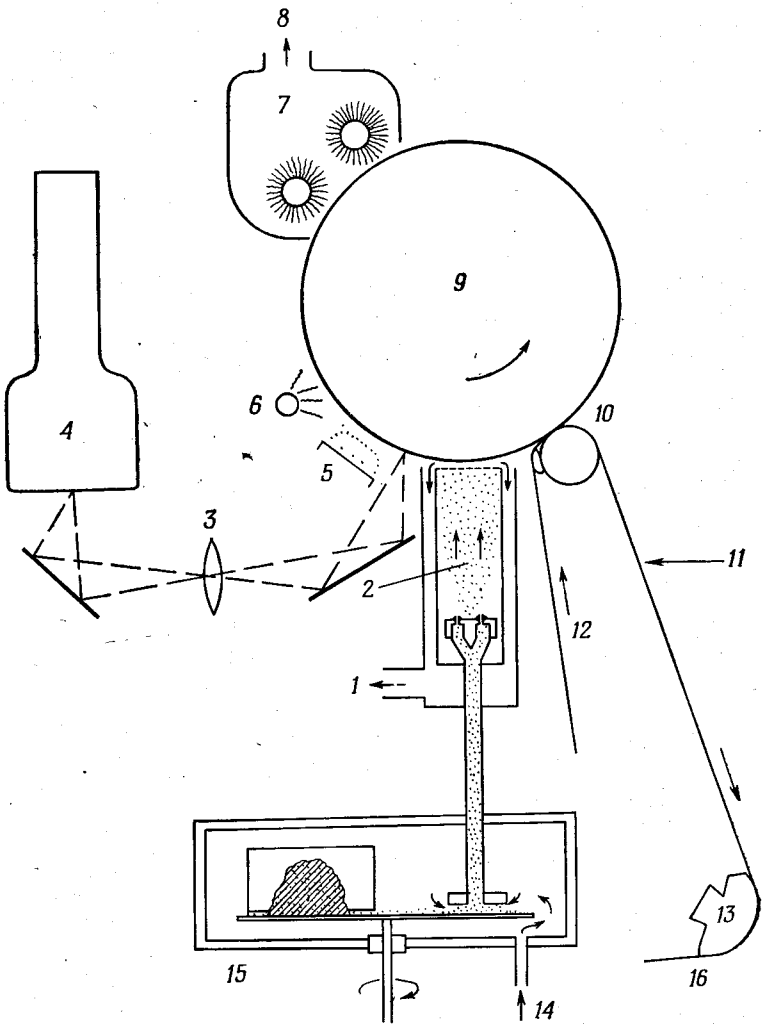


Рис. 86. Схема быстродействующего устройства для печатания тоновых изображений. [Bickmore, Ett, *Phot. Sci. Eng.*, 5, 137 (1961).]

1 — к вакуумному насосу; *2* — проявочная камера; *3* — объектив; *4* — ЭЛТ; *5* — зарядка; *6* — лампа для разрядки слоя; *7* — очистка; *8* — к вакуумному насосу; *9* — селеновый барабан; *10* — перенос; *11* — просмотр; *12* — бумажное полотно; *13* — нагреватель; *14* — сжатый воздух; *15* — генератор аэрозоля; *16* — закрепление.

устройстве применен селеновый барабан, изображения на котором проявляются специальным проявочным устройством аэрозольного типа (рис. 86). Входящие тоновые сигналы образуют линейный растр на экране ЭЛТ, отличающейся большой яркостью и высокой разрешающей способностью. Линейчатое изображение фокусируется на поверхность вращающегося селенового барабана. Перекрытие линий развертки дает эффект непрерывного тона. После проявления порошковое изображение переносится на непрерывную бумажную ленту и закрепляется. Экспериментальная модель такого устройства позволяет получать изображение шириной приблизительно в 240 *мм* и обеспечивает разрешение 14 пар *линий/мм* с интервалом оптических плотностей 1,5. Время выборки составляет 10 *сек*. Модель была разработана как бортовое самолетное устройство. Возможны и другие области применения, например транспортные средства или наземные сооружения, где имеются входные сигналы от развертывающих устройств с бегущим лучом и других датчиков с линейной разверткой.

10.6.6. ЗАПИСЬ ОСЦИЛЛОГРАММ

Фирма «Сенчури электроникс энд инстраментс» разработала ксерографическое устройство для записи осциллограмм [186, 187]. Запись производят на тонкую бумагу, покрытую слоем, содержащим окись цинка в смоляном связующем, сенсибилизированную красителем «бенгальский розовый». Бумага очувствляется в коронном разряде, заряжаясь до отрицательного потенциала 600 *в*. Свет, отраженный от зеркала гальванометра, фокусируется на бумаге в виде светового пятна, образуя разряженный след, ширина которого равна размеру пятна. После проявления с обращением, в котором используют вращающуюся магнитную щетку, получают черно-белую позитивную запись осциллограммы. Для обращения между магнитной щеткой и металлической пластиной, расположенной с другой стороны бумаги, прикладывают напряжение противоположной полярности. Это уменьшает потенциал неэкспонированных участков почти до нуля и повышает потенциал разряженных участков до величины, достаточной для отрыва частиц проявителя от магнитной щетки.

Регистрируемую осциллограмму можно непрерывно контролировать, наблюдая за бумагой, выходящей из зоны проявления. Проявитель закрепляется, когда бумага проходит над нагретым барабаном перед выходом из записывающего устройства.

Бумага для этого записывающего устройства выпускается в рулонах; ширина бумажной ленты в рулоне 225 *мм*, длина 61 *м*. По-видимому, эта бумага является полупрозрачной, так как

имеются сведения, что с такой записи можно непосредственно изготовлять копии, используя обычные диазотипные копировальные машины. Такое устройство можно использовать в радиоактивной среде, поскольку не наблюдается заметного ухудшения свойств бумаги при продолжительном облучении альфа-, бета- и гамма-лучами.

10.6.7. ДРУГИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Фоторепродукционные процессы применяют в различных отраслях промышленности. Результаты исследования возможности замены в некоторых случаях фотографических процессов электрофотографическими дают основание предположить, что своеобразие этих процессов приведет в будущем к расширению их использования.

Использование ксерографии для художественной отделки керамических изделий описано в работах [188] и [189].

Применение ксерографии в производстве печатных электронных схем освещено в работах [190] и [191]. Шугермен [192] добился успеха в изготовлении плат с печатным монтажом, используя процесс «электрофакс».

Шверц, Хеллер и Мезенко [193] сообщили о применении ксерографии при изготовлении электролюминесцентных панелей, служащих для воспроизведения самосветящихся растровых изображений.

В работе [39] описано оборудование, разработанное фирмой «Интернэйшнл бизнесс мэшинз» для печатания ксерографическим путем наклеек с адресами и перфокарт.

Методом ксерографического переноса проявленного изображения на прозрачную пленку можно довольно легко изготовлять диапозитивы для проекционного фонаря. После закрепления изображения пленка вставляется между стеклянными пластинками и окантовывается.

К другим перспективным областям применения электрофотографии относятся информационные системы на основе микроизображений документов, производство фирменных шильдиков, номерных дисков, декоративных изделий и фотошаблонов, брайлевская печать для слепых.

10.7. РАЗРАБОТКА СЕРИЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЗА ПРЕДЕЛАМИ США

Электрофотографический процесс был предложен в США, где на его основе были разработаны первые устройства нашедшие практическое применение. После первой публикации о ксерогра-

фии в 1948 г. и последовавшей за ней широкой рекламы к этой проблеме стал проявляться интерес и в других странах. Однако активно заниматься электрофотографией вне США начали только к концу 1950 г.

Автору этой монографии неизвестны цифры, характеризующие современный уровень применения серийного электрофотографического оборудования всеми странами в целом. Однако есть свидетельства того, что в большинстве крупных стран такое оборудование (импортное или собственного производства) используется. Приведенная ниже информация представляет собой попытку автора описать состояние разработок серийного электрофотографического оборудования в других странах на основании тех данных, которые ему удалось собрать во время работы над данной книгой. Если что-либо упущено, то это лишь значит, что соответствующие статьи не попали в поле зрения автора.

10.7.1. ЯПОНИЯ

Создается впечатление, что вне США наибольший объем исследований, направленных на создание серийного электрофотографического оборудования, приходится на Японию. О размахе исследовательских и конструкторских работ в этой области свидетельствует громадное количество технической литературы, опубликованной здесь за последние годы. Япония является единственной страной, где было организовано техническое общество, деятельность которого ограничена исключительно вопросами электрофотографии. Эта организация насчитывает свыше 500 членов. Технические статьи в этой области публикуются в издающемся ежеквартально журнале «Дэнси Сасин» («Электрофотография»).

Помимо компании «Фудзи ксерокс», которая производит и реализует оборудование фирмы «Ксерокс», в Японии имеется ряд фирм, которые изготовляют и реализуют электрофотографическое оборудование и материалы своей собственной разработки. Большей частью они основаны на использовании бумаги с покрытием, содержащим окись цинка.

Фирма «Конисироку фото» выпускает электрофотографические копировальные аппараты, работающие без изменения масштаба, и копировально-просмотровые аппараты для печатания с микрофильмов. Их действие основано на использовании процесса, подобного процессу «электрофакс». Эта фирма изготавливает также электрофотографическое устройство для записи осциллограмм, подобное выпускаемому в США фирмой «Сенчури электроникс энд инстраментс». Фирма также поставляет бумагу «конифакс» для копирования и изготовления офсетных печатных форм и материалы для проявления.

На фото 17 изображено копировальное устройство «Конифакс A400L», работающее без изменения масштаба. Это довольно компактное настольное копировальное устройство. Работа на нем подразделяется на четыре основных этапа. После того как оригинал помещен лицевой стороной вниз на оригиналодержатель в верхней части машины, лист электрофотобумаги закрепляют на барабане, находящемся в передней части машины. Затем нажимом кнопки машину приводят в действие. Во время вращения барабана бумага последовательно заряжается, экспонируется,

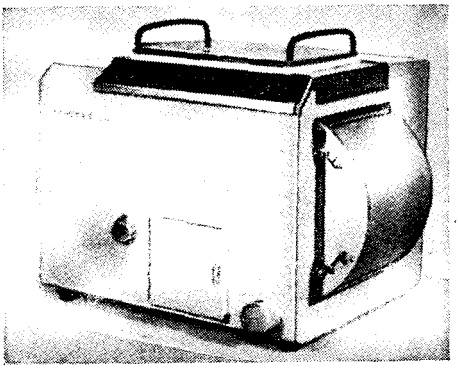


Фото 17. Электрофотографическое копировальное устройство «Конифакс A400L», работающее без изменения масштаба.

проявляется и затем, когда барабан завершает один полный оборот, выходит из щели в передней части машины. Закрепление производится, по-видимому, в отдельном устройстве. Время изготовления копии составляет приблизительно 45 *сек.* Так как оригинал остается неподвижным и развертка его осуществляется во время экспонирования синхронно с вращением барабана, устройство позволяет копировать и отдельные листы, и страницы переплетенных изданий. Размер бумаги 210 × 300 *мм.* Для модели большего размера «Конифакс B400L» используется бумага размером 255 × 365 *мм.*

Копировально-просмотровый аппарат «Конифакс A435RP» может печатать увеличенные копии с негативных или с позитивных микрофильмов на 35-миллиметровой пленке. Машина, показанная на фото 18, представляет собой, по существу, автоматическое устройство. После того как оригинал помещен в просмотровое устройство, зеркало переключается в положение для копирования. Затем нажимом кнопки копировальный аппарат приводится в действие. Копии выходят полностью обработанными.

Число копий с одного оригинала (от 1 до 10) устанавливают поворотом диска. Увеличение составляет 5,5, размер копии 210 × 300 *мм*. Бумага шириной 210 *мм* подается с рулона, устанавливаемого внутри машины. Одного рулона достаточно для получения 100 копий. Время копирования составляет 40 *сек* для первой копии, последующие копии выполняются со скоростью 3 *копия/мин*.

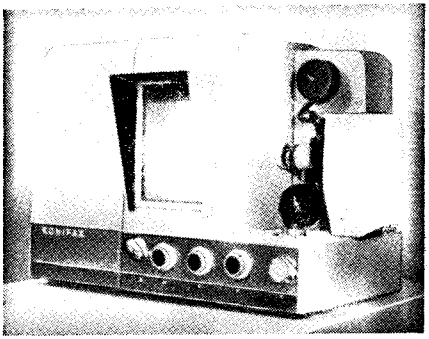
Фирма «Рико» выпускает электрофотографические копировальные устройства, работающие без изменения масштаба, и копировально-просмотровые аппараты, а также является поставщиком бумаги «рикофакс» для копирования и изготовления офсетных форм и проявляющих составов «рикофакс». Копировальное устройство «Рикофакс Р-4», работающее без изменения масштаба, действует на принципе «электрофакс». В машине, изображенной на фото 19, по-видимому, проходят все стадии процесса, кроме закрепления изображения, которое выполняется в отдельной установке для термического закрепления. Электрофотобумага вставляется вручную в щель, расположенную с лицевой стороны машины. Размер листа 210 × 300 *мм*. Время копирования, исключая закрепление, составляет 40—50 *сек*.

Копировально-просмотровое устройство «Рикофакс» позволяет печатать увеличенные в 6,2 раза копии с негативных 35- и 16-миллиметровых пленок на бумаге с покрытием, содержащим окись цинка. Общий вид этой машины показан на фото 20. Копировальный механизм полностью автоматизирован, включая автоматическую подачу бумаги. Используется жидкостное проявление на основе электрофореза. Размер копии 210 × 300 *мм*. Скорость копирования неизвестна.

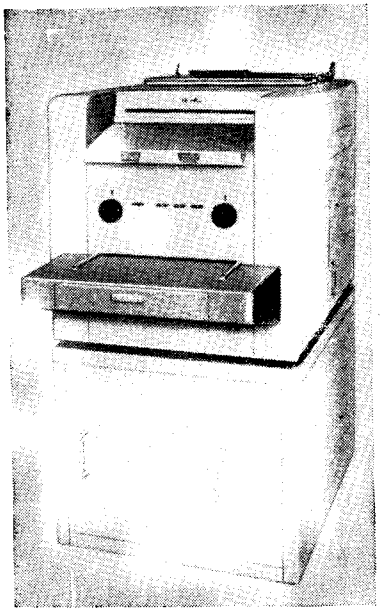
Фирма «Рико» выпускает также управляемое вручную оборудование для увеличения и печатания с микрофильмов; оборудование действует на принципе «электрофакс». Камера, проявочное устройство и устройство закрепления выполнены в виде отдельных узлов.

Фирма «Ивасаки кэммюникейшнс аппаратус» производит два электрофотографических копировальных аппарата и одно копировально-просмотровое устройство, а также поставляет бумагу «элефакс», офсетные формы и материалы для проявления.

Копировальный аппарат «Элефакс РС-301», показанный на фото 21, также действует на принципе «электрофакс» и является полуавтоматом. Зарядка, экспонирование и проявление выполняются в самой машине. Затем копию переносят для закрепления в отдельное устройство. Такой процесс позволяет осуществить ретушь изображения перед закреплением; ретушь выполняется вручную магнитной кистью. Оптическая система допускает уменьшение или увеличение изображения в диапазоне от 0,7 до 1,4.



Ф о т о 18. Копировально-просмотровый аппарат «Конифакс А435 RP».



Ф о т о 19. Электрофотографическое копировальное устройство «Рикофакс Р-4».

Ф о т о 20. Копировально-просмотровый аппарат «Рикофакс».

Машина позволяет копировать оригиналы размером до 300 × × 420 *мм* и получать копии размером 255 × 365 *мм*. Скорость копирования неизвестна. Время экспонирования лежит в пределах от 15 до 30 *сек*. По-видимому, первоначально это оборудование предназначалось не для выполнения большого объема работ

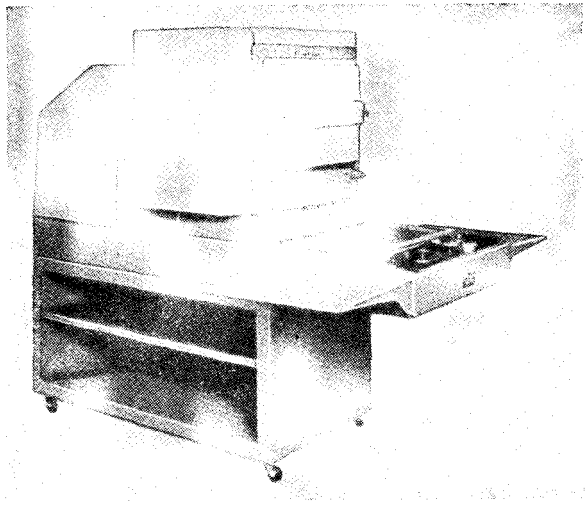


Фото 21. Электрофотографическое копировальное устройство «Элефакс РС-301».

по прямому копированию, а для изготовления печатных форм для множительных машин, работающих диазотипным или офсетным способом.

Фирма предлагает и меньшую по размерам модель «Элефакс РС-201». Этот копировальный аппарат работает с оригиналов размером до 255 × 365 *мм* и дает копии размером до 210 × 300 *мм*.

Копировально-просмотровое устройство «Элефакс МЕ-402», показанное на фото 22, печатает позитивные копии с негативной 35-миллиметровой пленки на электрофотобумаге или на офсетных пластинах. Это также полуавтоматическое устройство с автономным устройством для закрепления. Максимальный размер копии 300 × 420 *мм*; можно получать копии и меньших размеров. Увеличение осуществляется в диапазоне от 6 до 10 раз, время копирования 40 *сек*.

Фирма «Ориентл фото» разработала электрофотографическое оборудование для копирования, изготовления офсетных печатных форм и клише.

Копировальный аппарат «Орифакс» показан на фото 23. Хотя его можно использовать для получения копий типа «электрофакс», первоначально, по-видимому, он был задуман как прецизионная камера для изготовления офсетных печатных форм. Машина, по существу, управляется вручную. Оригинал помещают в копировальную раму, расположенную с лицевой стороны машины, а электрофотобумагу или офсетную пластину вставляют с задней стороны машины. Зарядкой, экспонированием и проявлением управляют с пульта на задней стороне машины. Оптическая

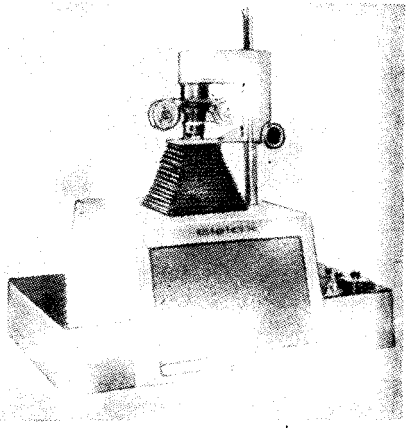


Фото 22. Копировально-просмотровый аппарат «Элефакс ME-402».

система с автоматической наводкой на резкость позволяет уменьшать и увеличивать изображение в диапазоне от 0,55 до 1,5. Размер бумаги 210 × 300 *мм*, размер офсетной пластины 255 × × 385 *мм*. Время копирования одна минута. К этой машине выпускается приспособление для увеличения микрофильмов. Можно применять негативную рулонную 35-миллиметровую пленку или перфокарты. Диапазон увеличения лежит в пределах от 6 до 8. Эта фирма поставляет бумагу «орифакс» и проявляющие составы для получения копий и офсетных печатных форм. Выпускаются также материалы и оборудование для изготовления клише. Для этого процесса можно использовать модели «Орифакс 202» или «Орифакс 301». Модель 301 включает, по-видимому, оборудование для очувствления в коронном разряде и проявления. К материалам для изготовления клише относятся: суспензия, содержащая окись цинка, которая наносится на цинковые или магниевые пластины; проявитель, а также растворитель для удаления электрофотослоя с непечатающих участков

перед травлением. Разработано несколько электрофотографических способов осуществления фотоцинкографского процесса [194].

Фирма «Токио сибаура электрик» поставляет оборудование для ксерорентгенографии; ею же разработано копировальное устройство типа «Тосиба Аутофакс AF-3», работающее на принципе «электрофакс» без изменения масштаба.

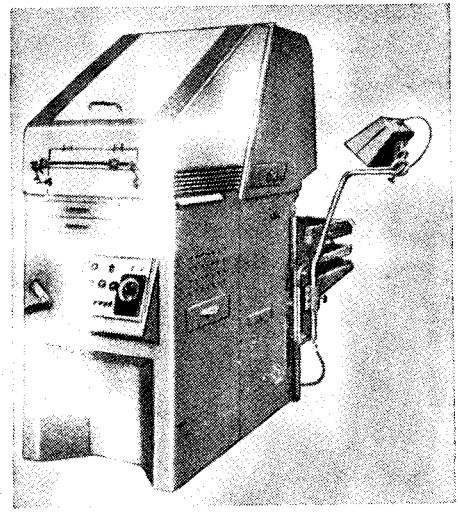


Фото 23. Электрофотографическая камера «Орифакс 202».

Фирма «Томоэгава пейпе мэньюфекчуринг» изготавливает электрофотографическую бумагу для копировальных устройств и бумагу для офсетных пластин.

10.7.2. ЗАПАДНАЯ ЕВРОПА И АНГЛИЯ

Основным поставщиком электрофотографического оборудования в Англии является фирма «Рэнк ксерокс», которая изготовляет оборудование «Ксерокс» того же типа, что и получившее распространение в США. Это оборудование реализуется в Англии и в странах Западной Европы. Для продажи ксерографической продукции и обслуживания установленного оборудования с учетом местных условий фирма «Рэнк ксерокс» создала сеть филиалов в ФРГ, Франции, Италии и Швеции (эта фирма имеет также филиалы в Австралии и Мексике).

Фирма «Рэнк ксерокс» содействовала внедрению ксерорентгенографии в Англии, где сейчас серийное оборудование этого типа

поставляет фирма «Уотсон энд сан». Разработки в области ксерорентгенографии успешно проводятся фирмой «Феррант».

Фирма «Рэнк пресижн индастриз» разработала копировальное устройство «Ксероник», служащее в качестве выходного устройства вычислительной машины [197]. Оно представляет собой сочетание с ЭЛТ с копировальным аппаратом «Копифло» фирмы «Ксерокс».

Английская фирма «Озалид» разработала машину для получения копий с микрофильма на бумаге с покрытием, содержащим окись цинка, при использовании жидкого проявления. Это автоматическое устройство производит позитивные отпечатки с 35-миллиметрового микрофильма. Копии могут быть увеличены до размера 455 × 610 *мм* или до размера 305 × 455 *мм*.

В ФРГ фирма «Минокс» сообщает о разработке электрофотографической копировальной машины; фирма «Калле» производит оборудование для изготовления офсетных пластин на алюминиевой фольге с органическим фотопроводящим покрытием.

Большой объем патентной литературы и технических статей, опубликованных в этих странах, свидетельствует о том, что исследовательские лаборатории этих стран уделяют электрофотографии значительное внимание. В первую очередь это относится к фирмам «Калле» и «Агфа» в ФРГ и к фирме «Геверт» в Бельгии. В Англии и в Западной Европе электрофотографию рассматривают как важный фактор будущего развития фотографии. Вопросы электрофотографии довольно тщательно исследуются в ряде лабораторий, где наибольшее внимание уделяется электрофотографическим материалам. Ряд фирм готовится выступить поставщиками электрофотографических бумаг для конторского копирования и получения копий с микрофильмов. Например, итальянское отделение фирмы «Ферранти» разработало бумагу с покрытием, содержащим окись цинка, которая должна была быть выпущена в продажу еще в 1961 г.

10.7.3. АВСТРАЛИЯ

Заслуживают упоминания работы по исследованию и усовершенствованию вопросов электрофотографии, которые проводятся в государственных и промышленных лабораториях Австралии. Наиболее интересны успехи, достигнутые в разработке жидких проявляющих составов, действие которых основано на явлении электрофореза. Проводятся работы и по другим вопросам электрофотографии, главным образом в направлении создания фотопроводящих покрытий, содержащих пигмент в связующем, а также техники обработки электрофотографических материалов.

10.7.4. СОВЕТСКИЙ СОЮЗ [1])

Интерес к электрофотографии в Советском Союзе начал проявляться в 1955—1956 гг., когда начались фундаментальные исследования в этой области. Основное внимание уделялось методам устойчивой внутренней поляризации (фотоэлектреты). Было опубликовано большое число научных и технических статей по вопросам теории фотоэлектретов и их применения в электрофотографии.

Сейчас в Советском Союзе имеется ряд лабораторий и институтов, которые занимаются изучением различных видов электрофотографии и их применением [166]. В это число входят «Институт кристаллографии и Всесоюзный научно-исследовательский институт полиграфической промышленности (Москва), Институт электрографии в Вильнюсе (Литовская ССР) и ряд ленинградских институтов.

Уровень достижений Советского Союза в области электрофотографии был продемонстрирован на второй Научно-технической конференции по вопросам электрофотографии и смежным с ней проблемам, состоявшейся в ноябре 1961 г. в Вильнюсе. Отчет об этой конференции был опубликован в 1962 г. [198].

Исследования и усовершенствования в области электрофотографии идут в Советском Союзе в довольно быстром темпе. Некоторые представления о степени интереса к этому предмету дает отчет о конференции в Вильнюсе в 1961 г. На конференции были представлены 53 доклада, в ее работе принимали участие представители 130 организаций. Можно предполагать, что эти коллективные усилия в конечном счете приведут к созданию многих полезных для практики электрофотографических устройств.

---

[1]) При переводе этого раздела опущено описание отечественного ксерографического оборудования ЭМА-1, ЭМА-2 и ЭРА-1, которое содержало ряд неточностей. Соответствующий материал можно найти в книге «Электрофотография и магнитография», Вильнюс, 1965.— *Прим. ред.*

Часть II

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

I. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Получение скрытого изображения в ксерографии путем создания поверхностного заряда на фотопроводящем слое и проецирования оптического изображения представляет собой довольно простую по исполнению задачу. Однако сам механизм процесса, с помощью которого поверхностный заряд удерживается, а затем рассасывается, гораздо сложнее. Экспериментальные данные и анализ характеристик процессов зарядки и разрядки ксерографических слоев позволяют сравнить различные фоточувствительные материалы и построить теоретические модели электрических и фотоэлектрических явлений, приводящих к образованию изображения.

1.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фоточувствительный материал в ксерографии представляет собой тонкую фотопроводящую изолирующую пленку на проводящем основании, или подложке, нанесенную методом напыления или покрытия. Величина поверхностного заряда на пленке может быть измерена электрометром. В ксерографии к измерениям зарядов предъявляются особые требования, поэтому необходимо разработать специальные типы электрометров. Характеристики скрытого изображения могут быть измерены без проявления, причем измерения не должны разрушать это изображение. Таким образом, сенситометрические характеристики, так же как и основные фотоэлектрические свойства фоточувствительного слоя, могут быть определены по изменению плотности поверхностного заряда в разных условиях. Чувствительный электрометр представляет собой наиболее важный прибор для исследования и оценки ксерографических материалов. Кроме него используют также монохроматор для измерений спектральной чувствительности, аппаратуру для измерения интенсивности света в абсолютных энергетических единицах и установку для измерения толщины и диэлектрической проницаемости тонких пленок.

К характеристикам фотопроводящих слоев относятся:

1) скорость зарядки с помощью различных коронных зарядников;

2) способность заряжаться, т. е. максимальная плотность поверхностного заряда, которая может быть создана на слое;

3) способность сохранять заряд, определяемая по темновому спаду поверхностного заряда;

4) фоточувствительность к разным источникам света и фоточувствительность как функция длины волны падающего света;

5) остаточный потенциал, определяемый поверхностным зарядом, остающимся после засветки;

6) «усталость», определяемая увеличением скорости темнового спада после серии циклов зарядки и экспонирования.

1.1.1. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

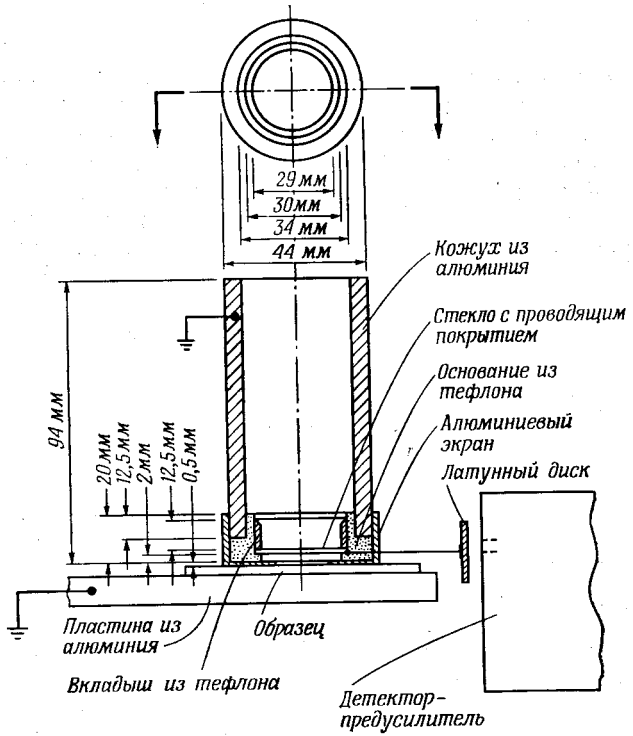
1.1.1.1. ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА

Несколько электрометров, сконструированных специально для применения в электрофотографии, описаны в работах [70, 199, 200]. Имеются также различные приборы для измерения поверхностных зарядов на изолирующих материалах. При изучении фотопроводящих изоляторов прибор должен позволять точно измерять спад поверхностного заряда в процессе экспонирования. Для этой цели используется главным образом прозрачный электрод, например стекло с проводящим покрытием [203, 204], который позволяет непрерывно регистрировать потенциал, создаваемый поверхностным зарядом. Электрометр должен быть чувствительным и стабильным, а система электрометр — самописец — малоинерционной, особенно в миллисекундном диапазоне.

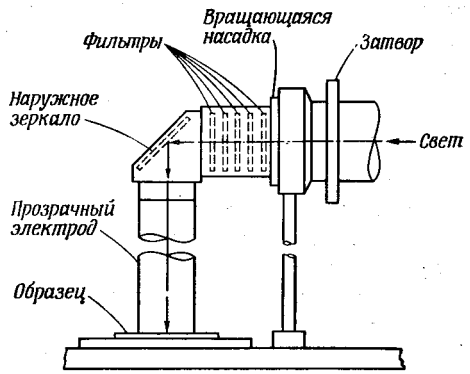
Темновой спад поверхностного заряда может быть измерен непрозрачным электродом. Им можно измерять и световой спад, при этом экспонирование и измерения проводятся поочередно. Однако, как показано в работе [203], этот метод не дает истинной кривой спада заряда в фотопроводящем слое.

Автором и его сотрудниками был использован электрометр с вращающимся сектором. Этот прибор позволяет измерять электростатический потенциал заряженных слоев с малой площадью. На рис. 87 приведена конструкция датчика с прозрачным электродом, описанная в работе [205]. Чувствительным элементом служит пластинка из стекла с проводящим покрытием, расположенная на конце светонепроницаемой трубы и соединенная емкостной связью с детектором-предусилителем.

Свет, входящий в цилиндрический кожух, проходит через проводящий стеклянный электрод и попадает на поверхность исследуемого образца. Очень важно, конечно, обеспечить равномерное освещение всей площади образца. Оптическая



Р и с. 87. Конструкция датчика с прозрачным электродом.



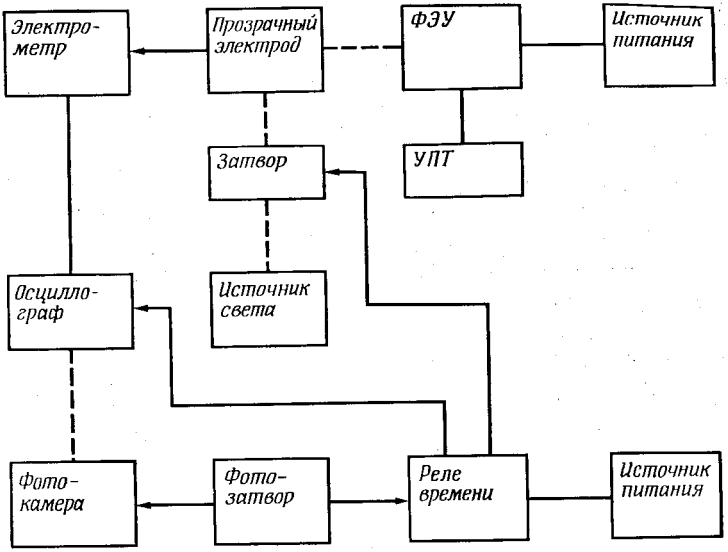
Р и с. 88. Оптическая система для освещения исследуемого образца через прозрачный электрод.

система для освещения образца показана на рис. 88. В качестве источника света можно использовать стандартный источник с непрерывным спектром и монохроматор. Для изменения интенсивности света могут быть вставлены нейтральные светофильтры. Если в опытах требуются интенсивности монохроматического освещения бóльшие, чем интенсивности, получаемые с монохроматором, то применяются узкополосные интерференционные фильтры с калиброванным источником света. В установке, показанной на рис. 88, цилиндрический кожух прозрачного электрода жестко соединен с вращающейся насадкой оптического узла. Это позволяет направлять световой пучок на фотоумножитель для измерения его интенсивности. Фотоумножитель должен быть тщательно прокалиброван в абсолютных энергетических единицах. Блок-схема включения датчика с прозрачным электродом приведена на рис. 89. Сигнал с электрометра подается на осциллограф и фотографируется. Некоторые типы осциллограмм фотоиндуцированного спада потенциала, полученные на этой установке, показаны на рис. 90. Необходимо подчеркнуть, что потенциал, регистрируемый проводящим электродом, меньше потенциала заряженной поверхности фотопроводящего изолятора. Уменьшение объясняется наличием дополнительной емкости кожуха электрода. Следовательно, потенциал, зарегистрированный вольтметром, в случае применения прозрачного электрода должен быть меньше показаний, полученных при использовании детектора-предусилителя для непосредственного обнаружения поверхностного потенциала. Поэтому необходимо с помощью известных поверхностных потенциалов прокалибровать установку.

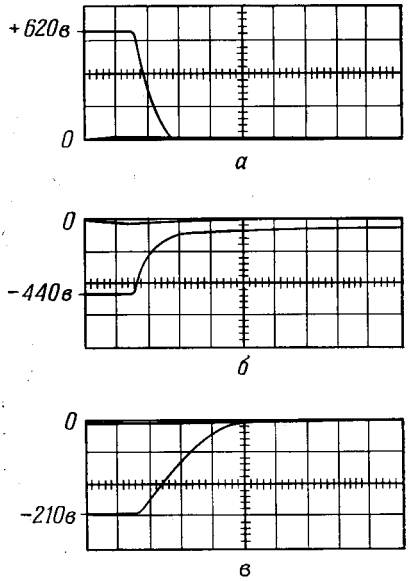
Отношение потенциала проводящего электрода к поверхностному потенциалу искомого образца постоянно для фиксированного расстояния между электродом и образцом. При увеличении этого расстояния потенциал электрода уменьшается. Поэтому очень важно поддерживать это расстояние постоянным. Важность измерения фотоиндуцированного спада оправдывает обсуждение еще одного методического вопроса.

Точное измерение интенсивности света, падающего на поверхность образца в процессе разрядки, играет первостепенную роль для правильной оценки результатов и их теоретического анализа. Результаты измерений должны быть выражены в абсолютных энергетических единицах, например в *мквт/см*^{2}. Таким образом, такие фотометрические единицы, как *фот*, *люкс* и другие, непригодны для определения фоточувствительности ксерографических материалов.

Одним из наиболее подходящих приборов для измерения освещенности поверхности служит термоэлемент, так как его чувствительность не зависит от длины волны. Однако, применяя ваку-



Р и с. 89. Блок-схема включения датчика с прозрачным электродом.



Р и с. 90. Типичные кривые фотоиндуцированного спада потенциала, полученные с помощью прозрачного электрода.

а и *б* — спады соответственно положительного и отрицательного потенциалов для ксерографических пластин из аморфного селена; *в* — спад отрицательного потенциала для бумаги, покрытой слоем ZnO в связующем. Освещение: лампа накаливания (75 *мквт/см*²). Шкалы вертикальные *а* и *б* — 190 *в* на 1 деление, шкала *в* — 76 *в* на 1 деление; шкалы горизонтальные — 0,2 *сек* на 1 деление.

умные термоэлементы, необходимо принимать во внимание пропускание материала окон. Промышленность выпускает термоэлементы с известными характеристиками чувствительности, поэтому их чувствительность может периодически проверяться стандартной лампой. Для измерения слабых освещенностей удобнее использовать фотоэлементы или фотоумножители. Чувствительность фотоэлемента зависит от длины волны, и, следовательно, ее необходимо калибровать как функцию длины волны. Так как область длин волн, на которую обычно реагирует фотоэлемент, ограниченна, то требуется несколько различных типов фотоэлементов, каждый из которых перекрывает определенный диапазон спектра.

Подробности этих методов и оборудование для измерения лучистой энергии читатель найдет в работах [206, 207].

1.1.1.2. ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТОЛЩИНЫ ФОТОПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ

С помощью электрометров нельзя измерить непосредственно плотность поверхностного заряда диэлектрических или фотопроводящих пленок. Ими измеряют только потенциал на поверхности пленки, созданный поверхностным зарядом. Если пленка располагается на заземленной проводящей подложке, то измеряется падение потенциала на пленке. Это падение потенциала связано с плотностью поверхностного заряда следующим уравнением:

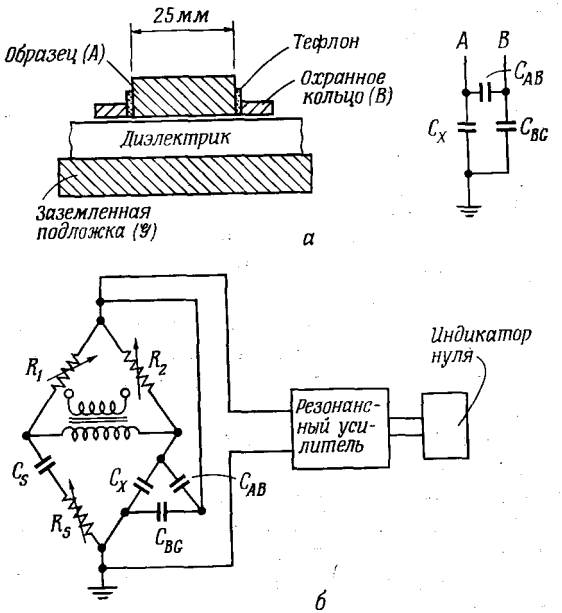
$$\sigma = K\varepsilon_0 V/L, \qquad (1)$$

где σ — плотность поверхностного заряда, $к/м^2$; K — диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $ф/м$ ($8{,}85 \cdot 10^{-12}$); V — падение потенциала на пленке, $в$; L — толщина пленки, $м$.

Единицы здесь выбраны в соответствии с системой МКСА. Так как V определяется путем электрометрических измерений, то плотность поверхностного заряда может быть вычислена, если найдены K и L. Выражение $K\varepsilon_0/L$ (емкость на 1 $м^2$) находится из результатов измерений емкости. Таким образом, поверхностную плотность заряда можно определить, не измеряя отдельно K и L. Однако для вычислений электрических полей, проводимости и других характеристик фотопроводящих пленок необходимо знать величины диэлектрической проницаемости и толщины пленки.

На рис. 91 приведена схема для измерения емкости, использованная в работе [208]. Важным элементом аппаратуры служит зонд. Торец зонда, соприкасающийся с диэлектрической пленкой, должен быть отшлифован, чтобы гарантировать хороший контакт по всей поверхности зонда.

Точное измерение толщины тонкой диэлектрической пленки без разрушения образца представляет собой довольно трудную задачу. Если разрушение образца допустимо, можно использовать



Р и с. 91. Схема эксперимента для измерения емкости тонких пленок. *а* — емкостная ячейка и эквивалентная цепь; *б* — электрическая схема.

различные механические и оптические способы. При снятии небольших участков пленки без разрушения толщину удаленной части можно измерить точным механическим датчиком толщины. Если после удаления части пленки поверхность подложки остается чистой, для измерения высоты пленки над подложкой можно применить оптические и механические методы.

В случае трудноудалимых пленок, например покрытия на бумаге, толщину можно определить по поперечному сечению с помощью микротома. Для измерений толщины без разрушения слоя разработаны различные способы и созданы приборы. В качестве примеров приведем электрические методы, основанные на измерении емкости или индуктивности, а также рассеяния проникающего излучения. Широкий обзор методов измерения толщины представлен в работе [209]. С помощью точных измерений емко-

сти и толщины можно вычислить диэлектрическую проницаемость из уравнения (в единицах системы МКСА)

$$K = CL/\varepsilon_0 A. \qquad (2)$$

1.1.2. ОЧУВСТВЛЕНИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

В части I было указано, что ксерографическая пластина электрически очувствляется при равномерной зарядке ее поверхности. Для этого используется ряд устройств. Наиболее подходящим для исследований считается скоротрон, главным образом потому, что он создает наиболее равномерный поверхностный заряд и позволяет лучше регулировать величину заряда, сообщаемого поверхности.

Используемые в настоящее время типы коронных зарядников обычно состоят из одной или нескольких тонких проволок, натянутых между клеммами и расположенных над поверхностью пластин на высоте нескольких миллиметров. Применение экранной сетки для контроля потенциала, приобретаемого фотопроводящим слоем, впервые было предложено Уолкапом [210]. Другие типы коронных зарядников описаны в его работе [211].

На рис. 92 показаны два типа коронных зарядников. В процессе зарядки устройство для коронного разряда движется вдоль поверхности ксерографической пластины или, как обычно бывает на практике, устройство остается на месте, а ксерографическая пластина или барабан движется мимо него.

Эффективность такой зарядки зависит от геометрии зарядника, диаметра и числа коронирующих проволок и расстояния от проволоки до пластины. Для применяемых на практике устройств (см. рис. 92, *а*) с постоянным расстоянием от проволоки до пластины скорость зарядки будет зависеть от ионного тока, идущего от проволоки к пластине, и скорости их относительного движения.

Характеристики коронного разряда можно определить, принимая коаксиальное расположение цилиндрических электродов, причем внутренним цилиндром служит проволока. Градиент электрического поля на поверхности проволоки (*кв/см*), необходимый для возникновения коронного свечения [212], дается эмпирическим соотношением

$$E_c = 31 m\delta \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{\delta a}}\right), \qquad (3)$$

где a — радиус проволоки, *см*; m — экспериментально подбираемый множитель и δ — коэффициент, зависящий от природы газа.

Для воздуха [212]

$$\delta = \frac{3{,}92b}{273+t}, \tag{4}$$

где b — давление воздуха, *см рт. ст.*; t — температура, °С. При 25° С и 76 *см рт. ст.* $\delta = 1$, а $m \approx 1$ для полированной проволоки.

Начальное напряжение короны для коаксиального цилиндра равно

$$V_0 = E_c a \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right), \text{ кв}, \tag{5}$$

где R — радиус внешнего цилиндра. Комбинируя равенства (3) и (5) и полагая $\delta = 1$ и $m = 1$, для воздуха при комнатной

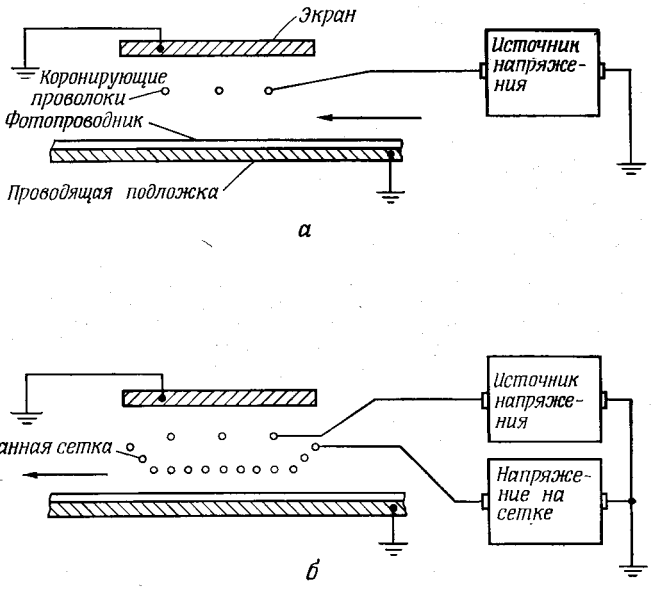


Рис. 92. Два типа коронных зарядников.
а — трехпроволочный коротрон; *б* — скоротрон.

температуре и атмосферном давлении получим

$$V_0 = 31a \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right) \cdot \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{a}}\right), \text{ кв}. \tag{6}$$

Несколько кривых, вычисленных по формуле (6), показывающих зависимость начального напряжения короны от диаметра проволоки, приведено на рис. 93. Условия возникновения короны между

параллельными проволоками, полученные Кобине, имеют вид

$$E_c = 30m\delta\left(1+\frac{0{,}301}{\sqrt{a\delta}}\right),\ кв/см \qquad (7)$$

и

$$V_0 = E_c a\cdot\ln\left(\frac{S}{a}\right),\ кв, \qquad (8)$$

где $\delta = m = 1$, а $S/2a \gg 1$ (S — расстояние между проволоками). Комбинируя выражения (7) и (8), получим

$$V_0 = 30a\left(1+\frac{0{,}301}{\sqrt{a}}\right)\ln\left(\frac{S}{a}\right),\ кв. \qquad (9)$$

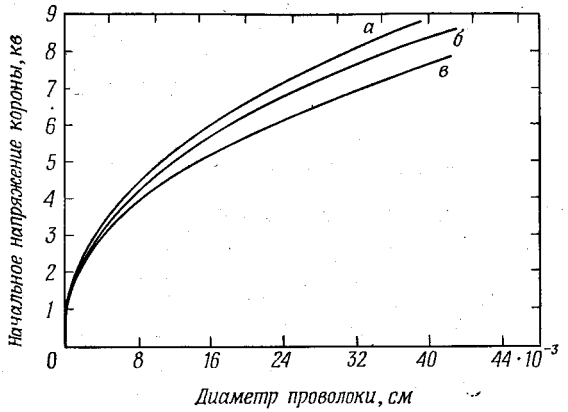
Отметим, что численные константы в соотношениях (6) и (9) приблизительно равны. Таким образом, можно ожидать, что подобные условия характерны и для возникновения короны между проволокой и плоской поверхностью. Зависимость коронного тока с единицы длины проволоки от разности потенциалов V между проволокой и цилиндром, выведенная Кобине [214], дается выражением

$$i = \frac{2\mu V(V-V_0)}{R^2\ln(R/a)}, \qquad (10)$$

где μ — подвижность ионов, а размерности величин даны в электростатических единицах. На рис. 94 приведено несколько кривых, показывающих зависимость коронного тока от приложенного напряжения. Для перехода к практической системе единиц следует умножить выражение (10) на $1{,}11263\cdot10^{-12}$, а V и V_0 выразить в *в*, R и a — в *см*, μ — в $см^2/в\cdot сек$. Для воздуха $\mu = 2\ см^2/в\cdot сек$.

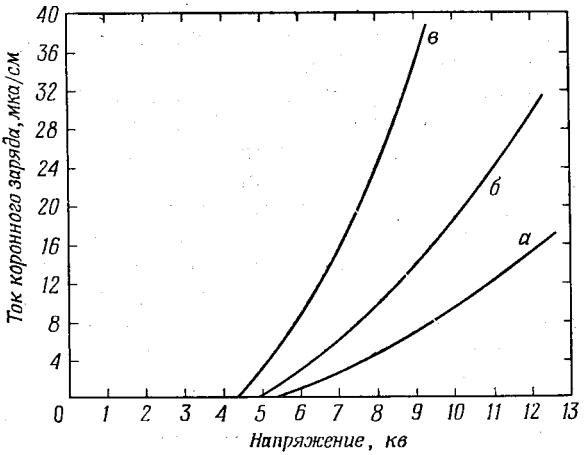
Хотя характеристики короны, определяемые из формул (6) и (10), относятся специально к проволоке, расположенной по оси цилиндра, эти результаты могут быть использованы для аппроксимации характеристик короны в случае проволоки, расположенной вблизи плоской поверхности.

Условия возникновения короны (6) и (9) применимы и в случае короны на переменном токе. При переменном токе корона возникает при несколько отличных напряжениях для отрицательной и положительной полярностей. Известно, что положительная корона возникает раньше отрицательной для проволок диаметром более 0,0075 *см*, а для проволок с меньшим диаметром справедливо обратное [215]. Начальное напряжение зависит от атмосферного давления [см. выражение (4)]. Поэтому на больших высотах корона возникает при меньших напряжениях, чем над уровнем моря. И так как ионная подвижность обратно пропорциональна плот-



Р и с. 93. Зависимость начального напряжения короны от диаметра проволоки.

Расстояние до цилиндра или пластины составляет, *см*: *а* — 2,0; *б* — 1,5; *в* — 1,0.



Р и с. 94. Зависимость тока коронного разряда от приложенного напряжения для проволоки диаметром 0,01 *см* при расстояниях до внешнего цилиндра, *см*: *а* — 2,0; *б* — 1,5; *в* — 1,0.

ности газа, коронный ток должен быть больше при меньших давлениях воздуха, как это видно из формулы (7). Увеличение μ и уменьшение V_0 должны приводить к большему коронному току при одном и том же приложенном напряжении.

1.1.2.1. ЗАРЯДКА КОРОТРОНОМ

Коронный ток между проволокой и поверхностью зависит от плотности ионов и их подвижности, а также от разности потенциалов и расстояния между проволокой и поверхностью. В общем случае плотность ионов пропорциональна разности потенциалов $V - V_0$. Для любой конфигурации проволок, расположенных на малом расстоянии от плоской поверхности, коронный ток можно представить следующим выражением:

$$i = AV(V - V_0), \tag{11}$$

где A — величина, зависящая от плотности ионов и расстояния между проволоками и поверхностью. Обычно в воздушной среде при постоянных температуре и давлении величина A постоянна. В выражении (10) $A = 2\mu/R^2 \ln(R/a)$. Величина A для случая очувствления короной не найдена, но она может быть определена экспериментально при измерении зависимости тока к металлической пластине от напряжения.

Коронный ток, определяемый выражением (11), является током к металлическому проводнику. Когда ионы, созданные короной, движутся к поверхности диэлектрической пленки, на ней накапливается электрический заряд того же знака, что и потенциал проволоки. Поэтому эффективное напряжение между поверхностью пленки и проволоками понижается на величину потенциала пленки, а это в свою очередь уменьшает ток короны.

Для простейшего случая одной коронирующей проволоки, расположенной вблизи ксерографической или металлической пластины, покрытой диэлектрическим [1]) материалом, выражение для тока короны имеет вид

$$i_s = A_s(V - V_s)(V - V_s - V_0), \tag{12}$$

где V_s — потенциал на поверхности диэлектрического покрытия.

Преобразуя это выражение, получаем

$$i_s = A_s V(V - V_0) - A_s(2V - V_0)V_s + A_s V_s^2. \tag{13}$$

---

[1]) В темноте фотопроводящий слой может рассматриваться как изолятор.

Для конкретной установки с постоянным напряжением короны все величины в правой части формулы (13), кроме V_s, постоянны.

Располагая заземленный экран над проволокой (см. рис. 92, *а*), можно увеличить плотность ионов. Так как на экране не создается заряд, то напряжение между экраном и проволокой остается постоянным и плотность ионов, образующихся вокруг проволоки, также постоянна. Однако, поскольку на пластине заряд накапливается, бóльшая часть ионов направляется к экрану. Таким образом, действие заземляющего экрана приводит к увеличению константы A_s в формуле (13) и, следовательно, к увеличению тока, текущего к пластине. Вид уравнения (13) в этом случае остается тем же самым.

Так как на поверхности диэлектрика накапливается заряд, потенциал пластины увеличивается, а ток уменьшается. Когда ток становится равным нулю, процесс зарядки прекращается и потенциал пластины достигает своего максимального значения. Если пренебречь темновым током в фотопроводящем диэлектрике, то скорость зарядки будет равна току, текущему к пластине, т. е.

$$i_s = C\frac{dV_s}{dt}, \tag{14}$$

где C — емкость диэлектрической пленки.

Из выражений (13) и (14) можно получить

$$C\frac{dV_s}{dt} = A_s V(V - V_0) - A_s(2V - V_0)V_s + A_s V_s^2. \tag{15}$$

После интегрирования получаем

$$V_s = V\frac{1 - e^{A_s V_0 t/C}}{1 - \dfrac{V}{V - V_0}e^{A_s V_0 t/C}}. \tag{16}$$

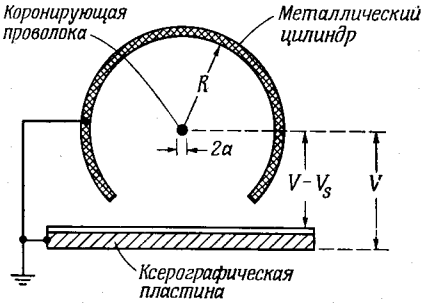
Уравнение (16) позволяет вычислить потенциал пластины как функцию времени зарядки, когда V, V_0, A_s и C известны. Константа A_s обычно определяется экспериментально. Однако, если сконструировать коротрон с одной проволокой в металлическом цилиндре с частично вырезанной боковой поверхностью, можно получить расчетным путем приближенную величину константы A_s. Такой коротрон показан на рис. 95. В этом случае ксерографическая пластина как бы заменяет вырезанный сектор цилиндра.

Ионный ток короны с одного сантиметра длины проволоки для узла, показанного на рис. 95, определяется формулой (10), а плотность тока зарядки будет равна

$$i_s = \frac{\mu(V - V_s)}{\pi R^3 \ln(R/a)}(V - V_s - V_0)\cdot 1{,}11263\cdot 10^{-12}\ a/см^2, \tag{17}$$

где V, V_s и V_0 выражены в *в*.

Для иллюстрации характеристик этого типа устройств рассмотрим пример цилиндрического коротрона. Выбирая $R = 1{,}5$ *см* и $2a = 0{,}010$ *см*, из кривой *б* на рис. 93 найдем $V_0 = 4630$ *в*.



Р и с. 95. Схема цилиндрического коротрона.

R — внутренний радиус цилиндра; $2a$ — диаметр коронирующей проволоки; V — разность потенциалов между проволокой и землей; $V - V_s$ — разность потенциалов между проволокой и поверхностью фотопроводящего диэлектрика.

Для воздуха при нормальных давлении и температуре $\mu \approx \approx 2 см^2/в \cdot сек$ [216]. Тогда выражение (17) перепишется в виде

$$i_s = 3{,}68 \cdot 10^{-14} (V - V_s)(V - V_s - V_0),\ а/см^2, \qquad (18)$$

где i_s — плотность тока, текущего к поверхности пластины. Когда темновой ток в диэлектрике пренебрежимо мал, i_s представляет собой зарядный ток. Однако известно, что темновой ток в пленке фотопроводящего изолятора может влиять на скорость зарядки коронным разрядом и на максимальный заряд, который может быть удержан этой пленкой. Кроме того, темновой ток не пропорционален напряжению на пленке и обычно увеличивается очень быстро, когда заряд, находящийся на пленке, образует внутри нее сильное поле. Некоторые примеры соотношения между токами и электрическими полями в изолирующих пленках можно найти в работе [217].

Так как на диэлектрической пленке накапливаются заряды, то ток, текущий к пленке, уменьшается, а ток утечки через пленку возрастает. Когда эти два тока становятся равными, потенциал пленки достигает максимального значения. При этом заряд стекает с той же скоростью, с какой ионы подходят к поверхности. Для иллюстрации этого эффекта с помощью выражения (18) вычислена зависимость тока к пластине от потенциала пластины для двух напряжений короны (рис. 96, кривые *г* и *д*). Там же представлены

зависимости темновых токов в пленке аморфного селена толщиной 20 *мк* как функции отрицательного (*а*) и положительного (*б*) потенциалов поверхности. Довольно резкое увеличение темнового

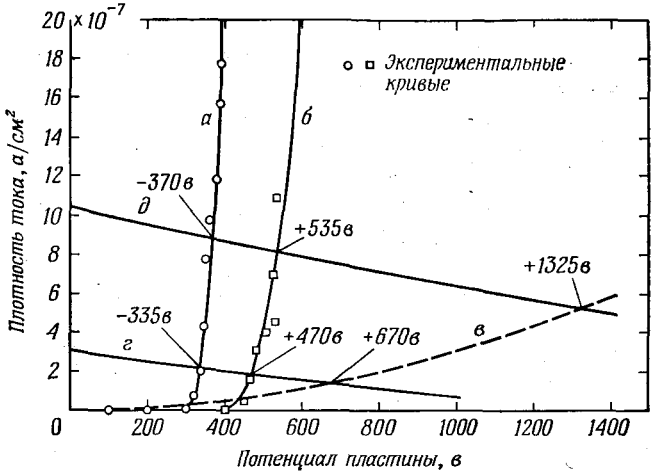


Рис. 96. Влияние тока короны и тока утечки на максимальный потенциал диэлектрической пленки.

тока в этих пленках наблюдается при поверхностных потенциалах выше 300 *в* (отрицательный) и 400 *в* (положительный). Кривая *в* на рис. 96 представляет зависимость тока от поверхностного потенциала для произвольной диэлектрической пленки, у которой ток растет как квадрат напряжения на пленке. Квадратичный закон выведен Моттом и Гарни [218] для токов, ограниченных пространственным зарядом, а Мак-Кьюри и Шафферт [219] использовали эту зависимость для объяснения кинетики спада заряда на некоторых смоляных пленках. Кривые на рис. 96 иллюстрируют влияние токов утечки на максимальный потенциал диэлектрических пленок. При зарядке пленки селена с помощью коротрона, представленного на рис. 95, максимальные потенциалы соответствуют —370 *в* и +535 *в* при напряжении короны 8100 *в* и соответственно —335 *в* и +470 *в* при напряжении короны 6000 *в*. Таким образом, максимальный потенциал слоя зависит от условий зарядки в коронном разряде. Наибольший эффект наблюдается для тока утечки, представленного кривой *в*. В этом случае максимальный потенциал при увеличении скорости зарядки почти удваивается, что следует из пересечения кривых *г* и *д* с кривой *в*.

Если учитывать утечку через пленку, то эффективная плотность тока зарядки i_e представляет собой разность плотностей тока к пластине i_s и тока утечки i_l

$$i_e = i_s - i_l. \tag{19}$$

Экспериментально найдено, что темновые токи аморфных пленок селена удовлетворяют соотношению

$$i_l = A' \operatorname{sh} bV_s, \tag{20}$$

где A' и b — константы. Эффективная плотность зарядного тока в этом случае описывается выражением

$$i_e = A_s (V - V_s)(V - V_s - V_0) - A' \operatorname{sh} bV_s. \tag{21}$$

Соотношение между поверхностным потенциалом V_s и временем зарядки t можно получить из уравнения

$$i_e = C \frac{dV_s}{dt}. \tag{22}$$

Комбинируя выражения (21) и (22) и интегрируя, получим

$$\int_0^{V_s} \frac{dV_s}{A_s (V - V_s)(V - V_s - V_0) - A' \operatorname{sh} bV_s} = \frac{t}{C}. \tag{23}$$

Левую часть соотношения (23) нельзя представить в аналитическом виде, и поэтому ее следует интегрировать численными методами.

Когда ток утечки ограничен пространственным зарядом, выражение для эффективной плотности зарядного тока имеет вид

$$i_e = A_s (V - V_s)(V - V_s - V_0) - BV_s^2, \tag{24}$$

где B — константа.

Используя формулу (18), перепишем (24) в виде

$$i_e = 3{,}68 \cdot 10^{-14} (V - V_s)(V - V_s - V_0) - BV_s^2, \ a/см^2. \tag{25}$$

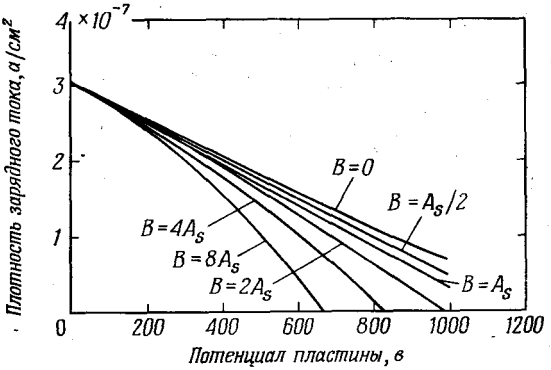
Кривые, показанные на рис. 97, получены из выражения (25) путем подстановки различных значений константы B. Соотношение между потенциалом пластины и временем зарядки получается путем комбинирования выражений (22) и (24) и интегрирования.

Окончательный результат имеет вид

$$V_s = \frac{A_s(2V - V_0) + h}{2(A_s - B)} \left(\frac{1 - e^{(h/C)t}}{1 - \frac{A_s(2V - V_0) + h}{A_s(2V - V_0) - h} e^{(h/C)t}} \right), \qquad (26)$$

где $h = \sqrt{A_s^2 V_0^2 + 4A_s BV(V - V_0)}$.

Соотношение (26) использовалось для построения кривых (рис. 98), иллюстрирующих влияние токов утечки на максимальный потенциал диэлектрических пленок. Использование квадратичной зави-



Р и с. 97. Влияние утечки через диэлектрик на зарядный ток. Начальное напряжение короны 4630 *в*, напряжение короны 6000 *в*.

симости токов утечки от напряжения применимо к случаю зарядки смоляных пленок [219]. Для таких фотопроводящих изоляторов, как аморфный селен, эффект должен быть, в общем, тем же, но подъем до максимального поверхностного потенциала будет более крутым благодаря резкому возрастанию тока утечки с увеличением напряженности поля.

Уравнения, полученные выше, справедливы при отсутствии относительного движения между зарядником и поверхностью диэлектрика. На практике же относительное движение обычно неизбежно. Например, блок коротрона может быть неподвижен, а заряжаемая поверхность может передвигаться. Скорость движения может регулироваться так, чтобы конечный поверхностный потенциал оказался ниже максимального потенциала. Это необходимо во избежание повреждений фотопроводящей пленки в электрическом поле.

Отметим, что максимальные потенциалы достигаются в интервале от 2 до 6 *сек* (см. рис. 98). Если относительная скорость больше 0,5 *см/сек*, то ни один из максимумов, показанных на

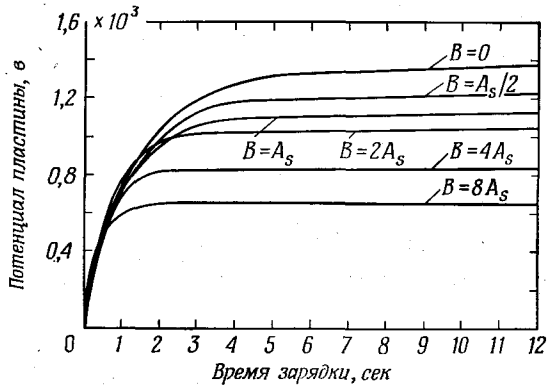


Рис. 98. Зависимость потенциала пластины от времени зарядки.

рис. 98, не может быть достигнут. При скорости 2 *см/сек*, соответствующей времени зарядки 0,5 *сек*, все диэлектрические пленки могут зарядиться примерно до одинакового поверхностного потенциала (~ 500 *в*).

1.1.2.2. ЗАРЯДКА СКОРОТРОНОМ

Схема скоротрона позволяет лучше управлять величиной заряда, сообщаемого поверхности. Установку можно отрегулировать так, чтобы максимальный поверхностный потенциал не превышал определенного значения, которое в принципе не зависит от характеристик заряжаемого диэлектрического материала. Это достигается путем контроля потенциала на экранной сетке, располагаемой между коронирующими проволоками и поверхностью диэлектрика. В этом случае ток короны, текущий к пластине, разделяется на ток, текущий к сетке, и ток, текущий к самой пластине. По мере увеличения потенциала пластины бóльшая часть тока течет к сетке и меньшая часть — к пластине. Когда на пластине достигается максимальный потенциал, весь ток течет к сетке и процесс зарядки прекращается.

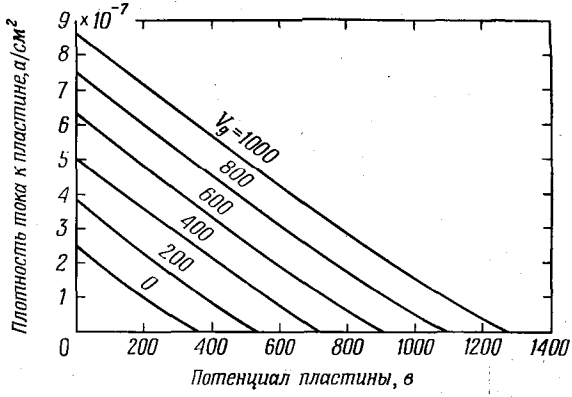
Используя соотношение (12), можно написать выражение для тока, текущего к пластине, в схеме коротрона на рис. 92, *а*. Когда экранная сетка помещена так, как это показано на рис. 92, *б*, часть тока будет течь на сетку. Сеточный ток

$$i_g = A_g (V - V_g)(V - V_g - V_0), \qquad (27)$$

где V_g — потенциал на сетке по отношению к земле, будет уменьшать ток, текущий к пластине, на величину, равную i_g, так что

$$i_s = A_s (V - V_s)(V - V_s - V_0) - i_g. \qquad (28)$$

Постоянные A_g и A_s могут быть определены из экспериментальных данных. Автор вычислил эти постоянные из данных Брауна [220], используя типичную схему зарядки скоротроном. Они оказались равными $A_s = 6{,}906 \cdot 10^{-14}$ и $A_g = 6{,}048 \cdot 10^{-14}$ (ток к пластине i_s был выражен в $a/см^2$). Коронирующие проволоки имели



Р и с. 99. Зависимость тока к пластине от ее потенциала при зарядке скоротроном.

Напряжение короны 8100 *в*, начальное напряжение короны 4100 *в*.

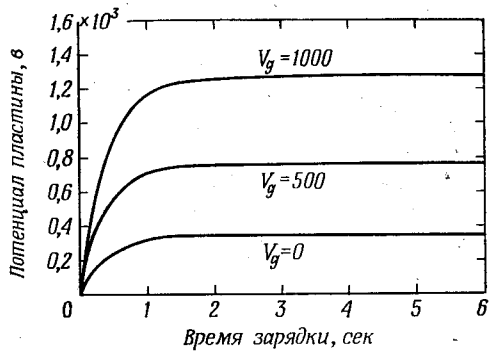
диаметр 0,0875 *см*, а начальное напряжение короны 4100 *в*. Эти значения подставлялись в выражения (27) и (28) и использовались для вычисления кривых зависимости тока к пластине от ее потенциала при различных сеточных потенциалах (рис. 99). Зависимость потенциала пластины от времени зарядки может быть получена из соотношений (14) и (28) с последующим интегрированием. Пренебрегая утечкой через диэлектрическую пленку, имеем

$$V_s = \frac{A_s (2V - V_0) + h'}{2A_s} \left(\frac{1 - e^{(h'/C)t}}{1 - \dfrac{A_s (2V - V_0) + h'}{A_s (2V - V_0) - h'} e^{(h'/C)t}} \right), \qquad (29)$$

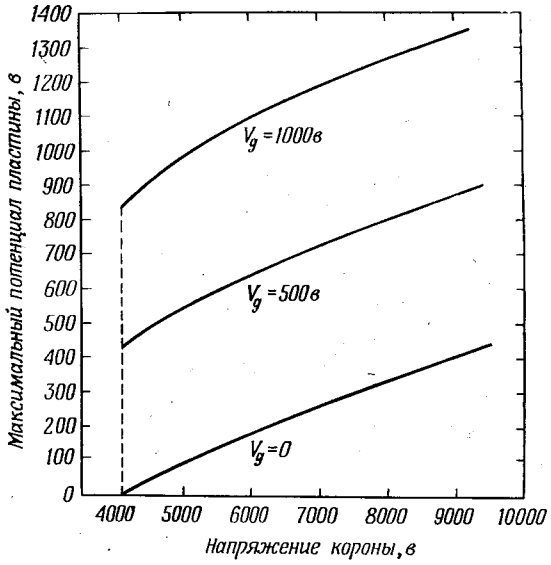
где

$$h' = \sqrt{A_s^2 V_0^2 + 4A_s i_g}.$$

На рис. 100 построены кривые, показывающие влияние напряжения сетки на характеристики процесса зарядки. Следует



Р и с. 100. Влияние напряжения на экранной сетке на максимальный потенциал пластины при зарядке скоротроном.
Напряжение короны 8100 *в*, начальное напряжение короны 4100 *в*.



Р и с. 101. Зависимость максимального потенциала пластины, заряжаемой скоротроном, от напряжения короны при трех различных напряжениях на сетке.

подчеркнуть, что результаты, приведенные на рис. 100, относятся к конкретным условиям работы экспериментальной установки. Напряжение короны и сеточное напряжение можно варьировать для изменения скорости зарядки и регулирования конечного потенциала пластины.

Из выражения (29) следует, что максимальный потенциал пластины, получаемый с помощью скоротрона, равен

$$(V_s)_m = \frac{A_s(2V - V_0) - h'}{2A_s} . \tag{30}$$

Подставляя выражения для h' и i_g из уравнения (27), получим

$$(V_s)_m = \frac{A_s(2V - V_0) - \sqrt{A_s^2 V_0^2 + 4A_s A_g (V - V_g)(V - V_g - V_0)}}{2A_s} . \tag{31}$$

На рис. 101 приведены кривые, иллюстрирующие влияние напряжения короны на максимальный потенциал пластины при трех различных значениях напряжения на сетке.

При наличии относительного движения между пластиной и заряжающим блоком максимальный потенциал пластины зависит еще и от скорости. Если скорость большая, пластина не сможет приобрести максимального потенциала, определяемого соотношением (31), и величина потенциала будет ниже максимального значения. В таких случаях фактическое время, в течение которого слой заряжается коронным разрядом, может быть определено и подставлено в выражение (29) для вычисления достигнутого конечного потенциала.

1.1.3. СПАД ЗАРЯДА В ФОТОПРОВОДЯЩИХ ИЗОЛИРУЮЩИХ ПЛЕНКАХ

Ксерографическая пластина при электрической зарядке может быть представлена конденсатором с изолирующей пленкой фотопроводника в качестве диэлектрической среды. Очувствляемая пластина и ее эквивалентная схема показаны на рис. 102.

Скорость спада заряда пластины описывается следующим уравнением:

$$-\frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{RC} , \tag{32}$$

где Q — заряд на поверхности слоя фотопроводящего изолятора, а R и C — соответственно его сопротивление и емкость. Так как $Q = CV$, то выражение (32) принимает вид

$$-\frac{1}{V}\frac{dV}{dt} = -\frac{d(\ln V)}{dt} = \frac{1}{RC} , \tag{33}$$

где V — разность потенциалов на слое, обусловленная поверхностным зарядом, t — время. С другой стороны,

$$\frac{1}{RC} = \frac{\sigma}{K\varepsilon_0}, \tag{34}$$

где σ — электропроводность слоя, *мо/м*. Решая уравнение относительно σ, получим

$$\sigma = -K\varepsilon_0 \frac{d(\ln V)}{dt}, \ мо/м \tag{35}$$

или

$$\sigma = -K \frac{d(\ln V)}{dt} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}, \ мо/см. \tag{36}$$

Из выражения (36) следует, что электропроводность слоя фотопроводящего изолятора в процессе спада заряда пропорциональна

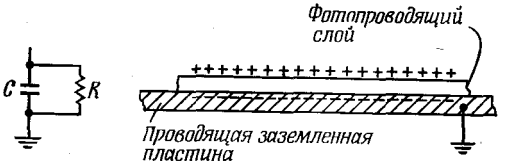


Рис. 102. Электрически заряженная ксерографическая пластина и ее эквивалентная схема.

наклону кривой, передающей зависимость $\ln V$ от t. При числовых расчетах знаком минус можно пренебречь, так как наклон кривой спада отрицателен.

Плотность тока, текущего через слой в процессе спада заряда, равна

$$i = \frac{-1}{A}\frac{dQ}{dt} = -\frac{C}{A}\frac{dV}{dt} = -\frac{K\varepsilon_0}{L}\frac{dV}{dt}, \tag{37}$$

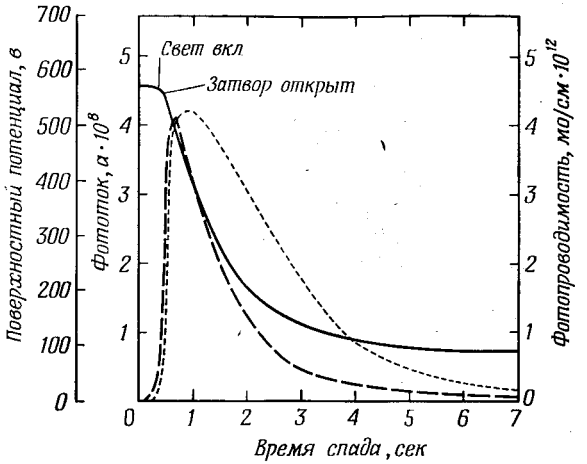
где A — площадь слоя и i берется в $а/м^2$, если L выражено в *м*. Если взять L в *см*, то плотность тока будет выражена в $а/см^2$:

$$i = -\frac{K}{L}\frac{dV}{dt} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}. \tag{38}$$

Следовательно, ток через слой пропорционален наклону кривой спада, передающей зависимость напряжения от времени.

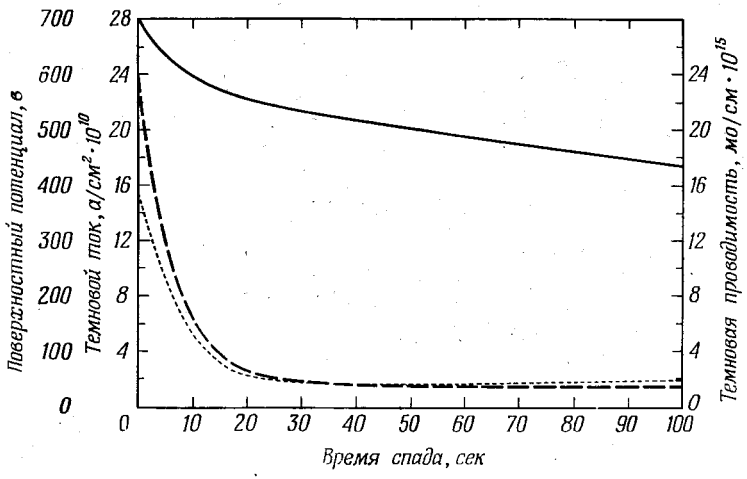
1.1.3.1. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эффективная электропроводность слоя фотопроводящего изолятора не остается постоянной в процессе спада заряда. Она зависит от электрического поля, образованного внутри слоя



Р и с. 103. Характерный фотоиндуцированный разряд ксерографической пластины.

———— спад поверхностного потенциала; — — — спад фототока; ····· спад фотопроводимости. Аморфный селен (50 *мк*) на алюминиевой подложке. (Положительный поверхностный заряд.)



Р и с. 104. Темновой разряд ксерографической пластины.

———— спад поверхностного потенциала; — — — темновой спад тока; ····· темновой спад проводимости. Аморфный селен (50 *мк*) на алюминиевой подложке. (Положительный поверхностный заряд.)

поверхностным зарядом, и от времени разряда. Это справедливо как для медленного разряда в темноте, так и для фотоиндуцированного разряда под действием освещения.

С помощью выражения (36) и точного графика зависимости поверхностного потенциала от времени можно определить фотопроводимость и темновую проводимость слоя в процессе спада заряда. Аналогично из кривых, соответствующих (38), определяются значения фототока и темнового тока. Примеры таких расчетов приведены на рис. 103 и 104. Эти данные вычислены путем дифференцирования кривых спада потенциала, полученных с помощью электрометра и самописца.

Фототок в процессе разряда ксерографического светочувствительного слоя может быть также зарегистрирован с помощью дифференциального электрометра [70].

Данные, приведенные на рис. 103 и 104, иллюстрируют метод анализа кривых разрядных токов. Эти данные были получены на ксерографической пластине из аморфного селена, представляющей собой слой толщиной 50 *мк*, нанесенный на алюминиевую подложку испарением в вакууме.

Из кривой на рис. 103 следует, что фотоиндуцированный разряд сначала происходит быстро, затем замедляется и длится до тех пор, пока скорость разряда не становится сравнимой со скоростью темнового спада. Поверхностный потенциал, соответствующий малой скорости спада, обычно называют остаточным потенциалом. В приведенном случае остаточный потенциал составляет примерно 85 *в*. При освещении поверхности селена фототок сначала очень быстро растет, достигая максимального значения, а затем медленно уменьшается почти до нуля. Фотопроводимость также резко возрастает до максимального значения, а затем уменьшается в процессе освещения поверхности селена. На рис. 104 показаны темновой спад поверхностного заряда и уменьшение тока и проводимости при этом в ксерографической пластине. Необходимо заметить, что начальная скорость спада заряда непосредственно после зарядки довольно большая, но с течением времени она уменьшается.

Аналогичные характеристики получаются, например, для слоев из окиси цинка (ZnO) в связующем. Однако формы кривых спада потенциала вообще различны для разных материалов.

1.1.4. ИЗМЕРЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Измерения зависимости фотоиндуцированного разряда слоя от интенсивности света и времени дают в ксерографии основные данные, необходимые для определения фоточувствительности

и сенситометрических характеристик. Для данных интенсивности и спектрального состава света эффективная фоточувствительность слоя зависит от скорости спада поверхностного заряда. В свою очередь скорость спада зависит главным образом от квантового выхода фототока и от эффективной подвижности носителей при их движении через слой. Число носителей, переходящих за единицу времени в зону проводимости, будет также зависеть от доли поглощенного света и от энергии фотона, определяемой длиной падающей волны. Квантовый выход, подвижность и оптическое поглощение являются основными свойствами фотопроводящего слоя. Они могут изменяться в широком диапазоне для разных материалов или для одного материала из-за структурных нарушений при изготовлении слоя.

Для определения фоточувствительности в ксерографии не установлено пока единых общих стандартов. Для выражения относительной фоточувствительности используются различные формулы, обобщающие данные по спаду поверхностного потенциала. Кек [221] использовал простую формулу $S = 1/t_h$, где t_h — время полуспада поверхностного потенциала (от 200 до 100 *в*) при экспонировании пластины с помощью «стандартного» источника света. В работе [222] была предложена эмпирическая формула для расчета относительной чувствительности ксерографических пластин из аморфного селена, слабо зависящей от начального потенциала. Эта формула имеет вид

$$S = \frac{V_0^{1/3}}{2t_h I^{0,9}}, \qquad (39)$$

где V_0 — начальный потенциал в темноте; t_h — время спада потенциала до значения $V_0/2$ при освещении слоя светом интенсивности I, *мквт/см*^{2}.

Гренишин и Черкасов [204] пришли к выводу, что изменение поверхностного потенциала при постоянной интенсивности света в течение определенного промежутка времени практически лучше характеризует фоточувствительность ксерографических пластин. Они использовали множитель $\Delta V/V$ в качестве характеристики относительной фоточувствительности, где V — начальный поверхностный потенциал, а ΔV — падение поверхностного потенциала при экспонировании. Для измерений на слоях аморфного селена и слоях, состоящих из сплава селена с теллуром, они использовали интенсивность света 1 *эрг/сек·см*^{2} и время экспозиции 5 *сек*. Для измерения на менее чувствительных материалах интенсивность была увеличена. В более поздней работе [223] они, однако, отказались от этого метода и вычисляли чувствительность по формуле $S = 1/It_h$, где I — интенсивность света в *эрг/сек·см*^{2}, а t_h — время полуспада поверхностного потенциала.

Величина, обратная количеству света, необходимого для уменьшения поверхностного потенциала наполовину, в качестве меры спектральной чувствительности и интегральной фоточувствительности широко используется теперь в ксерографической практике. Однако пока еще нет согласованности в выборе единиц измерения световой энергии и методик, используемых для измерений. По этой причине этот метод не обеспечивает согласующихся результатов. С другой стороны, оказывается, что время полуспада поверхностного потенциала зависит от величины начального

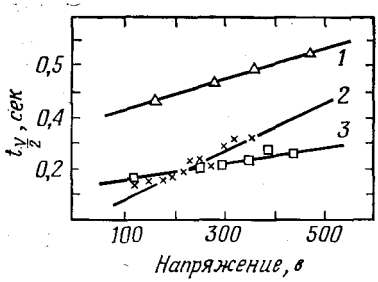


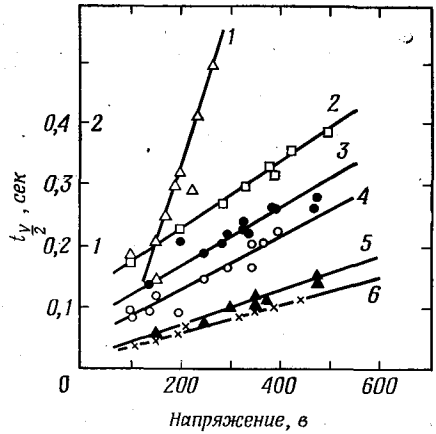
Рис. 105. Зависимость времени полуспада потенциала от начального потенциала для трех сортов бумаги, покрытой окисью цинка. (Плавина, *Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематограф.*, **7**, 145 (1962).)
1 — сенсибилизированная эозином бумага; *2* — экспериментальная бумага; *3* — коммерческая бумага. Постоянное освещение 300 *лк*.

потенциала. В работе [203] найдено, что время полуспада увеличивается с ростом начального потенциала при применении электрофотографической бумаги из окиси цинка. Однако в случае применения бумаги из поливинилкарбазола справедливо обратное. В работе [224] приведены результаты измерений на разных бумагах из окиси цинка. При этом также установлено, что время полуспада увеличивается с ростом начального потенциала. Более того, это увеличение много больше для слабых интенсивностей света, чем для высоких (рис. 105 и 106).

Клаус [225] определяет спектральную чувствительность ксерографических пластин по величине квантового выхода, причем квантовый выход задается числом поверхностных зарядов, нейтрализуемых одним падающим фотоном. Хотя Клаус не описывает метод, примененный для измерения квантового выхода, использование степени нейтрализации поверхностных зарядов в качестве критерия фоточувствительности, по-видимому, заслуживает внимания при установлении общего критерия для определения и измерения фоточувствительности в ксерографии. Так как поверхностная плотность зарядов зависит не только от поверхностного

потенциала, но и от диэлектрической проницаемости и толщины слоя, то спад заряда должен давать более объективный критерий, чем изменение поверхностного потенциала. К тому же нейтрализация заряда более тесно связана с непосредственным механизмом фотовозбуждения.

Из соотношения между поверхностным зарядом и потенциалом $\sigma = K\varepsilon_0 V/L$ следует, что более высокому потенциалу соответствует бо́льшая величина поверхностного заряда для одного



Р и с. 106. Зависимость времени полуспада от начального потенциала для бумаги, покрытой окисью цинка, при разных освещенностях слоя. (П л а в и н-а, *Журнал научн. и прикл. фотогр. и кинематограф.*, 7, 145 (1962).)
1 — 100 *лк*; *2* — 400 *лк*; *3* — 500 *лк*; *4* — 900 *лк*; *5* — 1000 *лк*; *6* — 1500 *лк*.

и того же фотопроводящего слоя. Точно так же для большего потенциала требуется нейтрализовать больший заряд, чтобы уменьшить потенциал наполовину. Поэтому не удивительно, что время полуспада больше для высокого начального потенциала. Итак, если мы сравним два слоя из одинакового материала, но различной толщины, то очевидно, что для получения одного и того же потенциала на обоих слоях тонкому слою следует сообщить меньший поверхностный заряд. Отсюда следует, что для тонкого слоя величина нейтрализованного заряда, соответствующая полуспаду потенциала, меньше, чем для толстого. Когда сравниваются различные типы фотопроводящих материалов, то их диэлектрические проницаемости также должны приниматься во внимание, так как они влияют на величину поверхностного заряда, соответствующего данному значению поверхностного потенциала. Отсюда ясно, что для определения фоточувствительности ксерографических материалов изменение плотности поверх-

ностного заряда служит лучшим критерием, чем изменение потенциала. Дальнейшие аргументы в пользу этого критерия будут приведены при рассмотрении процессов проявления в ксерографии. Известно, что осаждение проявителя тесно связано с электрическим полем, созданным изображением на слое. Эти поля определяются в основном изменением плотности поверхностного заряда на слое.

Отсюда вытекает, что фоточувствительность в ксерографии следует выражать через изменение поверхностного заряда в процессе экспонирования. Квантовый выход не может быть достаточным критерием, так как он уменьшается со временем в процессе освещения слоя. Если ввести скорость изменения поверхностного заряда, можно получить следующее общее соотношение:

$$S = \frac{\Delta\sigma}{It}, \tag{40}$$

где S — чувствительность; $\Delta\sigma$ — уменьшение плотности поверхностного заряда; I — интенсивность света, а t — время экспонирования.

При определении светочувствительности слоя величина $\Delta\sigma$ может считаться постоянной. Поле на поверхности слоя связано с плотностью поверхностного заряда следующей формулой (в единицах системы МКС):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 K}. \tag{41}$$

Следовательно,

$$\Delta\sigma = \varepsilon_0 K \Delta E. \tag{42}$$

Тогда соотношение (40) можно представить в форме

$$S = \frac{\varepsilon_0 K \Delta E}{It}. \tag{43}$$

Иногда определяют начальную напряженность поля при зарядке фоточувствительного слоя и используют это значение в качестве стандартной характеристики слоя до экспозиции. Если разумно выбрать величину этого поля, можно избежать перезарядки слоя. Например, слой из аморфного селена толщиной 50 *мк* может быть легко заряжен до поверхностного потенциала 500 *в*. Предполагая, что внутренняя поляризация за счет носителей, захваченных ловушками, отсутствует, приходим к значению напряженности поля 10^7 *в/м*. Если во время экспонирования потенциал падает до половины своей первоначальной величины, изменение напряженности электрического поля составляет $5 \cdot 10^6$ *в/м*. Это соответствует уменьшению плотности поверхностного заряда на величину $2{,}79 \cdot 10^{-4}$ *к/м*^{2}.

Обычно для регистрации изменения поверхностного заряда применяют электрометр, который чувствителен к изменению поверхностного потенциала. Выражение (43) в записи через изменение поверхностного потенциала имеет вид

$$S = \frac{\varepsilon_0 K \Delta V}{I t_h L}, \tag{44}$$

где L — толщина слоя в *м*, а t_h — время полуспада. Так как $\varepsilon_0 K/L = C$ — емкость 1 $см^2$ слоя, то выражение (44) можно привести к виду

$$S = \frac{C \Delta V}{I t_h}. \tag{45}$$

Если бы мы, например, использовали в качестве постоянных значений $E = 10^7$ *в/м* и $\Delta E = 5 \cdot 10^6$ *в/м*, тогда фоточувствительность любой ксерографической пластины или бумаги определялась бы следующим образом. Пластина заряжается до потенциала, равного $L \cdot 10^7$ *в*, а затем экспонируется в течение времени, необходимого для уменьшения поверхностного потенциала до $5L \cdot 10^6$ *в*, измеренного электрометром. Заданное значение ΔV затем подставляется в выражение (45) для вычисления чувствительности. Чтобы использовать соотношение (45), необходимо знать емкость C, интенсивность света I и время экспонирования t. Единицы измерения должны быть выбраны в одной системе, например если C выражено в $ф/м^2$, ΔV — в *в*, I — в $эрг/сек \cdot м^2$ и t — в *сек*, то чувствительность будет выражена в $к/эрг$.

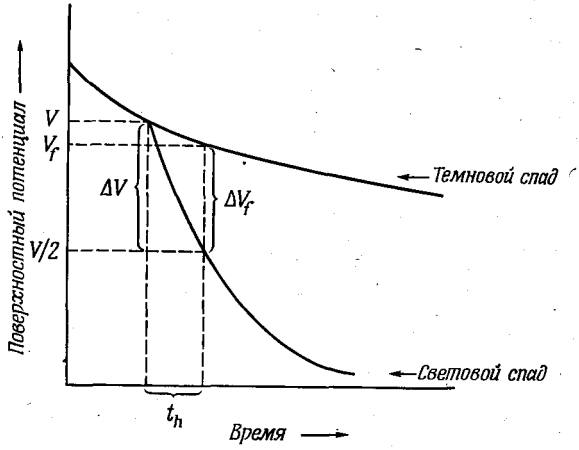
Так как установлено [226, 227], что в ксерографии закон взаимозаместимости не выполняется, то при выборе величины или диапазона изменения интенсивности света этот факт следует учитывать следующим образом. Чувствительность определяется при высоких, низких и промежуточных значениях интенсивности, и среднее из вычисленных значений дает фоточувствительность рассматриваемой пластины. Обычно наибольшим источником ошибок является измерение интенсивности света, особенно при определении ее в абсолютных единицах. Чтобы избежать ошибок, следует проводить измерения с тщательно калиброванными приборами, особенно при определении спектральной чувствительности. Для измерения интегральной чувствительности с конкретным источником света его характеристики должны быть указаны вместе с общей интенсивностью. Например, если применяется вольфрамовая лампа, то должна быть определена цветовая температура.

Результаты, полученные с помощью соотношения (44) и (45) при вычислении спектральной чувствительности, могут быть использованы для определения эффективного квантового выхода.

При этом количество заряда берется в электростатических единицах, а интенсивность — в фотонах в 1 *сек* на единицу площади.

1.1.4.1. ПОПРАВКИ НА ТЕМНОВОЙ СПАД

При освещении заряженной фотопроводящей пленки частичный спад заряда будет происходить за счет темновой проводимости пленки. Если темновой спад происходит медленно или если



Р и с. 107. Диаграмма, иллюстрирующая поправку на темновой спад, вводимую при вычислении эффективной фоточувствительности ксерографической пластины.

ΔV составляет половину величины начального потенциала; ΔV_f — разность потенциалов с учетом темнового спада; t_h — время полуспада.

период светового спада очень короткий, то вклад темновой проводимости в полный спад под действием освещения пренебрежимо мал. В противном случае темновой спад следует учитывать при вычислениях фоточувствительности из результатов измерений спада потенциала.

Степень контрастности, достигаемая при проявлении электрофотографических изображений, зависит от различия в плотности поверхностного заряда разных участков пластины после экспонирования. Таким образом, эффективная фоточувствительность с точки зрения последующего проявления изображения должна определяться разницей в плотностях поверхностного заряда между неосвещенным и освещенным участками пластины. Разность поверхностных потенциалов, входящая в соотношения (44) и (45), равна разности потенциалов, измеренных на неосвещенном

и освещенном участках к моменту полуспада потенциала на освещенном участке пластины. Эти измерения можно выполнять одновременно или раздельно. Конечное значение темнового потенциала может быть также определено из независимых измерений темнового спада на том же образце. На рис. 107 иллюстрируется вводимая поправка на темновой спад. С учетом этой поправки выражение (45) принимает вид

$$S = \frac{C\Delta V_f}{It_h}, \qquad (46)$$

где V_f — потенциал на кривой темнового спада в момент, соответствующий времени полуспада потенциала при освещении; $\Delta V_f = V_f - V/2$.

1.1.4.2. ЗАКОН ВЗАИМОЗАМЕСТИМОСТИ В КСЕРОГРАФИИ

Закон взаимозаместимости постулирует, что фотохимические эффекты зависят только от произведения интенсивности освещения на время. Вообще говоря, этот закон несправедлив для обычных фотографических процессов. Нарушение взаимозаместимости при образовании скрытого изображения в ксерографии подтверждалось многими исследователями [203, 226, 227].

Отклонение от взаимозаместимости в фотографии обычно обнаруживается при построении графика зависимости логарифма экспозиции от логарифма интенсивности для данной оптической плотности, получаемой при стандартном методе проявления. Если выполняется закон взаимозаместимости, то график получается в виде прямой линии, параллельной оси абсцисс.

В ксерографии параметры, влияющие на образование скрытого изображения, можно измерять независимо от процессов проявления. Поэтому выполнение закона взаимозаместимости можно проверить, используя такое явление, как спад заряда. В ксерографии пока не приняты стандартные методики для измерений взаимозаместимости. В работе [226] образцы освещались световым импульсом продолжительностью 7 *мсек* через интервалы 50 *мсек*. При этом регистрировалось число световых импульсов, необходимое для снижения начального поверхностного заряда до половины его первоначальной величины. В качестве источника света была использована проекционная вольфрамовая лампа мощностью 300 *вт*. Поправка на темновой спад не учитывалась. В работах [203, 227] при измерении взаимозаместимости было использовано постоянное падение поверхностного потенциала. Значение величины падения потенциала, а также тип использованного источника света не приводятся.

По-видимому, метод, использующий постоянную величину падения поверхностного потенциала в качестве параметра, может

давать наиболее правильные данные для контроля взаимозаместимости в ксерографии, если все другие условия постоянны. Для получения согласующихся результатов при проведении таких измерений каждый раз нужно начинать с одной и той же величины начального потенциала и убеждаться, что выбранная величина падения потенциала соответствует падению потенциала в реальных условиях образования изображения. Кривые взаимозаместимости, соответствующие малому и большому падению потенциала, очевидно, могут обнаружить разный характер отклонений от взаимозаместимости.

Доводы, изложенные в разделе о фоточувствительности, в пользу определения изменения плотности поверхностного заряда или изменения напряженности электрического поля, а не падения потенциала справедливы также и в отношении взаимозаместимости. Однако так как падение потенциала пропорционально уменьшению поверхностного заряда и изменению напряженности поля, то оно должно приводить к той же общей форме кривой взаимозаместимости, если только фиксируемое изменение потенциала составляет значительную часть начального потенциала.

1.1.5. ИЗМЕРЕНИЕ «УСТАЛОСТИ»

В части I отмечалось, что «усталость» ксерографической пластины выражается в увеличении скорости темнового спада поверхностного потенциала при повторных циклах зарядки и экспонирования. «Усталость» определяется путем наблюдения периодического изменения кривых темнового спада после ряда циклов. Для этого снимаются кривые темнового спада после 10, 100, 1000 и т. д. циклов зарядки и экспонирования. Общепринятых методов этих измерений пока не существует. Методика зарядки, источники света, интенсивность света, частота циклов, применяемые при контроле «усталости», зависят главным образом от предполагаемого использования ксерографических пластин на практике.

После целого ряда циклов величина «усталости» в конечном счете достигнет насыщения. Она может быть определена как увеличение скорости темнового спада в процентах после определенного числа циклов. Скорость темнового спада иногда вычисляется как средняя скорость спада, соответствующая падению потенциала 50 *в*, и выражается в *в/мин*.

1.2. ФОТОПРОВОДЯЩИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

С точки зрения применения в ксерографии фоточувствительные материалы делятся на два основных типа: 1) многократно используемые, характерным представителем которых является аморфный

селен, и 2) однократно используемые; примерами последних служат фотопроводящие покрытия на бумаге. Обычно применяется покрытие из окиси цинка в связующем.

Фотопроводящие материалы, представляющие интерес для ксерографии, могут быть различной природы: простые вещества (сера и селен); сплавы селена (Se — Te, Se — As и Se — S); неорганические соединения (окись цинка и сульфиды цинка и кадмия); органические соединения (такие, как антрацен, аценафтен, бензидин, поливинилкарбазол и многие другие). Сюда должны быть также отнесены органические красители, применяющиеся в качестве сенсибилизаторов.

В настоящее время на практике широко применяются селен в виде аморфных пленок и пленки из окиси цинка, диспергированной в связующем. Большое внимание также уделяется исследованиям органических фотопроводников и слоев из фотопроводящих материалов, диспергированных в связующем.

Фотопроводящие слои должны иметь следующие характеристики:

1. Относительно высокую способность заряжаться. Слой должен удерживать плотность поверхностного заряда, равную 0,5—1,5 $\cdot 10^{-7}$ *к/см*^{2}.

2. Незначительную скорость темнового спада заряда. Допустимые скорости темнового спада зависят от промежутка времени между экспонированием и проявлением. Считается нормальным, когда время полуспада потенциала составляет несколько минут.

3. Высокую фоточувствительность и значительный спад заряда во всей используемой области спектра. Спектральная чувствительность должна соответствовать спектру излучения практически используемых источников света.

4. Низкий остаточный потенциал. Некоторые пленки фотопроводящих изоляторов, если их зарядить и осветить, обнаруживают быстрый начальный спад заряда, который затем замедляется и прекращается при потенциале, отличном от нуля, т. е. пленка неполностью разряжается при освещении. Потенциал, соответствующий этому насыщению, называется остаточным потенциалом. Только в редких случаях остаточный потенциал может составлять 80—90% начального потенциала. Для большинства практических применений желательно иметь остаточный потенциал, составляющий незначительную долю начального потенциала.

5. Слабо выраженный эффект «усталости». Это свойство существенно только для многократно используемых материалов.

Для однократно используемого материала, такого, как электрофотографическая бумага, «усталость» не представляет проблемы. «Усталость» обнаруживает себя в виде прогрессирующего уве-

личения скорости темнового спада после последовательных циклов зарядки и экспонирования. Обычно усталостные эффекты исчезают после короткого «отдыха» (в редких случаях этот «отдых» может длиться до 24 *час*). Обычно слой может быть «излечен» от «усталости» путем кратковременного нагрева или засветки инфракрасным светом.

6. Гладкость и одинаковая толщина. Для многократно используемых фотопроводников важным фактором является устойчивость по отношению к износу и царапинам.

1.2.1. АМОРФНЫЙ СЕЛЕН

Этот материал иногда называется стеклообразным, но чаще всего аморфным селеном. Он получил большое применение в ксерографии благодаря большой фотопроводимости и подходящим диэлектрическим свойствам, а также возможности повторного использования слоя после многих циклов воспроизведения изображения.

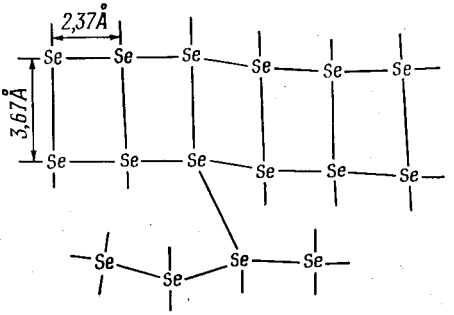
1.2.1.1. СТРУКТУРА

Известны три различные модификации селена: 1) аморфный, или стеклообразный, селен, 2) кристаллический красный селен и 3) кристаллический серый селен, или металлический селен. Красная кристаллическая или моноклинная модификация состоит из колец Se_8, тогда как металлическая гексагональная — из длинных параллельных цепей атомов селена. Согласно результатам работы [229], аморфный селен имеет такую же структуру, как жидкий селен, представляя собой беспорядочную цепную структуру с несколькими кольцевыми молекулами. Это оказалось в согласии с данными работы [230] о пленках аморфного селена, осажденных путем перегонки и испарения в вакууме. Кроме того, из данных по дифракции электронов найдено, что эти пленки содержат очень незначительное количество моноклинной модификации. В работе [231] высказано предположение, что в «стеклоподобно отвердевшем селене» примерно одна треть атомов располагается в кольцах Se_8, остальные находятся в кольцах, содержащих 1000 атомов. Другие исследователи склоняются к мнению о хаотической цепной структуре. В работе [232] проводится различие между стеклообразным и аморфным селеном, причем последний образуется при конденсации пара или при быстром выпадении осадка. В этом случае более вероятно, что атомы остаются в непосредственной близости от участка, охваченного процессом осаждения, так что атомы не могут мигрировать и оказываются ориентированными. В стеклообразном селене, полученном из жидкой фазы, возможно некоторое движение атомов, что способствует

образованию упорядоченной структуры. Однако если жидкость охлаждается быстро, то кристаллы не образуются.

В работе [233] высказано предположение, что стеклообразный селен является переохлажденной жидкостью с гомеополярной связью. Расстояние между атомами в цепи равно 2,37 Å, а между ближайшими соседями в смежных цепях 3,67 Å. Эта структура показана на рис. 108.

Согласно данным работы [234], атомы селена образуют спиральные цепи, в которых каждый атом соединен гомеополярными связями с двумя соседними атомами селена, причем цепи удерживаются вблизи друг друга силами Ван-дер-Ваальса. В работе



Р и с. 108. Расположение атомов аморфного селена.

[221] исследована структура испаренных на стекло в вакууме пленок и наблюдалось образование кристаллитов в аморфных пленках вблизи поверхности раздела селен — стекло. Было предположено, что эти кристаллиты принадлежат моноклинной модификации. Однако в работе [37] на основе рентгеновских исследований было обнаружено, что эти кристаллиты принадлежат к гексагональной модификации.

Известно, что свойства аморфных пленок селена, полученных испарением в вакууме, могут изменяться в широких пределах в зависимости от условий процесса испарения в вакуумной камере [235]. Температура, скорость испарения, скорость охлаждения и т. д. могут заметно влиять на электрические свойства пленок. Можно с уверенностью сказать, что существуют различия и в структуре пленок, образованных при различных условиях напыления.

Нагревание аморфного селена постепенно приводит к образованию кристаллической фазы. Добавление примесей обычно ускоряет кристаллизацию. В работе [236] обнаружено, что нагревание аморфного селена в интервале низких температур приводит

к образованию кристаллов в виде скоплений радиально распространяющихся игл, которые сначала появляются в форме небольших шариков, а затем растут по мере тепловой обработки. При высоких температурах материал полностью рекристаллизуется до образования равновесной фазы.

1.2.1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Сопротивление. Согласно результатам работ [237, 238], удельное сопротивление аморфного селена при комнатной температуре составляет примерно 10^{12} *ом·см*. В работе [230] приведена еще бо́льшая величина темнового сопротивления.

Удельное сопротивление напыленных в вакууме аморфных пленок селена, определяемое из кривых спада потенциала, составляет величину 10^{15} — 10^{16} *ом·см*. Возможно, что на эксперименты, проделанные разными исследователями, влияли металлические контакты, и инжекцией носителей из электродов можно объяснить наиболее низкие значения удельного сопротивления.

В разделе об очувствлении ксерографических пластин короной подчеркивалось, что в селене темновой ток резко возрастает при увеличении напряжения ($i \sim \operatorname{sh} bV$). Таким образом, можно ожидать довольно заметного уменьшения сопротивления с увеличением приложенного напряжения. Это качественно подтверждено в работе [239], где установлено, что темновой ток в аморфных пленках селена увеличивается приблизительно пропорционально шестой степени приложенного напряжения.

В работе [240] измерено сопротивление аморфного селена в функции напряженности поля в интервале от 200 до $18 \cdot 10^4$ *в/см* при температурах от —35 до 50° С. Обнаружено, что диапазон изменений сопротивления составляет от $3{,}6 \cdot 10^4$ *ом·см* при 136 500 *в/см* и 50° С до $4{,}2 \cdot 10^{16}$ *ом·см* при 227 *в/см* и —35° С. Найдено также, что соотношение между сопротивлением и напряженностью поля имеет вид $\rho = \rho_0 \exp\left(-a\sqrt{E}\right)$, где ρ_0 — сопротивление в отсутствие поля, E — напряженность поля и a — постоянная, зависящая от температуры.

Подвижность носителей заряда. Из измерений времени диффузии электронов и дырок в тонких напыленных пленках аморфного селена [241] получены значения эффективной подвижности электронов в пределах $4{,}7$—$5{,}5 \cdot 10^{-3}$ *см²/в·сек* и дырок 0,15 *см²/в·сек*. В работе [242] показано, что эффективная подвижность носителей в фотопроводниках может быть сильно снижена из-за ловушек. Из измерений температурной зависимости подвижности в аморфном селене [241] найдено, что зависимость электронной подвижности определяется ловушками, расположенными на глубине 0,25 *эв* ниже дна зоны проводимости; для дырок соответствующая

глубина ловушек равна 0,16 *эв* (выше потолка валентной зоны).

Подвижность дырок в кристаллическом селене изменяется в пределах от 0,1 до 10 $см^2/в \cdot сек$. В работе [233] установлено, что подвижность дырок в кристаллическом материале значительно превосходит подвижность электронов.

Диэлектрическая проницаемость. Известные из литературы [243] значения диэлектрической проницаемости аморфного селена равны 5,97—6,60. Автор использовал значение 6,3 для диэлектрической проницаемости напыленных пленок селена. Это согласуется со значением, полученным в работе [244]. Диэлектрическая проницаемость несколько уменьшается с частотой (на высоких частотах); так, на частоте 10^{10} *гц* было получено значение 5,97.

1.2.1.3. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Поглощение и отражение. В работе [245] собраны данные ряда исследователей по оптическому поглощению аморфного селена. На рис. 109 показаны данные по поглощению от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. В работе [246] измерены поглощение и отражение аморфного и гексагонального селена для длин волн от 300 до 1200 *ммк*. Результаты представлены на на рис. 110 и 111. Эффекты поглощения и отражения больше выражены для гексагонального селена, чем для аморфной модификации, причем отражательная способность для обеих модификаций увеличивается в области коротких длин волн. Отражательная способность аморфного селена уменьшается от 27% при 300 *ммк* до 25% при 550 *ммк*. При 700 *ммк* имеет место резкое падение до 20%.

Аморфный селен обладает очень малым поглощением в инфракрасной области. В работе [247] получен спектр поглощения (от 1 до 20 *мк*) и найдена полоса поглощения при 13,5 и 20,5 *мк*. Об измерениях поглощения селеном мягких рентгеновских лучей сообщалось в работе [248].

Показатель преломления. Данные некоторых исследователей по показателю преломления аморфного селена приведены на рис. 112. Показатель имеет максимальное значение $n = 3{,}13$ примерно при 500 *ммк* и быстро падает по обе стороны этого пика. В ближней красной области спектра показатель падает до 2,6 и затем уменьшается до постоянной величины 2,46 в инфракрасной области. Найдено, что соотношение $n^2 = K$ приближенно выполняется для показателя преломления и диэлектрической проницаемости, если для показателя преломления выбрано минимальное значение.

Ширина запрещенной зоны. Из измерений фотопроводимости для аморфного селена определена ширина запрещенной зоны,

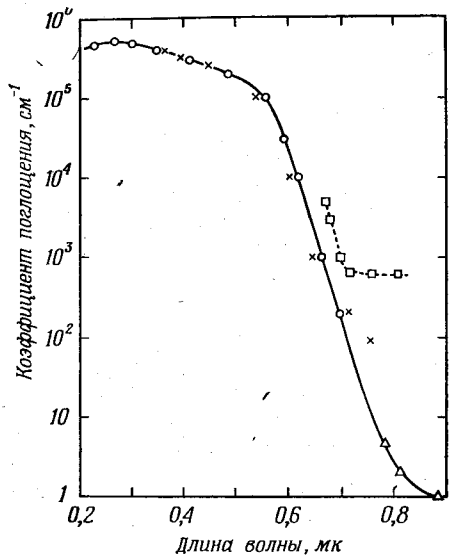


Рис. 109. Поглощение в селене. (Moss, Photoconductivity in the Elements, Acad. Press, N. Y., 1952.)

——— аморфный; — — — металлический.

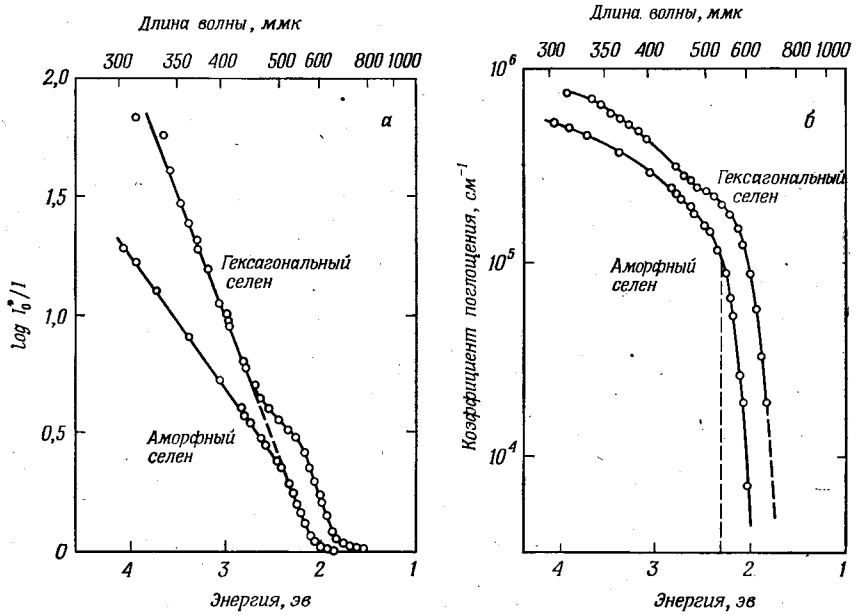
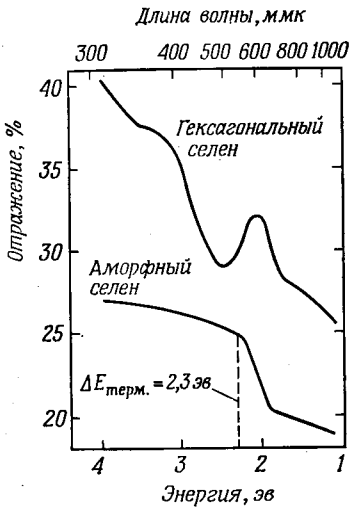


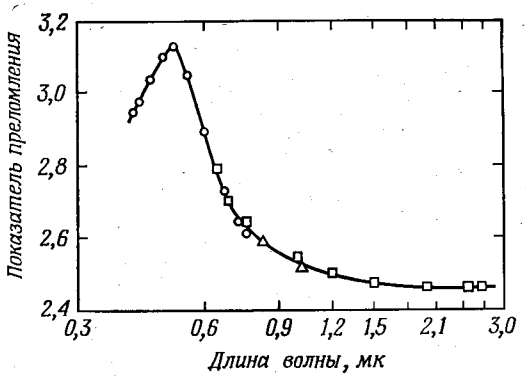
Рис. 110. Поглощение в аморфном и гексагональном селене. (Stuke, *Zeit. f. Physik*, 134, 201 (1953).)

а — поглощение слоя селена до и после превращения в гексагональную модификацию; I_0^* — интенсивность падающего света с учетом отражения; *б* — коэффициент поглощения в функции длины волны для аморфного и гексагонального селена.

равная 2,5 *эв* [249]. Приближенно это соответствует длине волны, при которой начинает быстро уменьшаться коэффициент поглощения. Таким образом, эта величина соответствует энергии связи между атомами селена, равной 57 *ккал/моль* [249]. Из температурных измерений сопротивления получена величина энергии термической активации аморфного селена, равная 1,7 *эв*. В работе [240] обнаружено заметное уменьшение энергии термической активации с увеличением напряженности поля (от 1,055 *эв* при 11 350 *в/см* до 0,332 *эв* при 13 650 *в/см*). Кривая зависимости энергии активации от приложенного поля имеет увеличивающийся наклон. Если эту кривую экстраполировать к малым значениям напряженности поля, то соответствующая энергия активации приближается к 1,7 *эв*. Из данных по оптическому поглощению ширина запрещенной зоны селена, соответствующая коэффициенту поглощения $\sim 10^5$ *см*$^{-1}$, равна 2,3 *эв* (см. рис. 110). Гексагональные и моноклинные модификации селена имеют ширину запрещенной зоны, найденную из измерений фотопроводимости, в интервале от 1,5 до 1,65 *эв* [249].



Р и с. 111. Отражение аморфного и гексагонального селена. (S t u k e, *Zeit. f. Physik*, **134**, 202 (1953).)



Р и с. 112. Показатель преломления селена. (M o s s, Photoconductivity in the Elements, Acad. Press, N. Y., 1952.)

1.2.1.4. ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Селен может быть 2-, 4- и 6-валентным. Его химическая активность аналогична активности серы, и образуемые соединения напоминают соединения серы. Таким образом, можно ожидать, что контакт селена с металлическими поверхностями будет приводить к образованию селенидов, а при определенных условиях — селенатов. Аморфный селен хорошо растворим в серной кислоте и менее в сероуглероде. Он не растворяется в воде и спирте. Однако двуокись селена, образующаяся на засвеченной поверхности аморфных селеновых пленок, до некоторой степени растворяется в воде, спирте, ацетоне и уксусной кислоте. Двуокись селена растворяется в воде с образованием селенистой кислоты, а трехокись растворяется в воде и спирте с образованием селеновой кислоты.

В работе [250] изучено влияние разных органических растворителей и водных растворов на аморфный селен. Обнаружено, что на него мало или вовсе не влияют следующие вещества: вода, хлоргидрат гидроксиламина, гидроксиламин, мочевина, роданид аммония, пикриновая кислота, ацетанилид, едкое кали, хлористый аммоний, желтая кровяная соль. Вторая группа веществ приводит к образованию «красной» кристаллической модификации селена. Эта группа включает спирт, бензин, тиофен, толуол, бензонитрил, пропиловый альдегид, амилнитрит, этилацетат, изомасляную кислоту, нитротолуол, ацетофенон, бромнитробензин, динитробензин, диметиланилин, нитрозо-β-нафтол, ацетон, пропиленбромид, йодистый этил, монометиланилин, хлороформ, фенилгидразин, бензиламин, дифенилметан. Третья группа веществ приводит к образованию «металлической» модификации селена. Это хинолин, анилин, пиридин, бензилцианид, бензимидобутиловый эфир, пиперидин, триэтиламин, гексаметиленамин, *p*-β-анисальдоксин.

1.2.1.5. ДРУГИЕ СВОЙСТВА

Удельный вес аморфного селена равен 4,27 *г/см*^{3}. Если аморфный селен превращается в металлический, то плотность увеличивается до 4,79 *г/см*^{3}. Модуль Юнга равен $4{,}89 \cdot 10^{10}$ *дин/см*^{2}, теплопроводность 0,0003 *кал/сек·см*^{3}*·град.* Аморфный селен довольно мягкий материал и легко царапается. В справочнике [251] приведена величина твердости селена (модификация не указывается) 2,0 по шкале Моса. Это значение сравнимо с 1,5 для свинца и 2,5—3,0 для меди.

1.2.1.6. ФОТОПРОВОДИМОСТЬ

До разработки селеновых ксерографических пластин аморфный селен как фотопроводник был изучен слабо. Обширными исследованиями в институте имени Баттела установлено, что аморфный селен является важным для ксерографии фотопроводником, хотя в работе [253] высказана мысль о противоположном.

В работе [254] проведены широкие исследования фотопроводимости аморфного селена в связи с его применениями в телевизионных трубках. Образцы были приготовлены испарением селена

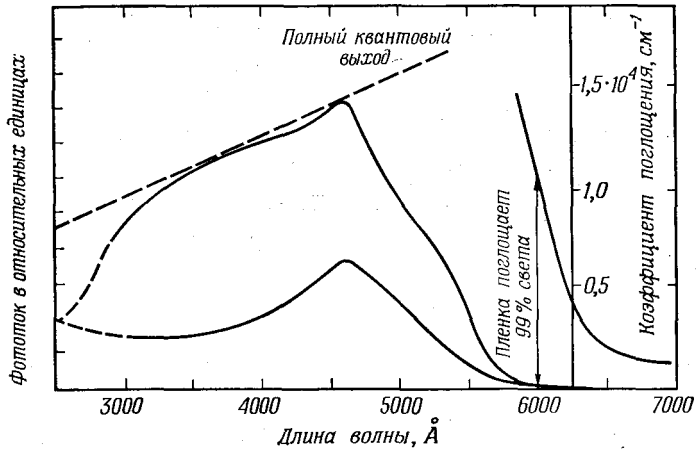
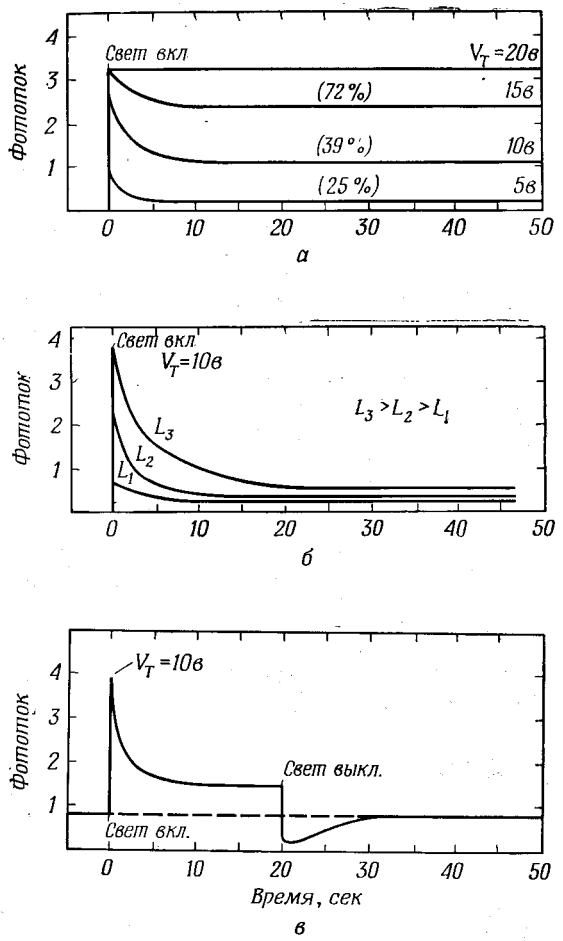


Рис. 113. Спектральные кривые фоточувствительности образцов из аморфного селена, измеренные методом сканирования. (Weimer, Cope, *RCA Rev.*, 12, 319 (1951).)

Интенсивность освещения одинакова по всему спектру. Видно, что край оптического поглощения располагается в более длинноволновой области, чем максимум фотопроводимости.

на покрытое проводящим слоем стекло. Толщина пленок селена менялась от значения меньше 0,1 до 10 *мк*. Образцы использовались в качестве мишеней в трубке типа видикон, а фотопроводимость наблюдалась при сканировании слоя селена электронным лучом. В этих экспериментах одним электродом служил проводящий слой на стекле, а другим — электронный луч. Падение напряжения на слое равнялось 25—50 *в*, а внутреннее поле $\sim 5 \cdot 10^4$ *в/см*. Кривая спектрального распределения фотопроводимости, полученная в этих экспериментах, показана на рис. 113. Кривая спектральной чувствительности, начиная от 5500 Å, заходит в область ультрафиолета. Было найдено, что преимущественно осуществляется дырочная проводимость. Сдвиг дырок



Р и с. 114. Влияние «усталости» на фототок в аморфном селене при разных напряжениях на образцах V_T и уровнях освещенности L. (W e i m e r, C o p e, *RCA Rev.*, 12, 327 (1951).)

«Провал» тока, выраженный в процентах от его начальной величины, оказывается наибольшим при низких напряжениях на мишени и при самом интенсивном освещении. График *в* иллюстрирует смещение кривой фототока под действием света.

в поле напряженностью $5 \cdot 10^4$ *в/см* равнялся 10^{-3} *см*, а электронов — 10^{-4} *см*. Аналогичные результаты приведены в работе [255]. Постоянная времени подъема или спада фототока оказалась меньше 50 *мксек*. Для чистого материала квантовый выход, близкий к единице, измерен в условиях освещения светом, сильно поглощаемым вблизи одного из электродов. По фототоку были

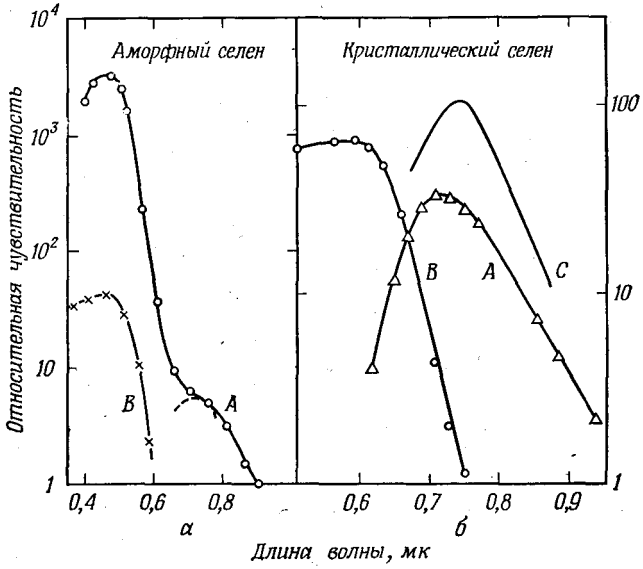


Рис. 115. Кривые спектральной чувствительности селена по данным работы [238].

а — кривая *А* построена по данным Мосса, *В* — по данным Веймера и Коупа; *б* — типичные кривые для моноклинной модификации селена (*А*) и металлического селена (*С*), фотовольтаический эффект в металлическом селене (*В*).

обнаружены «усталостные» эффекты, указывающие на наличие токов, ограниченных пространственным зарядом. Это влияние «усталости» показано на кривых рис. 114. Увеличение фототока с температурой указывает на наличие ловушек.

Мосс [238] измерил спектральную чувствительность слоев аморфного селена толщиной ~10 *мк* в интервале 380—900 *ммк*. Его результаты вместе с данными других исследователей для аморфной и кристаллической модификаций показаны на рис. 115. Он наблюдал пик на кривой фотопроводимости вблизи 440 *ммк*, который близок к положению пика, обнаруженного Веймером и Коупом [254]. Мосс обнаружил также полосу слабой чувствительности при 700 *ммк*.

Об отрицательной фотопроводимости и явлениях гашения в аморфном селене сообщалось в работе [256]. Оба явления имеют место только в довольно узком спектральном интервале вблизи 600 *ммк* и объясняются переходами с уровней очувствляющих центров, расположенных на 0,58—0,65 *эв* над валентной зоной.

Введение примесей и изменение методов приготовления образцов могут довольно заметно влиять на перенос заряда в аморфном селене [255]. Поэтому следует ожидать, что фотопроводимость, наблюдаемая разными авторами на образцах различной степени чистоты и приготовленных в различных условиях, будет иметь значения, изменяющиеся в довольно широком интервале.

1.2.1.7. КСЕРОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Ксерографические свойства аморфного селена в общем случае зависят от метода приготовления, степени чистоты, характера подложки, на которую осаждаются селеновые слои, и в определенной мере от толщины осаждаемых слоев.

Обычным методом приготовления слоев является испарение в вакууме. Этот метод позволяет получать селеновые слои, которые в основном аморфны, если температура подложки поддерживается ниже 90° С во время испарения. Выше этой температуры осажденные слои будут содержать относительно большую долю кристаллического вещества. В коммерческих ксерографических пластинах обычно селен осаждается на алюминиевые подложки толщиной 20—50 *мк* в зависимости от применения. Однако для специальных целей иногда используются латунные подложки, и толщина тогда может быть увеличена до 100 *мк*.

Большое темновое сопротивление аморфного селена определяет его возможность удерживать в течение долгого времени поверхностный заряд, а относительно хорошая светочувствительность позволяет разряжаться до необходимого уровня за короткие времена экспонирования. Обычно о разряде в темноте говорят как о «темновом спаде» и о разряде при освещении — как о «световом спаде».

Характеристики темнового спада. Темновой спад ксерографических пластин из аморфного селена зависит от знака поверхностного заряда и от материалов и методов, использованных при напылении слоев. Некоторые типичные кривые темнового спада показаны на рис. 116. Обычная пластина имеет время полуспада около 6,5 *мин* для начального потенциала, равного 500 *в*. Для пластин, приготовленных в различных условиях, автор обнаруживал времена полуспада продолжительностью от 9 *час* до нескольких секунд. Эксперименты показали, что поверхность раздела между слоем селена и подложкой служит главным фак-

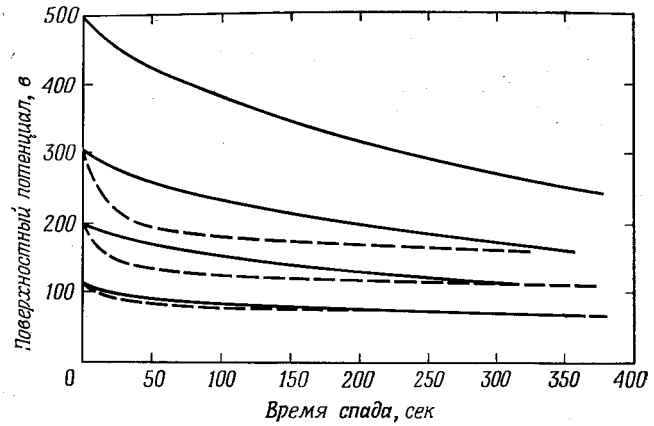
тором, определяющим темновой спад пластин из аморфного селена. Объемные свойства играют значительную роль, но являются менее важными, чем свойства поверхности раздела. Техника очистки и обработки поверхности подложки до напыления в вакууме селенового слоя может иметь заметное влияние на скорость темнового спада. Например, если поверхность алюминиевой подложки окисляется, то скорость темнового спада положительного поверхностного заряда уменьшается. Характеры темнового спада положительного и отрицательного зарядов обычно существенно отличаются (см. рис. 116).

Еще бóльшая разница отмечена для селеновых пластин, напыленных на подложки при разных температурах. Кривые темнового спада для трех пластин, приготовленных при различных температурах подложки, представлены на рис. 117. Кривые A и A' соответствуют температуре пластины 75° С. Эта пластина имеет медленный темновой спад положительного заряда, но темновой спад отрицательного заряда был таким быстрым, что удержался очень малый заряд после короткого времени между зарядкой и измерением электрометром (см. кривую A'). Кривые B и B' соответствуют температуре подложки 50—60° С. В этом случае отрицательный потенциал слоя селена не превышает 300 *в*. Кривые C и C' соответствуют положительной и отрицательной зарядке селеновой пластины, приготовленной без контроля температуры подложки. В начале процесса испарения температура была равна 25° С, а в конце процесса 50° С. В этом случае имеет место небольшая разница в скоростях темнового спада положительного и отрицательного зарядов. Три пластины, характеристики которых представлены на рис. 117, были сделаны в разное время на различных напылительных установках и не подходят для сравнения по влиянию температуры подложки. Они выбраны главным образом для того, чтобы показать большой разброс характеристик темнового спада, которые наблюдались для пластин аморфного селена, приготовленных в различных условиях.

Поверхностная кристаллизация, даже очень слабая, будет увеличивать скорость темнового спада слоев аморфного селена. Такая кристаллизация может происходить из-за продолжительного контакта с используемым для очистки растворителем или при длительном воздействии ультрафиолетового света.

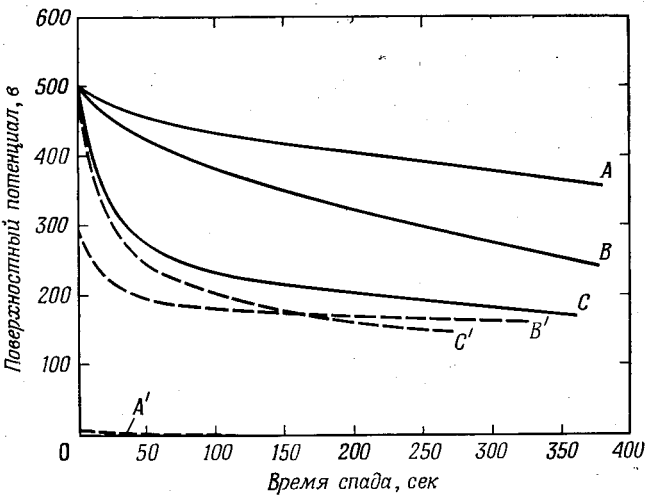
В работе [258] найдено, что скорость темнового спада очень мало зависит от изменений окружающей температуры и относительной влажности.

Характеристики светового спада. На практике селеновые ксерографические пластины в процессе электрического очувствления обычно приобретают положительный поверхностный заряд. Этим достигается дырочная проводимость через селеновый слой при



Р и с. 116. **Типичные кривые темнового спада для ксерографических пластин из аморфного селена.**

——— спад положительного поверхностного заряда; — — — спад отрицательного поверхностного заряда. Толщина слоя селена 50 *мк*.



Р и с. 117. Кривые темнового спада для ксерографических пластин из аморфного селена, изготовленных в разных условиях.

——— спад положительного поверхностного заряда; — — — спад отрицательного поверхностного заряда.

освещении, которая обеспечивает более эффективный разряд, чем электронная проводимость. Так как коэффициент поглощения в области наибольшей спектральной чувствительности очень высок, то, следовательно, свет почти полностью поглощается в очень тонком слое (приблизительно толщиной 0,1 *мк*) поверхности селена (рис. 118). Фотоны, поглощенные в этом тонком слое, рождают пары электрон — дырка. При положительном поверхностном заряде дырки будут двигаться в направлении к подложке, а электроны — к поверхности. Следовательно, электроны проходят очень короткое расстояние, в то время как дырки проникают через всю толщину слоя. Таким образом, при положительном поверхностном заряде освобожденные светом дырки становятся в действительности основными носителями фототока.

При отрицательном поверхностном заряде основными носителями будут электроны. Однако возможны исключения, например когда селен напыляется на стеклянную подложку с проводящим покрытием. В этом случае при освещении селенового слоя со стороны стекла для обеспечения дырочной проводимости необходим отрицательный поверхностный заряд, а для электронной проводимости — положительный заряд.

Типичные кривые светового спада для ксерографической пластины аморфного селена, полученные автором, представлены на рис. 119—121. Все представленные кривые получены на одной пластине, имевшей толщину приблизительно 50 *мк*. Влияние начального потенциала на скорость спада заряда иллюстрируется рис. 119, из которого видно, что скорость спада уменьшается с понижением начального потенциала. На рис. 120 показано влияние интенсивности света на скорость спада поверхностного потенциала, а на рис. 121 — влияние освещения одинаковой интенсивности, но различной длины волны. Эта пластина оказалась нечувствительной к свету с длиной волны 600—650 *ммк*, но была обнаружена доступная измерению чувствительность в красной области спектра (700—750 *ммк*) при положительном поверхностном заряде. С отрицательным поверхностным зарядом эта чувствительность к красному свету не обнаруживалась.

Отметим, что кривые светового спада отрицательного заряда, представленные на рис. 121, начинаются при низком начальном потенциале. Это объясняется тем, что селеновая пластина, использованная в этих работах, имела максимальный потенциал удерживаемого отрицательного заряда $\sim$300 *в*. Поэтому приходилось заряжать пластину до некоторого меньшего потенциала, чтобы предотвратить перезарядку слоя.

Спектральная чувствительность. Некоторые данные по спектральной чувствительности пластин аморфного селена в области спектра 330—750 *ммк* представлены на рис. 122. Данные для

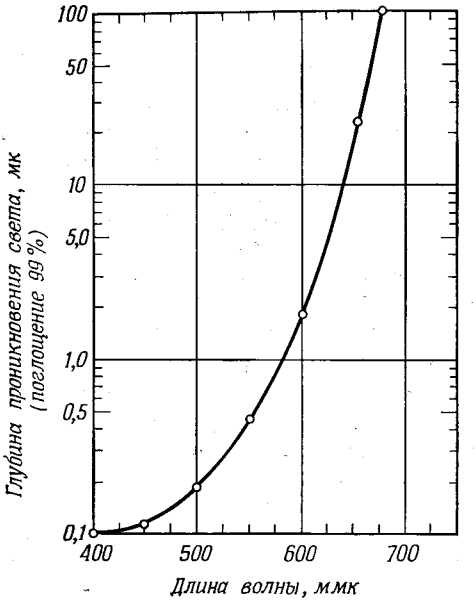


Рис. 118. Зависимость глубины проникновения света внутрь аморфного селена от длины волны. (Вычислено из данных на рис. 109.)

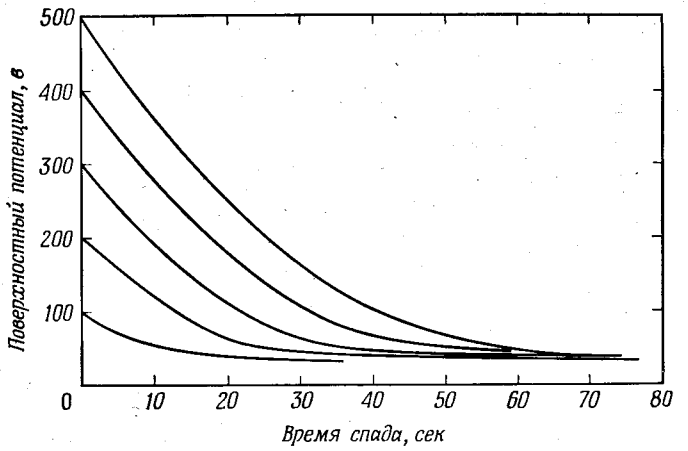
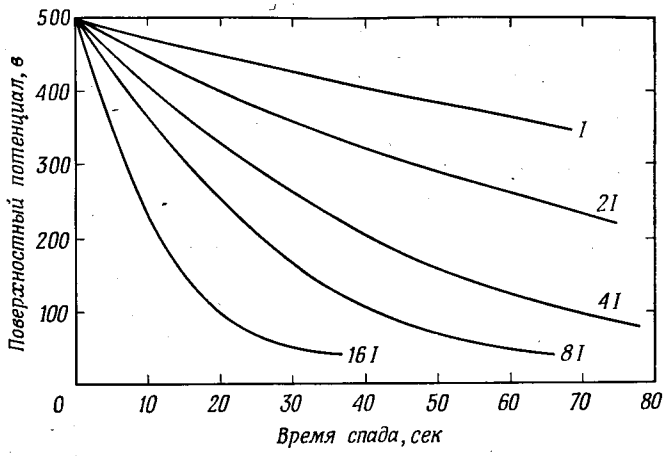
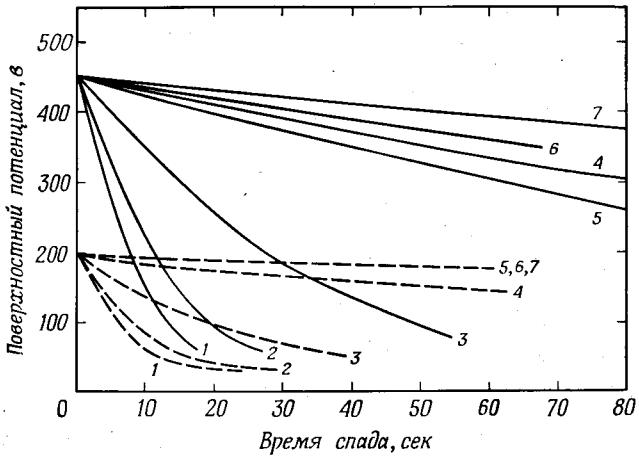


Рис. 119. Кривые светового спада для ксерографической пластины из аморфного селена при различных начальных потенциалах.

Постоянная интенсивность освещения, длина волны 450 *ммк*. Поверхностный заряд положительный.

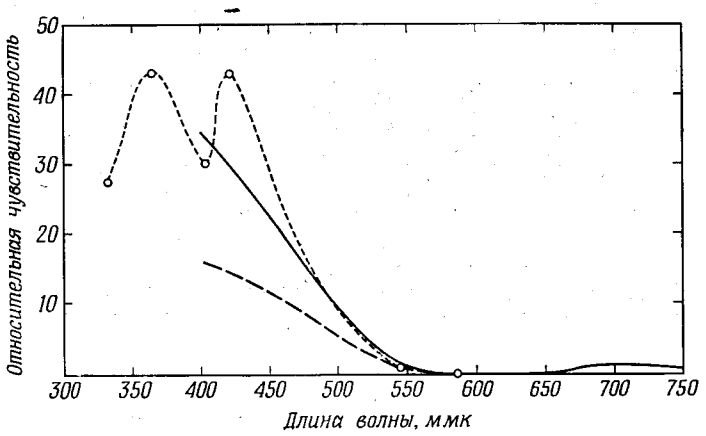


Р и с. 120. Кривые светового спада для пластины из аморфного селена при различных интенсивностях освещения.
Длина волны 450 *ммк*. Поверхностный заряд положительный.



Р и с. 121. Кривые светового спада для пластины из аморфного селена при различных длинах волн.
Постоянная интенсивность освещения при длинах волн, *ммк*: *1* — 400; *2* — 450; *3* — 500; *4* — 550; *5* — 700; *6* — 750; *7* — 600, 650 и темновой спад. ———— для положительного поверхностного заряда; — — — для отрицательного поверхностного заряда.

построения сплошной и пунктирной кривых взяты из кривых спада на рис. 121 и использована формула $S = (\Delta V/\Delta t)_h$, где S — относительная чувствительность, а ΔV и Δt — соответственно изменение потенциала и времени полуспада поверхностного заряда. Абсолютная интенсивность света точно не была определена в этих измерениях, но поддерживалась постоянной для всех длин волн.



Р и с. 122. Спектральная чувствительность ксерографических пластин из аморфного селена [208].
——— для положительного поверхностного заряда; — — — для отрицательного поверхностного заряда.

Поэтому из этих данных могут быть получены только относительные значения чувствительности. Показанная там же другая кривая (точки) представляет данные, полученные в работе [208] при использовании формулы (39). Две серии данных согласуются только в самом общем виде. Результаты работы [208] указывают на два пика — один при 435 *ммк* и другой при 365 *ммк*, в то время как кривые, вычисленные из данных рис. 121, не обнаруживают пиков в видимой области спектра, кроме небольшого пика при 700 *ммк*. Эти результаты приближенно согласуются с результатами, полученными Гренишиным и Черкасовым [204]. Они обнаружили пики чувствительности при 440 и 365—370 *ммк* (рис. 123). Измерения были сделаны на селеновых слоях толщиной 10 *мк*, напыленных на разные металлические основания. Данные на рис. 123 были получены при интенсивности света, равной 1 *эрг/сек·см*^{2} для всех длин волн. Образцы освещались в течение 5 *сек*.

Дробные численные значения получаются из отношения падения потенциала к начальному потенциалу при освещении в течение 5 *сек*. Интересно отметить, что эти авторы нашли заметную разницу в чувствительностях для различных материалов подложек, что можно видеть из рис. 123. Наивысшей чувствительностью обладает слой селена на подложке из железа, а самой низкой — на подложке из нержавеющей стали. Эти измерения сделаны с отрицательным поверхностным зарядом. Было бы интересно обнаружить какую-либо разницу при положительном поверхностном заряде, чтобы сравнить с результатами работы [259].

Кроме того, обнаружено, что тепловая обработка аморфных слоев селена заметно влияет на спектральную чувствительность. Для отрицательного заряда чувствительность увеличивается довольно значительно со временем при нагреве до 60° С, в то время как для положительного заряда чувствительность уменьшается. Эти результаты показаны на рис. 124.

Результаты по спектральной чувствительности аморфного селена, выраженной через квантовый выход [225], дают один широкий пик чувствительности в ультрафиолете (около 275 *ммк*, рис. 125). Методы измерения и вычисления данных не приведены.

Неудовлетворительное совпадение результатов, найденных разными авторами, по спектральной чувствительности ксерографических пластин из аморфного селена объясняется, вероятно, разной степенью чистоты, методами приготовления, а также методами измерения и вычисления чувствительности. Между данными по чувствительности и спектральными кривыми, полученными в измерениях фотопроводимости, имеется почти полное согласие (см. рис. 113 и 115).

Взаимозаместимость. В работе [226] сообщается о проверке закона взаимозаместимости для ксерографической пластины из аморфного селена. Результаты приведены на рис. 126. Пластина освещалась импульсами света от вольфрамовой лампы мощностью 300 *вт* с нейтральными светофильтрами для изменения интенсивности и измерялось время полуспада начального поверхностного заряда. На рис. 126 видно значительное отклонение от взаимозаместимости как при малых, так и при больших интенсивностях. В промежуточной области кривая почти плоская. Эти результаты несколько отличаются от результатов, сообщенных Фридкиным и Барулиным [262], которые получили кривые, имеющие плоский участок при малых интенсивностях (рис. 127). Однако при больших интенсивностях они обнаружили также значительное отклонение от взаимозаместимости. Селеновые слои освещались лампой накаливания (2800° С) с нейтральными светофильтрами для изменения интенсивности. Слои заряжались

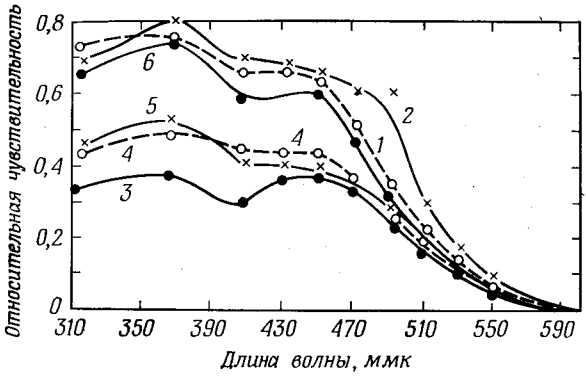


Рис. 123. Кривые спектральной чувствительности слоев аморфного селена, осажденных на подложки из различных материалов. [Гренишин, Черкасов, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 5, 735 (1960).]

Толщина слоев 10 *мк*. *1* — медь; *2* — железо; *3* — нержавеющая сталь; *4* — оцинкованное железо; *5* — полированный дюраль; *6* — латунь. Поверхностный заряд отрицательный.

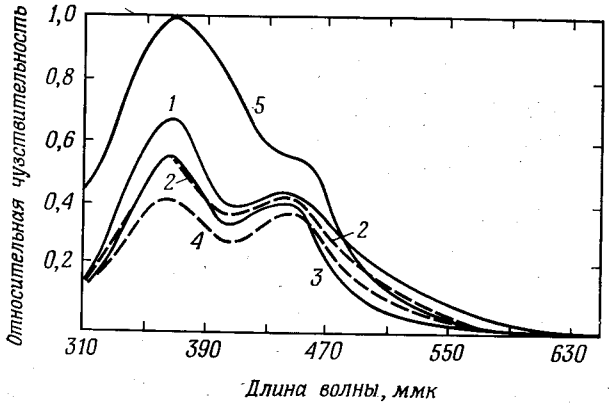


Рис. 124. Кривые спектральной чувствительности для слоев аморфного селена после прогрева в течение разного времени до 60° С. [Гренишин, Черкасов, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 5, 735 (1960).]

1 — 0,5; *2* — 8; *3* — 24; *4* — 0,5; *5* — 8 *час*. Кривые *1*, *2*, *3* — для положительного заряда; кривые *4*, *5* — для отрицательного заряда.

положительно. Данные по взаимозаместимости были получены из кривых спада заряда.

Хорошее соответствие закону взаимозаместимости при слабых интенсивностях имеет место для некоторых результатов, представленных на рис. 127, полученных при освещении монохроматическим светом ($\lambda = 450$ *ммк*). В диапазоне интенсивностей 0,003—0,03 *мквт/см*^{2} почти плоские кривые взаимозаместимости получены для падения напряжения на 300 *в* и меньше при начальном потенциале, равном 500 *в*.

Квантовый выход. В ксерографии эффективность падающих фотонов в процессе освещения может быть измерена по рассасы-

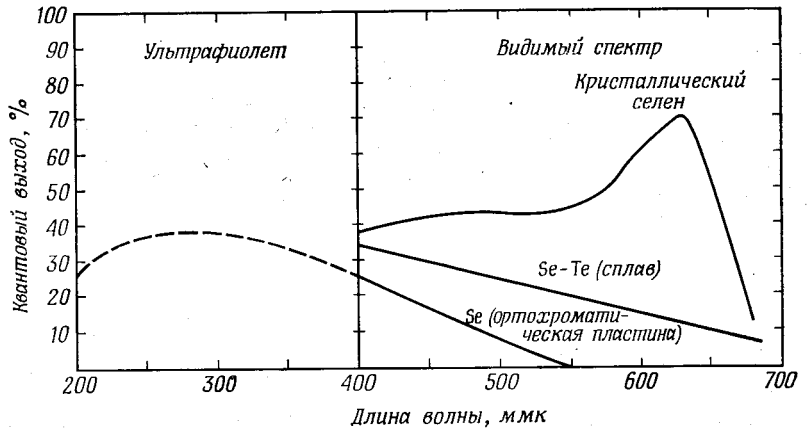


Рис. 125. Спектральная чувствительность ксерографических пластин. (Claus, *Phot. Sci. and Eng.*, **7**, 6 (1963).)

ванию заряда. Эффективный квантовый выход η_λ для нейтрализации поверхностного заряда в таком случае определяется по формуле

$$\eta_\lambda = \frac{\Delta\sigma}{N_\lambda}, \qquad (47)$$

где $\Delta\sigma$ — уменьшение поверхностного заряда, выраженное через число электронов на единицу площади, когда поверхность облучается светом длиной волны λ в течение данного периода времени, и N_λ — число фотонов на единицу площади, падающих на поверхность в течение того же времени. Выражая $\Delta\sigma$ через поверхностный потенциал, эту формулу запишем в виде

$$\eta_\lambda = \frac{K\varepsilon_0 \Delta V}{LN_\lambda}, \qquad (48)$$

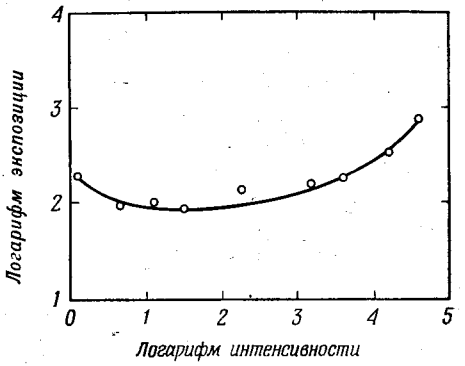


Рис. 126. Кривая взаимозаместимости для ксерографической пластины аморфного селена. Источник света — вольфрамовая лампа 300 *вт*. (Costelec, *J. Appl. Phys.*, **31**, 442 (1960).)

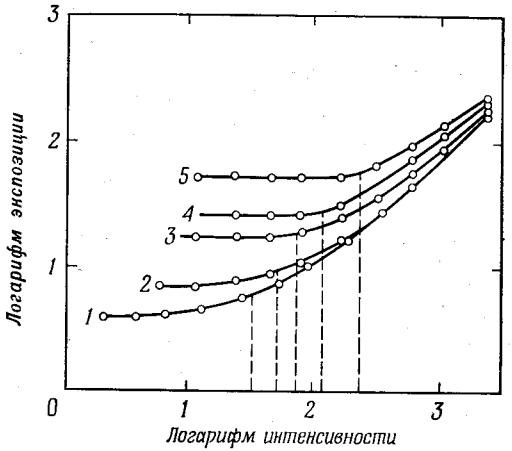
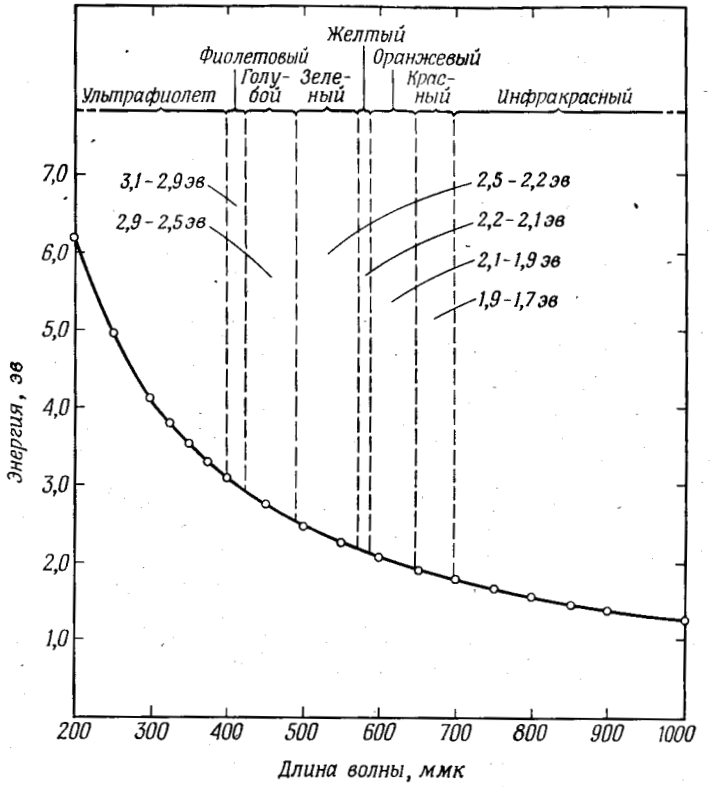


Рис. 127. Кривые взаимозаместимости для слоев аморфного селена. (Фридкин, Барулин, *Физика твердого тела*, **4**, 2978 (1962).)

Кривая *1* соответствует чистому селену; остальные — селену с добавками серы в следующих весовых концентрациях, %: *2*—3; *3*—7; *4*—13; *5*—33.

где K — диэлектрическая проницаемость, L — толщина фотопроводящего слоя и ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Когда интенсивность падающего света выражается в обычных энергетических единицах, т. е. в *вт*, то N_λ находится сначала переводом энергетических единиц в *эв*; затем, выражая энергию



Р и с. 128. Кривая для перевода длин волн в электрон-вольты.

фотона в *эв*, для данной длины волны с помощью кривой, представленной на рис. 128, определяют N_λ в *фотон/сек · см²*. Например, если интенсивность света выражена в *мквт/см²*, то число *фотон/сек·см²* будет равно

$$N_\lambda = \frac{I_0 \cdot 10^{13}}{1{,}6 n_\lambda}\,, \qquad (49)$$

где n_λ — энергия фотона в *эв* и I_0 — интенсивность света в *мквт/см²*; например, при $I_0 = 1{,}0$ *мквт/см²* и $\lambda = 400$ *ммк* имеем

$N_\lambda = 10^{13}/1{,}6 \cdot 3{,}08 = 2 \cdot 10^{12}$ *фотон/сек·см²*. Когда $\Delta\sigma$ переводят из кулонов в электростатические единицы заряда, то формула для эффективного квантового выхода записывается в виде

$$\eta_\lambda = \frac{K\Delta V n_\lambda}{LI_0} \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-6}. \qquad (50)$$

Если η_λ выражено в процентах, то ΔV — в *в*, n_λ — в *эв/фотон*, L — в *см* и I_0 — в *мквт/см²*.

Действительный квантовый выход для нейтрализации заряда, выраженный через величину света, поглощенного в фотопроводящем слое, определяется с учетом отражения и пропускания падающего пучка. Тогда I_0 в выражении (50) нужно заменить следующим выражением:

$$I^* = I_0(1 - R_\lambda)(1 - e^{-\alpha_\lambda L}). \qquad (51)$$

Здесь R_λ — отражательная способность поверхности и α_λ — коэффициент поглощения слоя, *см*$^{-1}$. Для аморфного селена эти величины могут быть получены из рис. 109—111.

В работе [260] сообщается о полном квантовом выходе, равном 93%, для тонких слоев аморфного селена, находящихся в сильном поле и освещенных светом с длиной волны 400 *ммк* через подложку из стекла с проводящим покрытием. Полагая потери на отражение за счет подложки равными 5%, для квантового выхода получаем приблизительно 100%. Это совпадает с наблюдениями по измерениям фотопроводимости [254]. Согласно выводам, сделанным в работе [260], сильное поле сводит к минимуму влияние ловушек и эффекта рекомбинации, позволяя фотовозбужденным носителям проходить, по существу, всю толщину селенового слоя. Используя данные работы [261], автор рассчитал квантовые выходы для величины рассасывания заряда и нашел, что они лежат в пределах 90—100% для начальных скоростей разряда при высоких начальных напряжениях. Даже для разряда до половины начального потенциала вычисленные из этих данных квантовые выходы равнялись 60—100%. Подобные же значения были получены в экспериментах на слоях аморфного селена в лаборатории фирмы «Ай-Би-Эм». Эти измерения были сделаны на пленках толщиной 50 *мк*, освещавшихся монохроматическим светом с длиной волны, равной 436 *ммк*. Эти значения гораздо выше значений, полученных в работе [225], где квантовый выход для нейтрализации заряда равен ~25% при длине волны падающего света 400 *ммк*. Разница может возникнуть из-за выбора величины конечного потенциала, используемой в вычислениях.

Влияние условий приготовления образцов. Электрические свойства ксерографических пластин, приготовленных в виде

пленок аморфного селена, напыленных в вакууме, сильно зависят от условий, поддерживающихся внутри вакуумной камеры в процессе напыления. Помимо механических устройств внутри вакуумной камеры, к факторам, воздействующим на свойства аморфных пленок селена, следует отнести следующие: 1) температуру подложки, 2) скорость испарения и 3) давление внутри вакуумной камеры.

Одним из наиболее существенных фактов при приготовлении пленок аморфного селена методом испарения в вакууме является температура подложки. Всестороннее изучение этого параметра для слоев селена толщиной 15—17 *мк*, напыленных на алюминиевые подложки, проделано в работе [263]. Для положительного поверхностного заряда можно сделать следующие выводы:

1. Максимальный потенциал, удерживаемый пленкой аморфного селена, не зависит от температуры подложки в диапазоне 40—90° С.

2. Остаточный потенциал после освещения голубым светом уменьшается при увеличении температуры подложки, причем минимум наблюдается при 65° С; дальнейшее повышение температуры приводит к небольшому увеличению остаточного потенциала.

3. Скорость темнового спада потенциала заметно зависит от температуры подложки в интервале 40—90° С.

4. Начальная чувствительность пленки к голубому свету почти не зависит от температуры подложки в диапазоне значений температуры 40—90° С.

5. Обнаруживается некоторая чувствительность пленок к красному свету, изготовленных на подложках с температурой около 75° С и выше.

6. При температурах подложек ниже 40° С чувствительность к голубому свету уменьшается; например, при 25° С чувствительность к любой области видимого спектра очень мала.

Для отрицательного поверхностного заряда получены следующие результаты:

7. Максимальный потенциал, удерживаемый пленкой, почти не меняется в интервале температур подложки 40—60°, но выше 60° С максимальный потенциал резко падает до очень малой величины.

8. Остаточный потенциал после освещения голубым светом уменьшается постепенно от относительно высокой величины при 40° до очень малой при 90° С.

9. По мере того как температура подложки становится выше 40° С, скорость темнового спада уменьшается до минимума при 62° С; затем она резко возрастает с дальнейшим повышением температуры подложки.

10. Обнаруживается чувствительность к голубому свету, достигающая максимума для пленок, приготовленных на подложках с температурой $\sim 60°$ С, причем чувствительность падает, как только температура подложки становится больше или меньше этой величины.

11. Чувствительность к красному свету при отрицательном поверхностном заряде не обнаружена на пленках аморфного селена, приготовленных при температурах 25—90° С. Результаты 5, 6, 9 и 10 в основном подтверждаются экспериментами [221]. Однако данные этой работы, указывающие на заметное увеличение темнового сопротивления для положительного поверхностного заряда при температурах подложки выше 60° С, не согласуются с результатом 3, а небольшая по величине чувствительность к красному свету для случая отрицательного заряда при температурах подложки ниже 60° С не согласуется с п. 11.

Сообщались также некоторые данные о влиянии скорости испарения на электрические свойства аморфных пленок селена. Наблюдались незначительные изменения, когда время напыления увеличивалось от 2 до 30 *мин*. Скорость темнового спада и спектральная чувствительность оказались, по существу, без изменений. Однако наблюдается заметный, но небольшой минимум остаточного потенциала для времени напыления около 15 *мин*. Когда время напыления увеличивается до 90 *мин*, пленка селена кристаллизуется. В основном результаты не указывают на специфическое влияние скорости испарения на процесс напыления аморфных пленок селена. Обнаруженные эффекты могут объясняться как увеличением времени тепловой обработки, так и продолжительностью времени напыления. В работе [37] найдено, что аморфные слои получаются при скорости напыления 1 *мк/мин* и выше при температурах подложки ниже 50° С. При высоких температурах и малых скоростях напыления в селеновых слоях начинается кристаллизация. В работе [235], однако, показано, что скорость напыления важна при ослаблении дефектов изображения, особенно для пластин, используемых в полутоновой фотографии. Установлено также, что скорость напыления должна быть $\sim 0{,}3$ *мк/мин*.

Прогрев селеновых слоев после напыления в вакууме приводит к возникновению кристаллитов внутри аморфного слоя. При температурах ниже $\sim 50°$ С кристаллическая фаза растет очень медленно, но по мере повышения температуры кристаллизация может происходить довольно быстро. Согласно результатам работы [37], скорость кристаллического роста может быть выражена уравнением Больцмана

$$v = Be^{-U/kT}, \tag{52}$$

где U — энергия активации, равная 1,05 *эв*; k — константа Больцмана и B — постоянная, которая равна приблизительно $5 \cdot 10^{13}$. Можно ожидать также, что нагрев будет приводить к диффузии примесей внутрь селенового слоя из металлической подложки, которые способствуют зарождению кристаллов. Как отмечалось выше [204], нагрев селеновых ксерографических слоев может довольно заметно влиять на фоточувствительность (см. рис. 124). Давление в камере в процессе испарения и осаждения селена не является критическим фактором. В экспериментах [264] были обнаружены лишь незначительные эффекты в пленках селена, обусловленные изменением давления внутри вакуумной камеры от 0,5 до 25 *мм рт. ст.*

Влияние поверхности подложки. Тип и качество поверхности, на которую осаждается пленка селена при испарении в вакууме, могут сильно влиять на электрические свойства пленки. Обычно это влияние проявляется в различии скоростей темнового спада. Так как свет, который поглощается селеном (зеленоголубой спектр видимого света), не проникает в аморфном селене до границы раздела с подложкой, то можно предположить, что условия на границе раздела не влияют на фоточувствительность в этой спектральной области. Однако для большинства пленок красный свет проникает до подложки; следовательно, условия на границе раздела могут изменять чувствительность к красному свету. Фотопроводимость, вызванная другими проникающими излучениями, такими, как рентгеновские лучи, также может зависеть от условий на поверхности подложки.

В экспериментах с разными металлическими подложками были использованы различные способы очистки и обработки поверхности металлических подложек и применены включения очень тонких слоев изолирующих и полупроводниковых материалов между селеном и подложкой. Условия на поверхности металла еще до напыления слоя селена оказываются более важными, чем выбор самого металла. Для высококачественных изображений необходима гладкая полированная металлическая поверхность. При микроскопически нечистой поверхности в проявленном изображении будут появляться дефекты [265].

Эксперименты по очистке и обработке поверхности алюминиевых подложек описаны в работе [257]. Заметное уменьшение скорости спада потенциала в темноте отмечалось при катодной обработке в растворе фосфата натрия.

Дальнейшее уменьшение скорости темнового спада наблюдалось, когда подложка подвергалась анодной обработке в растворе тартрата аммония или в растворе серной кислоты. Приемы очистки латунных подложек описаны в той же работе [257]. Очень заметное уменьшение скорости темнового спада потенциала оказывалось

при использовании полировки с помощью состава «вакс» (wax) или раствора парафина в бензине в качестве первой стадии очистки. В работе [235] обнаружено, что невидимые неровности на поверхности подложки, жирные пятна, отпечатки пальцев и т. д. становятся видимыми после напыления слоя селена. Установлено, что особенно эффективна химическая очистка поверхности 20%-ным спиртом в течение 1 *час* и следующая затем ионная бомбардировка в вакуумной камере.

Из экспериментов с различными материалами, напыляемыми между аморфным слоем и подложкой, становится ясно, что темновой спад определяется главным образом условиями на границе раздела. Материалы наносились на подложку до покрытия ее селеном путем напыления в вакууме [257]. Обычно промежуточные слои были толщиной меньше нескольких микрон. Единственными данными, известными из этих экспериментов, являются скорость спада потенциала в темноте и скорость спада потенциала при освещении голубым светом (~450 *ммк*). Результаты для разных промежуточных слоев могут быть суммированы следующим образом: двуокись селена увеличивает темновую проводимость при отрицательной поверхностной зарядке. Для положительного поверхностного заряда имеется меньшее, но все-таки заметное увеличение скорости темнового спада потенциала. Эти результаты указывают на высокую скорость инжекции дырок из слоя двуокиси селена в аморфный селен, а также на некоторое увеличение скорости инжекции электронов из двуокиси селена в пленку аморфного селена по сравнению со случаем, когда аморфный селен непосредственно контактирует с металлической подложкой. Сплав селена с цинком не приводит к каким-либо заметным изменениям в электрических характеристиках пленки аморфного селена. Промежуточные слои из фтористого магния MgF_2 не дают значительных изменений в скорости спада потенциала в темноте и при голубом свете. Однако обнаружено заметное увеличение остаточного потенциала после освещения голубым светом, указывающее на то, что эти пленки создают дырочные ловушки в слое селена. С промежуточными слоями из кристаллического селена не обнаружено заметных изменений в скорости спада потенциала в темноте и при голубом свете для положительного поверхностного заряда, однако для отрицательного поверхностного заряда наблюдалось значительное увеличение скорости спада потенциала в темноте, что свидетельствует об инжекции дырок из кристаллического в аморфный слой. Мышьяк не дает каких-либо заметных изменений в скорости спада потенциала ни в темноте, ни на свету. Окись As_2O_5 создает очень заметное увеличение темновой проводимости для положительного и отрицательного зарядов, указывая на инжекцию дырок и электронов в пленку аморфного селена. Теллур

в качестве промежуточного слоя между подложкой и аморфным селеном не влияет на электрические свойства аморфной пленки селена для положительного поверхностного заряда, но приводит к значительному увеличению скорости спада потенциала в темноте для отрицательного поверхностного заряда, что указывает на инжекцию дырок из слоя теллура в аморфный селен. Промежуточные слои германия приводят к аналогичным результатам, с той лишь разницей, что темновая проводимость для отрицательного поверхностного заряда увеличивалась настолько, что пленка аморфного селена не могла сохранить отрицательный поверхностный заряд. В работе [115] обнаружено, что промежуточный слой сплава As_2S_3 приводит к низким скоростям темнового спада положительного и отрицательного зарядов.

Слои аморфного селена, напыленные на подложки из стекла с проводящим покрытием, обнаруживают медленный темновой спад положительного заряда и очень быстрый темновой спад отрицательного заряда [266]. Когда слои были заряжены положительно и освещались со стороны селена, потенциал уменьшался до относительно низкой величины. Однако при освещении пластины со стороны стекла потенциал уменьшался сначала примерно с той же скоростью, но до более высокого значения остаточного потенциала. Такое поведение фототока можно объяснить тем, что при положительном заряде на селене и освещении через стекло фототок определяется электронами, и эффект должен быть аналогичен зарядке селена отрицательным зарядом и освещению слоя со стороны селена. При отрицательном заряде и освещении поверхности селена остаточный потенциал обычно выше, чем в случае положительного заряда. В работе [267] сообщается об экспериментах со слоями аморфного селена, напыленными на проводящие подложки, представляющие собой покрытия из окиси кадмия на стекле. Оксидное покрытие толщиной $\sim$0,05 *мк* было получено путем распыления. Селеновые слои толщиной 0,2—16 *мк* получались напылением в вакууме при температуре подложки, поддерживавшейся при 20° С и ниже. Эта температура оказалась необходимой для обеспечения адгезии между аморфными слоями и очень тонкими покрытиями. Обнаружено также, что темновые спады положительного и отрицательного зарядов достаточно медленны даже для очень тонких слоев. Сообщаются времена темновых полуспадов (от 30 до 60 *мин*). К тому же тонкие пленки были способны выдерживать довольно высокие поверхностные заряды, причем внутренние поля при насыщении достигали значений $50 \cdot 10^4$—$60 \cdot 10^4$ *в/см*, по-видимому, для положительной и отрицательной зарядок. Однако скорость светового спада положительного заряда приблизительно вдвое больше скорости спада отрицательного заряда.

Влияние примесей. Известно, что довольно малые количества примесей могут сильно влиять на поведение аморфных слоев селена. Пока еще нет достаточного количества экспериментальных данных для выявления связи специфических явлений с наличием определенных типов примесей. Селен, используемый в США для ксерографических пластин, в основном довольно высокой чистоты и содержит чрезвычайно малые количества (порядка миллионных долей и меньше) таких элементов, как Al, Cu, Fe, Te и S. Известны эксперименты [268] со слоями аморфного селена из ультрачистого материала. Селен высокой чистоты получается его восстановлением из селенистого водорода. Свойства слоя из чистого селена сравнивались со свойствами пленки аморфного селена, изготовленной из коммерческого сорта, имеющего чистоту 99,998%. Оба слоя были напылены в одинаковых условиях в вакуумной камере. Единственное обнаруженное значительное различие при положительном поверхностном заряде для ультрачистого образца по сравнению с коммерческими свелось к высокому остаточному потенциалу после освещения светом длиной волны 400 и 500 *ммк* и низкому остаточному потенциалу после освещения светом длиной волны 700 *ммк*. Спектральные чувствительности двух образцов почти не отличались.

Наличие низкого остаточного потенциала ультрачистого образца под действием красного света является существенным фактором. Так как известно, что чувствительность к красному свету аморфного селена на непрозрачной подложке возникает и на поверхности раздела слоя и подложки, то разряд положительного поверхностного заряда происходит за счет движения электронов в направлении к поверхности. Разряд при голубом свете возникает за счет движения дырок в противоположном направлении. Следовательно, удаление примесей уменьшает число электронных ловушек. С другой стороны, высокий остаточный потенциал при освещении голубым светом указывает на увеличение дырочных ловушек в ультрачистом образце.

Из этих экспериментов вытекает, что появление дырочных ловушек обусловлено структурными дефектами, а появление электронных ловушек связано с примесными центрами. Низкий остаточный потенциал для коммерческого образца при освещении голубым светом указывает на возможность присутствия одной или нескольких примесей, приводящих к уменьшению числа дырочных ловушек.

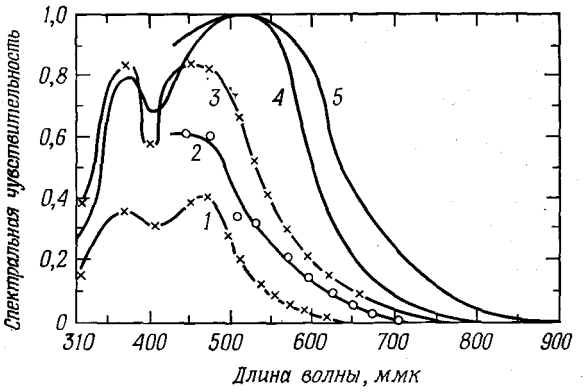
Исследования показали, что сдвиг электронов может быть увеличен, а сдвиг дырок может быть уменьшен соответствующим легированием аморфного селена [269]. Это свойство очень важно для разработки высокочувствительных многослойных пластин селена. В работе [270] обнаружено, что легирование аморфного

селена железом приводит к заполнению электронных ловушек, обеспечивая, таким образом, довольно большой сдвиг электронов. Установлено также, что примеси мышьяка, сурьмы и висмута определяют проводимость n-типа, а хлор, фтор, бром и иод — проводимость p-типа. В работе [255] обнаружено, что малые количества мышьяка увеличивают сдвиг электронов в аморфном селене и предотвращают кристаллизацию при слегка повышенных температурах. При этом было предположено, что атомы мышьяка служат поперечными звеньями цепей атомов селена; это ограничивает концы цепи и позволяет не рассматривать глубокие электронные ловушки.

Были проведены эксперименты с добавками разных элементов и составов в малых количествах (обычно меньше 0,1%). Селеновые слои, легированные этими материалами, приготавливались в виде ксерографических пластин напылением в вакууме. Толщина слоев составляла 40—50 *мк*.

Были исследованы следующие примесные материалы: Te, Sb, B, Ge, Tl, PbSe, As, CuO, Cd, Pb, $BiCl_3$, Sb_2S_3, Bi_2S_3, Zn, CdSe, S и $FeSeO_4$. В некоторых случаях количество материала, включенного в слой селена, не могло быть точно определено из-за того, что не достигалось полного сплавления. Однако вполне вероятно, что при использовании этого метода действительно содержащиеся в слоях селена количества примесей были значительно меньше 1%. Исключения составляли сера, теллур и таллий, которые полностью сплавлялись. В большинстве случаев образцы, содержащие менее 10% добавляемого материала, имели кривые чувствительности для положительного поверхностного заряда, по существу аналогичные кривым для контрольного образца селена. Таллий оказался исключением. Слои селена, содержащие таллий в количествах 0,05% и более, не обладают чувствительностью к свету в области 400—700 *ммк*. Остаточные потенциалы были примерно те же, что и для исходного селена. Темновые спады происходили медленнее, чем для контрольного образца, причем пластины содержались в темноте в течение 8 *час* перед проверкой. Однако при освещении испытываемых пластин рассеянным светом перед измерениями темновые спады протекали быстрее, чем для исходного селена. Это указывает на заметную величину «усталости» легированных образцов, которая в свою очередь говорит о вероятности того, что легирование создает мелкие «ловушечные» уровни. В этом случае освещение перед проверкой могло быть причиной устойчивой проводимости, объясняющей более быстрый темновой спад. Добавки мышьяка и теллура в количестве 1,0% и более увеличивают чувствительность и расширяют спектральную характеристику в длинноволновую сторону. К сожалению, в этих экспериментах не проводились измерения с отрицательным

поверхностным зарядом. Следовательно, делать какие-либо выводы из данных относительно влияния легирования на электронные ловушки или сдвиг электрона в слоях селена пока еще нельзя. Было установлено, что большие добавки теллура (вплоть до 7%) расширяют спектральную характеристику пленок аморфного селена в длинноволновую сторону и увеличивают чувствительность в видимой области спектра. С другой стороны, темновая проводимость возрастает с увеличением количества теллура, добавленного в пленки аморфного селена, и эффекты «усталости» проявляются сильнее. Слои селен — теллур были исследованы в работах



Р и с. 129. Спектральная чувствительность ксерографических пластин Se — Te [204].
Содержание Te, %: *1* —0,5; *2* — 1,5; *3* — 2,5; *4* — 6 и *5*—7,5.

[37, 204, 272]. Кривые спектральной чувствительности, полученные в работе [204], представлены на рис. 129.

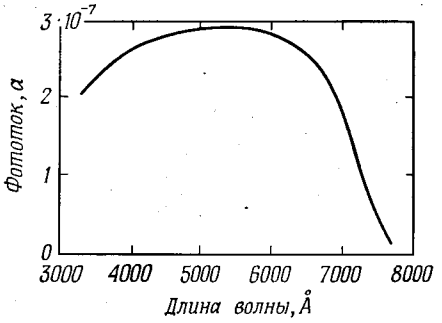
Согласно работе [255], добавки мышьяка к селену увеличивают чувствительность в красной области спектра. Данные по спектральной чувствительности для пленки состава селен — 25% мышьяка представлены на рис. 130. Измерения были проделаны на ячейке в виде сандвича, причем фототок измерялся поперек ячейки. Было установлено также, что мышьяк, добавленный к селену, усиливает эффекты «усталости» и увеличивает температуру размягчения слоев селена.

В работе [262] исследованы ксерографические слои аморфного селена, содержащие до 33% серы. Был измерен спад положительного заряда при освещении лампой накаливания. Из результатов, показанных на рис. 127, следует, что добавки серы уменьшают чувствительность аморфного селена к излучению лампы.

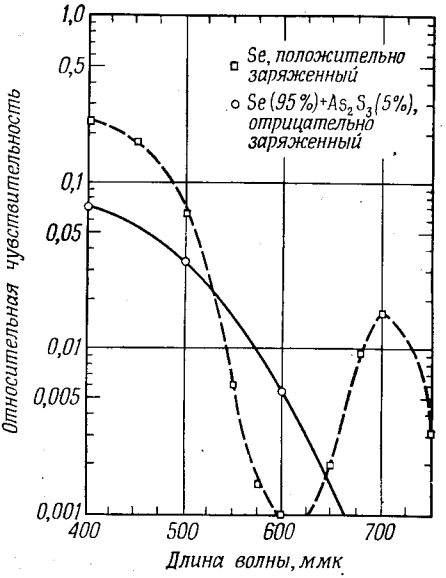
В работе [273] обнаружено, что добавки As_2S_3 к ксерографическим слоям аморфного селена уменьшают скорость темнового спада и увеличивают поверхностный потенциал. Добавление As_2S_3 также сдвигает спектральную чувствительность селена в сторону больших длин волн (рис. 131).

Многослойные пластины селена. Аморфный селен относительно высокой чистоты представляет собой хорошую среду для накопления и эффективного переноса носителей заряда. Попытки увеличить фоточувствительность путем добавок других элементов и соединений обычно ухудшали свойство селена сохранять заряд и влияли на подвижность носителей. Это привело некоторых экспериментаторов к рассмотрению возможности применения в ксерографии многослойных структур, в которых слой аморфного селена покрывается тонкими слоями других фотопроводящих материалов или материалов, обеспечивающих более эффективное поглощение падающего света. Эксперименты с поверхностными покрытиями из нескольких красителей [274] показали, что такие красители, как эритрозин, метил-виолет Б, феносафранин и пинацианол, увеличивают скорость темнового спада настолько, что времени, в течение которого существует поверхностный заряд, недостаточно для проведения измерений. С тонкими покрывающими слоями полупроводниковых [275] материалов на аморфном селене были получены следующие результаты: сульфид цинка не приводит к заметным изменениям в темновом спаде потенциала как для отрицательного, так и для положительного поверхностного заряда и не влияет на светочувствительность в голубой области спектра по сравнению с аморфными пленками селена без этого покрытия. Оказывается, что слои германия не имеют какого-либо заметного влияния на темновой спад потенциала или на чувствительность к любому свету для отрицательного поверхностного заряда; однако для положительного заряда этот спад значительно увеличивается. Слои фторида магния приводят к очень быстрому темновому спаду положительного и отрицательного зарядов и заметно уменьшают светочувствительность. Поверхностные слои из двуокиси селена дают быстрый темновой спад положительного и отрицательного зарядов. Слои пятиокиси мышьяка увеличивают темновую проводимость в такой степени, что покрытая ими пленка не может удерживать положительный заряд. Темновой спад отрицательного заряда происходил также быстро для покрытий из этого материала, и отсутствовала чувствительность к голубому свету.

Поверхностные слои, состоящие из сплава селена и теллура, напыленных на пленку аморфного селена, служили объектом обширных экспериментальных работ [276]. Использовались поверхностные слои, содержавшие до 35% теллура. Скорость темнового



Р и с. 130. Спектральная кривая фототока для пленки селен — мышьяк по данным работы [255]. Содержание мышьяка 25%.



Р и с. 131. Спектральная чувствительность аморфного селена и селена, содержащего 5% As_2S_3 [273].

спада потенциала увеличивалась с ростом концентрации теллура. Эти слои имеют панхроматическую чувствительность в видимой области спектра. Их светочувствительность почти на порядок больше чувствительности аморфного селена. Эти результаты справедливы для случая положительной зарядки. Для случая отрицательной зарядки результаты не сообщались.

Основные трудности с поверхностными покрытиями, предназначенными для увеличения спектральной чувствительности, состоят в том, что эти материалы являются плохими изоляторами по сравнению с аморфным селеном и разрушают естественный

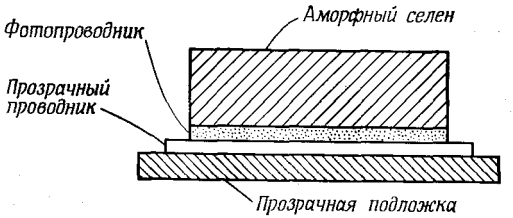


Рис. 132. Многослойная ксерографическая пластина. (Claus, *Photogr. Sci. and Eng.*, **7**, 7 (1962).)

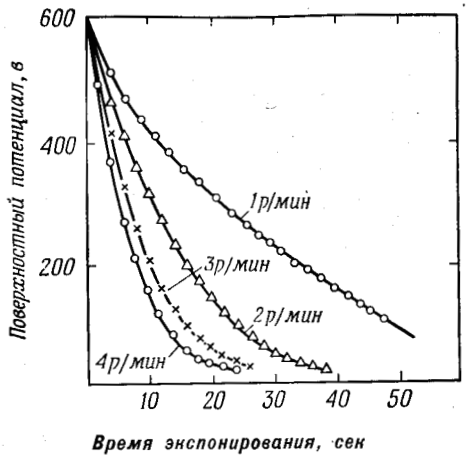
поверхностный барьер селена, ответственный за сохранение зарядов. Это имеет место при использовании в качестве поверхностных покрытий любых фотопроводников с узкой запрещенной зоной. Поверхностные слои этих материалов ведут себя подобно электродам на поверхности аморфного селена, создавая возможность для инжекции зарядов с поверхности слоя в его объем. Своеобразное решение этой проблемы было предложено в работе [277], где были получены многослойные структуры, в которых слой фотопроводящего материала находился между толстым (около 50 *мк*) слоем аморфного селена и прозрачной проводящей подложкой (рис. 132). В этом случае естественный барьер поверхности селена может быть использован для сохранения заряда, в то время как увеличенная спектральная чувствительность фотоактивного слоя используется при освещении его через прозрачную подложку. Были использованы фотоактивные слои гексагонального селена и сплавы селена с теллуром. Характеристики спектральной чувствительности многослойной структуры с этими материалами представлены на рис. 125 вместе с характеристиками обычной селеновой ксерографической пластины. При положительном поверхностном заряде освещение фотоактивного слоя заставляет электроны, инжектированные из этого слоя, проходить через слой аморфного селена. Обыкновенно сдвиг электронов

в аморфном селене очень мал и, следовательно, трудно ожидать, чтобы этот тип ксерографической структуры обладал характеристиками, необходимыми для высокочувствительных ксерографических пластин. Эта задача была решена путем включения легирующего материала в аморфный слой, чтобы обеспечить большой сдвиг электронов.

Наибольшая чувствительность была достигнута с фотоактивным слоем из кристаллического селена. Эта чувствительность была в 5—10 раз больше чувствительности стандартной селеновой ксерографической пластины. Многослойные пластины обладали также низкими остаточными потенциалами и пренебрежимо малыми эффектами «усталости», а фотоактивные слои не действовали как инжектирующие электроды. Очевидно, при этом образовывался блокирующий контакт с подложкой из стекла. Напомним, что слои кристаллического селена и теллура, расположенные между аморфным селеном и металлической подложкой, не увеличивают скорость темнового спада положительного поверхностного заряда. Это справедливо также для промежуточных слоев мышьяка и германия. В многослойной структуре этого типа могут быть использованы и другие фотоактивные слои. Поэтому может оказаться, что такие разработки представят важное техническое усовершенствование в производстве пластин высокой чувствительности. Краткое описание многослойных структур приведено в работах [225, 270, 278].

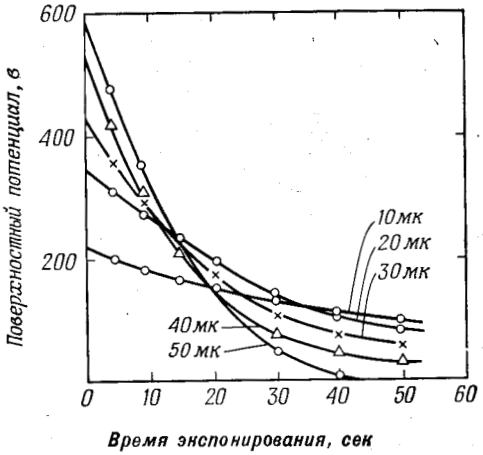
1.2.1.8. КСЕРОРЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В настоящее время в ксерографии аморфный селен используется только как светочувствительный материал. Влияние облучения рентгеновскими лучами на характеристики спада заряда аморфных слоев селена исследовалось несколькими лабораториями в Японии [119, 258, 279, 280]. Кривые спада под действием рентгеновских лучей, полученные в работе [258], оказывается, имеют такую же в основном форму, как и кривые для светового спада. На рис. 133 приведены кривые «рентгеновского спада» для пластины аморфного селена толщиной 50 *мк* при различных дозах облучения, а на рис. 134 показано влияние толщины селена на скорость «рентгеновского спада». Из кривых рис. 134 видно, что чувствительность к рентгеновскому облучению увеличивается с толщиной слоя селена. Это объясняется тем, что коэффициенты поглощения рентгеновских лучей селеном малы по сравнению с коэффициентами поглощения для большей части видимой и ультрафиолетовой области спектра. В работе [280] рассчитаны линейные коэффициенты поглощения в функции энергии рентгеновских лучей, выраженной в *кв*. Эти вычисления основаны на данных,



Р и с. 133. Кривые спада поверхностного потенциала под действием рентгеновских лучей для слоев аморфного селена при различных дозах облучения по данным работы [258].

Напряжение на рентгеновской трубке равно 70 *кв*; слой селена толщиной 50 *мк*.



Р и с. 134. Кривые спада потенциала под действием рентгеновских лучей для слоев аморфного селена при различных толщинах по данным работы [258].

Напряжение на рентгеновской трубке равно 70 *кв*; интенсивность облучения постоянная 2 *р/мин*.

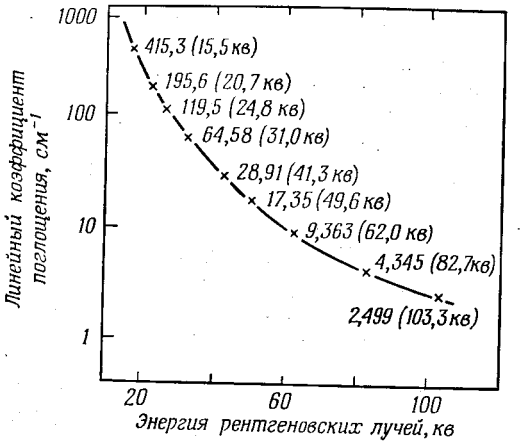


Рис. 135. Линейный коэффициент поглощения селеном рентгеновских лучей [280].

опубликованных в работе [281]. Результаты представлены на рис. 135. Отсюда видно, что коэффициент поглощения уменьшается довольно резко с увеличением энергии рентгеновских лучей. При 70 *кв* коэффициент равен приблизительно 6,85 $см^{-1}$, в то время как для длины волны 400 *ммк* в видимой области

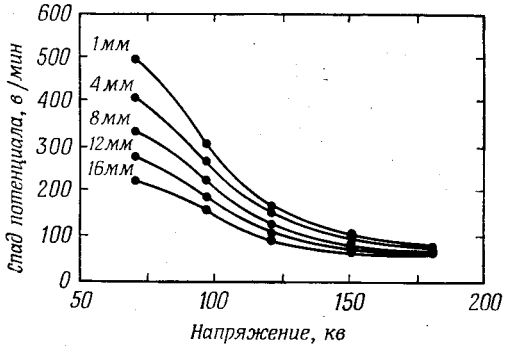


Рис. 136. Спад потенциала как функция напряжения на рентгеновской трубке для одинаковой экспозиции при различных толщинах алюминия [119].

спектра он равен $4 \cdot 10^5$ $см^{-1}$. При 70 *кв* только примерно 3,4% падающего пучка поглощается слоем селена толщиной 50 *мк* и меньше 1% — при толщине 10 *мк*. Так как для мягких рентгенов-

ских лучей поглощение больше, то в этой области энергии облучения чувствительность пластины из селена больше. В работе [112] обнаружено значительное уменьшение чувствительности в интервале 50 *кв* — 22 *Мэв*, а в работе [119] обнаружено заметное уменьшение в скорости спада в диапазоне 70—180 *кв* (рис. 136). Кривые, показанные на рис. 136, представляют собой «спектральную» чувствительность для ограниченного диапазона рентгеновских лучей. Так как рентгеновские лучи поглощаются во всем слое селена, то в слое будут передвигаться как электроны, так и дырки. При положительном поверхностном заряде электроны будут двигаться к поверхности, а дырки — в противоположном направлении. Следовательно, фототок будет зависеть от электронных и дырочных ловушек. Так как кривые спада (см. рис. 133, 134) указывают на очень малый остаточный потенциал, то очевидно, что носители в глубоких ловушках не остаются долго. Довольно резкие эффекты «усталости», встречающиеся в ксерорентгенографии, указывают на устойчивые явления проводимости, обусловленные, вероятно, захватом большинства носителей обоих знаков на мелких ловушках. Нагрев в течение малого времени восстанавливает первоначальные свойства пластины селена.

1.2.2. СЛОИ ИЗ ФОТОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ, ДИСПЕРГИРОВАННЫХ В СВЯЗУЮЩЕМ (ГЕТЕРОГЕННЫЕ СЛОИ)

Разработка фоточувствительных слоев, состоящих из фотопроводящих материалов, диспергированных в смоляном связующем, составляет основу важной ветви ксерографии, которую часто называют «электрофакс» [17]. Ксерографические пластины, использующие такие материалы, исследовались еще задолго до появления способа «электрофакс» [278]. В ранних работах измельченные фотопроводники, такие, как антрацен, селен и различные «фосфоры», диспергировались в пленкообразующей смоле. Полученные суспензии наносили на металлические пластины. Такие пластины могли быть заряжены, экспонированы и проявлены для получения ксерографических изображений.

Разработка процесса «электрофакс» [17] определила новый интерес к этому типу фотопроводящих покрытий. Белая окись цинка в связующей смоле, которой покрывают бумагу, позднее стала объектом исследования во многих лабораториях.

1.2.2.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЛОЕВ

Для приготовления гетерогенных слоев применяются методы, аналогичные методам, используемым для получения красок, лаков, покрытий на бумаге и т. д. Компонентами обычно являются фото-

проводящий материал в измельченном виде и пленкообразователь, состоящий из одной и более смол, растворенных в углеводородном растворителе. Затем они перемешиваются в шаровой мельнице до получения хорошей дисперсии в смоляном связующем. Для улучшения пленкообразования могут быть добавлены размягчители или пластификаторы. После измельчения, если необходимо, добавляется растворитель до получения требуемой вязкости для нанесения покрытия. Покрытие подложки такими смесями осуществляется одним из возможных способов нанесения покрытия, например разбрызгиванием, купанием и т. д. При нанесении покрытия на бумагу можно использовать оборудование, применяемое для получения фотобумаги. После покрытия растворитель испаряется, оставляя на основании твердую пленку. Некоторые смолы требуют дополнительной горячей сушки или вулканизации. Аналогичные слои могут быть получены также из водных суспензий.

Ксерографические свойства этих слоев зависят от соотношения между фотопроводящим материалом и смолой, от размера и формы частиц материала, от степени дисперсности и от толщины пленки. Если рассмотреть комбинации различных типов фотопроводящих материалов и различных типов смол, станет очевидно, что экспериментирование в этой области может быть довольно обширным и комплексным. Не удивительно поэтому, что были исследованы только немногие комбинации материалов.

1.2.2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СЛОЕВ

Сочетание фотопроводящего материала и изолирующей смолы создает фотопроводящий диэлектрик, способный сохранять поверхностный заряд в темноте и разряжаться под действием света. Фоточувствительность состава определяется фотопроводящим материалом. Сама смола способствует только сохранению заряда. Подобные составы обладают несколькими привлекательными с точки зрения экспериментальных исследований свойствами. Во-первых, фотопроводящий материал может иметь небольшое темновое сопротивление. Это обеспечивает широкий выбор материалов. Могут быть использованы фотопроводники с узкой запрещенной зоной и с спектральной чувствительностью в широком диапазоне. Во-вторых, может быть использовано несколько фотопроводников в одном слое путем смешения их как отдельных порошков в смоляном связующем. И, в-третьих, могут быть применены красители-сенсибилизаторы для увеличения чувствительности в отдельных областях спектра.

Количество фотопроводящего материала, которое может быть диспергировано в связующем, обычно ограничивается из следую-

щих соображений. Если отношение количества фотопроводящего материала к количеству смолы велико, то пленка может стать слишком хрупкой и слабой, а темновой спад заряда будет происходить очень быстро. Экспериментально установлено, что доля содержания материала равна ~25—45% от общего объема затвердевшей пленки.

Ксерографические характеристики гетерогенных слоев оцениваются с помощью тех же критериев и методов, которые применяются для аморфного селена и других фотопроводящих изолирующих слоев. К важным характеристикам относятся способность удерживать заряд, скорость темнового и светового спадов, фоточувствительность, спектральная чувствительность, остаточный потенциал и «усталость».

1.2.2.3. ПЛЕНКИ ОКИСИ ЦИНКА В СВЯЗУЮЩЕМ

Фотопроводящие изолирующие пленки окиси цинка, диспергированной в смоляном связующем, исследованы довольно широко. Однако при этом использовались различные по качеству окиси цинка и разные сорта смол. Поэтому методы приготовления и даже техника измерения заметно отличались у разных исследователей и, следовательно, невозможно сделать разумного сравнения доступных данных. Можно только оценить некоторые конкретные величины для ксерографических покрытий из ZnO в связующем.

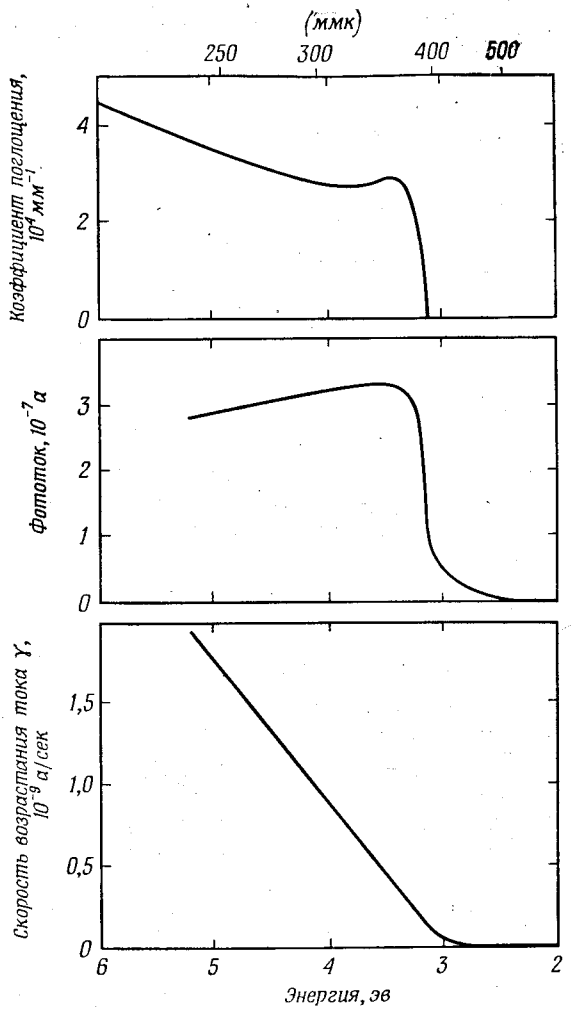
Свойства ZnO. Окись цинка представляет собой полупроводник *n*-типа, причем проводимость *n*-типа приписывается наличию нестехиометрического избытка цинка [282]. Электрические свойства сильно зависят от избытка Zn в объеме материала, а на поверхности — от адсорбированного кислорода. Величина электропроводности кристаллов обычно лежит в интервале 10^{-2}—1 *мо/см* [282]. Увеличение избытка Zn повышает темновую проводимость, а поглощение кислорода на поверхности уменьшает ее. В порошкообразном виде у окиси цинка темновая проводимость много ниже, очевидно, из-за большой площади поверхности, доступной для поглощения кислорода. В очень тонких слоях (0,1 *мк*) установлено [282], что темновая проводимость зависит от степени окисления. При полном окислении она может быть чрезвычайно малой. В работе [283] сообщается, что стехиометрическая окись цинка является изолятором.

Коэффициенты поглощения и фоточувствительность для тонких слоев ZnO, определенные в работе [282], представлены на рис. 137. Образцы были приготовлены путем окисления цинка, нанесенного на кварцевые пластины. Кривая поглощения обрывается при значении энергии ~3,1 *эв*. Это совпадает с величиной,

найденной в [284], для чистых монокристаллов. С уменьшением длины волны коэффициент поглощения сначала быстро увеличивается, достигая максимума при 370 *ммк*, а затем постепенно уменьшается. Фототок достигает максимума примерно при той же длине волны, что и максимум поглощения. Увеличение избытка Zn при нагревании кристаллов ZnO в парах Zn при высокой температуре приводит к появлению полосы поглощения при 3,2 *эв* [283] и сдвигу в длинноволновую область [282]. Можно ожидать, что дополнительный избыток цинка будет сдвигать фоточувствительность в длинноволновую область. Фотопроводимость в окиси цинка определяется, по-видимому, одновременным действием двух независимых механизмов [282, 283]. Первый механизм дает большую фоточувствительность и связан с оптической ионизацией избытка ионов Zn^+, второй механизм представляет собой медленный процесс, связанный с оптическим освобождением кислорода с поверхности, что приводит к увеличению избытка Zn и повышает темновую и световую проводимости. Этот процесс, иногда называемый фотодесорбцией, очевидно, преобладает в случае порошков и пористых спекшихся слоев ZnO. Попытки увеличить собственную проводимость окиси цинка путем легирования оказались безуспешными [278]. В работе [285] изучено влияние легирования порошка ZnO элементами Cu, Li, Ga и Al. Влияние десорбции кислорода оценивалось путем помещения порошков в парафин в вакууме. Все измерения проводились в атмосфере азота, свободной от кислорода. Было обнаружено, что фотопроводимость обычно уменьшается, а темновая проводимость увеличивается с ростом концентрации примеси. Эти примеси, однако, расширяют фоточувствительность в длинноволновую область.

Длины волн края поглощения приблизительно равнялись следующим значениям: ZnO (чистый) — 425 *ммк*; ZnO — Cu — 436 *ммк*; ZnO — Li, ZnO — Ga, ZnO — Al — 600 *ммк*. Добавки Al_2O_3, Cr_2O_3, Ga_2O_3 увеличивали темновую проводимость ZnO [286]. Легирование монокристаллов литием уменьшает проводимость на несколько порядков.

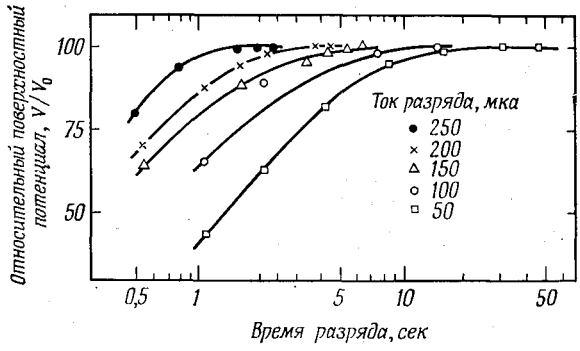
Другие оптические и электрические свойства окиси цинка приведены в работе [289]. Показатели преломления равны 2,01 и 2,03, т. е. ZnO является двулучепреломляющим веществом. Диэлектрическая проницаемость на длине волны 1 *см* равна 8,5. Окись цинка также обладает фотодиэлектрическим эффектом. Согласно [290], в результате освещения возникало увеличение диэлектрической проницаемости ZnO от 7 до 100. Кроме того, ZnO обнаруживает флуоресценцию [282, 284] при возбуждении ультрафиолетом, рентгеновским излучением и электронным пучком.



Р и с. 137. Оптическое поглощение и фототок в тонких слоях ZnO по данным работы [282].

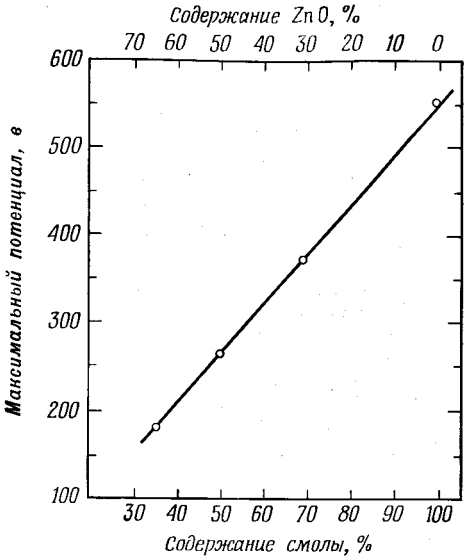
B (интенсивность света) $= 4{,}5 \cdot 10^{17}$ $h\nu/см^2 \cdot сек$; I_0 (темновой ток) $= 2{,}2 \times 10^{-6}$ $а$.

Электрическая зарядка слоев ZnO в связующем. На практике слои ZnO в связующем заряжаются отрицательным поверхностным зарядом. Такие слои в общем случае обладают большой фоточувствительностью и более эффективны, когда они заряжены отрицательно. Характеристики зарядки различных типов покрытий из ZnO в связующем исследовались в нескольких лабораториях

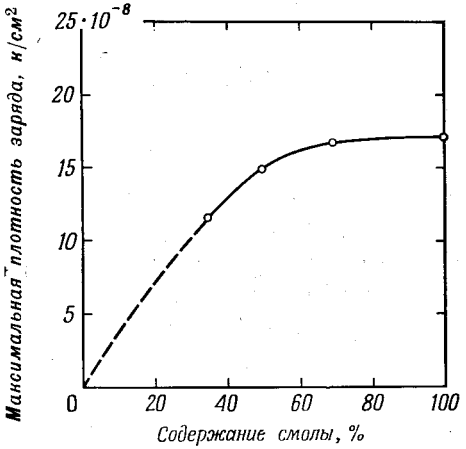


Р и с. 138. Зарядка в коронном разряде слоев ZnO в связующем [292].
Расстояние от проволоки до поверхности 6 *мм*. Потенциал короны: от —4120 до —4700 *в*. Измерялись разрядные токи на свободную металлическую пластину.

разных стран. Формы кривых зарядки для слоев ZnO, получающиеся при зарядке в коронном разряде, аналогичны вычисленным в разд. 1.1.2.1 и представлены на рис. 98. Некоторые типичные кривые, полученные в работах [292], приведены на рис. 138. Здесь было исследовано влияние соотношения между смолой и окисью цинка на характеристики отрицательной зарядки короной слоев (~10 *мк*), нанесенных на бумагу и алюминиевую фольгу. Порошок ZnO (размер частиц от 0,1 до 0,5 *мк*) диспергировался с помощью шаровой мельницы в силиконовой смоле в растворе бензина или толуола. Содержание смолы менялось от 35 до 100% объема всего вещества. При этом обнаружилось, что максимальный потенциал слоев прямо пропорционален содержанию смолы (рис. 139). Эти данные были затем использованы для вычисления плотности поверхностного заряда как функции объемной концентрации смолы в процентах (рис. 140). Плотность заряда определялась из выражения (1) при использовании формулы Брауна для диэлектрической проницаемости твердых смесей [293]. Следует отметить, что плотность поверхностного заряда не является линейной функцией объема смолы и не обнаруживает большого разброса величин, который характерен для максимального потенциала. Время, необходимое для достижения максимума, увели-



Р и с. 139. Поверхностный потенциал как функция отношения окиси цинка и смолы для слоев ZnO с силиконовой смолой [292].



Р и с. 140. Максимальная плотность поверхностного заряда как функция содержания смолы в слоях ZnO с силиконовой смолой. Вычислено по данным работы [291]. Толщина слоев равна 10 *мк*.

чивается с ростом сопротивления слоев [291] в соответствии с теоретическими вычислениями (см. разд. 1.1.2.1, а также рис. 98). В работе [294] изучены характеристики зарядки короной различных покрытий из ZnO в связующем на бумаге. Была отмечена задержка между моментами включения и начала образования поверхностного заряда. Эта задержка объясняется влиянием бумаги. Обнаружено также, что силиконовые смолы могут заряжаться до более высокого потенциала, чем смолы полиэфирного типа. В работе [295] открыто аномальное увеличение коронного тока при отрицательной зарядке короной слоев ZnO с силиконовой смолой. Здесь были применены образцы ZnO в связующем, нанесенные на алюминиевые пластины. Если измерить коронный ток к свободной металлической пластине и к пластине с образцом ZnO в связующем, то оказывается, что коронный ток во втором случае в 18 раз больше. При освещении слоев коронный ток уменьшается до той же величины, что и для свободной металлической пластины. Увеличение тока было наибольшим для слоев толщиной 10 *мк*, причем для слоев тоньше и толще 10 *мк* коронный ток был меньше. Было замечено, что если число видимых точек разряда на коронирующих проволоках увеличивается, то также увеличивается и число точек разряда на поверхности ZnO. Для полиэтиленовых пленок и слоев MgO в связующем при зарядке короной это явление не наблюдается. Наоборот, с этими материалами коронный ток значительно уменьшается по сравнению с током, который достигается в случае свободной металлической поверхности. Аномальное увеличение коронного тока к слоям было открыто в работе [296], где проделано довольно обширное исследование этого эффекта. Была предложена гипотеза о том, что отрицательная корона создает на поверхности слоя ZnO в связующем малые области избытка заряда и что большие локальные градиенты потенциала около этих изолированных зарядов приводят к ионизации, увеличивающей коронный ток. Вначале коронный ток резко возрастает до величины, достигаемой в случае, когда в качестве анода применяется свободная металлическая поверхность или слой, сильно поглощающий свет, затем наступает короткая пауза, после которой он вновь резко увеличивается до уровня, соответствующего темновому току. Это поведение тока показано на рис. 141. Эффект не наблюдается при положительной коронной зарядке. В экспериментах применялась синтетическая смола «плиолит» (сополимер полистирол — бутадиен) с отношением материала к смоле, равным 4:1. Имея в виду относительные плотности материала и смолы (ZnO $\sim$5,5, плиолит $\sim$1,05), это весовое отношение приблизительно эквивалентно объемному отношению 4:5. Аномальное поведение пленок ZnO в связующем под действием отрицательной зарядки от короны дает возможность предполагать, что зарядка — это не просто

оседание ионов, образованных в результате коронного разряда. Другой неожиданный результат состоит в том, что измеренное темновое сопротивление на несколько порядков может быть

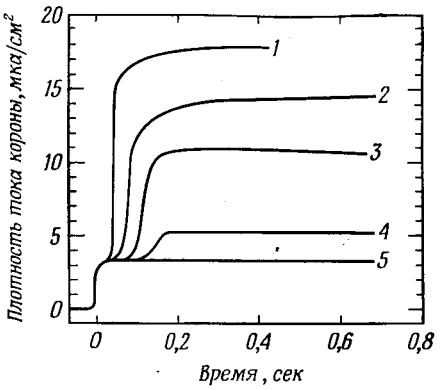


Рис. 141. Зависимость плотности тока коронного разряда от времени зарядки для окиси цинка в связующем при постоянном потенциале короны [296].

Освещение, равное $2 \cdot 10^{13}$ *фотон/см²*, действовало до зарядки в течение времени соответственно для кривых: *1* — пластина не освещалась; *2*—10 *сек*; *3*—40 *сек*; *4*—160 *сек*; *5* — зарядка происходила на свету.

меньше обычного сопротивления, необходимого для удерживания поверхностного заряда, достаточного для образования изображения [296].

В этой работе слои с удельными темновыми сопротивлениями порядка 10^{11}— 10^{12} были заряжены отрицательно в коронном разряде до относительно высоких поверхностных потенциалов. Высокое сопротивление при отрицательной зарядке связано, очевидно, с блокирующими контактами, образующимися на поверхностях раздела окиси цинка и смолы с помощью отрицательных ионов [297].

Эксперименты, описанные в [297], показали, что с помощью короны в атмосфере кислорода или воздуха можно создать большой поверхностный отрицательный заряд на слоях ZnO в связующем, а в атмосфере азота или гелия получающийся поверхностный заряд очень мал. Отсюда следует, что наличие ионов кислорода играет существенную роль при отрицательной зарядке слоев из окиси цинка.

В работе [298] обнаружено, что для отрицательной зарядки потенциал слоев ZnO в связующем с плиолитом постоянен в широком интервале значений потенциалов короны от —7 до —20 *кв*. Этого можно ожидать, если ток утечки через слой

резко возрастает с величиной приложенного поля. Такой тип поведения характерен для аморфного селена (см. рис. 96). Результаты работы [298] показаны на рис. 142, где данные для слоев ZnO в связующем сравниваются с данными для целлюлозно-ацетатной пленки, обладающей линейной зависимостью начального потенциала от потенциала короны. Здесь обнаружено также, что

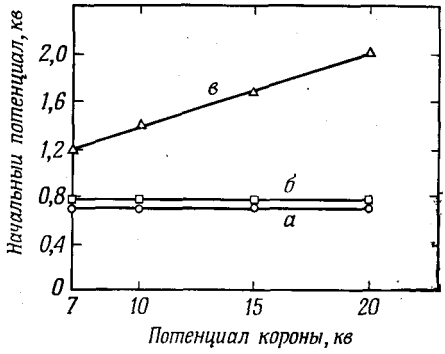


Рис. 142. Зависимость начального потенциала от потенциала короны [298].

а — несенсибилизированный слой ZnO в связующем; *б* — ZnO, сенсибилизированный «бенгальским розовым»; *в* — слой ацетатной целлюлозы.

потенциал слоев ZnO в связующем возрастает с увеличением толщины слоя для данного потенциала короны, в то время как для изолирующей пленки, такой, как целлюлозно-ацетатная или майлар, поверхностный потенциал не зависит от толщины. Этот эффект объясняется образованием положительного пространственного заряда в объеме слоя окиси цинка в связующем (рис. 143).

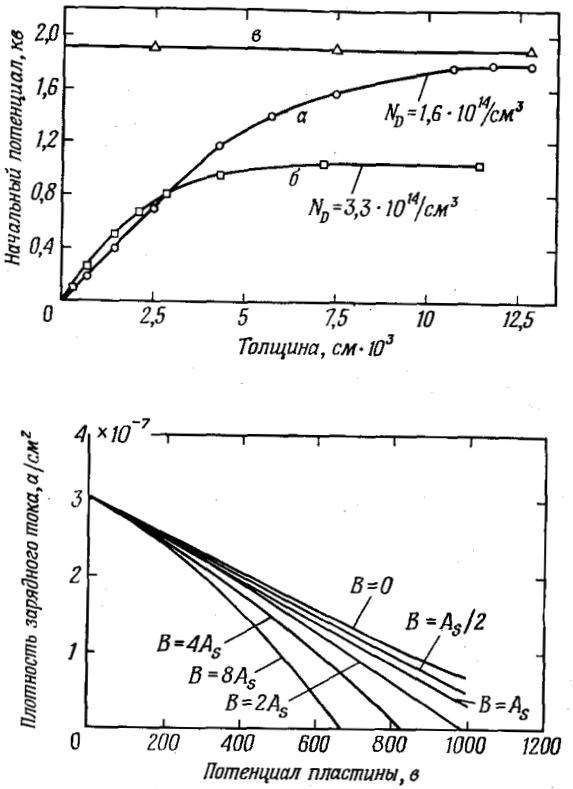
Влияние толщины на максимальный поверхностный потенциал было обнаружено также в работе [299]. Сплошные кривые на рис. 143 вычислены из соотношения

$$V_s = \frac{4\pi\sigma_s t}{k}\left(1 - \frac{N_D t}{2\sigma_s}\right), \qquad (52a)$$

где V_s — поверхностный потенциал; σ_s — плотность поверхностного заряда; t — толщина слоя; N_D — объемная плотность положительного пространственного заряда и k — диэлектрическая проницаемость слоя.

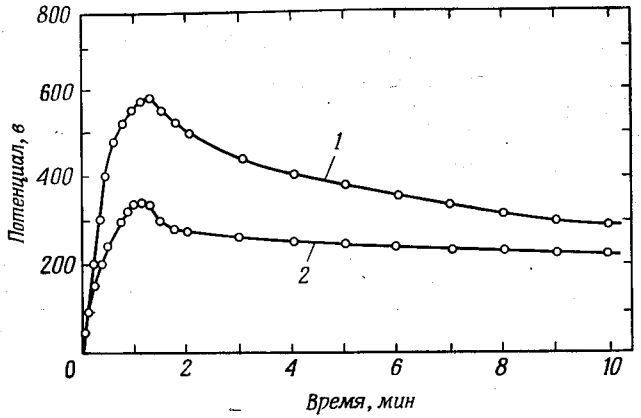
Аналогичные выражения, связывающие поверхностный потенциал с пространственным зарядом, были получены в работах 300, 301]. Из анализа выражения (52) следует, что при наличии

объемного пространственного заряда плотность поверхностного заряда не является теперь линейной функцией поверхностного потенциала, как в идеальном случае, рассмотренном в разд. 1.1.1.2 [выражение (1)].

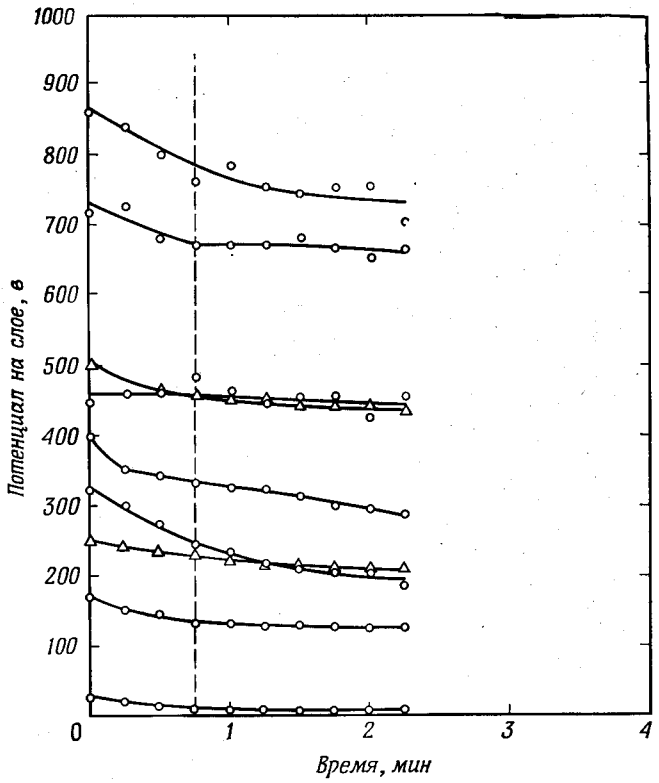


Р и с. 143. Зависимость начального потенциала от толщины слоя [298]. *а* — несенсибилизированный слой ZnO; *б* — сенсибилизированный слой *в* — слой ацетатной целлюлозы. Сплошные кривые получены из теоретических выражений для значений N_D, указанных на рисунке.

Темновой и световой спады заряженных слоев ZnO в связующем. Характеристики темнового и светового спадов слоев ZnO в связующем могут зависеть от фотопроводящего материала, связующего, применяемых красителей-сенсибилизаторов, времени измельчения и т. д. Темновой спад отрицательного заряда обычно характеризуется довольно быстрым разрядом, возникающим непосредственно после зарядки, за которым следует медленный уста-



Р и с. 144. Кривые зарядки и темнового спада для двух сортов бумаги, покрытых ZnO в связующем [302].
1 — бумага *А*; *2* — бумага *Б*.



Р и с. 145. Кривые темнового спада слоев ZnO в связующем для различных порошков ZnO. Зарядка при напряжении короны 6 *кв* [303].

новившийся спад (рис. 144). Кривые темнового спада для пленок из различных сортов окиси цинка в связующем представлены на рис. 145 [303]. Использованное вяжущее вещество не известно. Однако известно, что все слои были изготовлены одинаковым способом из одной и той же смолы и толщина слоя была приблизительно одинаковой (~12,5 *мк*) для всех образцов. Хотя все девять кривых обладают быстрым темновым спадом, заметно отличие в формах кривых, обусловленное использованием различных фотопроводящих материалов. Более существенным, однако, является большой разброс значений потенциалов от образца к образцу. Влияние вяжущего свойства смолы на темновой спад определяется главным образом только собственным электрическим сопротивлением смолы, так как химической реакции между ZnO и смолой не происходит. Другими словами, чем выше сопротивление смолы, тем медленнее темновой спад. Отношение количества смолы к количеству окиси цинка также влияет на скорость темнового спада. Это следует из данных работы [292], где обнаружено, что кривые темнового и светового спадов слоев силиконовой смолы с окисью цинка приближенно подчиняются эмпирическому соотношению

$$V = V_0 e^{-\alpha \sqrt{t}}, \qquad (53)$$

где V_0 — начальный потенциал; V — поверхностный потенциал в момент времени t; α — постоянная, характеризующая материал слоя. При этом эффективная проводимость связана эмпирически с α выражением $\sigma = \alpha C/2\sqrt{t}$, где C — емкость на 1 $см^2$ слоя. (Очевидно, это уравнение не может быть экстраполировано к значению при $t = 0$ и, следовательно, применимо только для последующих стадий спада заряда.) В работе [292] величина α определена как функция количества смолы в слоях с окисью цинка (рис. 146).

Следует отметить, что для темнового спада изменение α в зависимости от концентрации смолы относительно мало. Кривая значений этой константы имеет довольно широкий пик при содержании смолы 35—40%. Приближенно это соответствует уменьшению сопротивления слоя (рис. 147).

Из данных для α можно заключить, что темновой спад вначале не зависит от количественного соотношения между силиконовой смолой и окисью цинка. Объяснение этого явления, предложенное в работе [292], состоит в следующем. Оказывается, что 40% смолы как раз достаточно для заполнения пространства между частицами окиси цинка, а при меньшем ее содержании в пространстве между частицами находится воздух. При содержании выше 40% сопротивление снова увеличивается за счет собственного высокого сопротивления смолы. Аналогичные результаты для слоев силиконовой

смолы с окисью цинка приведены в работе [304]. В ней также обнаружено, что эмпирическое соотношение такого же вида, как соотношение (53), может быть применено для описания кривых темнового и светового спадов. При этом постоянная, соответствующая α, обнаруживает пик для темнового спада при содержании смолы, равном 50%; причем величина этой постоянной с толщиной слоя в интервале от 20 до 120 *мк* существенно не меняется,

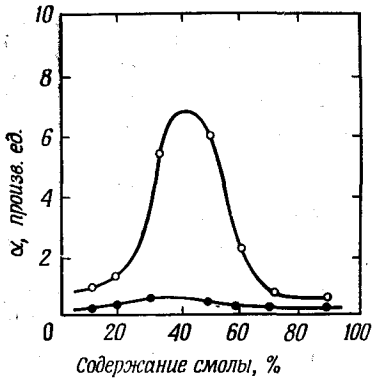


Рис. 146. Изменение постоянной α в зависимости от количества силиконовой смолы в слоях ZnO [292].

—●—●— в темноте; —o—o— при освещении (длина волны 365 *ммк*).

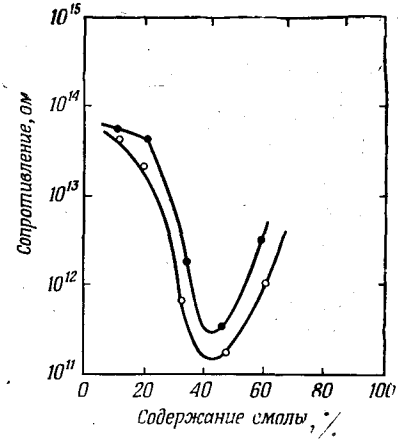


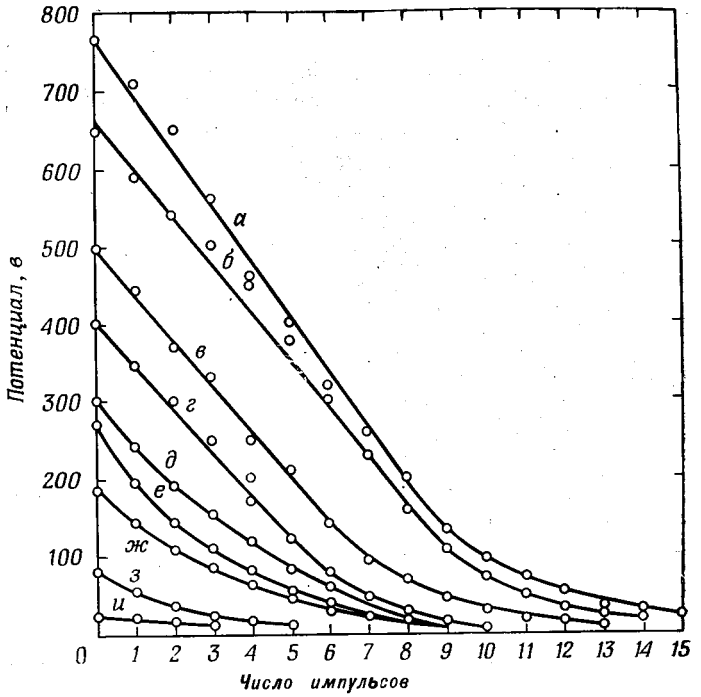
Рис. 147. Зависимость сопротивления от процентного содержания силиконовой смолы в слоях ZnO [292].

—●— в темноте; —o— при освещении (длина волны 405 *ммк*).

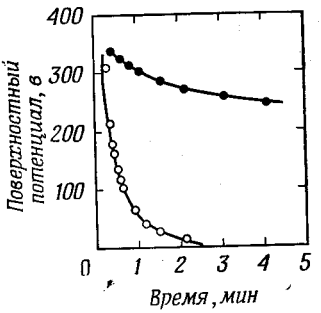
однако она увеличивается с повышением начального потенциала. В работе [299] установлено, что темновой спад протекает медленнее с увеличением толщины слоя.

Очень мало сведений, касающихся темнового спада при положительной зарядке. По-видимому, слои, предназначенные обеспечивать оптимальные характеристики при отрицательной зарядке, обычно не сохраняют достаточного положительного заряда для надежных измерений. Сообщалось, что слои с 41%-ным содержанием ZnO в смоле могут быть заряжены положительно, в то время как слои с 46%-ным и выше содержанием ZnO положительно не заряжаются [304].

Кривые светового спада (зависимость потенциала от времени) для слоев ZnO в связующем опубликованы многими исследователями. Ряд характерных кривых, полученных в разных условиях, представлен на рис. 148—151. В отдельных случаях наблю-



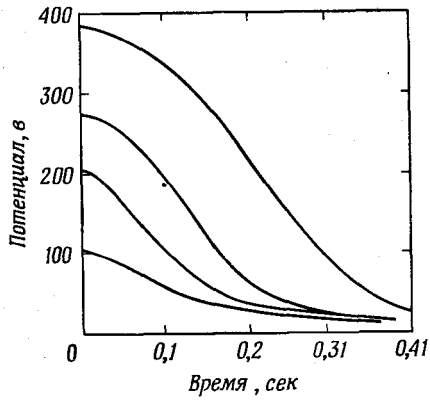
Р и с. 148. Характеристики светового разряда слоев «электрофакс» [305]. Толщина слоя $14{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см*; каждые 5 *сек* импульс света от вольфрамовой лампы несет на поверхность слоя $1{,}06 \cdot 10^{11}$ *фотон/см*². *а* — *и* — порошки ZnO разных сортов.



Р и с. 149. Кривые спада для слоя ZnO с силиконовой смолой при интенсивности освещения 0,2 *мквт/см*² [292].

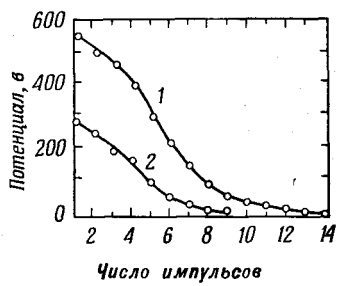
—●— в темноте; —○— при освещении (длина волны 435 *ммк*).

дается вполне заметная разница в формах этих кривых. В работе [203] проделаны измерения кривых спада для нескольких сортов бумаги «электрофакс», освещаемых лампой накаливания. Обнару-



Р и с. 150. Экспериментальные кривые разряда электрофотографических слоев окиси цинка при освещенности 600 *лк* [306].

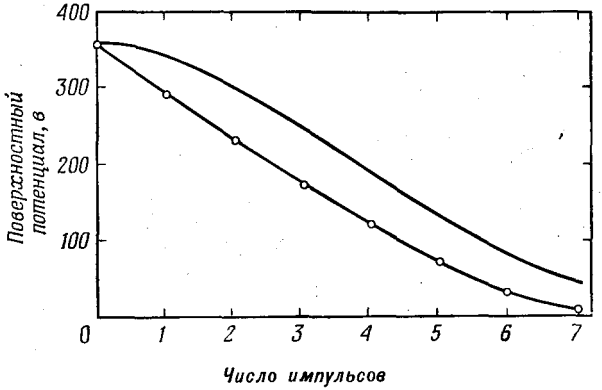
жено, что S-образная форма кривой спада получается при измерении поверхностного потенциала в процессе непрерывного освещения; почти линейный спад характерен для чередования измерения и освещения (рис. 152). В работе [307] проведено всестороннее



Р и с. 151. Кривые светового спада для двух сортов бумаги «электрофакс» [66].

изучение факторов, влияющих на форму кривых светового спада для слоев ZnO в связующем. Вид кривых светового спада зависит в некоторой степени от сорта порошка окиси цинка и смолы, а также от способа изготовления слоев. Однако такие факторы, как интенсивность и длина волны падающего света, максимальный потенциал, задержка темнового спада в начальный период, сенсибилизация красителями, определяют в значительной мере форму

кривых светового спада. Рис. 153 иллюстрирует влияние интенсивности и длины волны света. Начальная скорость спада заряда под действием освещения зависит от скорости появления фототока. Для аморфного селена при освещении слоя фототок возрастает очень быстро (см. рис. 103), а для слоев ZnO в связующем, наоборот, очень медленно. При резком возрастании медленный начальный спад заряда обычно незаметен на ходе кривой зависимости поверхностного потенциала от времени. При медленном возрастании



Р и с. 152. Сравнение кривых светового спада для слоев ZnO при непрерывном и чередующемся освещении [203].

Источник света — вольфрамовая лампа (2900° К). — непрерывное освещение (50 *лк*); —●— освещение через каждые 30 *сек* импульсами 50 *лк·сек*.

фототока будет получаться характерная S-образная кривая. При измерениях скорости спада заряда слоев ZnO в связующем при различных условиях зарядки и экспонирования было установлено, что скорость светового спада пропорциональна эффективному фототоку через слой. Рассмотренные выше результаты можно суммировать следующим образом:

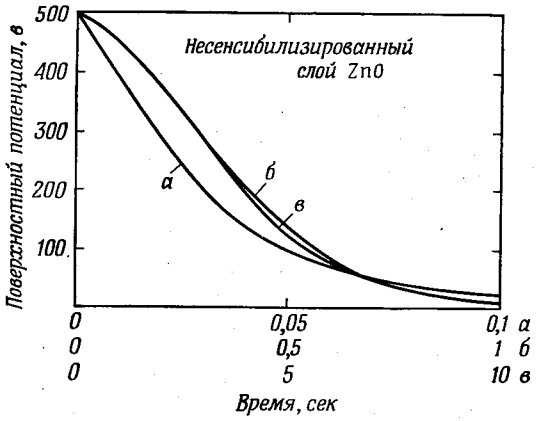
1) время возрастания разрядного тока уменьшается, если интенсивность света увеличивается;

2) время возрастания тока увеличивается с повышением начального потенциала;

3) время возрастания тока уменьшается, если слой освещается светом длиной волны 365 *ммк* (по сравнению с длинноволновым освещением);

4) предшествующее освещение значительно уменьшает время возрастания разрядного тока;

5) время возрастания для несенсибилизированных слоев ZnO в связующем несколько меньше, чем для слоев, сенсибилизированных родамином В.



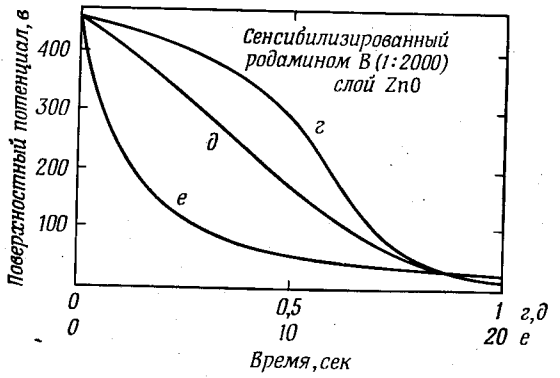
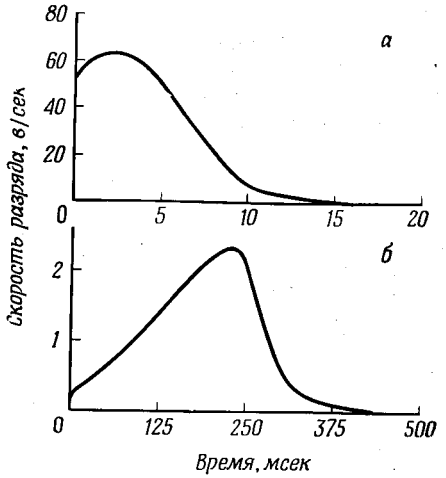
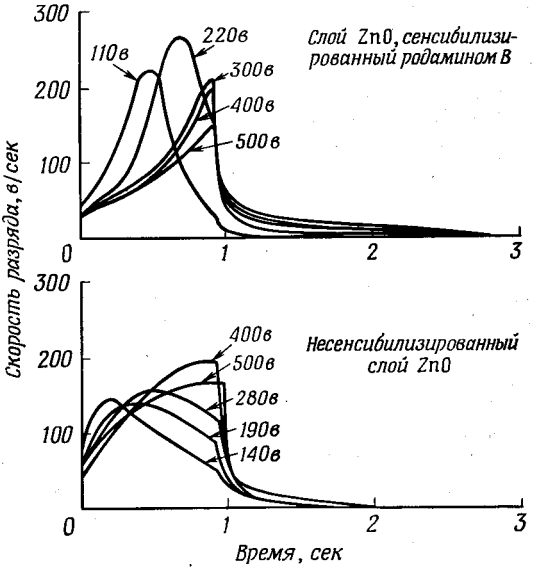


Рис. 153. Кривые светового спада для слоев ZnO, иллюстрирующие влияние интенсивности и длины волны света [307].

а — ксеноновая лампа без фильтра; *б*, *в* — ксеноновая лампа с нейтральным светофильтром; *г* — ксеноновая лампа с широкополосным фильтром; *д* — ксеноновая лампа с интерференционным фильтром (λ_{max} = 365 *ммк*); *е* — поливинилкарбазол.

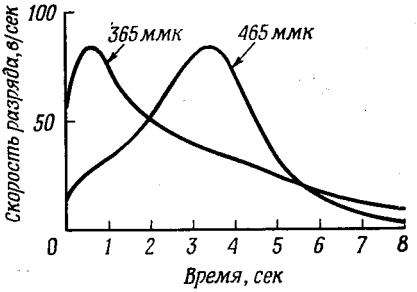


Р и с. 154. Влияние интенсивности света на время возрастания фототока для слоев ZnO в связующем на бумаге [307].
Ксеноновая лампа без фильтра с относительной интенсивностью ~100 (а) и ~4 (б).



Р и с. 155. Влияние начального потенциала на время возрастания фототока в слоях ZnO в связующем [307].

На рис. 154—157 показаны результаты экспериментов, анализ которых дает объяснение различных видов кривых спада, полученных разными авторами. В случае применения метода чередования измерений, или импульсного метода, слой «запоминает» факт предыдущего освещения перед каждым измерением его поверхностного потенциала. Это уменьшает время возрастания тока для каждого последующего освещения после первого, и результирующие кривые спада не имеют S-образной формы.



Р и с. 156. Влияние длины волны падающего света (интенсивность различна для двух длин волн) на время возрастания фототока в слое ZnO, сенсибилизированном родамином В (1 : 2000) [307].

Такая форма кривой может также не обнаружиться при непрерывном освещении светом большой интенсивности или светом длиной волны в области основного поглощения ZnO.

Медленный начальный спад, определяющий S-образную форму кривых, объясняется явлением захвата. Слой, находящийся в темноте, содержит ловушки, которые захватывают свободные электроны, образованные при освещении. При этом начальный спад является периодом заполнения ловушек. По мере заполнения ловушек темновой ток увеличивается и кривая спада становится круче. Однако приблизительно в конце спада электрическое поле в слое уменьшается и рекомбинация становится преобладающей. Это вновь уменьшает скорость спада и объясняет конечное понижение кривой.

Публикаций, содержащих характеристики светового спада положительно заряженных слоев ZnO в связующем, пока очень мало, так как такие слои, как правило, не сохраняют положительного заряда. В работе [203] получены кривые спада для бумаги «электрофакс» при положительной зарядке. Полученные кривые спада представлены на рис. 158. Фоточувствительность при положительной зарядке много меньше, чем при отрицательной.

Спектральная чувствительность. Из опубликованных данных известно, что максимум чувствительности несенсибилизирован-

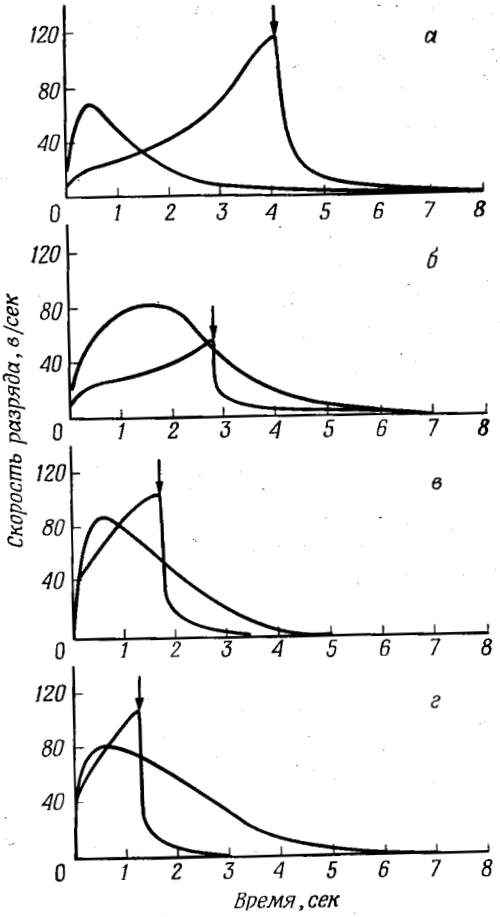
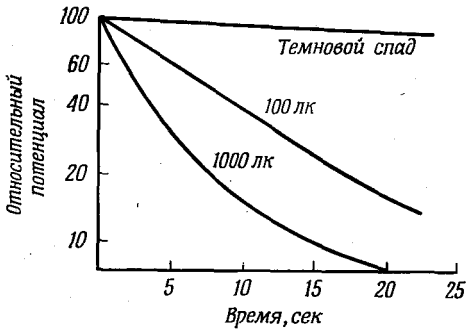


Рис. 157. Влияние предшествующего освещения и периодов темноты на время возрастания фототока в слоях ZnO [307].

Период темноты равен времени между первым и вторым освещением. Стрелки указывают момент предыдущего освещения. *а* — слой окиси цинка, сенсибилизированный родамином В (1:2000), выдержка в темноте равна 6 *сек*; *б* — слой окиси цинка, сенсибилизированный родамином В (1:2000), выдержка в темноте 60 *сек*; *в* — несенсибилизированный слой окиси цинка, выдержка в темноте 7 *сек*; *г* — несенсибилизированный слой окиси цинка, выдержка в темноте 60 *сек*.

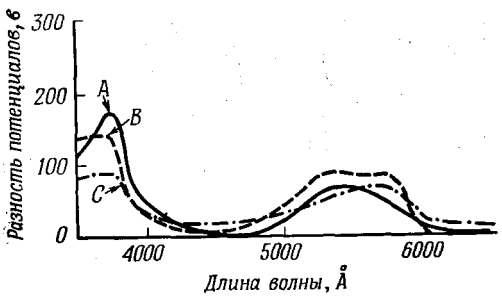
ных слоев ZnO в связующем лежит в спектральной области от 370 до 390 *ммк* [17, 204, 292, 301]. Это соответствует энергии запрещенной зоны ZnO, равной 3,2 *эв*.

Введение красителей-сенсибилизаторов в слои окиси цинка приводит к увеличению фоточувствительности в длинноволновой



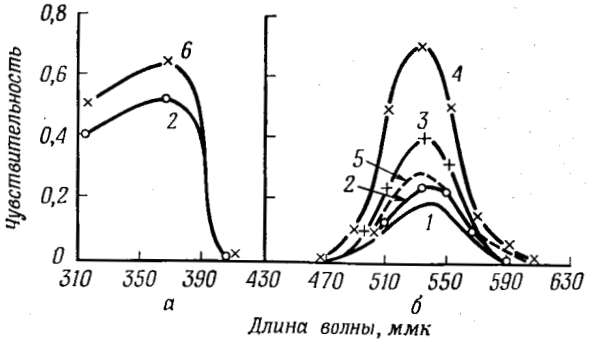
Р и с. 158. Характеристики спада потенциала положительно заряженной бумаги «электрофакс» [203].

области, соответствующей полосе оптического поглощения красителя. Некоторые из экспериментальных красителей, примененных в работе [17], упоминались в части I данной книги и представлены на рис. 16. По-видимому, молекулы красителя адсор-



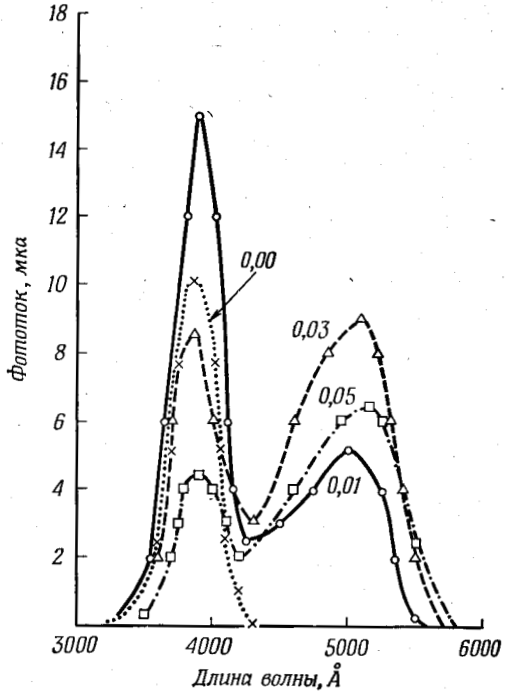
Р и с. 159. Спектральная чувствительность бумаги «электрофакс», сенсибилизированной «бенгальским розовым» [17].
Содержание красителя в граммах на 120 *г* ZnO: 0,02 (*A*); 0,04 (*B*); 0,08 (*C*).

бируются на поверхности частиц ZnO таким образом, что фотоэлектроны, образованные в молекулах красителя, переносятся в зону проводимости ZnO. Кривые спектральной чувствительности пленок ZnO, сенсибилизированных красителем, представлены на рис. 159 и 160. Отметим, что фоточувствительность при добавлении



Р и с. 160. Спектральная чувствительность слоев ZnO, сенсибилизированных эозином [204].

Концентрация красителя в граммах на 1 *г* ZnO: *1*—$2{,}5 \cdot 10^{-4}$; *2*—$6{,}5 \cdot 10^{-}$; *3*—$1{,}5 \cdot 10^{-3}$; *4*—$4{,}0 \cdot 10^{-3}$; *5* — поверхностно-сенсибилизированный слой; *6* — несенсибилизированный слой ZnO. *а* — интенсивность света $I = 1$ *эрг/сек·см²*; *б* — $I = 20$ *эрг/сек·см²*.

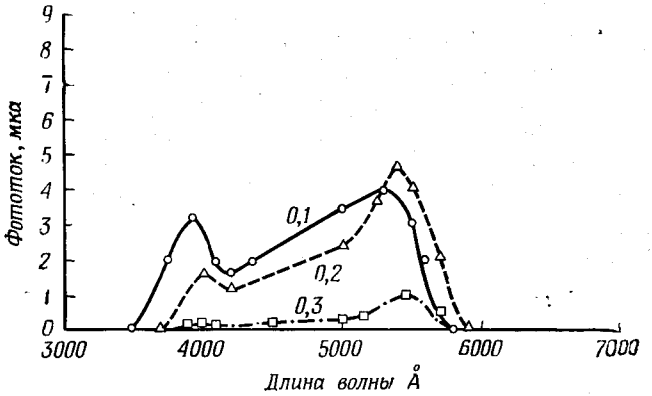


Р и с. 161. Фоточувствительность слоев «электрофакс», сенсибилизированных красителем с концентрациями 0,01, 0,03 и 0,05 *г* флуоресцеина на 120 *г* ZnO (из данных работы [308]).

Кривые получены без поправки на спектр источника.

красителя увеличивается, а собственная чувствительность окиси цинка уменьшается. В работе [308] измерена фотопроводимость слоев, сенсибилизированных следующими красителями: «бенгальским розовым» (кислотный ксантеновый краситель), флуоресцеином, бриллиантовой зеленью, триофлавином и оранжевым акридином в разных концентрациях. При этом наблюдались следующие интересные явления:

1. При очень низких концентрациях красителя фототок при длине волны света 385 *ммк* сначала увеличивается, а потом уменьшается с ростом концентрации красителя.



Р и с. 162. Фоточувствительность слоев «электрофакс», сенсибилизированных красителем с концентрацией 0,1, 0,2 и 0,3 *г* флуоресцеина на 120 *г* ZnO [308].

Кривые получены без поправки на спектр источника.

2. Длинноволновый пик фототока с ростом концентрации красителя сначала увеличивается до максимума, а затем уменьшается. (Эти закономерности видны на рис. 161 и 162 для слоев, сенсибилизированных флуоресцеином.)

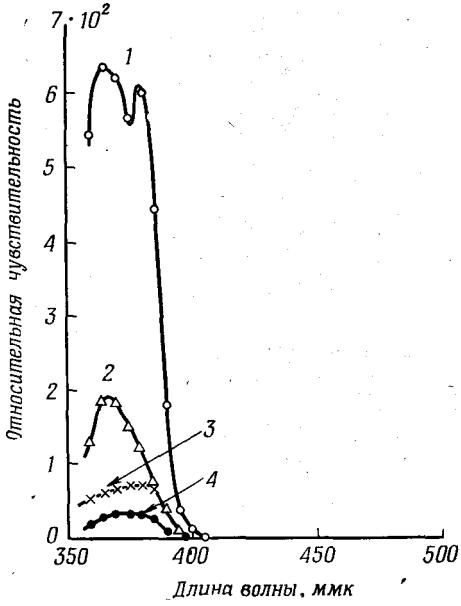
3. Экспонирование производит необратимые изменения спектральных характеристик сенсибилизированных слоев. Эти изменения можно рассматривать как результат понижения «эффективной» концентрации красителя.

4. По мере увеличения концентрации красителя пик фототока сдвигается в красную область спектра.

5. Спектральная чувствительность окрашенных слоев зависит от предшествующих экспонирований.

6. Красители, используемые для сенсибилизации окиси цинка, не обязательно должны быть высокой чистоты.

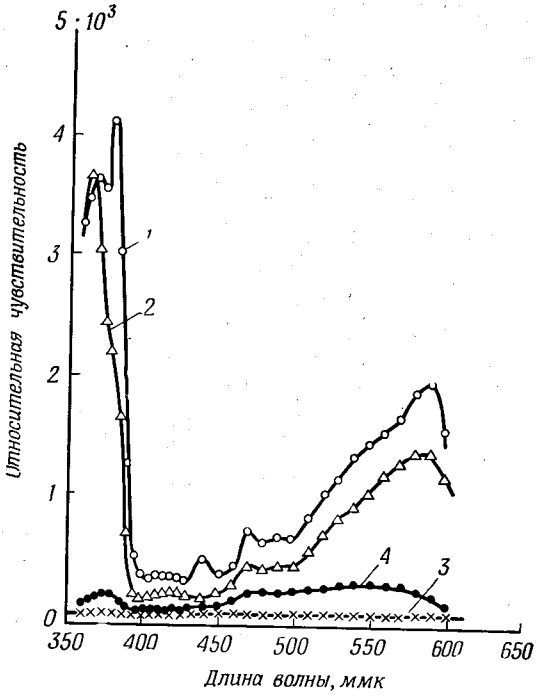
В работе [308] удалось получить слои «электрофакс» с панхроматической чувствительностью путем сочетания нескольких красителей, имеющих разные максимумы поглощения. В работе [309] обнаружено, что адсорбция некоторых молекул, обладающих «электронным сродством», таких, как иод, ангидрид фталевой кислоты и *p*-хлоранил, на частицах ZnO приводит к заметному



Р и с. 163. Спектральное распределение фотопроводимости соединения ZnO — O_2 плюс адсорбированные молекулы [309].

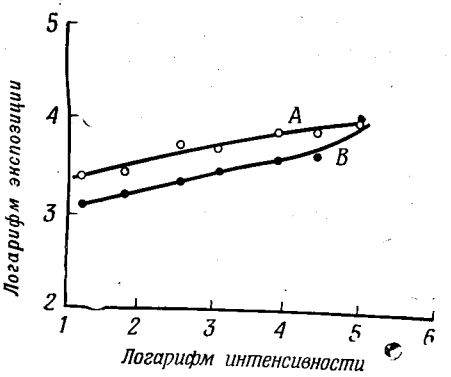
1 — ангидрид фталевой кислоты; *2* — иод; *3* — *p*-хлоранил; *4* — основное соединение ZnO — O_2. Интенсивность света $4 \cdot 10^{-4}$ *вт/см²*. Адсорбированных молекул 0,03 мол.%.

увеличению фоточувствительности в области собственной спектральной чувствительности окиси цинка. Более того, когда ZnO, сенсибилизированный такими веществами, обрабатывался красителем «бенгальский розовый», наблюдалось дополнительное увеличение фоточувствительности слоя как в собственной области, так и в области, соответствующей красителю. Результаты этих работ представлены на рис. 163 и 164. В работе [310] эксперименты проводились с двухслойными покрытиями ZnO в связующем на бумаге. Было обнаружено, что сенсибилизация верхних слоев увеличивает чувствительность, а сенсибилизация нижних слоев не увеличивает. Кроме того, найдено также, что чувствительность слоев ZnO в связующем уменьшается с увеличением времени



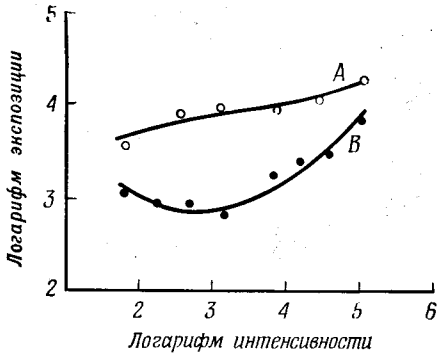
Р и с. 164. Спектральное распределение фотопроводимости для слоев $ZnO—O_2$, сенсибилизированных «бенгальским розовым» [309].

Адсорбированных молекул 0,03 мол.%; красителя — 0,002 мол.%. *1* — ангидрид фталевой кислоты + «бенгальский розовый»; *2* — иод + «бенгальский розовый»; *3* — *p*-хлоранил + «бенгальский розовый»; *4* — основное соединение $ZnO — O_2$ + + «бенгальский розовый». Интенсивность света равна $4 \cdot 10^{-4}$ *вт/см²*.



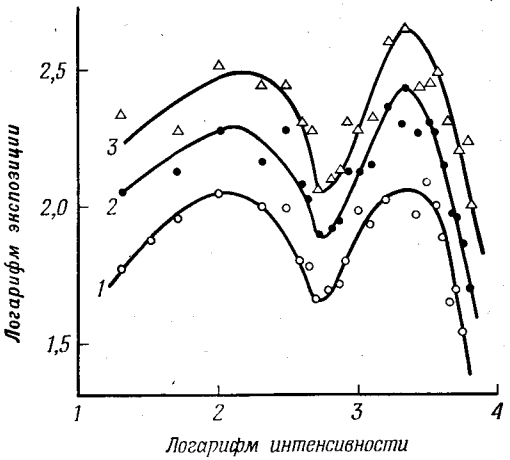
Р и с. 165. Кривые закона взаимозаместимости для ZnO в связующем на бумаге [226].

A — освещение через ультрафиолетовый фильтр; *B* — освещение вольфрамовой лампой без фильтра.



Р и с. 166. Кривые закона взаимозаместимости для ZnO, сенсибилизированного «бенгальским розовым» [226].

А — освещение через ультрафиолетовый фильтр; *В* — освещение через желтый фильтр.



Р и с. 167. Кривые нарушения закона взаимозаместимости для отрицательно заряженной электрофотографической бумаги с несенсибилизированным слоем окиси цинка [227].

1 — $V_0 = 250$ *в*, $\Delta V = 50$ *в*; *2* — $V_0 = 250$ *в*, $\Delta V = 100$ *в*; *3* — $V_0 = 250$ *в*, $\Delta V = 150$ *в*.

измельчения смеси [311]. Это же наблюдалось и в работе [302], где установлено, что измельчение в шаровой мельнице уменьшает чувствительность в 20—30 раз по сравнению с неизмельченным покрытием.

Взаимозаместимость. Причины отклонения от закона взаимозаместимости в слоях окиси цинка в связующем описаны в работах [226, 227, 312]. Некоторые результаты показаны на рис. 165—168. Данные на рис. 165 и 166 указывают на постепенное уменьшение

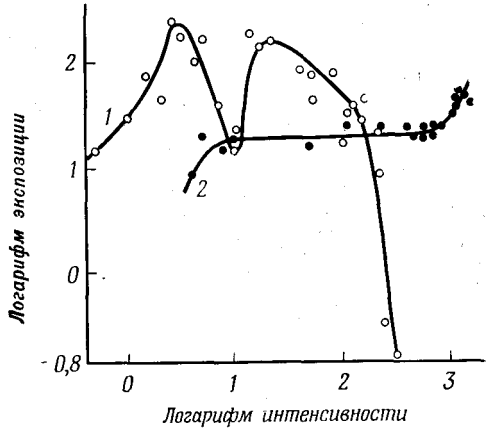


Рис. 168. Кривые нарушения взаимозаместимости для электрофотографической бумаги со слоем окиси цинка, сенсибилизированные эозином [227]. $V_0 = 250$ *в*, $\Delta V = 50$ *в*; *1* — отрицательно заряженные слои; *2* — положительно заряженные слои.

чувствительности с ростом интенсивности света для сенсибилизированного и несенсибилизированного слоев окиси цинка. Результаты работы [227] совершенно другого характера и обнаруживают необычный тип поведения кривой взаимозаместимости. Трудно анализировать результаты этих двух независимых экспериментов, так как сведения, помещенные в работе [226], не позволяют сравнивать источники света и единицы интенсивности. Различие в методах измерения и выбора критерия для оценки чувствительности может объяснить очевидное расхождение данных этих двух работ.

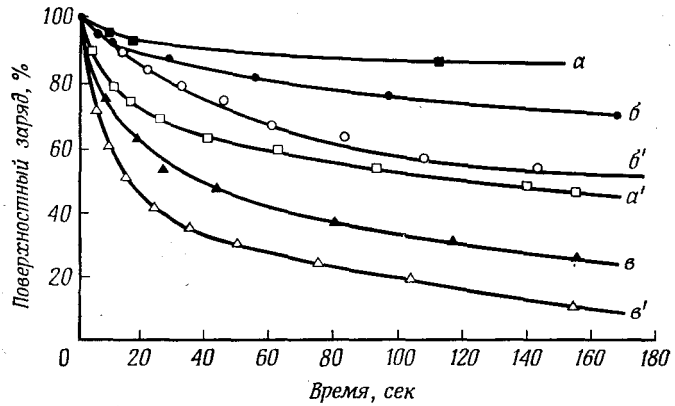
1.2.2.4. ДРУГИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Хотя окись цинка как фотопроводящий материал занимает первое место в ксерографических слоях в связующем, были исследованы и другие фотопроводящие материалы. К ним относятся сульфиды цинка и кадмия, которые изучены довольно подробно, а также селен, сульфид ртути и двуокись титана.

Сульфиды цинка и кадмия. Фотопроводящие свойства ZnS и CdS в настоящее время хорошо изучены (см., например, [289]). Ксерографические пластины из порошков сульфида цинка и кадмия в связующем описаны в работе [313]. Фотопроводящие материалы в виде промышленных порошков фосфóров диспергировались в силиконовой смоле, а слои наносились на алюминиевые пластины. Такие слои могли заряжаться либо отрицательной, либо положительной короной. Темновые спады происходили относительно медленно. Световые спады при освещении лампой накаливания свидетельствовали о меньшей чувствительности, чем чувствительность слоев селена. Однако для одной партии порошков их чувствительность была почти равной чувствительности селена. Кривые светового спада имели начальный крутой участок, переходящий в пологую кривую, соответствующую остаточному потенциалу, который составлял 15—20% начального потенциала. Слои обнаруживали «усталость». После освещения и перезарядки скорость темнового спада увеличивалась. Однако при интенсивной инфракрасной подсветке или зарядке обратной полярностью скорость темнового спада слоев восстанавливалась до первоначальной величины. В зависимости от приобретенного поверхностного заряда в характеристиках темнового и светового спадов наблюдалась очень небольшая разница. Но в некоторых случаях при отрицательной зарядке световой спад протекал немного быстрее. Оказалось, что световой спад происходит быстрее для более тонких пленок. Для объемного отношения материала к смоле 1 : 2 световой спад происходил быстрее, чем для отношения 1 : 1.

Результаты исследований фотопроводящих материалов типа фосфóров приведены в работе [36]. В ней также представлены экспериментальные результаты для промышленных и специально приготовленных фосфóров, диспергированных в силиконовой смоле. Кривые темнового и светового спадов для слоев, приготовленных из трех порошков промышленных фосфóров, представлены на рис. 169. Световые спады фосфóров преимущественно из ZnS характеризуются высокими остаточными потенциалами (около 50% от начального). Световой и темновой спады для CdS, показанные на рис. 169, протекают значительно быстрее, чем для двух других. Медленный темновой спад и наибольшая фоточувствительность достигались с материалом следующего состава: 95% CdS — 5% ZnS (рис. 170). В работе [36] указывается, что для ксерографических и фотопроводящих свойств ZnS и CdS важны два типа примесей. Примеси внедрения, такие, как Cu, Ag и Cd, влияют на спектральную чувствительность, а примеси замещения, такие, как Mn, увеличивают темновое сопротивление. В составах CdS — ZnS с увеличением содержания CdS фоточувствительность увеличивается и сдвигается в длинноволно-

вую сторону. Пики фоточувствительности лежат между 400 *ммк* для ZnS и 600 *ммк* для фосфóра с высоким содержанием CdS. Пики фотопроводимости располагаются в коротковолновой области характеристической люминесценции, и их положения могут значительно изменяться в присутствии примесей [314]. Резуль-



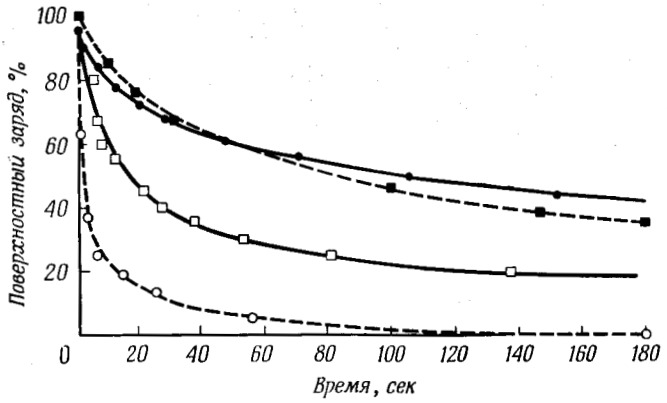
Р и с. 169. Темновой и световой спады нескольких слоев ZnCdS в связующем [36].

Поверхностный заряд положительный. ▲■● темновой спад; △□○ световой спад.

таты экспериментов с порошком ZnCdS, описанных в работе [304], в основном совпадают с результатами, изложенными выше.

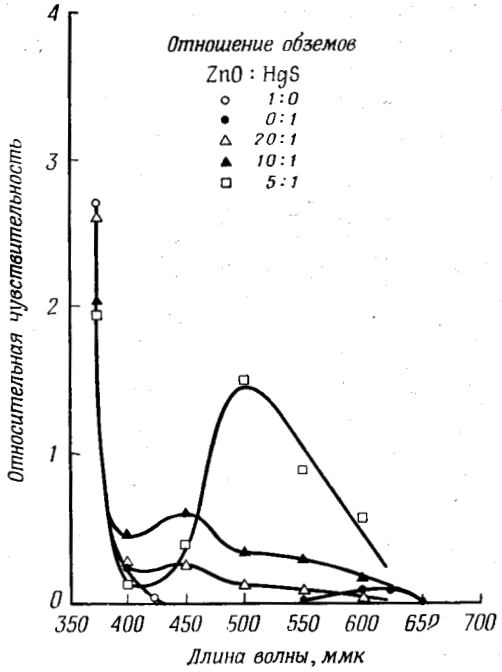
Сульфид ртути. В работе [315] в качестве фотопроводящего материала использовался красный сульфид ртути, который добавлялся в слои окиси цинка. Было обнаружено, что эти слои обладают очень малой фоточувствительностью. Однако при смешивании сульфида ртути с окисью цинка в пропорции 1 : 5 интегральная чувствительность слоя ZnO в связующем значительно увеличивается (рис. 171). Смесь ZnO и HgS с помощью шаровой мельницы была диспергирована в смоле полибутилметакрилат; в качестве растворителя для уменьшения вязкости смолы был выбран толуол. Слои толщиной ~20 *мк* были нанесены на алюминиевые пластины. Оптимальное отношение объемов фотопроводящего материала к смоле оказалось равным примерно 1,4 : 1.

Селен. Некоторые ранние эксперименты с фотопроводниками в связующем проводились с порошком селена. Фоточувствительные слои приготавливались путем измельчения порошка селена в шаровой мельнице. Эксперименты ограничивались главным образом проверкой поведения слоев селена в связующем. Пленки обладали несколько меньшей светочувствительностью по сравне-



Р и с. 170. Кривые спада для легированного фосфо́ра CdS в связующем [36].

Материал: 95% CdS + 5% ZnS + 0,1% $MnSO_4H_2O$ + 6% NaCl.
● темновой спад, $V_0 = 270$ *в* } зарядка при +7000 *в*, +480 *в*;
□ световой спад, $V_0 = 300$ *в* }
■ темновой спад, $V_0 = 312$ *в* } зарядка при —7000 *в*, —480 *в*.
○ световой спад, $V_0 = 384$ *в* }



Р и с. 171. Спектральная чувствительность слоев ZnO, содержащих разные количества сульфида ртути [315].

нию с пленками из аморфного селена, напыленного в вакууме, и обнаруживали относительно высокую степень «усталости» после серии циклов зарядки и экспонирования.

Двуокись титана. В работе [317] описаны слои, использующие TiO_2 (рутил) в качестве фотопроводящего материала. Обнаружено, что слои TiO_2 с алкидной смолой толщиной 50 *мк* могут быть заряжены отрицательной короной до поверхностного потенциала 600—1200 *в*. Темновой полуспад продолжается 3—6 *сек*. Световой спад протекает быстрее, чем для таких же слоев из окиси цинка. Граница основного поглощения для TiO_2 располагается в более длинноволновой области, чем для ZnO; ширина запрещенной зоны для TiO_2 равна 2,95 *эв* (420 *ммк*), а для ZnO она равна 3,25 *эв* (380 *ммк*). Этим можно объяснить большую чувствительность к спектру излучения вольфрамовой лампы. Часто наблюдалось аномальное явление при зарядке и экспонировании слоев TiO_2 в связующем. По-видимому, при зарядке слоя до потенциала, меньшего максимального, освещение приводило к росту поверхностного потенциала до максимальной величины с последующим медленным спадом. Это поведение, вероятно, может быть связано с комплексными диэлектрическими свойствами двуокиси титана, которая обладает сегнетоэлектрическим эффектом и диэлектрической проницаемостью порядка 100 [318].

1.2.3. ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОПРОВОДНИКИ

Органический фотопроводник антрацен был одним из первых, использованных в экспериментах по электрофотографии. Слои антрацена, сублимированные на металлические подложки, способны сохранять поверхностный заряд в темноте, а под действием света разряжаться. Аналогичное поведение наблюдалось у таких соединений, как хризен, фенантрен и аценафтен. Так как фоточувствительность этих материалов была слишком слабой для практического использования в электрофотографии, они не пользовались вниманием и у исследователей. В последние годы появился новый интерес к органическим фотопроводникам в связи с их применением в ксерографии в качестве фотопроводящих изолирующих пленок. Хотя библиография по органическим фотопроводникам довольно обширна, тем не менее данных, позволяющих провести сравнение ксерографических свойств, не так много.

В работе [319] измерены некоторые ксерографические свойства карбазола и его производных (N-алкил и N-ацил) и проведено сравнение с поливинилкарбазолом. В большинстве случаев пленки приготавливали испарением в вакууме на алюминиевые пластины. Однако полимер поливинилкарбазол смешивали с растворителем и просто намазывали на пластины, а затем высушивали.

Были получены кривые темнового и светового спадов. В качестве источника света применяли флуоресцентную лампу мощностью 20 *вт*. Пленки N-метил-, N-этил- и N-n-пропилкарбазола обладали почти такой же чувствительностью, как и пленка карбазола. Темновой спад N-n-октадецилкарбазола протекал слишком быстро, так что нельзя было провести количественные измерения. N-ацил-, N-ацетил-, N-бензоил- и N-p-толуолсульфонилкарбазол оказались нечувствительными к спектру излучения флуоресцентной лампы. Чувствительность поливинилкарбазола оказалась примерно в 10 раз больше, чем чувствительность карбазола и N-алкилкарбазолов. Во всех случаях чувствительность при положительной зарядке была выше, чем при отрицательной.

В работе [320] исследован ряд органических фотопроводников, выбранных из девяти различных групп. Эти вещества являются производными ацилгидразона, оксадизола, триазола, пиразолина, имидазолона, имидазолтиона, бензимидазола, бензоксазола и бензотиазола. Образцы были приготовлены путем растворения органического соединения в фенольной смоле и растворителе (метилцеллосольве или хлоробензоле). Раствор наносили на алюминиевые пластины и сушили их в течение 10 *мин* при 70° С. Затем слои заряжались отрицательно в коронном разряде и освещались лампой накаливания (20 *лк*). Кривые светового спада использовались для определения относительной фоточувствительности образцов. Данные о положительной зарядке не приведены. У всех 33 исследованных образцов наблюдался спад заряда при освещении. В большинстве случаев чувствительность была очень низкой по сравнению с аморфным селеном и окисью цинка. Так как группа производных имидазолтиона обладала наибольшей чувствительностью к спектру лампы накаливания, то наиболее чувствительным оказалось соединение 1,3,5-трифенил-4-(p-диметиламинофенил)имидазолтион. Это соединение обладало чувствительностью, близкой к чувствительности несенсибилизированной окиси цинка. Чувствительность некоторых из соединений в группах акрилгидразона и пиразолина значительно увеличивалась при добавлении красителей. Из трех использованных красителей метил-виолет и родамин В оказались эффективными, а «бенгальский розовый» — неэффективным. Было определено оптимальное соотношение между органическим фотопроводником и фенольной смолой.

В работе [321] получены прозрачные фотопроводящие слои, содержащие смесь полимера винилхлорид, 4,4′-лейкооснования малахитового зеленого и следов малахитовой зелени. В работе нет данных о чувствительности и других ксерографических свойствах. Однако установлено, что спектральная чувствительность соответствует двум главным пикам поглощения малахитовой

зелени (~630 и 430 *ммк*). Этот материал был использован в качестве экспериментального для создания электрофотографических диапозитивов.

В работе [203] приведены результаты некоторых измерений на полимерном фотопроводнике поливинилкарбазоле (ПВК). Из представленных данных следует, что фоточувствительность слоев ПВК в процессе спада заряда при освещении вольфрамовой лампой (2900° К) примерно на два порядка меньше, чем чувствительность несенсибилизированных слоев окиси цинка. Сенсибилизация ПВК красителем «виктория голубой» увеличивает чувствительность примерно на один порядок.

Большое число исследований посвящено фотопроводимости органических соединений [322]. Фотопроводимость относится к числу обычных свойств органических веществ и наблюдается у большинства органических соединений. Механизм фотопроводимости органических веществ во многом аналогичен механизму фотопроводимости неорганических полупроводников: проводимость является электронной, и носителями могут быть как электроны, так и дырки, либо те и другие вместе. Также наблюдается явление захвата и рекомбинации. Однако фотовозбуждение затрагивает молекулярные, а не кристаллические уровни энергии, и для полного возбуждения носителей может потребоваться тепловая энергия. Квантовый выход равен 0,25. Однако значения подвижности малы, и это вместе с уменьшением эффективного сдвига носителей из-за захвата и барьеров может объяснить относительно низкую фоточувствительность ксерографических слоев, содержащих органические фотопроводники.

Фотопроводящие диэлектрические пленки на основе органических фотопроводников могут быть получены в трех следующих видах: 1) в виде твердой пленки, содержащей только органическое соединение, если само соединение в темноте является изолятором (например, антрацен и поли(N-винилкарбазол); 2) в виде раствора (например, пленки, описанные в работе [320]); 3) в виде пленки из органического фотопроводящего материала, диспергированного в смоле.

Органические фотопроводники, несомненно, займут одно из первых мест в будущих разработках по созданию фоточувствительных пленок для ксерографии. Эти материалы представляют большой интерес благодаря их способности к селективной сенсибилизации.

II. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА В ФОТОПРОВОДЯЩИХ ИЗОЛЯТОРАХ

Способность ксерографических фотопроводящих пленок заряжаться, сохранять электрический заряд в темноте и разряжаться при экспонировании зависит от подвижности электронов и дырок в слое. Если темновой спад поверхностного заряда зависит главным образом от инжекции носителей заряда в слое с поверхности или через контактный барьер между слоем и проводящей подложкой, то световой спад зависит от скорости генерации и подвижности носителей в объеме пленки.

2.1. ТЕМНОВОЙ СПАД И ЗАРЯДКА СЛОЯ

Ксерографическая пластина в простейшем виде состоит из тонкого фотопроводящего изоляционного слоя, нанесенного на проводящую подложку. Если поверхность фоточувствительного слоя зарядить в темноте, то заряд с течением времени будет уменьшаться. Скорость темнового спада заряда зависит от величины темнового тока через слой, который в свою очередь зависит от плотности свободных носителей в слое. Образование свободных носителей происходит в результате следующих трех процессов: 1) теплового освобождения носителей заряда внутри слоя; 2) инжекции носителей в слой через поверхность и 3) инжекции носителей через поверхность раздела между слоем и проводящей подложкой. Обычно при комнатной температуре плотность термически возбуждаемых носителей в изоляторе мала, а те, что имеются в слое, покидают его при зарядке в коронном разряде.

Свободная поверхность пленки обычно препятствует инжекции зарядов с поверхности в объем пленки. Посредством введения проводящих или полупроводящих примесей или пленок на поверхность можно увеличить инжекцию зарядов с поверхности. Примеси или пленки в этом случае аналогичны инжектирующему электроду. Физическая природа поверхностного заряда, образованного, например, коронным разрядом, пока еще не установлена. По некоторым представлениям, поверхностный заряд существует в виде ионов, адсорбированных на поверхности, или в виде зарядов, захваченных поверхностными ловушками [323]. В пос-

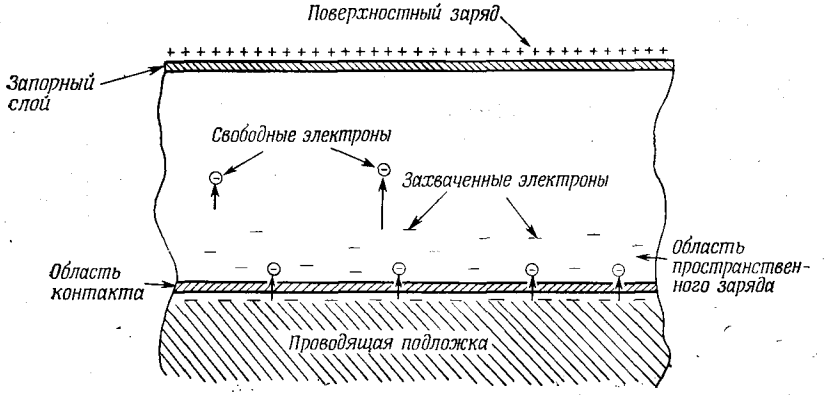
леднем случае ионы, попадающие на поверхность, отдают свой заряд поверхностным уровням [1]).

Характер поверхности раздела между фотопроводником и подложкой является определяющим фактором темнового спада. Существенно то, что этот контакт должен быть запорным для носителей по крайней мере одного знака. При положительной зарядке область контакта должна стать барьером для электронов, а при отрицательной — для дырок. Раздел должен быть эффективным при относительно высоких напряженностях поля, для того чтобы проявляемый поверхностный заряд удерживался в фоточувствительном слое. Запирание может быть обусловлено либо высоким потенциальным барьером, либо относительно низким, образованным ловушками. При наличии ловушек отпадает необходимость в постоянном запорном слое. В этом случае поверхность раздела может быть просто омическим контактом. Во время коронного разряда носители свободно переходят из проводящей подложки в пленку и захватываются глубокими ловушками. Возникает статистический пространственный заряд, препятствующий дальнейшему потоку зарядов из подложки и уменьшающий поле на границе раздела. При выключении короны коронный ток падает до нуля. Однако темновой ток не прекращается, так как он обусловлен освобождением ловушек в области компенсирующего пространственного заряда. Он постепенно уменьшается до тех пор, пока поток носителей из подложки не придет в равновесие с потоком носителей, освобождаемых из ловушек. Проводимость контакта между подложкой и слоем зависит от напряженности поля; с уменьшением поля она уменьшается. Ниже критической величины поля проводимость становится постоянной. Таким образом, после зарядки слоя в коронном разряде немедленно следует экспоненциальный темновой спад. Такого рода запорные контакты создаются в слоях аморфного селена и окиси цинка в связующем.

Модель, иллюстрирующая возможный механизм темнового спада в ксерографической пластине, представлена на рис. 172. На рисунке показан случай положительной зарядки слоя. Однако тот же механизм справедлив и для отрицательной зарядки. Рассматриваемая ксерографическая пластина является четырехслойной структурой, состоящей из объемного слоя, поверхностного слоя, промежуточного слоя (между фотопроводником и подложкой) и проводящей подложки. Поверхностный слой является запорным слоем, препятствующим переходу зарядов с поверх-

[1]) Вопрос о природе поверхностных уровней, ответственных за поверхностный заряд электрофотосферических слоев, подробно разработан в работе [383].— *Прим. ред.*

ности в объем. Объемный слой представляет собой диэлектрик, в котором плотность термически возбужденных носителей незначительна. Он состоит из относительно глубоких электронных ловушек, которые имеют наибольшую плотность вблизи подложки. Промежуточный слой является чувствительным к полю барьером, а подложка действует главным образом как поставщик электронов. При отрицательной зарядке поверхности этот контакт должен быть запирающим по отношению к дыркам.



Р и с. 172. Модель темнового спада в ксерографической пластине.

Предполагая, что темновой спад полностью обусловлен инжекцией носителей из подложки в объем слоя, можно вывести выражение для зависимости спада поверхностного потенциала от времени. Рассмотрим случай положительной зарядки поверхности, когда ток темнового спада обусловлен электронами, переходящими из подложки и захватываемыми электронными ловушками.

Сразу после выключения короны плотность свободных электронов, следующих к положительно заряженной поверхности, будет иметь максимальную величину n_0 ($см^{-3}$). Плотность электронов, заполняющих ловушки в этот момент времени, обозначим через N_{f_0} ($см^{-3}$). Эти величины уравновешивают друг друга в момент, когда при зарядке наступает насыщение. При равновесии скорость освобождения ловушек равна скорости их заполнения. Однако после прекращения зарядки это равновесие нарушается, причем скорость освобождения ловушек превышает скорость заполнения. Поскольку скорость захвата электронов равна скорости освобождения ловушек, можно написать

$$\frac{dN_f}{dt} = -\alpha N_f = \frac{dn}{dt}, \qquad (54)$$

где N_f — плотность заполненных ловушек, n — плотность свободных электронов и α — коэффициент, зависящий от времени жизни электронов в ловушках.

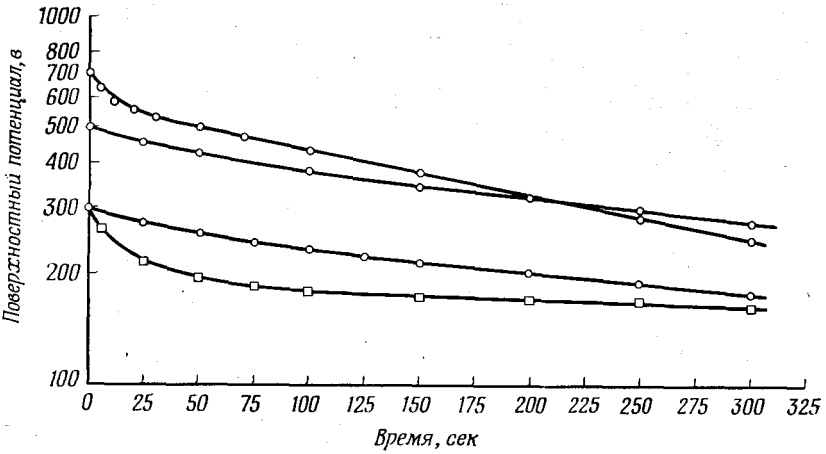


Рис. 173. Теоретические и экспериментальные кривые темнового спада для ксерографических пластин аморфного селена.

Сплошными линиями обозначены кривые, рассчитанные по уравнению (60). Кривые, начинающиеся с 500 и 300 *в*, сняты на одной пластине селена. Верхняя кривая соответствует другой пластине. Толщина слоя селена ~50 *мк*. ○ экспериментальные значения для положительной зарядки; □ экспериментальные значения для отрицательной зарядки.

Интегрирование левой части выражения (54) дает

$$N_f = N_{f0} e^{-\alpha t}, \tag{55}$$

а в правой части тогда получаем

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha N_{f0} e^{-\alpha t}. \tag{56}$$

Интегрирование выражения (56) дает выражение для плотности свободных электронов в момент времени t

$$n = n_0 - N_{f0}(1 - e^{-\alpha t}). \tag{57}$$

Ток разряда через объем можно написать в виде

$$i_d = -C\frac{dV}{dt} = ne\mu\frac{V}{L}, \tag{58}$$

где V — падение напряжения в слое; C — емкость на единицу поверхности; L — толщина слоя; e — заряд электрона и μ — подвижность. Подставляя величину n из (57) в (58) и выполняя

некоторые преобразования, получим

$$\frac{dV}{V} = -\frac{e\mu}{CL}[n_0 - N_{f0}(1 - e^{-\alpha t})]\,dt. \tag{59}$$

После интегрирования имеем уравнение темнового спада

$$V = V_0 \exp\left[-\frac{A_1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t}) - A_2 t\right], \tag{60}$$

где

$$A_1 = \frac{e\mu}{CL} N_{f0}, \qquad A_2 = \frac{e\mu}{CL}(n_0 - N_{f0}).$$

Путем приближенной оценки констант A_1, A_2 и α уравнение (60) может быть использовано для описания экспериментальных кривых темнового спада заряда в слоях аморфного селена. Соответствующие результаты представлены на рис. 173.

2.2. РОЛЬ ПРОЦЕССА РЕКОМБИНАЦИИ В ФОТОПРОВОДЯЩИХ ИЗОЛЯТОРАХ

В собственном фотопроводнике первоначальное действие падающего света заключается в возбуждении электронно-дырочных пар, принимающих участие в фототоке в объеме слоя. При наличии примесей электроны могут быть возбуждены с донорных, а дырки соответственно с акцепторных уровней. В этом случае электроны и дырки возбуждаются не парами, так как один заряд из пары остается локализованным на соответствующем уровне.

После фотовозбуждения часть электронов и дырок может рекомбинировать. Это уменьшает число свободных носителей, участвующих в проводимости. Вероятность рекомбинации зависит от плотности дырок и электронов и сечения захвата центров рекомбинации.

Рекомбинация может быть уменьшена за счет быстрого разделения электронов и дырок под действием сильных полей, используемых в ксерографии. Этот случай имеет место в селене при положительной зарядке, где возбуждение осуществляется внутри очень тонкого поверхностного слоя.

Сильные поля способствуют довольно быстрому разделению дырок и электронов. Однако в результате разряда слоя поле слабеет и плотность электронов на поверхности слоя возрастает. Оба эти эффекта благоприятствуют рекомбинации. Таким образом, очень быстрый вначале разряд со временем замедляется.

Число носителей, способных участвовать в проводимости, уменьшается также за счет ловушек. Фоточувствительный изолирующий слой с высокой плотностью ловушек, вообще говоря, будет медленно разряжаться даже при достаточно большой интенсивности освещения. Когда носители попадают в глубокие ловуш-

ки или на уровни в неосвещаемой части фоточувствительного слоя, слой полностью не разряжается. При сильном «прилипании» создаются более или менее стабильный пространственный заряд и соответственно остаточный потенциал, который очень медленно спадает со временем (примерно со скоростью темнового спада). Слои, имеющие высокий остаточный потенциал, всегда обнаруживают эффект «усталости», возрастающий при последующих циклах зарядки и экспонирования. Это объясняется тем, что в области перехода от фотопроводника к подложке образуется сильное поле в результате накопления пространственного заряда при захвате носителей на уровни прилипания. Но это не единственная причина «усталости» слоя. Медленный спад заряда после выключения света может также сказываться на увеличении скорости темнового спада при последующих циклах зарядки. Здесь наблюдается тот же самый эффект, который лежит в основе получения устойчивого изображения в ксерографии. Он обусловлен наличием высокой плотности относительно мелких ловушек. При фотовозбуждении носители быстро захватываются этими ловушками, и после выключения света освобождение их под действием тепловых колебаний поддерживает устойчивое состояние проводимости.

Эффективность захвата зависит также от глубины проникновения падающего света. Освобождение ловушек будет, вообще говоря, зависеть от их глубины и температуры. Однако при энергии фотонов, достаточной для освобождения ловушки, носители могут быть освобождены даже из относительно глубоких ловушек. Глубина проникновения света в фотопроводящий слой зависит от коэффициента поглощения света заданной длины волны, и эта зависимость может сильно влиять на характер фотопроводимости слоя. Например, фоточувствительность аморфного селена имеет максимум вблизи 4000 Å, а при 6000 Å равна нулю. При 4000 Å поглощение составляет 99%, а глубина проникновения света менее 0,1 *мк*; при 6000 Å проникновение света $\sim$100 *мк*. Таким образом, фотовозбуждение свободных носителей является, по существу, поверхностным эффектом. Если поверхность селена заряжена положительно, то только дырки могут дрейфовать в слое, а электроны в основном остаются на поверхности. Следовательно, при разрядке положительно заряженного слоя селена мы имеем дело только с дырочной проводимостью. При экспонировании в узкой спектральной области вблизи 4000 Å объем слоя находится в темноте, и освобожденные дырки должны двигаться через эту область. При попадании в глубокие ловушки дырки могут оставаться захваченными в течение длительного промежутка времени. Однако при экспонировании слоя в спектральной области от 4000 до 6000 Å захваченные дырки освобо-

ждаются быстрее. Фоточувствительность в этом случае увеличивается по сравнению с экспонированием монохроматическим светом 4000 Å, хотя само освещение слоя светом 6000 Å не вызывает фотопроводимости.

В аморфном селене при положительной зарядке в основном преобладают дырочные ловушки. В фотопроводящих веществах, где коэффициент поглощения мал и свет проникает в объем слоя, необходимо учитывать оба вида ловушек. Если время жизни носителей в ловушках мало, что справедливо для мелких ловушек, процесс захвата в фотопроводнике упрощается. В этом случае можно считать, что он приводит только к уменьшению подвижности и не влияет на концентрацию свободных носителей [242].

Фототок может быть уменьшен также разного рода потенциальными барьерами. Это могут быть барьеры между зернами в случае поликристаллических слоев или слои в связующем, возможны даже межмолекулярные барьеры для аморфных и полимерных материалов. В работе [324] высказано предположение, что существуют барьеры даже между цепями в аморфном селене, которые сильно зависят от напряженности поля; ослабление поля за счет поверхностных зарядов усиливает влияние этих барьеров на фототок.

2.3. РАЗРЯД В КСЕРОГРАФИИ

Качество изображения в ксерографии на заряженном слое фоточувствительного изолятора под действием падающих фотонов зависит от скорости светового спада. Эта скорость определяется следующими факторами:

1) количеством падающего света, поглощенным в слое;

2) квантовым выходом в начале возбуждения, т. е. числом свободных электронов или дырок или тех и других вместе на один поглощенный фотон;

3) скоростью рекомбинации электронов и дырок;

4) скоростью захвата носителей и временем жизни носителей в ловушках;

5) подвижностью носителей в слое.

Выражение для плотности фототока ($а/см^2$) при разрядке слоя имеет вид

$$j = -C\frac{dV}{dt} = (n\mu_n + p\mu_p)\, eV/L, \qquad (61)$$

где C — емкость на 1 $см^2$ фотопроводящего слоя; V — эффективное падение напряжения в слое; n, p — соответственно плотности свободных электронов и дырок; e — заряд электрона; μ_n, μ_p — соответственно подвижности электронов и дырок; L — толщина слоя; t — время.

Во время экспонирования концентрация свободных носителей определяется скоростью фотовозбуждения, скоростью рекомбинации и захвата. Это соотношение имеет вид

$$\frac{d(n+p)}{dt} = \alpha_1 F + \alpha_2 N_f + \alpha_3 P_f - \beta_1 N_t n - \beta_2 P_t p - \gamma np, \qquad (62)$$

где F — интенсивность освещения, *фотон/сек·см*^{2}; N_t — плотность свободных электронных ловушек; P_t — плотность свободных дырочных ловушек; N_f, P_f — плотности электронов и дырок в ловушках соответственно; α_1 — вероятность создания пары носителей при поглощении одного фотона; α_2, α_3 — вероятности освобождения электронов и дырок из ловушек; β_1, β_2 — вероятности захвата ловушками электронов и дырок; γ — вероятность рекомбинации электрона и дырки.

Определенные из уравнения (62) значения n и p могут быть подставлены в соотношение (61). В результате получится дифференциальное уравнение, описывающее скорость разряда фоточувствительного слоя изолятора при экспонировании. Последующее интегрирование дало бы уравнение, из которого можно было бы рассчитать и построить кривые спада потенциала во времени. Однако уравнение (62) в общем случае решить нельзя, и его решение обычно получают при довольно ограниченных условиях, которые неприложимы к переходным процессам, наблюдаемым в ксерографии.

2.4. ТЕОРИЯ РАЗРЯДА

В работе [325] рассмотрена общая модель разряда или светового спада с учетом выражения Гехта [326] для фототока в изолирующих кристаллах. Эта теория основывается на предположении, что средний сдвиг свободных носителей (электронов или дырок) в слое изолятора пропорционален электрическому полю, т. е.

$$w = \mu\tau E = \mu\tau \frac{V}{L}, \qquad (63)$$

где μ — дрейфовая подвижность свободных носителей; τ — время жизни носителей; E — напряженность электрического поля.

Число носителей заряда при их движении через слой будет уменьшаться в соответствии с формулой

$$n = n_0 e^{-x/w}, \qquad (64)$$

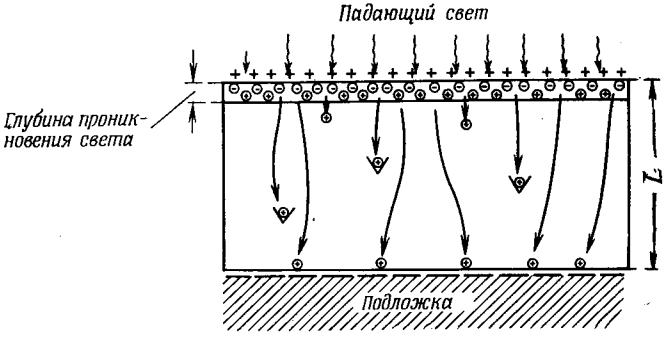
где x — расстояние в направлении поля. Если носители возбуждаются светом в слое толщиной Δx на расстоянии x от электрода, к которому они движутся, то общий заряд, переносимый через единицу площади поверхности, можно определить при

интегрировании соотношения (64) в пределах от 0 до x. В результате получаем формулу Гехта [327] для плотности тока через слой в виде

$$j = \frac{dn}{dt}\, e\Delta x \cdot \frac{\mu\tau V}{L^2}\left(1 - e^{-xL/\mu\tau V}\right), \qquad (65)$$

где dn/dt — скорость генерации свободных носителей в единице объема при освещении слоя, e — заряд электрона.

Формула (65) была рассмотрена для двух случаев, соответствующих сильному и слабому поглощению падающего света.



Р и с. 174. Схема дырочной проводимости и действие ловушек в слое аморфного селена при сильном поглощении света.

В первом случае весь свет поглощается в тонком поверхностном слое (рис. 174), например в слое аморфного селена при освещении его светом длиной волны короче 500 *ммк* (см. рис. 118). При очень сильном поглощении света соотношение (65) принимает вид

$$j = bJe\frac{\mu\tau V}{L^2}\left(1 - e^{-L^2/\mu\tau V}\right), \qquad (66)$$

где J — интенсивность падающего света в *фотон/сек* и b — отношение числа освобожденных носителей к числу поглощенных фотонов.

В случае слабого поглощения освещается весь объем слоя. Плотность тока при этом можно найти при интегрировании уравнения (65) по переменной x от 0 до L. Это приводит к следующему уравнению [325]:

$$j = bJe \cdot \frac{\mu\tau V}{L^2}\left[1 - \frac{\mu\tau V}{L^2}\left(1 - e^{-L^2/\mu\tau V}\right)\right]. \qquad (67)$$

Если плотность тока в форме выражений (66) и (67) приравнять к скорости разряда ($j = -CdV/dt$), то интегрирование полученного дифференциального уравнения даст выражение, описывающее спад поверхностного потенциала во времени.

В случае сильного поглощения света уравнение (66) после разделения переменных и интегрирования принимает вид

$$\int_{p_0}^{p} \frac{dp}{p - pe^{-1/p}} = \frac{-bJe\mu\tau}{CL^2} t, \tag{68}$$

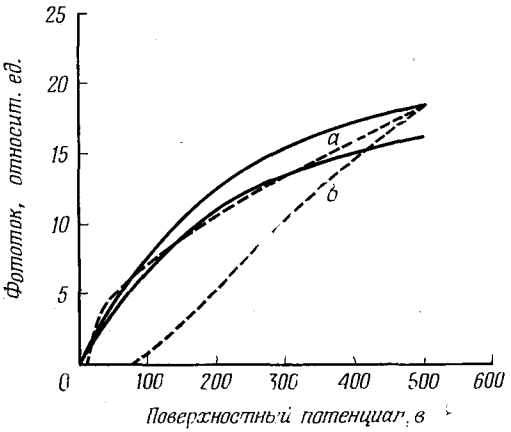
где $p = \mu\tau V/L^2$, $p_0 = \mu\tau V_0/L^2$ и C — емкость слоя на 1 $см^2$. Используя тот же прием для выражения (67), в случае слабого поглощения света получаем

$$\int_{p_0}^{p} \frac{dp}{p - p^2 + p^2 e^{-1/p}} = \frac{-bJe\mu\tau}{CL^2} t. \tag{69}$$

Интегрирование соотношений (68) и (69) проводится от начального потенциала V_0 до V и по времени от $t = 0$ до $t = t$. Интегралы слева могут быть вычислены графическим путем, что в принципе позволяет получить кривые спада, характеризующие зависимость поверхностного потенциала от времени. Используя упрощающие предположения, авторы работы [325] получили уравнения (20) и (22), которые, однако, неприменимы к фоточувствительным слоям в ксерографии. Например, в аморфном селене величина $\mu\tau$ для дырок, полученная в работе [260], составляет $8 \cdot 10^{-8}$ $см^2/в$. В этом случае $p = 3{,}2 \cdot 10^{-3}$ $в$ для $L = 50$ $мк$. Таким образом, в пределах изменения потенциала от $V_0 = 1000$ $в$ до $V = 10$ $в$ величина p изменяется от 3,2 до 0,032. При $p = 1{,}0$ сдвиг свободных носителей равен толщине слоя. Таким образом, при разности потенциалов выше соответствующей $p = 1$ ток разряда имеет насыщение, а спад потенциала близок к линейному. При небольших значениях p (низкие потенциалы) кривая спада потенциала приближается к экспоненте. Таков приблизительно характер спада потенциала для слоев аморфного селена.

В соотношении (64) учитывается уменьшение свободных носителей только за счет попадания их в ловушки при дрейфе в слое, а рекомбинация носителей, особенно в случае сильного поглощения света, не принимается во внимание. Это эквивалентно предположению, что рекомбинация или вообще не происходит в области поглощения света, или ее скорость постоянна и не зависит от напряженности поля. Такое предположение приводит в соответствии с выражением (66) к насыщению тока разрядки при высоких поверхностных потенциалах. В действительности же, если представить графически разрядный ток как функцию поверхностного потенциала при освещении заряженного слоя аморфного селена, то кривая с насыщением не получается. Экспериментальные результаты для слоя аморфного селена в виде двух таких кривых представлены на рис. 175 вместе с кривыми, рассчитанными по формуле (66) при подстановке значений $\mu\tau = 8 \cdot 10^{-8}$ $см^2/V$

и $L = 50$ *мк*. Из рисунка видно только приблизительное соответствие между теоретической кривой Гехта и экспериментальной кривой для слоя аморфного селена, имеющего низкий остаточный потенциал. Верхняя сплошная кривая на рис. 175 приведена к величине тока, измеряемого в селеновых ксерографических пластинках с потенциалом 500 *в*, а нижняя сплошная кривая



Р и с. 175. Зависимость скорости разряда от величины поверхностного потенциала для селеновых ксерографических пластин.

———— кривые, рассчитанные по уравнению (66); — — — — экспериментальные кривые. *а* — пластина с низким остаточным потенциалом; *б* — пластина с высоким остаточным потенциалом.

приведена к значению тока, соответствующего кривой *а* с потенциалом 312,5 *в*. Нижняя сплошная кривая приблизительно совпадает с кривой *а* при потенциале ниже 300 *в*. Расхождение между этими кривыми при высоких потенциалах может быть связано с рекомбинацией, которая, по-видимому, увеличивается по мере уменьшения начального поверхностного потенциала. Хорошее совпадение между экспериментальными данными для ячеек аморфного селена при импульсном освещении и формулой Гехта получено в работе [255]. Однако эта методика не эквивалентна разряду ксерографических пластин при освещении. Кривая *б* на рис. 175 соответствует пластине с остаточным потенциалом, равным ~ 80 *в*, при котором разрядный ток падает почти до нуля. Рассмотренная выше теория не описывает этого явления. По-видимому, теория может дать лучшее согласие с экспериментом лишь в том случае, когда свет проникает в объем фотопроводящего слоя. При этом рекомбинация может быть учтена в рамках соотношения (64) как часть общего эффекта. Остаточный потенциал

может появиться лишь в том случае, когда время жизни носителей в ловушках будет больше, чем время релаксации при разрядке слоя.

2.4.1. МОДЕЛЬ СЛОЕВ АМОРФНОГО СЕЛЕНА

В работе Ли и Регенсбургера [260] предложена теоретическая модель, объясняющая характеристики фотоиндуцированного разряда ксерографических слоев аморфного селена. Эта модель учитывает не только движение носителей в объеме, но и рекомбинацию фотогенерированных дырок и электронов. Был рассмотрен случай только сильного поглощения света на поверхности фотопроводящего слоя изолятора, что характерно для аморфного селена при освещении его светом в области максимума фоточувствительности (т. е. для $\lambda \approx 400$ *ммк*). При этих условиях только один тип носителей становится подвижным, поскольку рассматривается проводимость в объеме слоя. Так, при положительном поверхностном заряде в объем слоя из тонкой поверхностной области, где происходит поглощение, инжектируются только дырки. Часть электронов и дырок рекомбинирует в области поглощения. Оставшиеся носители разделяются электрическим полем, причем электроны дрейфуют к поверхности, чтобы нейтрализовать положительные поверхностные заряды, а дырки движутся в противоположном направлении. Часть дырок проходит через весь слой, а часть захватывается ловушками. Таким образом, поверхностный потенциал $V(t)$ может быть представлен в виде

$$V(t) = V_0 - [Q_s(t)/C] + \bar{V}(t), \tag{70}$$

где C — емкость слоя, равная $k\varepsilon_0/L$, в расчете на единицу поверхности (k — диэлектрическая проницаемость, L — толщина слоя); V_0 — начальный поверхностный потенциал перед освещением; $Q_s(t)$ — величина поверхностного заряда, нейтрализованного за время t; $\bar{V}(t)$ — объемный потенциал, обусловленный захватом дырок в слое в течение времени t. Величина $Q_s(t)$ равна числу дырок, вышедших из области поглощения, умноженному на величину заряда электрона. Если выразить вероятность выхода дырок через время дрейфа и время жизни, ограниченное рекомбинацией в пределах тонкого поглощающего слоя, то $Q_s(t)$ может быть представлено в следующем виде:

$$Q_s(t) = eF \int_0^t \exp\left[-T_b(t)/\tau_r\right] dt, \tag{71}$$

где e — заряд электрона; F — интенсивность света, *фотон/сек·см²*; $T_b(t)$ и τ_r — соответственно время дрейфа и время жизни до рекомбинации для дырок в тонком поглощающем слое толщи-

ной b (см. рис. 174). По аналогии с формулой (63)

$$T_b(t) = bL/\mu V(t).$$

Третий член в уравнении (70) может быть представлен в виде

$$\overline{V}(t) = 1/C \int_0^t \gamma [d\overline{Q}(t)/dt]\, dt, \tag{72}$$

где $\overline{Q}(t)$ — заряд, созданный захваченными дырками за время t, и γ — фактор, зависящий от пространственного распределения захваченных дырок в объеме слоя. Выражение для γ, приведенное в работе [260], имеет вид

$$\gamma = \{1 - \exp[-T_L(t)/\tau]\}^{-1} - [\tau/T_L(t)], \tag{73}$$

где τ — время жизни дырок до захвата уровнем прилипания, $T_L(t)$ — время дрейфа дырок через слой толщиной L. Так как $b \ll L$, можно положить $T_L(t) = L^2/\mu V(t)$. Выражение для γ тогда может быть представлено как функция поверхностного потенциала в процессе спада заряда. Если все заряды захвачены очень близко к положительной поверхности, то $\gamma \approx 1{,}0$, а если они однородно распределены по объему, то $\gamma = {}^1/_2$. Последнее предположение является гипотетическим, так как механизм захвата в сильной степени зависит от напряженности электрического поля, что исключает возможность реализации этого случая. Действительно, расчеты, основанные на уравнении (73), дают величину γ, близкую к 0,5, только при очень высоких поверхностных потенциалах, что в свою очередь для слоя разумной толщины предполагает отсутствие сколько-нибудь существенного захвата. В этом случае распределение будет теоретически однородно, так как плотность захваченных дырок равна нулю.

Скорость роста захваченных дырок может быть представлена соотношением

$$\frac{d\overline{Q}(t)}{dt} = J_b(t) - J_L(t), \tag{74}$$

где $J_b(t)$ — плотность дырочного тока, образованного дырками, покидающими область поглощения, а $J_L(t)$ — плотность дырочного тока, образованного дырками, достигающими поверхности слоя. Дифференцируя выражение (71), получим

$$J_b(t) = eF \exp[-T_b(t)/\tau_r] = eF \exp[-bL/\mu\tau_r V(t)] \tag{75}$$

и аналогично

$$J_L(t) = J_b(t) \exp[-T_L(t)/\tau] = \\ = eF \exp[-bL/\mu\tau_r V(t)] \exp[-L^2/\mu\tau V(t)]. \tag{76}$$

Подставляя выражения (75) и (76) в выражение (74) с учетом соотношений (73) и (72), придем к выражению для потенциала $\overline{V}(t)$, обусловленного захваченным в объеме зарядом. Окончательно, подставляя этот результат и соотношение (71) в (70), получим

$$V(t) = V_0 - \frac{eFL}{k\varepsilon_0} \int_0^t \exp\left[-bL/\mu\tau_r V(t)\right] \left[\mu\tau V(t)/L^2\right] \times \\ \times \left[1 - \exp\left(-L^2/\mu\tau V(t)\right)\right] dt. \qquad (77)$$

Интеграл в выражении (77) не имеет решения в аналитическом виде. Однако авторы работы [260] получили численное решение, используя формулу

$$\int_{V_0}^{V} \frac{dV}{f(V)} = -t, \qquad (78)$$

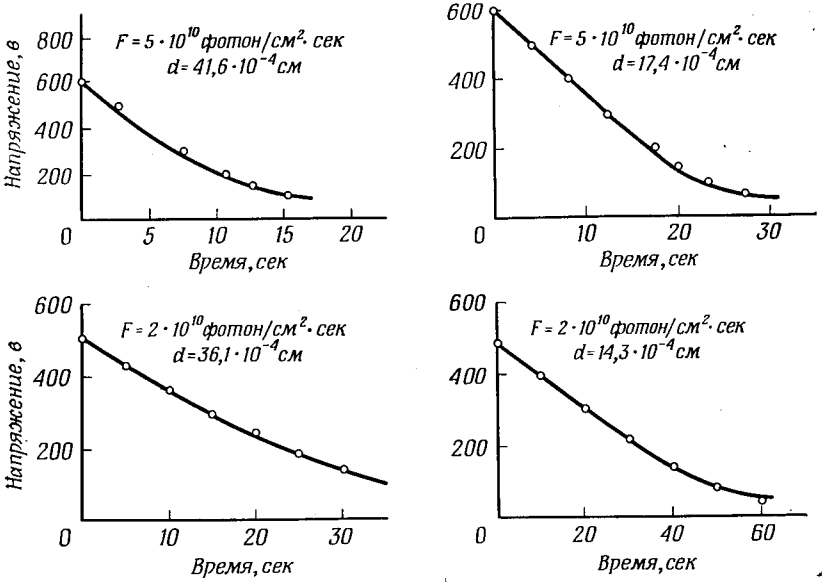
где $f(V)$ — производная по времени от правой части выражения (77). Они получили довольно хорошее совпадение с экспериментальными результатами, полагая $\mu\tau = 8 \cdot 10^{-8}$ *см*^{2}/*в* и $b/\mu\tau_r = 2 \cdot 10^4$ *в*/*см*. Их результаты представлены на рис. 176. Значения использованных при этом параметров согласуются со значениями, использованными в других работах [255].

Путем дифференцирования выражения (77) по времени можно получить выражение для скорости разряда, или фототока,

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{-eFL}{k\varepsilon_0} \exp\left[-bL/\mu\tau_r V(t)\right] \times \\ \times \left[\mu\tau V(t)/L^2\right] \left[1 - \exp\left(-L^2/\mu\tau V(t)\right)\right]. \qquad (79)$$

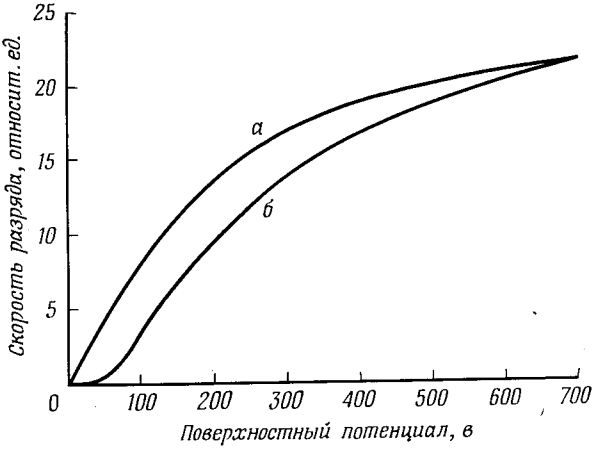
Следует отметить, что с точностью до члена $\exp\left[-bL/\mu\tau_r V(t)\right]$ это выражение совпадает с выражением (66).

Подставляя в формулу (79) указанные выше значения $\mu\tau$ и $b/\mu\tau_r$, можно рассчитать зависимость разрядного тока от поверхностного потенциала для слоев селена толщиной 50 *мк*. Результаты этого расчета представлены на рис. 177 одновременно с кривыми, рассчитанными по формуле (66) для одних и тех же значений $\mu\tau$ и $b/\mu\tau_r$. Кривые на рис. 177 иллюстрируют некоторые интересные особенности. Кроме рекомбинационного эффекта, проявляющегося в виде более крутого спада при $V_0 = 700$ *в*, обращает на себя внимание резкий спад до нуля при $V \approx 35$ *в* кривой *б*, обнаруживающей, таким образом, остаточный потенциал. Итак, вышеприведенная теория наряду с рекомбинацией и захватом носителей хорошо описывает явление остаточного потенциала. Остаточный потенциал в рамках этой теории соответствует установившемуся состоянию, когда плотность захваченных дырок постоянна, а ток, или скорость разряда, обусловлен относительно



Р и с. 176. Кривые фотоиндуцированного разряда для аморфного селена [260].

——— теоретические кривые; ○ экспериментальные точки.



Р и с. 177. Скорость разряда как функция поверхностного потенциала.

а — кривая, рассчитанная по уравнению (66); *б* — кривая, рассчитанная по уравнению (79). Кривые совмещены при начальной скорости разряда ($V_0 = 700$ в).

медленным процессом освобождения ловушек[1]). В этих условиях поле в области поглощения уменьшается почти до нуля, а рекомбинация увеличивается и становится равной 100%. Рассмотренная теория не учитывает влияния барьеров внутри селенового слоя. Тот факт, что она дает согласие с экспериментальными данными без рассмотрения межмолекулярных барьеров, свидетельствует либо об отсутствии этих барьеров в аморфном селене, либо об их незначительном влиянии на перенос носителей в слое.

2.4.2. МОДЕЛЬ СЛОЕВ ZnO В СВЯЗУЮЩЕМ

В вышеприведенных теориях предполагается, что фототок мгновенно достигает своей максимальной величины при освещении слоя. Для аморфного селена это допущение разумно (см. рис. 103), а ошибка, возникающая за счет этого предположения, незначительна. Однако существует ряд случаев, когда фототок медленно растет со временем, и ошибка, получаемая при пренебрежении этим фактором, становится существенной. Это характерно для большинства фотопроводников в связующем, в частности для слоев ZnO в смоле (см., например, данные работы [307]).

Существует несколько теорий, пытающихся объяснить механизм фотопроводимости и темновой проводимости в слоях ZnO в связующем [297, 328, 329]. Однако эти теории не дают четкой математической модели для объяснения светового разряда. В некоторых работах ставилась цель объяснить механизм разряда такого рода фоточувствительных слоев [306, 330], однако в них затрагивалась общая природа явления и соответствие теории эксперименту не было очевидным[2]). В работе [331] предложена «модель объемного заряда» для объяснения характеристик разряда слоев ZnO при их экспонировании световыми импульсами. Однако эта модель не приводит к экспериментально наблюдаемой зависимости потенциала от времени и, следовательно, не применима к разряду при непрерывном экспонировании слоя.

Формула для светового разряда слоев аморфного селена не может описывать световой спад потенциала для слоев ZnO, поскольку эти слои при освещении имеют относительно меньшую скорость начального разряда[3]). В работе [301] медленный началь-

---

[1]) Явления прилипания носителей в аморфном селене и связанный с ними остаточный потенциал слоя более подробно исследованы в работе [384].— *Прим. ред.*

[2]) Следует отметить, что модель, предложенная в работе [306], может описывать темновой спад потенциала на слоях ZnO, но применительно к фотоспаду не является корректной.— *Прим. ред.*

[3]) На этот экспериментальный факт впервые обратила внимание И. З. Плавина, хотя в ее работе [306] он не получил правильного объяснения.— *Прим. ред.*

ный спад поверхностного заряда связан с процессом десорбции ионов кислорода, который приводит к накоплению нейтральных молекул кислорода на поверхности. Эти молекулы захватывают свободные электроны и замедляют их движение по направлению к положительно заряженной поверхности (подложке). В соответствии с гипотезой, высказанной в [301], при образовании электронно-дырочных пар во время экспонирования дырки движутся к поверхности и нейтрализуют ионы кислорода, которые играют роль электронных ловушек. Таким путем нейтрализация фотовозбужденных электронно-дырочных пар происходит только вначале. Глубина проникновения света в собственной полосе (около 380 *ммк*) для ZnO составляет $\sim$0,1 *мк*. Следовательно, вышеописанный процесс протекает в очень тонком поверхностном слое. В процессе десорбции кислорода скорость аннигиляции электронно-дырочных пар становится меньше и, следовательно, скорость разрядки слоя возрастает.

Хотя описанный выше механизм правдоподобен, те же экспериментальные результаты могут быть объяснены и другим путем. Известно, что ZnO является полупроводником *n*-типа с избытком ионов Zn^+ (или с кислородными вакансиями). Можно предположить, что при отрицательной зарядке поверхности свободные электроны отталкиваются к положительной поверхности, образуя слой, состоящий из неподвижных положительных ионов [297, 301]. Когда при освещении образуются электронно-дырочные пары, эти ионы действуют как центры рекомбинации.

Результатом этих двух механизмов будет суперпозиция зависящего от времени процесса непрямой рекомбинации и зависящего от поля процесса прямой рекомбинации. Таким образом, для случая сильного поглощения света в слое ZnO скорость выхода электронов из тонкого освещенного поверхностного слоя будет ограничиваться двумя процессами рекомбинации. В первый момент после начала освещения прямая рекомбинация минимальна, поскольку сильное электрическое поле, созданное отрицательными поверхностными зарядами, стремится разделить фотовозбужденные электроны и дырки. По мере разрядки слоя и уменьшения поля прямая рекомбинация будет увеличиваться. Скорость непрямой рекомбинации, напротив, максимальна вначале и со временем постепенно уменьшается.

Так как центры непрямой рекомбинации не аннигилируют в процессе рекомбинации, то число таких центров при освещении остается постоянным[1]). Если обозначить плотность этих центров

---

[1]) Это справедливо при условии, если время жизни электронов, захваченных центрами рекомбинации, меньше времени их жизни в свободном состоянии.

через P, то скорость изменения концентрации электронов проводимости в тонком поверхностном слое дается выражением

$$\frac{dn}{dt} = F - \beta P n, \tag{80}$$

где F — число электронов, переходящих в зону проводимости за 1 *сек* под действием падающего света; β — вероятность захвата электрона рекомбинационным центром и n — плотность свободных электронов.

Интегрируя выражение (80) в пределах от $n = 0$ до $n = n$ и от $t = 0$ до $t = t$, получим следующее выражение для плотности электронов проводимости:

$$n = \frac{F}{\beta P}(1 - e^{-\beta P t}). \tag{81}$$

Уравнение (81) дает концентрацию свободных электронов в функции времени освещения слоя. Скорость выхода электронов из поглощающего слоя можно представить в виде

$$J_b = eF(1 - e^{-\beta P t})\, e^{-b'/V}, \tag{82}$$

где $b' = bL/\mu\tau_r V$. Уравнение (82) получено заменой в уравнении (75) eF на eF $[1 - \exp(-\beta P t)]$. Электроны, выходящие из освещенного слоя, захватываются при движении через объем слоя ZnO, а их сдвиг в соответствии с формулой (63) является функцией подвижности, времени жизни носителей и напряженности электрического поля. Если вместо постоянной скорости генерации носителей bJe в соотношение (66) подставить выражение (82), в котором скорость генерации зависит от времени и напряжения, то получится модифицированная формула Гехта. В этом случае скорость разрядки заряженного слоя ZnO при освещении описывается выражением

$$\frac{dV}{dt} = \frac{-eFL}{k\varepsilon_0}(1 - e^{-\beta P t})\, e^{-b'/V} \cdot \frac{V}{a'}(1 - e^{-a'/V}), \tag{83}$$

где $a' = L^2/\mu\tau$; k и L — соответственно диэлектрическая проницаемость и толщина слоя. Уравнение (83) может быть также получено методом, с помощью которого выведена формула (79).

Выражение, описывающее соотношение между поверхностным потенциалом и временем разряда, получается разделением переменных и интегрированием от $V = V_0$ до $V = V$ и от $t = 0$ до $t = t$. Окончательный результат имеет вид

$$\int_{V_0}^{V} \frac{dV}{f(V)} = -\left[\frac{t}{\beta P} + \frac{1}{\beta^2 P^2}(e^{-\beta P t} - 1)\right], \tag{84}$$

где

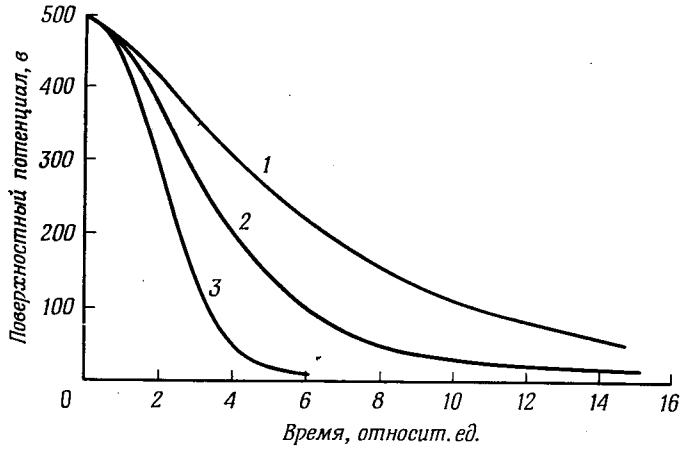
$$f(V) = \frac{eFL}{k\varepsilon_0}\, e^{-b'/V} \cdot \frac{V}{a'}(1 - e^{-a'/V}).$$

Левая часть выражения (84) такая же, как и в (78); эти два решения отличаются только временно́й функцией.

Барьеры между зернами в вышеизложенной теории не принимаются во внимание, так как, по-видимому, роль этих барьеров в слоях из окиси цинка в связующем незначительна. В работе [297] установлено, что частицы ZnO находятся в контакте между собой и количество изолирующей смолы, разделяющей частицы, пренебрежимо мало. В работе [332] найдено, что межгранулярные барьеры в образцах из CdS в связующем не играли существенной роли при напряженностях поля от $2 \cdot 10^3$ *в/см* и выше. Это соответствует поверхностному потенциалу от 2 до 3 *в* при толщине слоя 10—15 *мк*. Таким образом, слой оказывается, по существу, разряжен еще до того, как такие барьеры начали бы влиять на ток разряда.

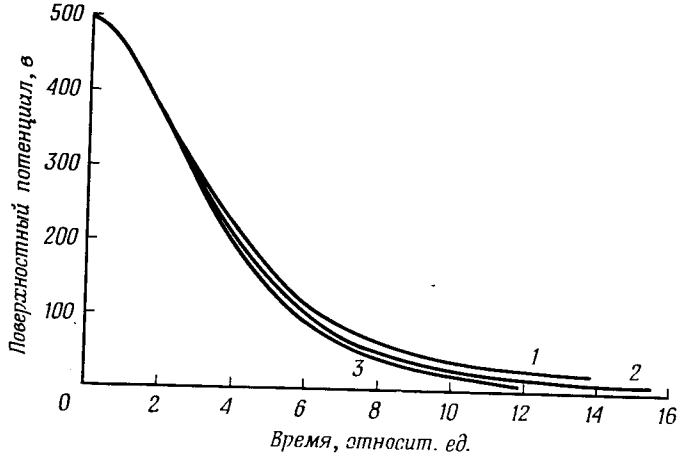
Подстановка соответствующих констант в уравнение (84) дает хорошее согласие с экспериментально наблюдаемой кинетикой светового спада потенциала слоев ZnO в связующем. При этом константы a', b' и βP неизвестны. Две первые константы включают толщину объемного слоя L, глубину проникновения света b, подвижность электронов μ и времена жизни свободных электронов τ и τ_r в соответствующих слоях. Толщина объемного слоя определяется из непосредственных измерений, а глубина проникновения света может быть вычислена из коэффициента оптического поглощения. В соответствии с данными работы [297] время жизни фотоэлектронов в слоях ZnO составляет $\sim 10^{-5}$ *сек*. В работе [298] установлено, что дрейфовая подвижность в слоях ZnO в связующем составляет более 0,25 $см^2/в \cdot сек$. В работе [282] приведена величина подвижности, равная ~ 10 $см^2/в \cdot сек$ для конденсированных слоев ZnO, а для монокристаллов она равна ~ 200 $см^2/в \cdot сек$ [298]. Как и следовало ожидать, подвижность в порошках и в слоях ZnO со связующим много меньше, чем в конденсированных слоях или монокристаллах, что связано с нарушением структуры и присутствием большого количества мелких ловушек. Если мы воспользуемся значениями 10^{-5} *сек* для времени жизни свободных электронов и 0,25 $см^2/в \cdot сек$ для их подвижности, то для a' получим значения 0,4 и 0,9 *в* соответственно для слоев 10 и 15 *мк*. Если взять эти же значения времени жизни и подвижности для слоя поглощающего свет, то для $b' = bL/\mu\tau_r$ получим значения $10^{-3} - 10^{-2}$. С учетом этих численных значений для a' и b' величины $(V/a')[1 - \exp(-a'/V)]$ и $\exp(-b'/V)$ в уравнении (83) оказываются близкими к единице для всех разумных значений V.

Найдено, что значение $a' \approx 500$ *в* согласуется с экспериментальными данными по световому спаду потенциала. Это в свою очередь дает величину $\mu\tau \approx 10^{-9}$. Если эту же величину использовать в качестве $\mu\tau_r$, то значение b' оказывается равным ~ 10 *в*.



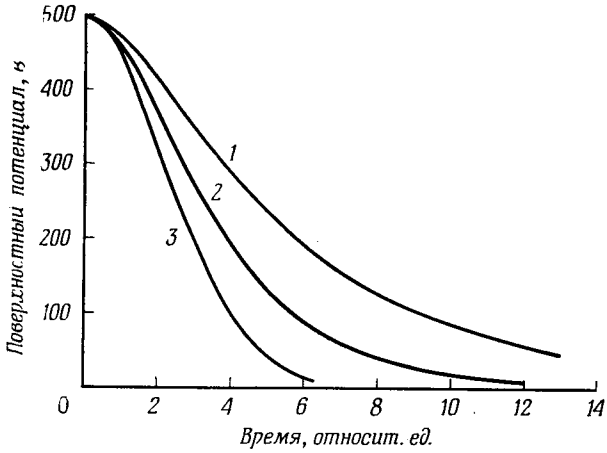
Р и с. 178. Теоретические кривые светового спада потенциала для слоев ZnO в связующем.

Рассчитаны по уравнению (84) при $b' = 0$, $\beta P = 1{,}0$ для трех значений a': 1000 *в* (*1*); 500 *в* (*2*); 200 *в* (*3*).



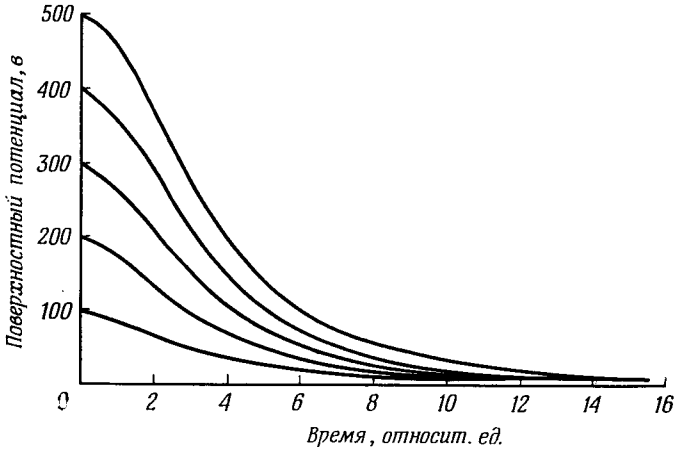
Р и с. 179. Теоретические кривые светового спада потенциала для слоев ZnO в связующем.

Рассчитаны по уравнению (84) при $a' = 500$ *в*, $\beta P = 1{,}0$, а b' принимает следующие значения: 30 *в* (*1*); 10 *в* (*2*); 0 (*3*).



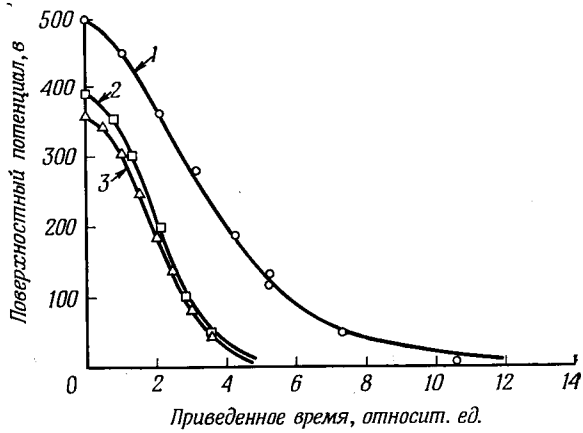
Р и с. 180. Теоретические кривые светового спада потенциала для слоев ZnO в связующем.

Рассчитаны по уравнению (84) при $a' = 500$ *в*, $b' = 10$ *в*, а βP принимает следующие значения: 2,0 (*1*); 1,0 (*2*); 0,1 (*3*).



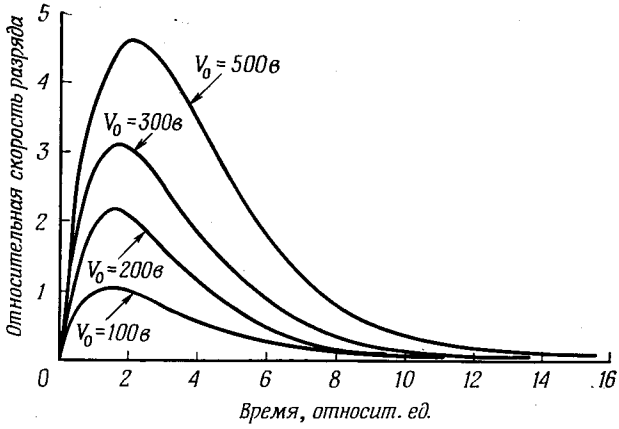
Р и с. 181. Теоретические кривые светового спада потенциала для слоев ZnO в связующем, начинающиеся при различных начальных потенциалах.

Рассчитаны по уравнению (84) при $a' = 500$ *в*, $b' = 10$ *в*, $\beta P = 1{,}0$.



Р и с. 182. Теоретические кривые (сплошные линии) и экспериментальные данные из кривых светового спада потенциала слоев ZnO.

Кривые рассчитаны по уравнению (84): *1*— при $\beta P = 1{,}0$, $V_0 = 500$ *в*; *2*— $\beta P = 0{,}1$, $V_0 = 390$ *в*; *3* —$\beta P = 0{,}1$, $V_0 = 355$ *в*. Для всех трех кривых $a' = 500$ *в*, $b' = 0$. ○ данные из кривых *б*, *в* рис. 153; □ данные из верхней кривой рис. 150; △ данные из верхней кривой рис. 152.



Р и с. 183. Зависимость скорости разряда от времени для слоев ZnO в связующем.

Рассчитаны по уравнению (83) при нескольких значениях начального потенциала V_0 при $a' = 500$ *в*, $b' = 10$ *в*, $\beta P = 1{,}0$.

Однако теоретические кривые лучше соответствуют экспериментальным данным, если b' равна нулю. Это указывает на то, что прямая рекомбинация электронов и дырок не играет существенной роли при фоторазрядке слоев ZnO в связующем [1]).

Значение константы βP нельзя определить из известных характеристик слоев ZnO, но найдено, что значение βP может находиться в пределах от 0,1 до 1,0.

На рис. 178—180 приведены теоретические кривые светового спада потенциала при использовании нескольких значений постоянных a', b' и βP. Эти графики были получены путем численного интегрирования уравнения (84). Рис. 181 иллюстрирует кривые спада, полученные для нескольких значений начального потенциала путем подстановки в соотношение (84) одного набора констант. Сравнение этих кривых с экспериментальными кривыми рис. 150—153 показывает, что формы кривых совершенно идентичны. Кривые спада на рис. 182 построены для сопоставления экспериментальных данных с теоретическими кривыми. Следует отметить, что при приведении кривых к одной и той же временно́й шкале получилось хорошее соответствие.

На рис. 183 показано изменение скорости разряда со временем, полученное из соотношения (83) для нескольких значений начального потенциала. Следует отметить, что эти кривые по форме аналогичны экспериментальным кривым для несенсибилизированных слоев ZnO в связующем (см. рис. 154—157).

2.4.3. ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОТОПРОВОДЯЩИЕ СЛОИ

Опубликованные данные для органических ксерографических слоев при освещении недостаточно полны для разработки четкой описательной модели. Некоторые кривые спада для конденсированных и полимерных органических слоев напоминают кривые спада для аморфного селена [203, 307, 319], тогда как слои из органических веществ в связующем материале [320] обнаруживают кривые спада, наблюдаемые для слоев ZnO в связующем.

Имея в виду характеристики фотопроводимости органических материалов, описанных в общих чертах в работе [322], можно ожидать, что кривые светового спада для органических ксерографических слоев будут соответствовать одной из двух моделей, используемых при выводе формул (78) и (84) для случая слабого поглощения света.

---

[1]) Под прямой рекомбинацией автор понимает не межзонную рекомбинацию, а, как уже указывалось выше, рекомбинацию, зависящую от поля. В этом смысле термин «прямая рекомбинация», используемый автором, не является вполне удачным.— *Прим. ред.*

III. СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ [1])

Хорошо известно, что скрытое электростатическое изображение в ксерографии образуется на поверхности фотопроводящего изолятора. Сначала фотопроводящий слой электризуется в темноте, приобретая однородный поверхностный заряд. После проецирования оптического изображения на поверхности слоя создается распределение зарядов. Пользуясь терминологией черно-белой фотографии, можно сказать, что самые черные области оригинала будут представлены участками с максимальной плотностью заряда, а самые белые — участками с минимальной плотностью заряда.

Если объект является штриховым оригиналом, то, по-видимому, можно предположить, что различие в плотностях зарядов, соответствующих черным и белым участкам, будет довольно большим. В идеальном случае черные участки изображения были бы равномерно заряжены до максимальной плотности заряда, а участки белого фона были бы полностью разряжены. В обычных фотографических способах штриховое изображение для определения разрешения оценивают по тест-объекту, а тоновое изображение — по серой шкале плотностей.

В идеальном случае линии электростатического изображения будут одинаковой ширины, с одинаковой плотностью заряда по всему изображению и с полностью разряженными промежутками между ними. Поперечное сечение изображения в таком случае характеризовалось бы распределением плотности заряда в виде волны прямоугольной формы (рис. 184, *а*). Однако оптические и электрические краевые эффекты исключают получение резкого скачка плотности между заряженными и незаряженными участками. Так как фотопроводящая поверхность не является абсолютным изолятором, можно предположить некоторое расширение изображения на его краях в результате взаимного отталкивания зарядов. Кроме того, поскольку оптические системы не обеспечивают получения идеального изображения, по этой же

[1]) Этот раздел первоначально был опубликован автором в виде статьи, помещенной в журнале *Photogr. Sci. Engr.* [333].

причине можно ожидать некоторую потерю резкости. Для узких линий эти краевые эффекты более заметны. В таких случаях можно предполагать распределение поверхностного заряда в направлении, поперечном линиям, подобным распределению, показанному на рис. 184, *б*. Такое распределение заряда можно представить синусоидальной волновой функцией с амплитудой, определяемой максимальной плотностью поверхностного заряда, и периодичностью, характеризуемой пространственной частотой.

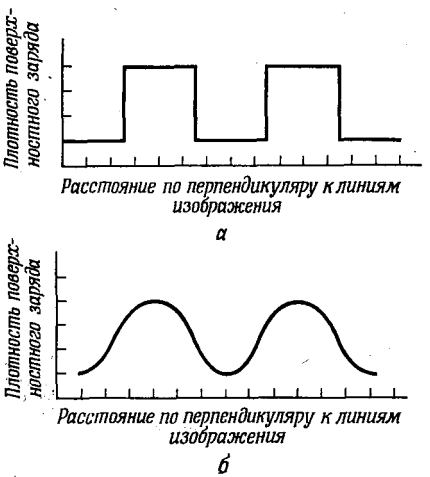


Рис. 184. Распределения поверхностного заряда для линий элекростатического изображения.
а — идеализированная волна прямоугольной формы; *б* — синусоидальная волна.

Таким образом, можно выразить различные характеристики электростатических изображений в виде параметров синусоидальной функции. Тонкие детали могут быть представлены более высокими пространственными частотами, а более грубые структуры — более низкими пространственными частотами. При очень низких пространственных частотах широкие вершины синусоиды могут быть использованы для представления электростатического аналога серой шкалы, в котором изменение амплитуды соответствует ступеням плотности.

Здесь изложение ограничено представлением распределения зарядов в виде простейшей синусоидальной функции, однако можно добиться более точного воспроизведения, если воспользоваться комбинацией гармоник по методу Фурье.

3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Скрытое электростатическое изображение обычно рассматривают как систему поверхностных зарядов, способных притягивать противоположно заряженные частицы к несущей изображение поверхности. Однако обычно не принимается во внимание, что важной характеристикой электростатического изображения являются форма и величина электрического поля в воздушном пространстве у поверхности электрофотослоя. Присутствие поверхностного заряда не обеспечивает безусловного наличия электрического поля в этом пространстве, поскольку такое поле, кроме того, зависит от структуры и свойств слоя, несущего изображение. Когда большая площадь имеет равномерно распределенный поверхностный заряд, электрическое поле в воздушном пространстве наблюдается только около краев заряженной области; в центральной части поле почти полностью находится внутри диэлектрика или фотопроводящего слоя. Таким образом, в центральной части подобной заряженной системы наблюдалось бы лишь незначительное притяжение частичек проявителя. Вообще заметное электрическое поле появляется в воздушном пространстве у поверхности слоя только в том случае, когда имеют место изменения поверхностной плотности заряда.

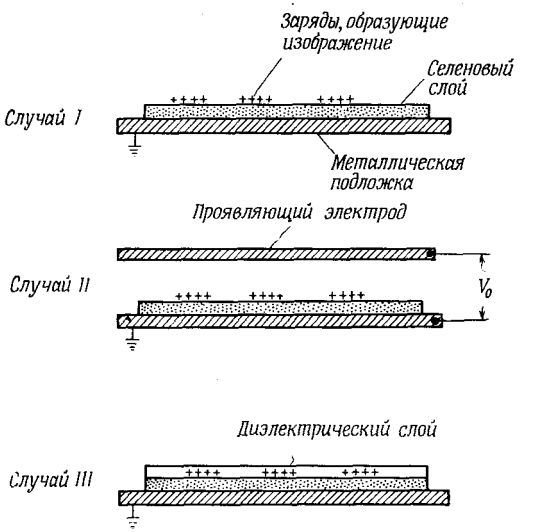
Положение существенно изменяется, когда близко к поверхности слоя подносят электрод, например плоскую металлическую пластину. Поле, созданное поверхностными зарядами, разделяется тогда между фотопроводящим слоем и воздушным зазором, отделяющим слой от электрода. При таких условиях форма и величина электрического поля электростатического изображения могут быть заметно изменены. Изменения могут быть также вызваны наложением внешнего электрического поля на поле скрытого изображения, т. е. напряжения между электродом и подложкой слоя. Степень этих изменений зависит от толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрических слоев (включая воздух), которые образуют электрическую систему.

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Нейгебауер [334], используя «метод изображений», нашел выражения в виде ряда для поля линейных и круговых электростатических изображений. Мацца [335] предложил метод определения поля при синусоидальном распределении зарядов. Этот метод позволяет использовать для анализа поля скрытого изобра-

жения решения уравнения Лапласа, что значительно упрощает математические выкладки и расчеты.

Сначала рассмотрим природу электростатического изображения на ксерографическом слое, т. е. на аморфном селене. Рассмотрим затем действие, оказываемое на поле изображения плоским параллельным электродом, который расположен близко к поверхности изображения, и влияние диэлектрической пленки (или покрытия) на селеновом слое. Эти три случая иллюстрируются рис. 185. Во всех трех случаях электростатическое изображение состоит



Р и с. 185. Три случая расчета поля электростатического изображения.

из серий параллельных линий с синусоидальным изменением заряда в плоскости, перпендикулярной этим линиям. Пусть ось x параллельна линиям скрытого изображения так же, как перпендикулярная ей ось y расположена в плоскости этого изображения; тогда плотность поверхностного заряда σ будет изменяться по следующему закону:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{2}\left(1 + \cos\frac{2\pi}{\lambda}\, y\right), \qquad (85)$$

где σ_0 — максимальная плотность заряда в $к/м^2$ и $1/\lambda$ — пространственная частота линий изображения.

Выводы выражений для напряженности поля, потенциала и для построения силовых линий для такого распределения зарядов представлены в приложениях А и Б в конце данного раздела.

3.2.1. ПОЛЕ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НАД ЭЛЕКТРОФОТОСЛОЕМ

Этот случай представлен схематично на рис. 185 (случай I). На практике он реализуется при репродуцировании штрихового оригинала с использованием каскадного проявления. При таких условиях над большими, заряженными однородно участками поле отсутствует, за исключением пространства у краев изображения, где имеется скачок плотности заряда. Поле будет наблюдаться в воздушном пространстве над изображением только тогда, когда имеет место изменение плотности поверхностного заряда.

Если изображение состоит из серии параллельных линий, на которых плотность поверхностного заряда меняется в соответствии с уравнением (85), нормальная составляющая поля над изображением (см. приложение А на стр. 350) описывается следующим выражением:

$$E_{bz} = \frac{\sigma_0 e^{pl} e^{-pz} \operatorname{sh} pl}{2(\varepsilon_b \operatorname{sh} pl + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl)} \cos py, \tag{86}$$

где z — расстояние по перпендикуляру от проводящей подложки ксерографической пластины; l — толщина фотопроводящего слоя изолятора; ε_a и ε_b — диэлектрические проницаемости соответственно фотопроводящего слоя и воздуха и $p = 2\pi/\lambda$.

Горизонтальная составляющая поля равна

$$E_{by} = \frac{\sigma_0 e^{pl} e^{-pz} \operatorname{sh} pl}{2(\varepsilon_b \operatorname{sh} pl + \varepsilon_a \operatorname{ch} p)} \sin py, \tag{87}$$

и скалярная величина результирующей напряженности поля равна

$$|E_r| = \frac{\sigma_0 e^{pl} e^{-pz} \operatorname{sh} pl}{2(\varepsilon_b \operatorname{sh} pl + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl)}. \tag{88}$$

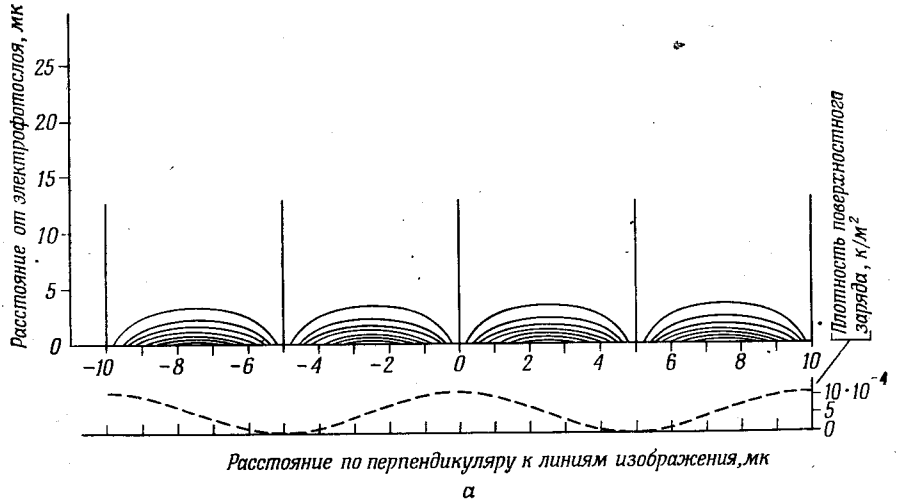
Электрическое поле над изображением может быть представлено в виде «силовых линий» путем построения семейства (см. приложение Б на стр. 354) по уравнению

$$z' = \frac{1}{p} \ln\left(\frac{\sin py}{isp}\right), \tag{89}$$

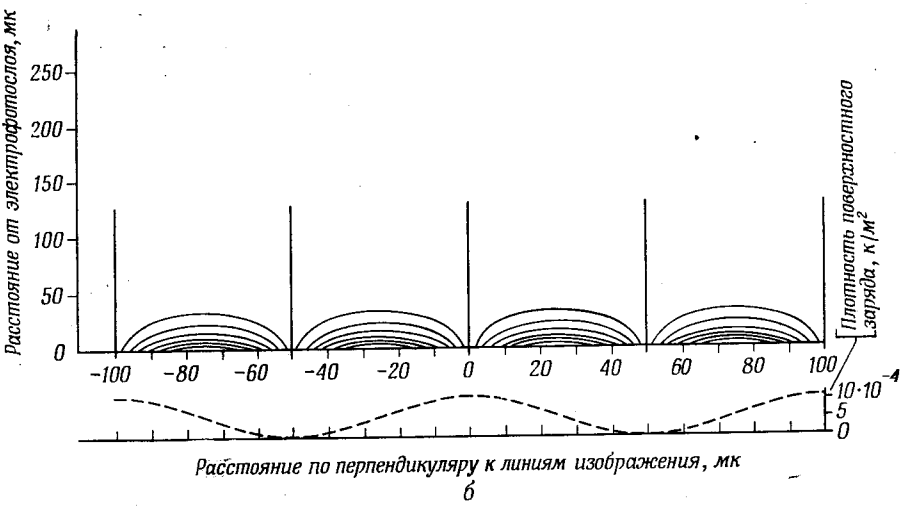
где

$$y \leqslant \frac{1}{p} \arcsin isp.$$

В выражении (89) $z' = z - l$, s — расстояние между последовательными силовыми линиями и i — номер i-й линии при счете от $y = 0$, т. е. $i = 0, 1, 2, 3$ и т. д. Расстояние s обратно пропорционально напряженности поля, и плотность линий характеризует



а



б

Р и с. 186. Силовые линии поля в случае I.

Электростатическое изображение на селеновом слое: 100 *линия/мм* (*а*); 10 *линия/мм* (*б*); $l = 25$ *мк*; $\sigma_0 = 11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м²*; $\lambda = 10$ *мк* (*а*) и 100 *мк* (*б*); $F = 1{,}72$ (*а*) и 17,2 (*б*).

напряженность поля. Таким образом, можно записать $s = F \mid E_r \mid$, где F — постоянная, которая определяет расстояние между соседними силовыми линиями.

Для рассматриваемого случая величина $\mid E_r \mid$ не зависит от y. Поэтому $\mid E_r \mid$ постоянна, когда z постоянно (например, когда $z' = 0$). Если мы выберем некоторую величину для s (при $z' = 0$), то F определится как

$$F = \frac{s\sigma_0 \operatorname{sh} pl}{2(\varepsilon_b \operatorname{sh} pl + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl)} . \qquad (90)$$

Аналогично если мы выберем в качестве произвольной единицы величину F, то из выражения (90) можно определить соответствующее значение s. Уравнение (89) было использовано для построения силовых линий поля, изображенного на рис. 186, *а*. В этом случае $\sigma_0 = 11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м*^{2}, $\varepsilon_a = 55{,}75 \cdot 10^{-12}$ *ф/м*, $\varepsilon_b = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ *ф/м*, $l = 25$ *мк*, $\lambda = 2\pi/p = 10$ *мк* и $F = 1{,}72$. Это значение F будет использовано почти во всех последующих вычислениях с тем, чтобы сохранить приемлемое отношение между плотностью линий и напряженностью поля в различных электрических средах.

На рис. 186, *б* силовые линии отражают конфигурацию поля скрытого изображения, где $\lambda = 100$ *мк* (10 *линия/мм*) и постоянная $F = 17{,}2$. Остальные условия для случая, отображенного на рис. 186, *б*, те же, что и для случая, отображенного на рис. 186, *а*. Следует отметить, что каждая силовая линия на рис. 186, *б* эквивалентна 10 силовым линиям на рис. 186, *а*.

3.2.2. ПОЛЕ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПРОЯВЛЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Этот вариант показан на рис. 185 (случай II). Он соответствует условиям при проявлении тоновых электростатических изображений. Плоский электрод, называемый на практике «проявляющим электродом», является средством для изменения формы и напряженности поля в воздушном зазоре.

В случае синусоидального распределения поверхностного заряда, определяемого по формуле (85), электрическое поле в зазоре между электрофотослоем и плоским электродом (приложение А) имеет нормальную компоненту

$$E_{bz} = -[B_0 + p(B_1 e^{pz} - B_2 e^{-pz}) \cos py] \qquad (91)$$

и тангенциальную компоненту

$$E_{by} = p(B_1 e^{pz} + B_2 e^{-pz}) \sin py, \qquad (92)$$

где

$$B_0 = \frac{\varepsilon_a V_0 - \frac{\sigma_0 l}{2}}{\varepsilon_b l + \varepsilon_a (m-l)}, \tag{93}$$

$$B_1 = \frac{-\sigma_0 e^{-pm} \operatorname{sh} pl}{4p\,[\varepsilon_b \operatorname{sh} pl \operatorname{ch} p(m-l) + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl \operatorname{sh} p(m-l)]}, \tag{94}$$

$$B_2 = -B_1 e^{2pm}. \tag{95}$$

В этих выражениях l, ε_a, ε_b и p имеют те же самые значения, как и в случае I, а $m - l$ является толщиной воздушного зазора между электрофотослоем и плоским электродом (рис. 185, *б*). Поле в воздушном зазоре может быть представлено силовыми линиями путем построения семейства кривых по следующему уравнению (приложение Б):

$$\operatorname{ch} p(m-z) \sin py - \operatorname{ch} p(m-l) \sin py_i = \frac{B_0 p e^{pm}}{2B_2} (y - y_i), \tag{96}$$

где y_i — значение y для кривой i при $z = l$.

Значения y_i ($i = 0, 1, 2, 3$ и т. д.) — координаты начала силовых линий у поверхности электрофотослоя — определяются из соотношения

$$F = B_0 (y_{i+1} - y_i) - \frac{2B_2 e^{-pm}}{p} \operatorname{ch} p(m-l) (\sin py_{i+1} - \sin py_i), \tag{97}$$

где y_{i+1} — величина y на кривой $i+1$ при $z = l$. В выражении (97) F — постоянная, которая, как и в первом случае, определяет расстояние между соседними силовыми линиями.

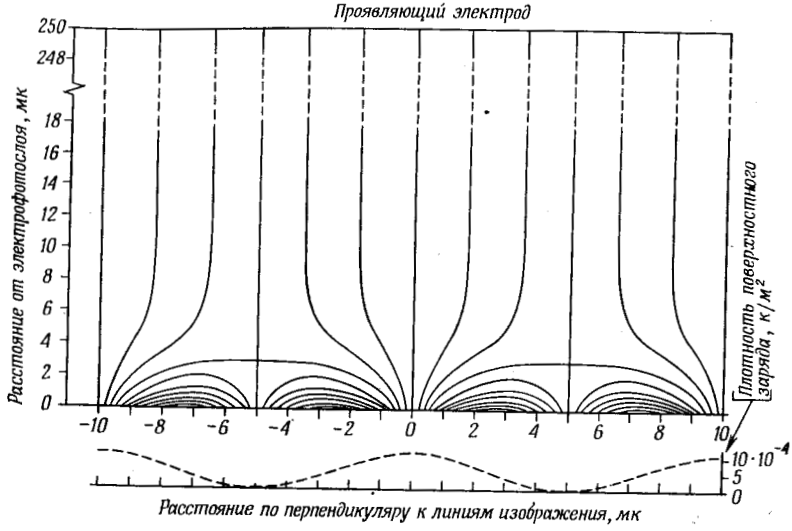
На рис. 187 представлена картина поля, полученная из выражений (96) и (97).

3.2.3. ПОЛЕ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОФОТОСЛОЯ

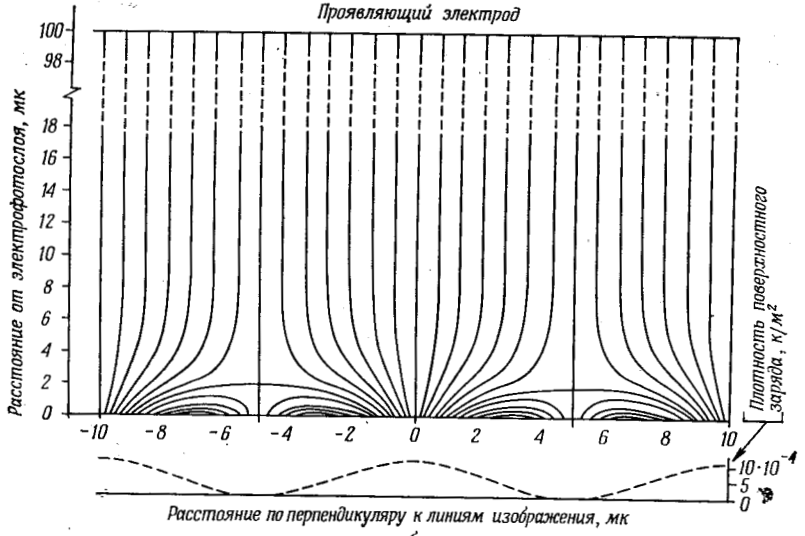
Этот случай показан на рис. 185 (случай III). В ксерографии он осуществляется в двух вариантах:

1. Защитное диэлектрическое покрытие на ксерографической пластине. Такие покрытия предполагаются очень тонкими (не больше нескольких микрон) и могут быть двух типов. При одном варианте это покрытие — очень хороший изолятор, при другом — до некоторой степени проводящий изолятор.

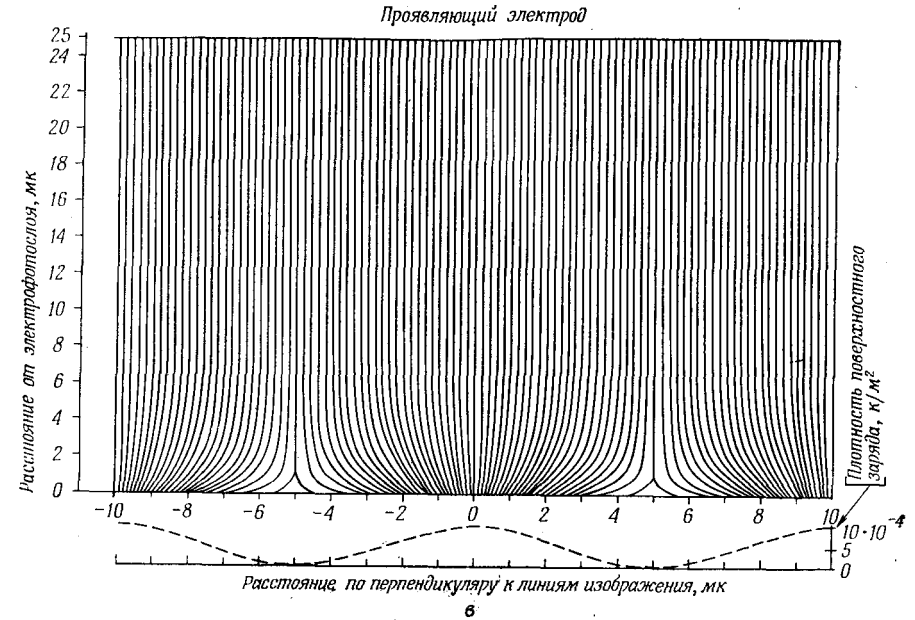
2. Относительно толстый (от 25 до 50 *мк*) лист диэлектрика помещен в контакте с фотопроводящей поверхностью ксерографической пластины. Это может быть прозрачная пленка или ровный лист бумаги. Так как в обоих случаях может оказаться

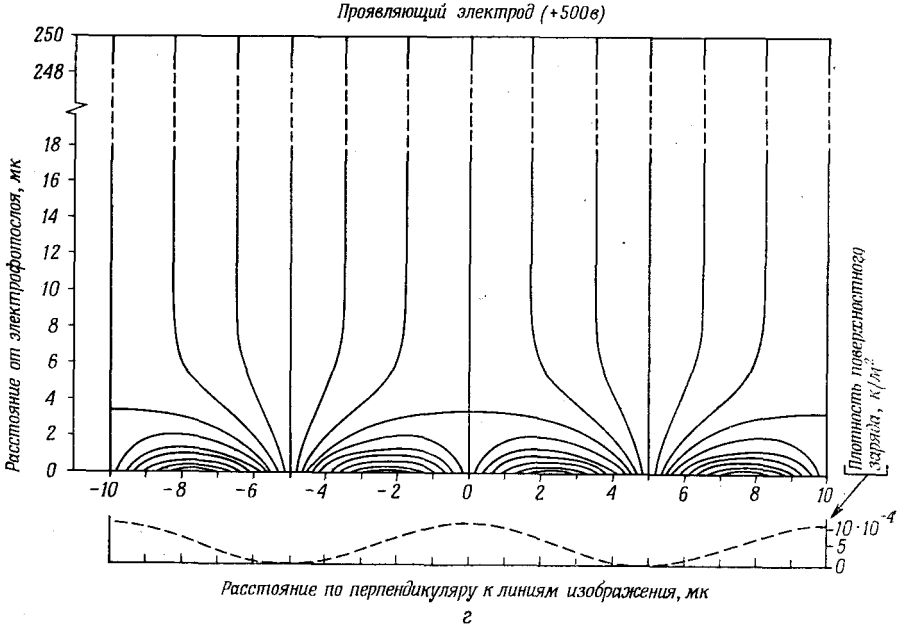

Проявляющий электрод
250
248
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Расстояние от электрофотослоя, мк
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Плотность поверхностного заряда, к/м²
10·10⁻⁴
5
0
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

а


Проявляющий электрод
100
98
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Расстояние от электрофотослоя, мк
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Плотность поверхностного заряда, к/м²
10·10⁻⁴
5
0
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

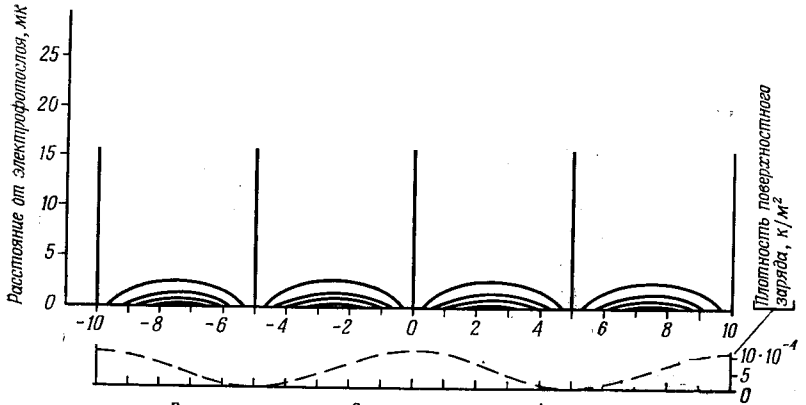
б



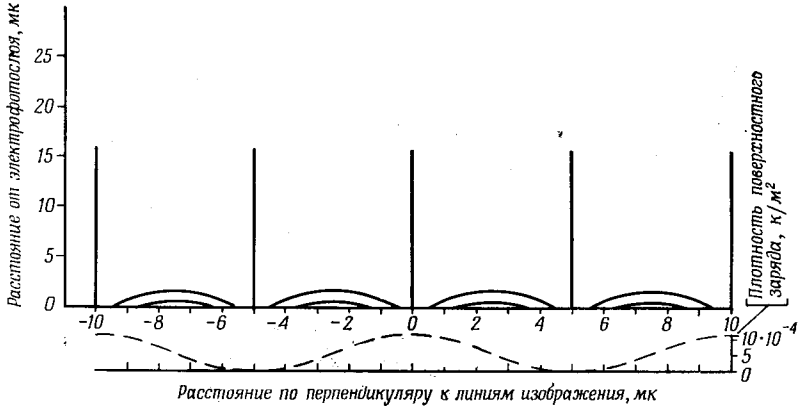


Р и с. 187. Силовые линии поля в случае II.

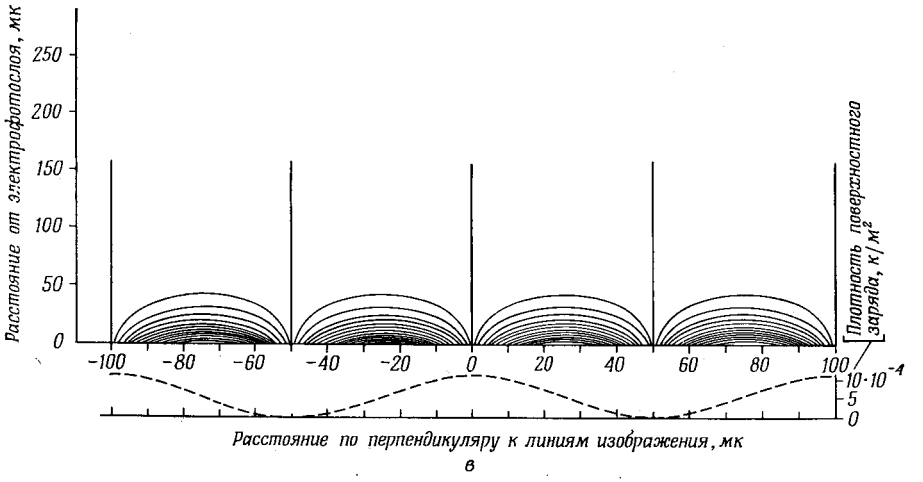
Электростатическое изображение на селеновом слое: 100 *линия/мм*; $l = 25$ *мк*; $\sigma_0 = 11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м²*; $\lambda = 10$ *мк*; $V_0 = 0$ (*а*, *б* и *в*) и $+500$ *в* (*г*); расстояние до электрода 250 *мк* (*а*), 100 *мк* (*б*), 25 *мк* (*в*), 250 *мк* (*г*); $F = 1{,}72$. Наложение поля обратной полярности (*г*) дает изображение, обращенное по отношению к (*а*).


Расстояние от электрофотослоя, мк
25
20
15
10
5
0
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Плотность поверхностного заряда, к/м²
10·10⁻⁴
5
0
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

а


Расстояние от электрофотослоя, мк
25
20
15
10
5
0
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Плотность поверхностного заряда, к/м²
10·10⁻⁴
5
0
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

б



Р и с. 188. Силовые линии поля для случая III, характеризующие влияние диэлектрических слоев, расположенных на поверхности селенового слоя. Толщина диэлектрического слоя равна: 1 *мк* (*а*), 2 *мк* (*б*), 25 *мк* (*в*); электростатическое изображение: 100 *линия/мм* (*а* и *б*), 10 *линия/мм* (*в*); $l = 25$ *мк*; $\sigma_0 = 11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м*²; $\lambda = 10$ *мк* (*а* и *б*), 100 *мк* (*в*); $F = 1{,}72$.

желательным проявить изображение на поверхности диэлектрического слоя, важно определить природу поля у этой поверхности.

Ниже приведены выражения для нормальной и тангенциальной составляющих напряженности поля (приложение А) на поверхности диэлектрического слоя

$$E_{cz} = pC_2 e^{-pz} \cos py \tag{98}$$

и

$$E_{cy} = pC_2 e^{-pz} \sin py. \tag{99}$$

Величина постоянной C_2 дана в приложении А. Результирующее поле у поверхности диэлектрика ($z = m$) тогда равно

$$|E_r| = pC_2 e^{-pm}. \tag{100}$$

Кривые, представляющие поле в виде силовых линий, могут быть определены тем же путем, как и в случае I, на основе выражения (89) с учетом расстояния s, определяемого как

$$s = \frac{F}{pC_2 e^{-pm}}. \tag{101}$$

Для того же значения постоянной ($F = 1{,}72$) были построены поля для нескольких значений толщин диэлектрического слоя и двух пространственных длин волн: $\lambda = 10$ и 100 *мк*. Полученные результаты приведены на рис. 188.

3.2.4. СОПОСТАВЛЕНИЕ СЛУЧАЕВ I, II И III

Изображение электрических полей при помощи силовых линий (см. рис. 186—188 для случаев I, II и III) является удобным средством для изучения природы полей и позволяет видеть, каким образом они могут меняться при изменении электрического состояния окружающей среды. Первоначально предполагалось использовать для всех случаев одно значение постоянной F. Однако полученные в некоторых случаях значения напряженностей поля заставили отказаться от такого подхода из-за большой плотности линий, которая была бы необходима для того, чтобы сохранить постоянное отношение между напряженностью поля и расстоянием между силовыми линиями. В качестве основного значения постоянной F была выбрана величина 1,72. Эта величина бралась в большинстве случаев для линейчатых изображений с частотой 100 *линия/мм* ($\lambda = 10$ *мк*). Для линейчатых изображений с частотой 10 *линия/мм* ($\lambda = 100$ *мк*) в одном случае величина F была увеличена до 17,2. Так, каждая силовая линия на рис. 186, *б* эквивалентна 10 силовым линиям на рис. 186, *а*.

Сравнение рис. 186, *а* и 186, *б* показывает, что влияние электрического поля линейчатого изображения с частотой 10 *линия/мм* распространяется на бóльшую область над поверхностью электрофотослоя, чем влияние поля изображения с частотой 100 *линия/мм*.

Сравнение рис. 186, *а* с рис. 187, *а* и *б* позволяет установить действие проявляющего электрода на поле изображения. Следует отметить, что по мере того, как расстояние между этим электродом и поверхностью электрофотослоя уменьшается, напряженность поля увеличивается (рис. 187, *а* — *в*). Эти рисунки также показывают, что при небольшом удалении от поверхности электрофотослоя поле становится, по существу, однородным по напряженности и по направлению.

На рис. 187, *г* показано, как изображение может быть обращено электрически путем приложения напряжения обратной полярности между электродом и подложкой ксерографической пластины.

На рис. 188 показано действие диэлектрического слоя (например, смоляной пленки), нанесенного на поверхность ксерографической пластины или лежащего над ней. Если сравнить

рис. 188, *а* и *б* с рис. 186, *а*, то можно заметить, что диэлектрическая пленка толщиной всего 1 или 2 *мк* оказывает заметное ослабляющее действие на поле линейчатого изображения с частотой 100 *линия/мм*. Рис. 188, *в* показывает, что поле изображения с частотой 10 *линия/мм* остается еще достаточно сильным даже при диэлектрической пленке толщиной 25 *мк*. Можно видеть, что поле линейчатого изображения с частотой 10 *линия/мм* при пленке диэлектрика толщиной 25 *мк* значительно сильнее, чем поле, образованное линейчатым изображением с частотой 100 *линия/мм* при пленке толщиной 1 *мк* (рис. 188, *а*). Таким образом, можно предположить, что при наличии пленки диэлектрика крупное изображение проявлять легче, чем мелкое.

3.3. РАЗРЕШЕНИЕ ПОЛЯ И АМПЛИТУДА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Электростатические изображения обычно проявляются (превращаются в видимые) благодаря притяжению к поверхности электрофотослоя мелких частиц проявителя [1]). Эффективность и характер проявления зависят от конфигурации связанных с изображением электрических полей и от области, на которую распространяется действие этих полей.

Сравнение рисунков, соответствующих случаям I, II и III, показывает действие «проявляющего электрода» и диэлектрических пленок на характеристики полей электростатических изображений. Эти рисунки показывают также качественно влияние пространственной частоты линейчатого изображения на область действия полей этих изображений.

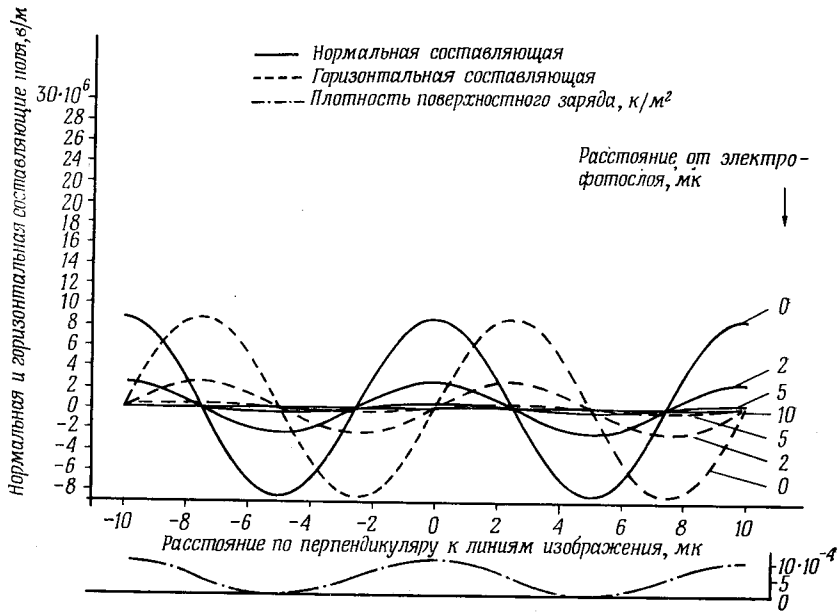
Известно, что на разрешающую способность проявленного электростатического изображения, помимо других факторов, влияет и размер частиц проявляющего состава. Если предположить, что эти частицы достаточно малы, то результирующая разрешающая способность будет зависеть от разрешающей способности электрического поля, связанного с зарядами изображения.

Результирующая плотность и контрастность проявленного изображения зависят от напряженности поля и относительного контраста напряженностей поля над поверхностью электрофотослоя.

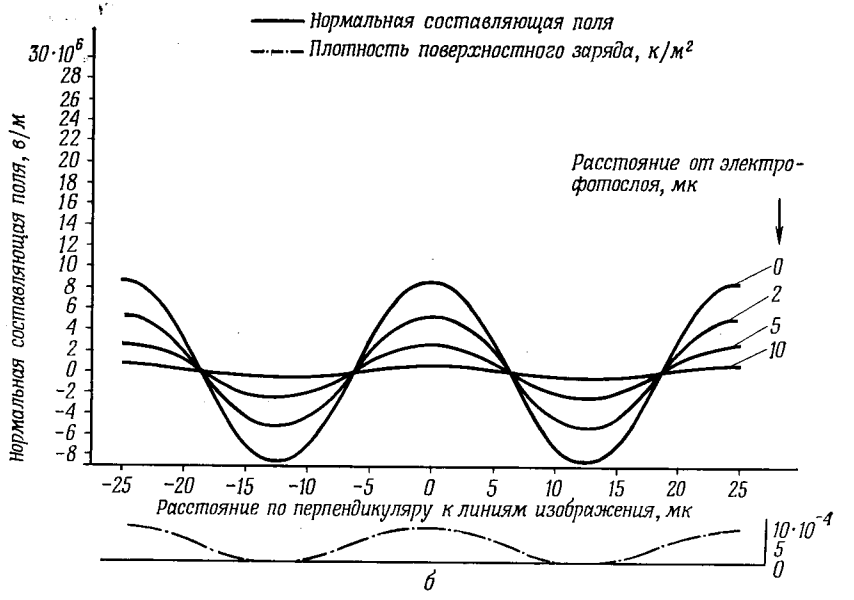
Используя для характеристики электростатических изображений синусоидальное распределение зарядов, можно легко рассчитать разрешающую способность поля на различных уровнях над поверхностью изображения. Амплитуду синусоидальной

---

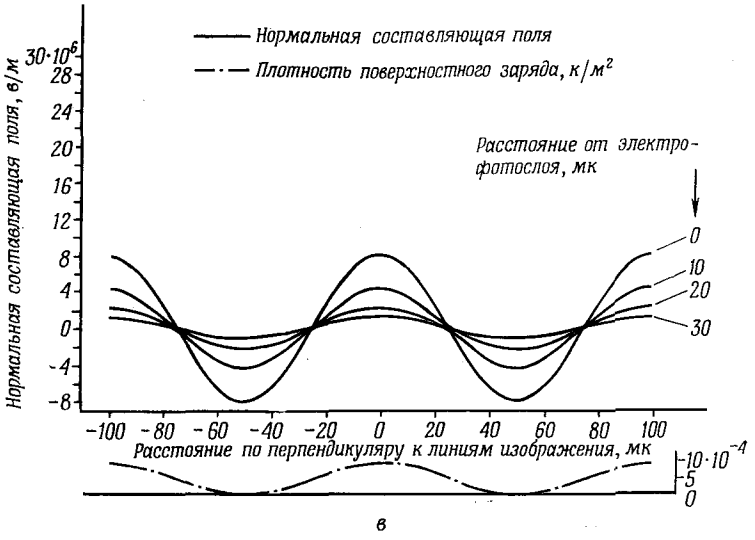
[1]) Исключение составляет проявление нагреванием термопластических пленок [44, 46].


Нормальная составляющая
Горизонтальная составляющая
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Нормальная и горизонтальная составляющие поля, в/м
Расстояние от электрофотослоя, мк
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

а


Нормальная составляющая поля
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Нормальная составляющая поля, в/м
Расстояние от электрофотослоя, мк
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк

б



Р и с . 189. Разрешение нормальной составляющей поля для случая I. Пространственная частота: 100 *линия/мм* (*а*); 40 *линия/мм* (*б*) и 10 *линия/мм* (*в*).

волны в этом случае можно рассматривать как множитель, определяющий контраст. На основе этих расчетов можно получить некоторые очень интересные характеристики электростатических изображений [1]).

Как и в предыдущем разделе, рассматриваемые здесь электростатические изображения состоят из параллельных равномерно расположенных линий с синусоидальным распределением поверхностного заряда, описываемого уравнением (85). Пространственная частота этих линий будет определяться пространственной длиной волны λ, которая может меняться в широком диапазоне. Например, когда $\lambda = 10$ *мк*, пространственная частота составляет 100 *линия/мм*, а когда $\lambda \to \infty$, изображение можно рассматривать как изображение, состоящее из больших равномерно заряженных и незаряженных площадей.

Для упрощения вычислений примем, что изображение представляет собой систему зарядов на поверхности аморфного селена. Следующие параметры рассматриваются постоянными: толщина и диэлектрическая проницаемость селена будут соответственно равны 25 *мк* и 6,3. В тех случаях, когда вводятся диэлектрические пленки, их диэлектрическая проницаемость будет равна 3,0. Мак-

[1]) В дальнейшем в этом разделе автор неправильно отождествляет разрешение и контраст изображения.— *Прим. ред.*

симальная плотность поверхностного заряда σ_0 будет взята равной $11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м*^{2}. Это соответствует потенциалу селенового слоя 500 *в*.

3.3.1. РАЗРЕШЕНИЕ ПОЛЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ I

Используя выражения (86) и (87), мы можем определить нормальную и горизонтальную составляющие напряженности электрического поля в любой точке пространства над поверхностью изображения. В этих уравнениях ось z перпендикулярна плоскости изображения, а ось y параллельна этой плоскости, причем обе оси направлены под прямым углом к линиям изображения. Ось x параллельна линиям изображения и плоскости изображения, но так как в этом направлении величина заряда не меняется, составляющая напряженности поля в направлении оси x будет равна нулю.

Рис. 189 позволяет определить разрешение поля на различных расстояниях от поверхности электрофотослоя для трех различных величин пространственной частоты: 100, 40 и 10 *линия/мм*. Из этого рисунка видно, что разрешение поля у поверхности электрофотослоя существенно не зависит от пространственной частоты линий изображения. Однако при удалении от электрофотослоя влияние частоты становится заметным. Например, при расстоянии только 10 *мк* над поверхностью электрофотослоя при пространственной частоте 100 *линия/мм* разрешения практически нет, при 40 *линия/мм* оно едва заметно, а при 10 *линия/мм* имеется вполне удовлетворительное разрешение.

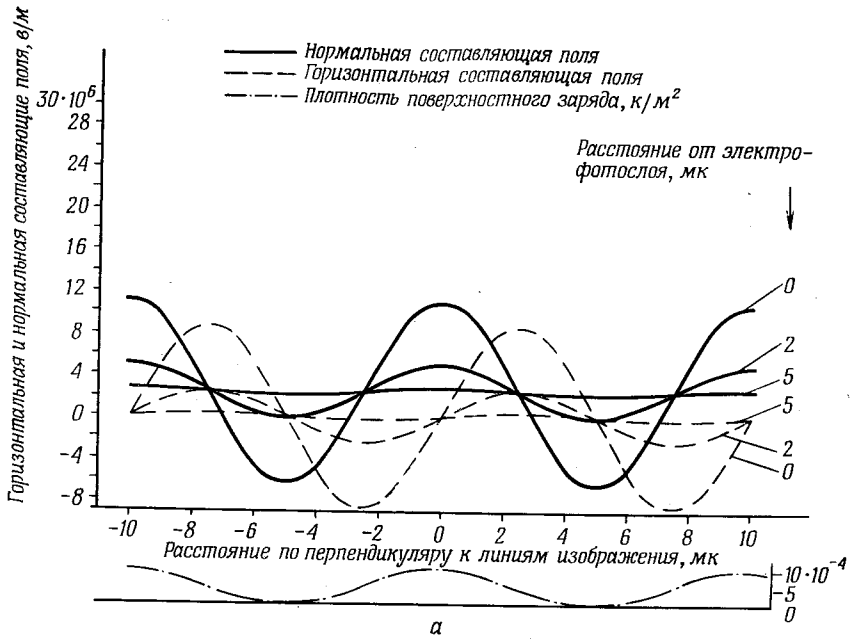
Для случая I величины и амплитуды горизонтальных составляющих напряженности поля равны соответствующим величинам нормальных составляющих, но горизонтальные составляющие сдвинуты по фазе по отношению к нормальным составляющим на 90°.

3.3.2. РАЗРЕШЕНИЕ ПОЛЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ II

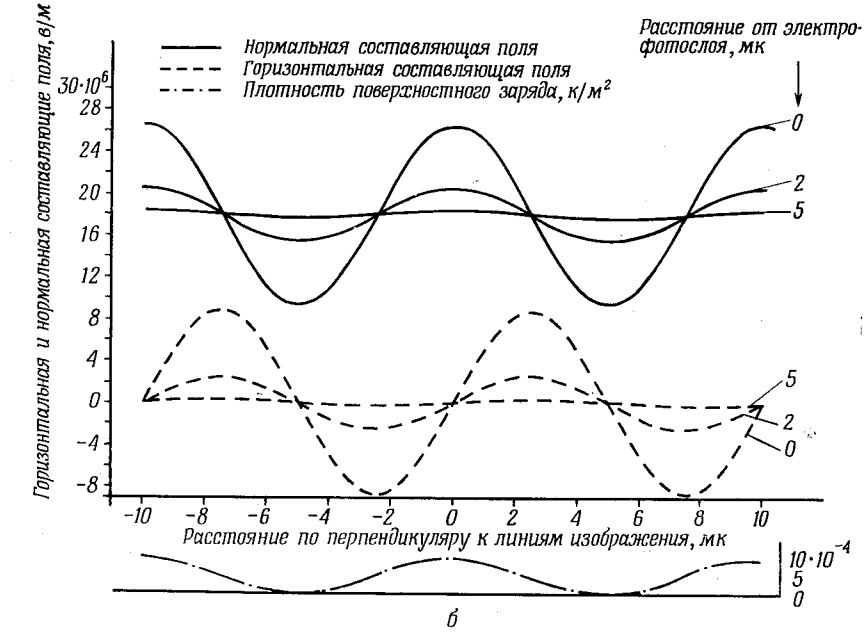
Нормальная и горизонтальная составляющие напряженности поля электростатического изображения для случая II могут быть определены из уравнений (91) и (92).

Разрешение поля для этого случая можно определить по рис. 190 для трех значений пространственной частоты: 100, 40 и 10 *линия/мм* и для двух различных расстояний электрода от поверхности изображения: 10 и 100 *мк*.

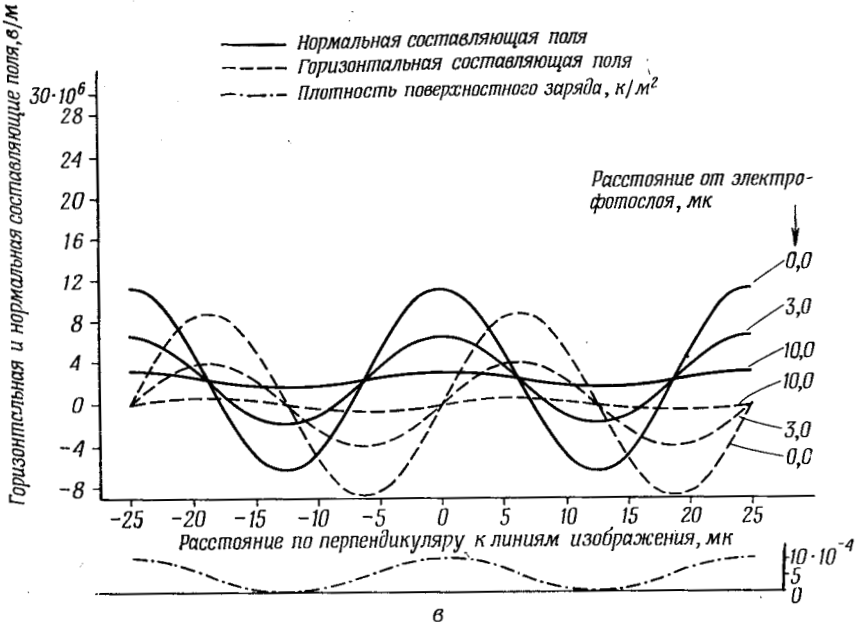
Сравнение рис. 190 (случай II) с рис. 189 (случай I) показывает, что электрод, находящийся на расстоянии 100 *мк* от поверхности изображения, изменяет разрешение поля очень мало. Для случая, когда электрод удален от изображения на 10 *мк*, разрешение нормальной составляющей поля изображения увеличится для низкой пространственной частоты (10 *линия/мм*), в то время


Нормальная составляющая поля
Горизонтальная составляющая поля
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Горизонтальная и нормальная составляющие поля, в/м
30·10⁶
28
24
20
16
12
8
4
0
-4
-8
Расстояние от электрофотослоя, мк
0
2
5
5
2
0
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк
10·10⁻⁴
5
0

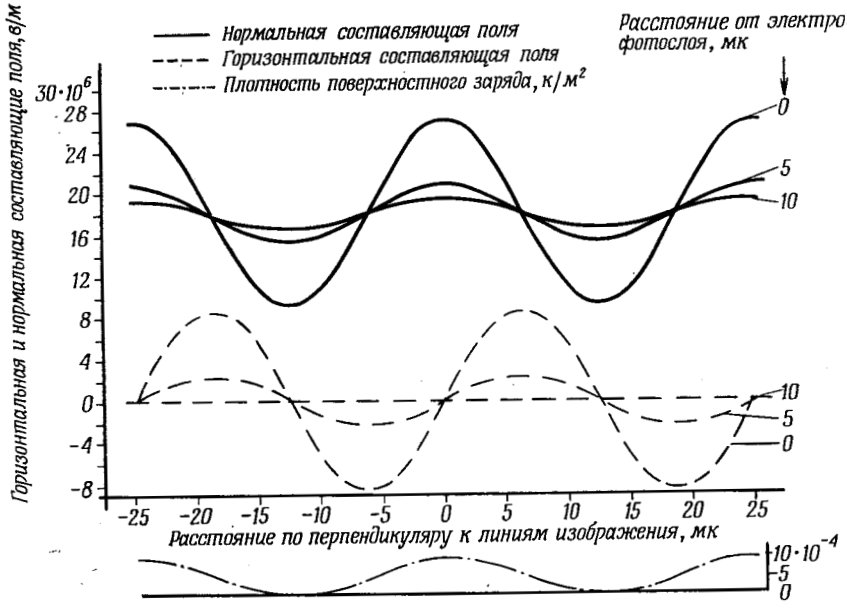
а


Нормальная составляющая поля
Горизонтальная составляющая поля
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Расстояние от электрофотослоя, мк
Горизонтальная и нормальная составляющие поля, в/м
30·10⁶
28
24
20
16
12
8
4
0
-4
-8
0
2
5
5
2
0
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4
6
8
10
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк
10·10⁻⁴
5
0

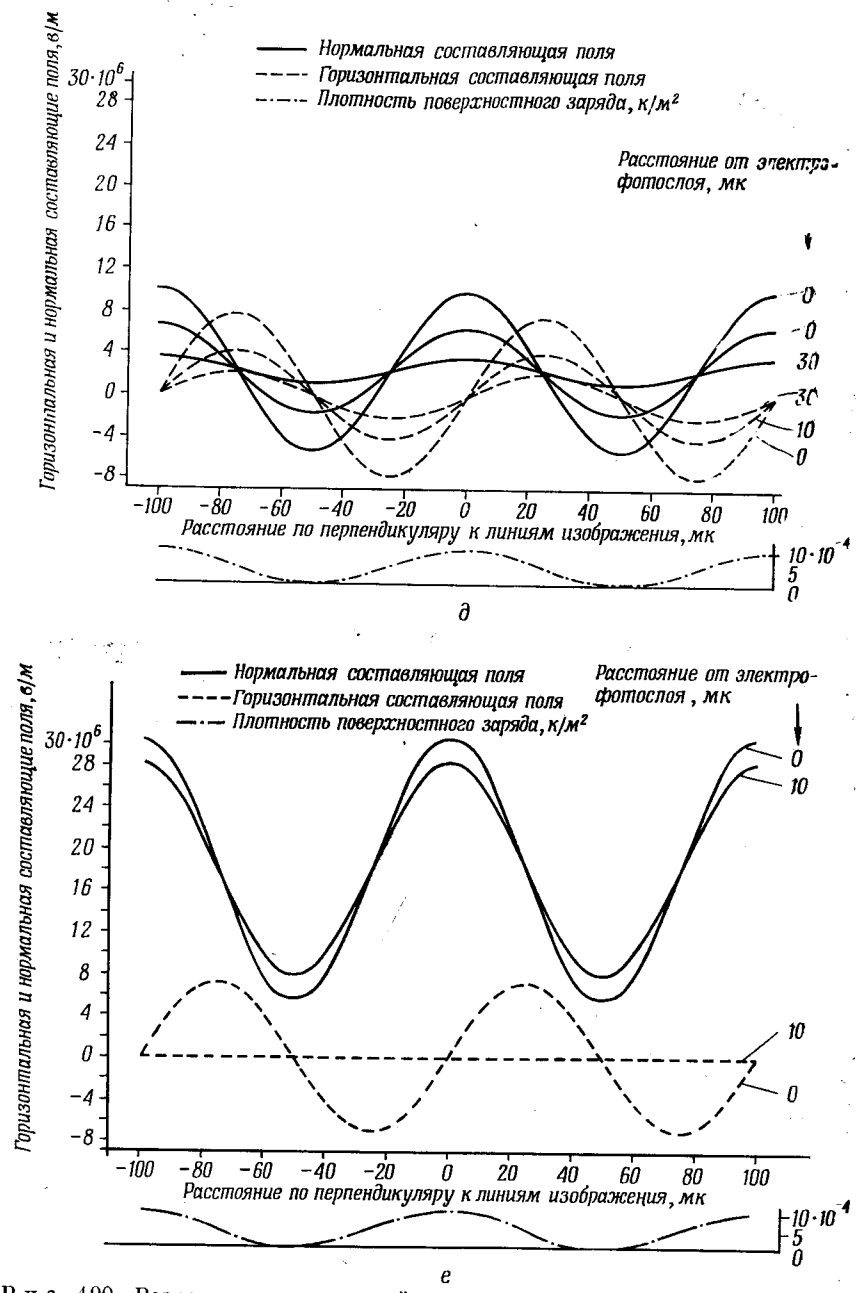
б


Нормальная составляющая поля
Горизонтальная составляющая поля
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Горизонтальная и нормальная составляющие поля, в/м
30·10⁶
28
24
20
16
12
8
4
0
-4
-8
Расстояние от электрофотослоя, мк
0,0
3,0
10,0
10,0
3,0
0,0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк
10·10⁻⁴
5
0

в


Нормальная составляющая поля
Горизонтальная составляющая поля
Плотность поверхностного заряда, к/м²
Горизонтальная и нормальная составляющие поля, в/м
Расстояние от электрофотослоя, мк
30·10⁶
28
24
20
16
12
8
4
0
-4
-8
0
5
10
10
5
0
-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
Расстояние по перпендикуляру к линиям изображения, мк
10·10⁻⁴
5
0

г



Р и с. 190. Разрешение нормальной и горизонтальной составляющих поля для случая II.

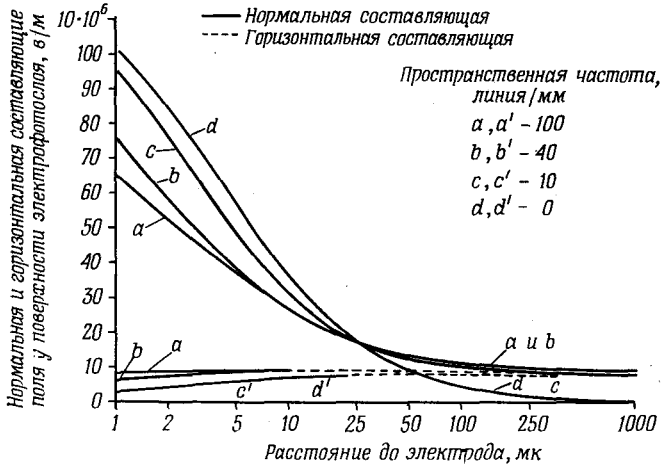
Пространственная частота: 100 *линия/мм* (*а*, *б*); 40 *линия/мм* (*в*, *г*); 10 *линия/мм* (*д*, *е*); расстояние до электрода равно 100 *мк* (*а*, *в*, *д*) и 10 *мк* (*б*, *г*, *е*).

как для больших пространственных частот (40 и 100 *линия/мм*) значительного изменения разрешения при наличии электрода не наблюдается. Разрешение горизонтальной составляющей поля в основном остается неизмененным.

В результате действия электрода напряженность поля нормальной компоненты возрастает. При расстоянии до электрода 100 *мк* это увеличение довольно незначительно, но при расстоянии 10 *мк* оно достаточно велико. Напряженность поля для горизонтальной составляющей заметно не изменяется; она немного уменьшается при расстоянии до электрода 10 *мк* в случае низкой пространственной частоты (10 *линия/мм*). Для двух более высоких частот присутствие электрода не изменяет горизонтальной составляющей.

3.4. ДЕЙСТВИЕ ПРОЯВЛЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА НА ПОЛЕ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Из рис. 190 видно, что нормальная составляющая напряженности поля возрастает в том случае, когда электрод приближается к поверхности электрофотослоя. Горизонтальная составляющая



Р и с. 191. Зависимость напряженности поля у поверхности электрофотослоя от расстояния до электрода.
Толщина слоя селена 25 *мк*.

изменяется весьма незначительно и только слегка уменьшается, когда электрод находится очень близко к электрофотослою.

Из выражений (91) — (95) следует, что напряженность поля над поверхностью электрофотослоя является функцией расстояния

от него до электрода и пространственной частоты линий изображения. В этих уравнениях $m - l$ является расстоянием между поверхностью электрофотослоя и электродом, а величина p пропорциональна пространственной частоте.

Рис. 191 показывает изменение напряженности поля для нормальной и горизонтальной составляющих как функцию расстояния до электрода при нескольких различных значениях пространственной частоты. Построенные здесь поля имеют максимальные значения у поверхности электрофотослоя ($z = l$) при отсутствии приложенного напряжения, т. е. при $V_0 = 0$.

Следует отметить довольно резкое увеличение нормальной составляющей поля в случае приближения электрода к поверхности электрофотослоя. Горизонтальная составляющая остается в основном постоянной, но слегка уменьшается на очень малых расстояниях. На рис. 191 интересным моментом является то, что все кривые для нормальной составляющей пересекаются в точке, соответствующей расстоянию до электрода, равному 25 *мк*. Именно эта толщина селенового слоя использована в приведенных расчетах.

Можно показать, что величина нормальной составляющей напряженности поля на поверхности электрофотослоя не зависит от пространственной частоты, когда расстояние электрода от $m - l$ до селеновой пластины равно толщине селенового слоя l.

Если мы подставим в выражение (91) l вместо $m - l$ при $z = l$ и $V_0 = 0$, то получим

$$E_{bz} = \frac{\frac{\sigma_0}{2}}{\varepsilon_b + \varepsilon_a} (1 + \cos py). \qquad (102)$$

Таким образом, при этих условиях напряженность поля прямо пропорциональна плотности поверхностного заряда, что особенно важно для ксерогрфаической сенситометрии. Это означает, что если при таких условиях проявление проводится до насыщения, то все участки электростатического изображения будут проявлены до оптической плотности [1]), пропорциональной плотности поверхностного заряда каждого участка; кроме того, время проявления не будет критичным параметром, если оно достаточно для проявления изображения до насыщения.

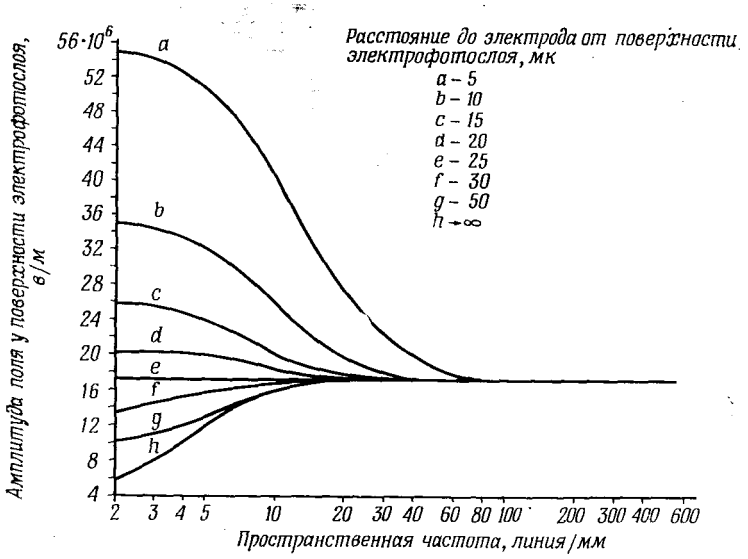
Практически трудно расположить электрод на расстоянии, равном толщине селенового слоя, даже для селеновых покрытий толщиной до 100 *мк*. Предельным расстоянием до электрода при проявлении порошковым облачком считают величину порядка

---

[1]) Точнее, количество проявителя будет пропорционально плотности поверхностного заряда.— *Прим. ред.*

250 *мк*. Однако при жидкостном проявлении на основе электрофореза расстояния до электрода в диапазоне от 25 до 100 *мк* являются практически реальными. Можно предположить, что эти условия можно удовлетворить и при проявлении магнитной кистью.

Амплитуда, или контраст, поля электростатического изображения также изменяется под действием проявляющего электрода. Это отражено на рис. 192, где амплитуда поля представлена как функция пространственной частоты в широком диапазоне расстояний до электрода. Амплитуда здесь берется как разность



Р и с. 192. Влияние пространственной частоты на амплитуду поля изображения при различных расстояниях до электрода.
Толщина слоя селена 25 *мк*.

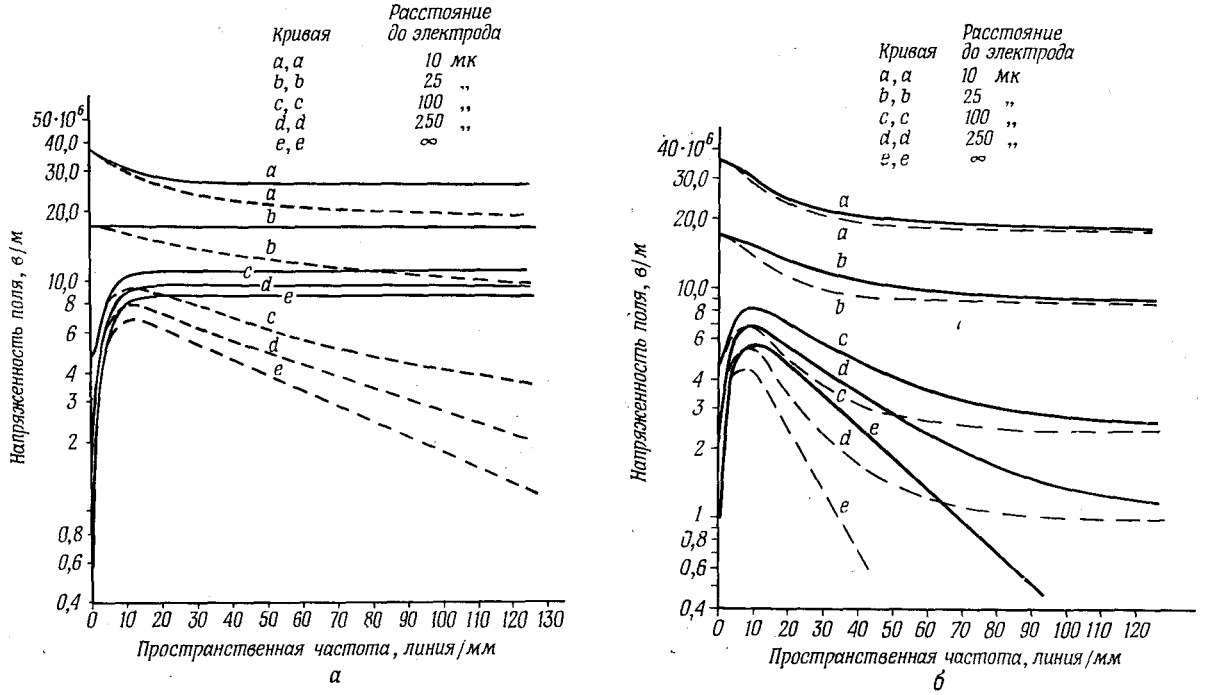
между максимальной и минимальной величинами напряженности. Кривая h на рис. 192 соответствует расстоянию до электрода, стремящемуся к бесконечности, и отвечает условиям для случая I. Для небольших значений пространственной частоты амплитуда поля возрастает по мере того, как уменьшается расстояние до электрода, тогда как для пространственных частот, бóльших 100 *линия/мм*, электрод практически не оказывает влияния на амплитуду поля (для условий, использованных в проведенных выше расчетах). Как и в случае напряженности поля, амплитуда остается постоянной для всех пространственных частот, когда расстояние до электрода равно толщине селенового слоя (см. кри-

вую d, рис. 192). Этому условию, по-видимому, соответствует оптимальное расстояние от электрода до поверхности изображения при проявлении с точки зрения обеспечения линейной пропорциональности между плотностью заряда и количеством осажденных частиц проявителя.

На рис. 191 и 192 указаны максимальные значения напряженности поля и контраста на поверхности электрофотослоя. При проявлении область, на которую распространяется влияние поля изображения, важна для определения того, насколько близко к поверхности изображения должны подходить частицы проявителя, чтобы на них оказали действие силы поля. В случае I, где нет электрода, поле изображения затухает по экспоненте [уравнение (88)] с увеличением расстояния от поверхности электрофотослоя. Для более высоких пространственных частот градиент затухания возрастает. В случае II положение несколько изменяется под действием электрода; происходит увеличение области распространения поля изображения. Этот эффект графически отражен на рис. 193, где напряженность поля изображения дана как функция пространственной частоты для различных расстояний от поверхности электрофотослоя (от бесконечности до 10 *мк*).

Следует отметить, что при пространственной частоте, большей $\sim$20 *линия/мм*, напряженность поля у поверхности электрофотослоя, по существу, не зависит от пространственной частоты (рис. 193, *а*), но уже при расстоянии всего в несколько микрон от поверхности электрофотослоя наблюдается значительное изменение напряженности поля при изменении пространственной частоты (рис. 193, *б*). Важным свойством этих кривых является то, что при удалении электрода на расстояние, превышающее оптимальное (в данном случае 25 *мк*), наблюдается максимум напряженности поля в диапазоне пространственных частот от 7 до 12 *линия/мм*. Случайно эта величина приблизительно совпадает с пределом разрешающей способности человеческого глаза.

Как видно из рис. 193, наличие плоского электрода близ поверхности электрофотослоя увеличивает область, на которую распространяется влияние поля изображения. Это заметно даже при относительно больших расстояниях до электрода. Для пространственной частоты, близкой к нулю, напряженность поля при отсутствии электрода, по существу, равна нулю; однако поле возникает, когда электрод поднесен близко к поверхности электрофотослоя. Между нулевой пространственной частотой и частотой порядка 10 *линия/мм* имеется очень крутой подъем напряженности поля. При более высоких величинах пространственной частоты напряженность поля над изображением уменьшается, но при наличии электрода это уменьшение выражено менее заметно. В общем случае напряженность поля возрастает при



Р и с. 193. Влияние пространственной частоты на поле скрытого изображения при различных расстояниях до электрода.

Сплошные линии: *а* — у поверхности электрофотослоя; *б* — при расстоянии 5 *мк* до поверхности электрофотослоя.
Пунктирные линии: *а* — при расстоянии 2,5 *мк*; *б* — при расстоянии 10 *мк* до поверхности электрофотослоя.
Толщина селенового слоя 25 *мк*; максимальная плотность заряда $10{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м*^{2}.

уменьшении расстояния от электрода до поверхности электрофотослоя.

Область, на которую распространяется влияние поля изображения, играет важную роль в процессе проявления электростатических изображений, особенно там, где требуется получение высокого разрешения. Например, если мы рассматриваем случай I (отсутствие электрода) и предполагаем, что ни одна частица проявителя не подходит к поверхности изображения ближе, чем на 2,5 *мк*, то мы можем сделать следующие выводы: 1) участки электростатического изображения, соответствующие пространственной частоте порядка 10 *линия/мм*, будут проявлены сильно; 2) участки, соответствующие пространственной частоте порядка 100 *линия/мм*, будут проявлены слабо. Это означает, что очень мелкие детали изображения могут быть при этих условиях или совсем потеряны, или проявлены очень слабо; 3) большие заряженные площади не будут проявлены совсем (это будет справедливо даже и в том случае, если частицы проявляющего состава будут находиться в контакте с поверхностью, так как поле в этом случае по существу равно нулю во всех точках над поверхностью изображения).

Частицы проявителя не могут подойти достаточно близко к поверхности изображения для проявления мелких деталей в случаях, когда: 1) фотопроводящая поверхность имеет диэлектрическое покрытие, 2) используется грубая фотопроводящая поверхность и 3) фотопроводящий слой заряжен внутренней поляризацией и заряд находится внутри слоя.

Если мы теперь поместим близ поверхности электрофотослоя плоский электрод и предположим, что пространство между двумя поверхностями содержит аэрозоль с электрически заряженными частицами однородной дисперсности, то скорость, с которой эти частицы будут осаждаться на поверхность электрофотослоя, будет зависеть от напряженности поля во всей области пространства между электродом и поверхностью изображения. Скорость осаждения будет в таком случае пропорциональна интегралу напряженности поля между поверхностью изображения и электродом. Это эквивалентно разности потенциалов между двумя поверхностями, так как

$$V_{b(m,\,l)} = \int_{l}^{m} E_{bz}\, dz. \tag{103}$$

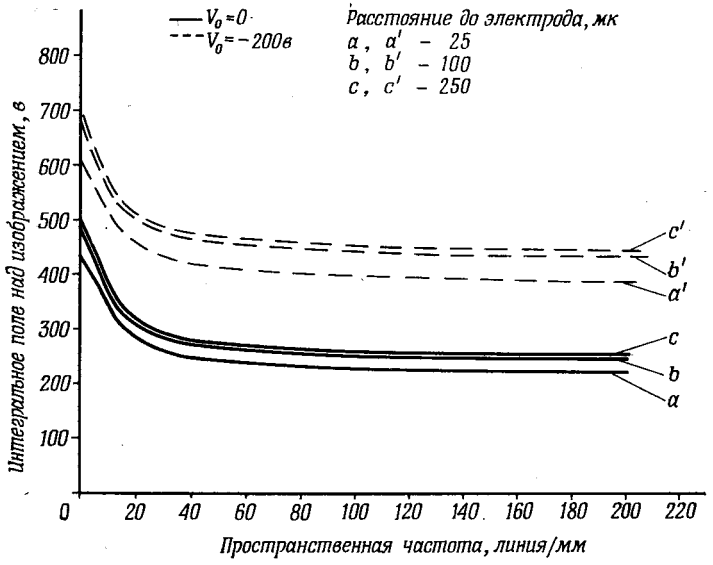
Воспользовавшись выражением для E_{bz} из уравнения (91), получаем

$$V_{b(m,\,l)} = B_0 (m - l) + [B_1 (e^{pm} - e^{pl}) + B_2 (e^{-pm} - e^{-pl})] \cos py. \tag{104}$$

Подставляя в (104) величины B_0, B_1 и B_2 из выражений (93) — (95) и рассматривая только максимальную величину при $\cos py = 1$, это выражение можно записать в следующей форме:

$$V_{b(m,\ l)} = \frac{(\varepsilon_a V_0 - \sigma_0 l/2)\,(m-l)}{\varepsilon_b l + \varepsilon_a (m-l)} - \frac{\sigma_0}{2p\,[\varepsilon_b \operatorname{cth} p\,(m-l) + \varepsilon_a \operatorname{cth} pl]}. \qquad (105)$$

В этом уравнении не учтено действие объемных зарядов, создаваемых заряженными частицами. Однако в аэрозольных проявляющих составах общий заряд, содержащийся в пространстве



Р и с. 194. Зависимость величины интегрального поля от пространственной частоты при различных расстояниях до электрода.
Толщина селенового слоя 25 *мк*; $\sigma_0 = 11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м²*.

между поверхностью электрофотослоя и электродом, весьма мал по сравнению с плотностью поверхностного заряда. Поэтому искажение поля, внесенное этими заряженными частицами, предполагается незначительным. Например, аэрозоль, использованный Бикмором, Леви и Холлом [336], при расстоянии до электрода 250 *мк* образовал бы на поверхности электрофотослоя объемный заряд $5{,}4 \cdot 10^{-8}$ *к/м²*, а максимальная величина заряда изображения, использованная для расчетов в этом разделе, равна $11{,}15 \cdot 10^{-4}$ *к/м²*.

На рис. 194 приведена зависимость напряжения в пространстве между электродом и поверхностью электрофотослоя от про-

странственной частоты электростатического изображения при величине приложенного напряжения 0 и —200 *в*. Предполагая, что скорость осаждения проявителя пропорциональна напряжению, приложенному к зазору между электродом и поверхностью электрофотослоя [336], из анализа рис. 194 можно сделать следующие выводы: 1) скорость осаждения будет максимальной для больших заряженных площадей (пространственная частота $\rightarrow 0$); 2) скорость осаждения несколько возрастает с увеличением расстояния до электрода; 3) приложение вспомогательного напряжения между электродом и подложкой селенового слоя увеличивает общую скорость осаждения проявителя.

Эти данные показывают, что сначала будут проявлены большие сплошные участки и участки изображения с более грубой структурой, в то время как мелкие детали будут проявлены последними.

Таким образом, если процесс проявления аэрозолем остановится после короткого периода, можно предположить, что на плашках и грубых контурах будут наблюдаться большие плотности, а на мелких деталях, вероятно, очень небольшие. Однако если процесс проявления продолжится, плотность на мелких деталях в конечном счете возрастет и в некоторых случаях будет выше, чем на плашках и грубых контурах (см. кривые, изображенные сплошными линиями на рис. 193, *а*).

При величине зазора, превышающей толщину селенового слоя, т. е. при $m-l>l$, проявление до насыщения даст меньшую оптическую плотность для малых пространственных частот (см. сплошные линии *с* и *d* на рис. 193, *а*), однако скорость проявления при этом будет выше (рис. 194). Таким образом, когда величина зазора относительно велика, можно выбрать время проявления так, чтобы получить постоянное отношение оптической плотности к плотности заряда для всей шкалы частот.

Приведенные здесь соображения применимы для жидких электрофоретических проявляющих составов, а также и для аэрозольных проявляющих составов. Приведенные значения полей и напряжений будут в случае жидкого состава несколько меньшими, так как диэлектрическая проницаемость жидкости выше, чем у воздуха. Для жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью ($\sim 2{,}0$) это уменьшение будет невелико.

3.5. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Когда электростатическое изображение представлено в виде синусоидального распределения поверхностного заряда с изменяющейся пространственной частотой, электрическое поле, свя-

занное с этими распределениями, можно рассчитать по уравнению Лапласа.

Когда на электростатическое изображение не влияет «проявляющий электрод», при увеличении расстояния от поверхности электрофотослоя происходит экспоненциальное уменьшение напряженности электрического поля, образованного синусоидальным распределением зарядов. Для более высоких пространственных частот это уменьшение происходит быстрее. В случае изображений, получаемых на ксерографических пластинах при характерных для практики условиях, напряженность поля достигает максимума в диапазоне пространственных частот порядка 7—12 *линия/мм*.

Когда плоский электрод поднесен близко к поверхности электрофотослоя, напряженность поля и область действия этого поля возрастают. Амплитуда, или контраст, поля также увеличивается, за исключением диапазона более высоких пространственных частот. С уменьшением расстояния до электрода эти эффекты усиливаются. Было найдено, что существует оптимальное положение электрода, при котором напряженность поля и его амплитуда остаются постоянными для всего диапазона пространственных частот. Это оптимальное расстояние равно толщине электрофотослоя или слоя диэлектрика, на котором находится скрытое электростатическое изображение. Такое небольшое расстояние до электрода, вероятно, недостижимо на практике во всех случаях, за исключением жидкостного проявления на основе электрофореза и, возможно, проявления магнитной кистью.

В случае применения проявляющего электрода интегральное поле над электростатическим изображением является максимальным для низких пространственных частот и падает при более высоких пространственных частотах, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине. В случае проявления (например, порошковым облачком) теоретически возможно путем правильного выбора длительности этого процесса достигнуть равномерного проявления изображения при зазоре, превышающем оптимальную величину.

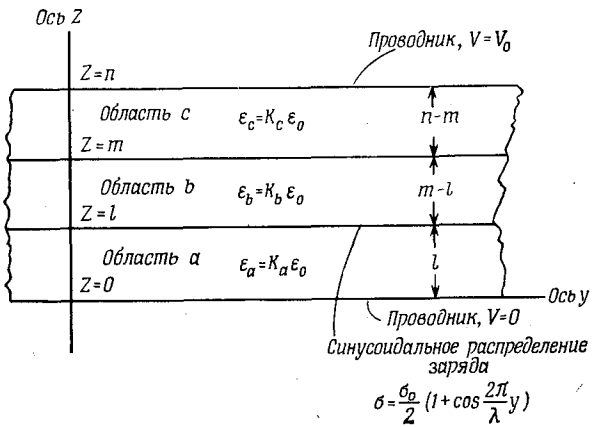
При отсутствии электрода высокая контрастность штриховых деталей изображения достигается в диапазоне промежуточных пространственных частот. При низких пространственных частотах напряженность поля приближается к нулю. Этим объясняется успешное воспроизведение штриховых оригиналов при каскадном проявлении.

Диэлектрический слой над поверхностью электрофотослоя ослабляет поле, и при высоких пространственных частотах поле в воздушном зазоре над диэлектриком практически отсутствует.

3.6. ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ ДЛЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Проведенный здесь расчет следует методу, предложенному Мацца [335].

Схема, соответствующая общему случаю, из которой можно получить все случаи, отраженные на рис. 185, приведена на рис. 195, где три слоя диэлектрика помещены между двумя плоскими электродами. В качестве нижнего слоя диэлектрика взят фотопроводящий изолятор, а один из оставшихся двух слоев



Р и с. 195. Схема распределения диэлектрических сред, используемая для вычисления электрического поля.

может быть воздушной прослойкой. Внешнее напряжение приложено таким образом, что верхний электрод имеет потенциал V_0, а потенциал нижнего электрода равен нулю.

Заряды находятся на поверхности раздела областей a и b. Плотность этого заряда распределена по закону $\sigma = (\sigma_0/2)(1 + \cos py)$, где $p = 2\pi/\lambda$, а $1/\lambda$ является пространственной частотой распределения заряда.

Задача определения поля сводится к нахождению решений уравнения Лапласа $\nabla^2 V = 0$ в плоскости yz (в направлении оси x поле неизменно), удовлетворяющих соответствующим граничным условиям на поверхностях раздела диэлектриков. Предполагая, что диэлектрики имеют линейные характеристики, изотропны и гомогенны, получим следующие решения уравнения Лапласа

для трех указанных областей [337]:

$$\text{Область } a\text{: } V_a = A + A_0 z + (A_1 e^{pz} + A_2 e^{-pz}) \cos py, \tag{1a}$$

$$\text{Область } b\text{: } V_b = B + B_0 z + (B_1 e^{pz} + B_2 e^{-pz}) \cos py, \tag{2a}$$

$$\text{Область } c\text{: } V_c = C + C_0 z + (C_1 e^{pz} + C_2 e^{-pz}) \cos py, \tag{3a}$$

где V_a, V_b и V_c — потенциалы соответственно в областях a, b и c, а все A, B и C — постоянные.

Для линейных диэлектриков гармоническая часть решения может быть рассмотрена отдельно от остальной части решения, а полное решение можно получить сложением этих частей.

Рассмотрим сначала гармонические члены:

$$V_{aH} = (A_1 e^{pz} + A_2 e^{-pz}) \cos py,$$
$$V_{bH} = (B_1 e^{pz} + B_2 e^{-pz}) \cos py,$$
$$V_{cH} = (C_1 e^{pz} + C_2 e^{-pz}) \cos py.$$

Необходимо учесть следующие граничные условия:

I. Поскольку потенциал нижнего электрода постоянен и равен нулю, т. е.

$$V_{aH} = 0 \quad \text{при} \quad z = 0, \text{ то } A_1 + A_2 = 0.$$

II. Исходя из неразрывности потенциала на границе областей a и b, можем записать

$$V_{aH} = V_{bH} \quad \text{при} \quad z = l,$$
$$A_1 e^{pl} + A_2 e^{-pl} = B_1 e^{pl} + B_2 e^{-pl}$$

и, используя I, получим

$$A_1 (e^{pl} - e^{-pl}) = B_1 e^{pl} + B_2 e^{-pl} = A_1 2 \operatorname{sh} pl.$$

III. Снова, исходя из неразрывности потенциала на границе областей b и c, имеем

$$V_{bH} = V_{cH} \quad \text{при} \quad z = m,$$
$$B_1 e^{pm} + B_2 e^{-pm} = C_1 e^{pm} + C_2 e^{-pm}.$$

IV. Так как потенциал верхнего электрода постоянен и равен V_0, то гармоническая часть равна нулю:

$$V_{cH} = 0 \quad \text{при} \quad z = n,$$
$$C_1 e^{pn} + C_2 e^{-pn} = 0.$$

V. Изменение нормальной составляющей вектора электрической индукции на границе раздела диэлектриков равно плот-

ности поверхностного заряда на этой границе:

$$D_{bNH} - D_{aNH} = \frac{\sigma_0}{2} \cos py \quad \text{при} \quad z = l,$$

$$\varepsilon_b \left(-\frac{\partial V_{bH}}{\partial z} \right) - \varepsilon_a \left(-\frac{\partial V_{aH}}{\partial z} \right) = \frac{\sigma_0}{2} \cos py,$$

$$-\varepsilon_b (B_1 p e^{pl} - B_2 p e^{-pl}) + \varepsilon_a (A_1 p e^{pl} - A_2 p e^{-pl}) = \frac{\sigma_0}{2};$$

учитывая, что $A_2 = -A_1$, получим

$$-\varepsilon_b p (B_1 e^{pl} - B_2 e^{-pl}) + \varepsilon_a p A_1 2 \operatorname{ch} pl = \frac{\sigma_0}{2}.$$

VI. При отсутствии свободных зарядов на границе раздела нормальная составляющая вектора электрической индукции непрерывна и

$$D_{cNH} - D_{bNH} = 0 \quad \text{при} \quad z = m,$$

$$\varepsilon_c \left(-\frac{\partial V_{cH}}{\partial z} \right) - \varepsilon_b \left(-\frac{\partial V_{bH}}{\partial z} \right) = 0,$$

$$-\varepsilon_c (C_1 p e^{pm} - C_2 p e^{-pm}) + \varepsilon_b (B_1 p e^{pm} - B_2 p e^{-pm}) = 0.$$

Приведенные выше уравнения могут быть решены относительно значений постоянных величин в каждой области. В области b они равны

$$B_1 = \frac{p\sigma_0 (\operatorname{sh} pl) [(\varepsilon_c + \varepsilon_b) + (\varepsilon_c - \varepsilon_b) e^{2p(n-m)}]}{D}, \tag{4a}$$

$$-B_2 = \frac{p\sigma_0 (\operatorname{sh} pl) [(\varepsilon_b + \varepsilon_c) e^{2pn} + (\varepsilon_c - \varepsilon_b) e^{2pm}]}{D}, \tag{5a}$$

где

$$\begin{aligned} D = &-4\varepsilon_b^2 p^2 \operatorname{sh} pl (e^{2pn-pm} - e^{pm}) \operatorname{sh} p(m-l) - \\ &-4\varepsilon_b \varepsilon_c p^2 \operatorname{sh} pl (e^{2pn-pm} + e^{pm}) \operatorname{ch} p(m-l) - \\ &-4\varepsilon_a \varepsilon_b p^2 \operatorname{ch} pl (e^{2pn-pm} - e^{pm}) \operatorname{ch} p(m-l) - \\ &-4\varepsilon_a \varepsilon_c p^2 \operatorname{ch} pl (e^{2pn-pm} + e^{pm}) \operatorname{sh} p(m-l). \end{aligned} \tag{6a}$$

Постоянные составляющие полей могут быть получены из линейных членов

$$V_{aK} = A + A_0 z,$$
$$V_{bK} = B + B_0 z,$$
$$V_{cK} = C + C_0 z.$$

Применим граничные условия к этой части решения:

I. $V_{aK} = 0$ при $z = 0$, следовательно, $A = 0$;

II. $V_{aK} = V_{bK}$ при $z = l$, следовательно, $A_0 l = B + B_0 l$;

III. $V_{bK} = V_{cK}$ при $z = m$, следовательно, $B + B_0 m = C + C_0 m$;

IV. $V_{cK} = V_0$ при $z = n$, следовательно, $C + C_0 n = V_0$;

V. $D_{bNK} - D_{aNK} = \frac{\sigma_0}{2}$ при $z = l$, следовательно, $-\varepsilon_b B_0 + \varepsilon_a A_0 = \frac{\sigma_0}{2}$;

VI. $D_{cNK} - D_{bNK} = 0$ при $z = m$, следовательно, $-\varepsilon_c C_0 + \varepsilon_b B_0 = 0$.

Эти уравнения могут быть решены относительно значений постоянных величин. В области b последние равны

$$B = l\left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} - 1\right) B_0 + \frac{l}{\varepsilon_a}\frac{\sigma_0}{2}, \tag{7a}$$

$$B_0 = \frac{\varepsilon_a \varepsilon_c V_0 - l\varepsilon_c \frac{\sigma_0}{2}}{\varepsilon_c (\varepsilon_b - \varepsilon_a)\, l + \varepsilon_a (\varepsilon_c - \varepsilon_b)\, m + \varepsilon_a \varepsilon_b n}. \tag{8a}$$

Нормальная составляющая поля в области b равна

$$E_{bz} = -\frac{\partial V_b}{\partial z} = -[B_0 + p(B_1 e^{pz} - B_2 e^{-pz}) \cos py], \tag{9a}$$

а горизонтальная составляющая

$$E_{by} = -\frac{\partial V_b}{\partial y} = p(B_1 e^{pz} + B_2 e^{-pz}) \sin py. \tag{10a}$$

Подобные выражения можно получить для областей a и c.

Полученные общие выражения для потенциалов и полей можно применить для каждого из случаев, отраженных на рис. 185. При этом мы будем рассматривать лишь интересующие нас области.

Случай I (область b).

Здесь $n = m = \infty$ и $\varepsilon_c = \varepsilon_b$, откуда

$$B = \sigma_0 l / 2\varepsilon_a,$$

$$B_0 = 0,$$

$$B_1 = 0,$$

$$B_2 = \frac{\sigma_0 e^{pl} \operatorname{sh} pl}{2p(\varepsilon_a \operatorname{sh} pl + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl)}.$$

Случай II (область b).

Здесь $n = m$ и $\varepsilon_c = \varepsilon_b$, откуда

$$B = \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a} - 1\right) B_0 l + \frac{\sigma_0 l}{2\varepsilon_a},$$

$$B_0 = \frac{\varepsilon_a V_0 - \sigma_0 l/2}{\varepsilon_b l + \varepsilon_a (m - l)},$$

$$B_1 = \frac{-\sigma_0 e^{-pm} \operatorname{sh} pl}{4p[\varepsilon_b \operatorname{sh} pl \operatorname{ch} p(m-l) + \varepsilon_a \operatorname{ch} pl \operatorname{sh} p(m-l)]},$$

$$B_2 = -B_1 e^{2pm}.$$

Случай III (область c).

Здесь $n=\infty$, и, исходя из граничных условий, получаем

$$C=\frac{\sigma_0 l}{2\varepsilon_a},$$

$$C_0=0,$$

$$C_1=0,$$

$$C_2=\frac{\varepsilon_b\sigma_0 e^{pl}}{\left\{\begin{array}{c} p\varepsilon_a \operatorname{cth} pl\,[(\varepsilon_b-\varepsilon_c)\,e^{-2p(m-l)}+ \\ +(\varepsilon_b+\varepsilon_c)]-p\varepsilon_b\,[(\varepsilon_b-\varepsilon_c)\,e^{-2p(m-l)}-(\varepsilon_b+\varepsilon_c)] \end{array}\right\}}.$$

3.7. ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ

Принято графически представлять поля силовыми линиями. При этом линии прослеживают направление поля, а густота линий пропорциональна напряженности поля. Силовые линии определяются дифференциальным уравнением

$$\frac{dz}{dy}=\frac{E_{bz}}{E_{by}}. \tag{1б}$$

Интегрируя в пределах от y_i до y, можно написать [1])

$$z=\int_{y_i}^{y}\frac{E_{bz}}{E_{by}}\,dy, \tag{2б}$$

где y_i — значение y на i-й кривой при $z=l$. Полученное в результате интегрирования (2б) уравнение может быть использовано для построения силовых линий, исходящих из точек $(y_i,\ z=l)$. Если семейство кривых должно характеризовать как плотность потока, так и направление поля, то величины y_i должны быть выбраны так, чтобы расстояния между линиями были обратно пропорциональны напряженности поля. Если каждая линия представляет поток с плотностью F, то расстояние между кривыми i и $i+1$ равно

$$F=\int_{y_i}^{y_{i+1}}E_{bz}\,dy, \tag{3б}$$

где $i=0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$.

[1]) Только при условии, что отношение E_{bz}/E_{by} не зависит от z. — *Прим. ред.*

Случай I (область b).

Здесь $E_{bz}/E_{by} = \operatorname{ctg} py$ и, следовательно, уравнение (2б) принимает вид

$$z' = \frac{1}{p} \ln \left(\frac{\sin py}{\sin py_i} \right) . \qquad (4б)$$

где $z' = z - l$.

Расстояние между соседними кривыми получим из уравнения (3б)

$$F = B_2 e^{-pl} (\sin py_{i+1} - \sin py_i). \qquad (5б)$$

Так как отношение $F/B_2 e^{-pl}$ постоянно, то и разность синусов с аргументами py_{i+1} и py_i при всех i постоянна. Следовательно,

$$\sin py_i = isp, \qquad (6б)$$

где $s = F/|E_r| = F/pB_2 e^{-pl}$, $|E_r|$ является скалярной величиной результирующего поля при $z = l$.

Случай II (область b).

Вычисление интеграла (2б) для этого случая дает следующее соотношение между z и y:

$$\operatorname{ch} p(m - z) \sin py - \operatorname{ch} p(m - l) \sin py_i = \frac{B_0 p e^{pm}}{2B_2} (y - y_i). \qquad (7б)$$

Это уравнение определяет семейство кривых, представляющих собой силовые линии.

Вычисление интеграла (3б) для этого случая дает выражение

$$F = B_0 (y_{i+1} - y_i) - \frac{2B_2 e^{-pm}}{p} \operatorname{ch} p(m - l) (\sin py_{i+1} - \sin py_i), \qquad (8б)$$

из которого могут быть определены значения y_i.

Случай III (область c).

Этот случай подобен случаю I.

Интегрирование выражения (2б) дает уравнение такого же вида, как и (4б).

Однако значения y_i будут другими. В этом случае эти значения определяются из соотношения

$$F = C_2 e^{-pl} (\sin py_{i+1} - \sin py_i). \qquad (9б)$$

IV. ПЕРЕНОС СКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ

В гл. VI ч. I были описаны различные способы переноса скрытых электростатических изображений. Техника переноса во всех этих случаях разная, но в нее обязательно входит либо перемещение электрических зарядов через воздушный зазор, либо прямой перенос зарядов при отсутствии воздушного зазора. В данной главе рассматриваются явления, лежащие в основе этих процессов.

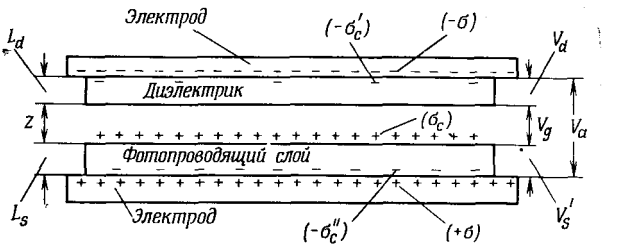
В недавно опубликованной работе [338] излагается теория механизмов переноса заряда между двумя диэлектрическими поверхностями под действием электрического разряда в газовой среде, возникающего в результате ионизации, автоэлектронной эмиссии или обоих этих явлений одновременно. В указанной работе явление переноса зарядов через разделяющий две диэлектрические поверхности воздушный промежуток шириной более 8 *мк* описывается с помощью кривой Пашена. Для доказательства теоретической возможности переноса заряда при очень малых воздушных зазорах (порядка нескольких микрон) был предложен измененный вариант кривой Пашена. Такие малые зазоры встречаются в тех случаях, когда поверхности практически находятся в контакте. Было установлено также, что заряды могут переноситься непосредственно с одной диэлектрической поверхности на другую, когда эти поверхности настолько плотно прилегают друг к другу, что между ними нет воздушного зазора (например, в случае двух пленок, находящихся под давлением).

4.1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

На рис. 196 представлена схема процесса электростатического переноса изображения. При совмещении диэлектрической пленки с электрофотографической пластиной толщина разделяющей их газовой прослойки уменьшается, и в момент достижения практически полного контакта между поверхностями эта прослойка принимает вид очень тонкой пленки.

С помощью давления воздушная прослойка может быть полностью удалена. При разделении поверхностей толщина воздушного слоя постепенно увеличивается.

Если фотопроводящий слой изолятора (см. рис. 196) сначала зарядить до потенциала V_c, а затем создать между электродами напряжение V_a, то напряжение V_g в воздушном зазоре может быть определено следующим образом. Предположим, что при напряжении V_a плотность заряда на поверхности контакта верхнего электрода с диэлектрической пленкой равна $-\sigma$. Тогда плотность заряда на поверхности раздела нижнего электрода с фотопроводящим слоем будет $+\sigma$. Заряд скрытого изображения,



Р и с. 196. Схема переноса электростатического изображения.

поверхностная плотность которого σ_c считается постоянной, индуцирует на верхнем электроде отрицательный заряд с плотностью $-\sigma_c'$, а на нижнем электроде — заряд с плотностью $-\sigma_c''$.

Общая плотность заряда на верхнем электроде, создаваемая напряжением V_a и зарядом скрытого изображения, составляет $-(\sigma + \sigma_c')$, а на нижнем электроде плотность заряда равна $\sigma - \sigma_c''$.

Пренебрегая краевым эффектом, можем написать в системе МКС

$$V_d' = \frac{\sigma + \sigma_c'}{K_d \varepsilon_0} L_d, \tag{106}$$

$$V_g = \frac{\sigma + \sigma_c'}{\varepsilon_0} z, \tag{107}$$

$$V_s' = \frac{\sigma - \sigma_c''}{K_s \varepsilon_0} L_s, \tag{108}$$

где V_d', V_g и V_s' — соответственно напряжения в диэлектрическом слое, воздушном промежутке и фотопроводящем слое; L_d, z и L_s — толщины этих слоев (см. рис. 196); K_d и K_s — диэлектрические проницаемости диэлектрического и фотопроводящего слоев; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Принимая во внимание, что $\sigma_c = \sigma_c' + \sigma_c''$ и $V_c = \sigma_c L_s / K_s \varepsilon_0$ и подставляя выражение (107) в (106) и (108), получим

$$V_d' = \frac{V_g L_d}{K_d z}, \tag{109}$$

$$V'_s = \frac{V_g L_s}{K_s z} - V_c. \tag{110}$$

С другой стороны, из рис. 196 следует

$$V'_d + V_g + V'_s = V_a. \tag{111}$$

Подставляя формулы (109) и (110) в выражение (111), получим

$$V_g \left(\frac{L_d}{K_d z} + 1 + \frac{L_s}{K_s z} \right) = V_a + V_c. \tag{112}$$

Решая уравнение (112) относительно V_g, найдем

$$V_g = \frac{(V_a + V_c)\, z}{\frac{L_s}{K_s} + \frac{L_d}{K_d} + z}. \tag{113}$$

Следует отметить, что в тех случаях, когда диэлектрик с проводящей подложкой располагают вблизи заряженной поверхности (как на рис. 196), напряжение, создаваемое зарядом скрытого изображения V_c, оказывает такое же действие, как и приложенное напряжение той же величины. Так, создаваемое зарядом напряжение 500 *в* в сочетании с приложенным напряжением 1000 *в* порождает в воздушном промежутке такую же напряженность поля, как и приложенное напряжение 1500 *в* при отсутствии заряда. Для незаряженных участков, соответствующих участкам фона электростатического изображения, в уравнении (113) необходимо V_c принять равным нулю. Уравнение (113) можно использовать для построения графиков зависимости напряжения в зазоре от величины зазора. Эти графики позволяют определять условия, в которых происходит перенос заряда при электрическом разряде в воздушном зазоре.

4.2. КРИВАЯ ПАШЕНА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД

Если две поверхности разделены слоем газа, то перенос электростатических изображений на диэлектрическую пленку осуществляется путем перемещения электрических зарядов через газовую среду.

В работе [339] переход зарядов при переносе электростатического изображения объясняется явлением электрического пробоя воздуха. При сравнительно большой величине воздушного зазора (более 8 *мк*) механизм переноса зарядов легко объясняется явлением электрического разряда в газе. Установлено [338], что для описания предельных условий переноса зарядов в этом диапазоне удобно пользоваться кривой Пашена для воздуха.

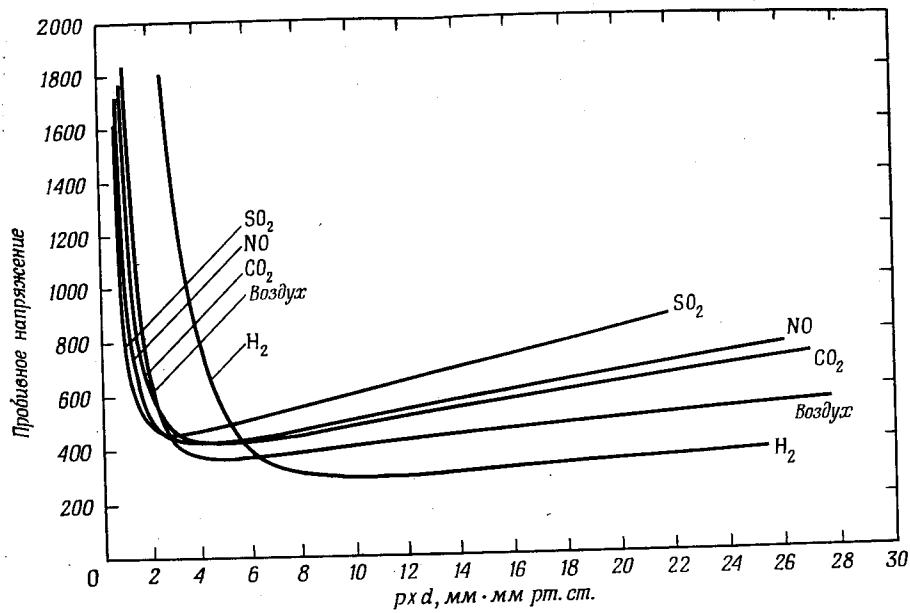
По закону Пашена, описывающему явление пробоя газа в элект-

рическом поле, пробивное напряжение линейно зависит от произведения давления газа p на расстояние между электродами d. Для воздуха при комнатной температуре закон Пашена выполняется при условии, что произведение $p \times d$ больше 5 *мм·мм рт. ст.* При меньших значениях $p \times d$ напряжение пробоя резко увеличивается (рис. 197). Отметим, что минимальное пробивное напряжение для воздуха равно 360 *в*; при меньшем напряжении независимо от давления и расстояния между электродами пробой не возникает. Однако предполагают, что при очень малых зазорах протекание тока через воздушную прослойку можно наблюдать и при напряжениях, меньших 360 *в*; в этом случае ток возникает в результате автоэлектронной эмиссии.

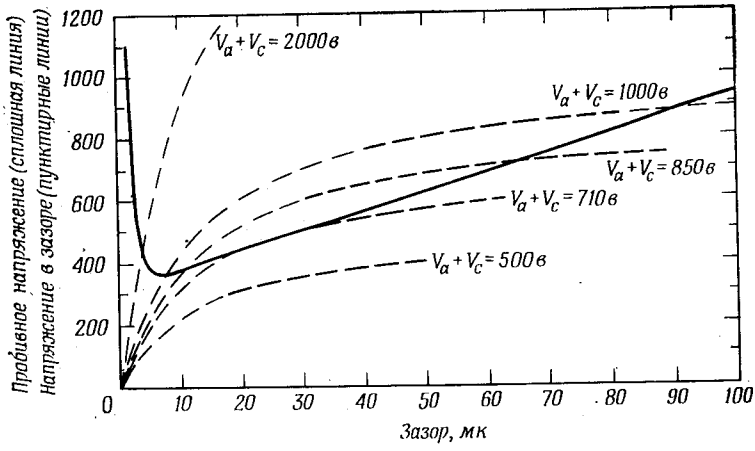
На рис. 198 показана кривая Пашена для воздуха, построенная на основании данных рис. 197 для постоянного давления 760 *мм рт. ст.* Теперь достаточно вычислить напряжение в воздушном промежутке (V_g, рис. 196) как функцию от величины зазора и нанести полученные результаты на график, на котором построена кривая Пашена, чтобы определить, при каком зазоре будет возникать разряд. Это позволит также определить и максимальную величину зазора (расстояние между поверхностями), при которой электростатическое изображение еще может быть перенесено на диэлектрическую поверхность. Природа зависимости между напряжением в воздушном зазоре и его величиной иллюстрируется семейством кривых (см. рис. 198), вычисленных для нескольких значений $V_a + V_c$ и для системы из двух пленок майлара [1]). Эта система аналогична системе, представленной на рис. 196, но фотопроводящий и диэлектрический слои в ней заменены пленками майлара. Из графика видно, что кривые для $V_a + V_c = 1000$ *в* и $V_a + V_c = 850$ *в* пересекают кривую Пашена в двух точках. Это значит, что при разделении поверхностей перенос заряда начинается в тех точках пересечения кривых, которые соответствуют меньшей величине воздушного зазора. Если же эти поверхности сближаются, перенос зарядов начинается в тех точках пересечения кривых, которые соответствуют большей величине зазора. На рис. 198 минимальное значение $V_a + V_c$, при котором будет происходить перенос зарядов, равно 710 *в*. Кривая, вычисленная с помощью выражения (113), для такого значения $V_a + V_c$ лишь касается кривой Пашена. При меньших значениях $V_a + V_c$, например 500 *в*, кривая уравнения (113) не пересечется с кривой Пашена и переноса не произойдет.

Очевидно, что при величине воздушного зазора, равной всего нескольким микронам, для переноса зарядов электрическим разрядом потребуются очень высокие напряжения (при условии,

[1]) Пленка из полиэтиленгликольтетрафталата.— *Прим. перев.*



Р и с. 197. Кривые Пашена для различных газов (по данным работы [340]).



Р и с. 198. Обычная кривая Пашена (сплошная линия) и кривые зависимости напряжения в зазоре от величины зазора (пунктирные линии) для двух пленок майлара.

Воздух при атмосферном давлении; V_a — приложенное напряжение; V_ε — напряжение поверхностного заряда.

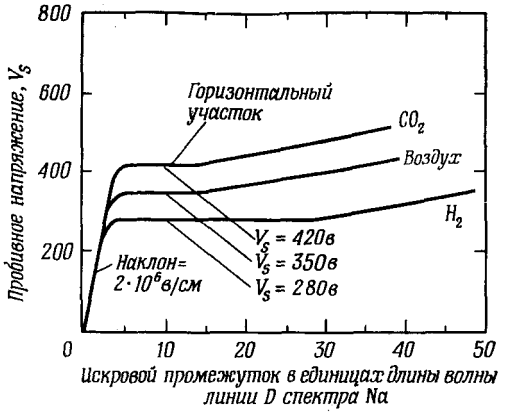
что левая часть кривой Пашена показана на рис. 198 правильно). Так, для переноса зарядов через зазор величиной 2 *мк* при определенных условиях требуется напряжение более 6000 *в*. Очевидно также, что в воздушных промежутках, соответствующих левой от точки минимума части кривой Пашена, напряженность электрического поля будет достигать очень больших значений ($\sim 10^6$ *в/см*), при которых может возникать автоэлектронная эмиссия.

4.3. МОДИФИЦИРОВАННАЯ КРИВАЯ ПАШЕНА

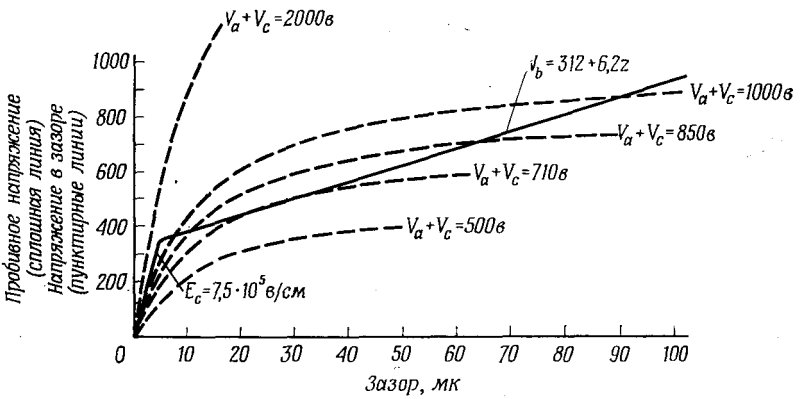
Было проведено тщательное исследование правой части от точки минимума кривых Пашена, показывающих зависимость пробивного напряжения от произведения $p \times d$. Результаты исследований хорошо известны и позволяют с достаточной точностью и надежностью предсказывать поведение некоторого конкретного газа в диапазоне величин $p \times d$, превышающих значения, при которых кривая Пашена имеет минимум. Случаи, соответствующие левой, круто возрастающей части кривой, сравнительно редки, так как в этом диапазоне значений $p \times d$ разряд идет обычно по более длинному пути между электродами, а напряженность поля в зазоре выше той, которую показывает наклон правой части кривой Пашена [341]. Левая часть кривой наблюдается при низких давлениях и сравнительно больших воздушных зазорах. Если же давление равно атмосферному и величина зазора слева от точки минимума для воздуха менее 8 *мк*, то кривой с крутым подъемом не получается. Очевидно, наличие сильных полей в малых зазорах приводит к возникновению токов автоэлектронной эмиссии, преобладающих над токами, источником которых служат электронные лавины Таунсенда [342].

На рис. 199 приведены кривые, полученные для левой части кривой Пашена при условии, что путь зарядов через газовую среду ограничивается очень малым зазором. Для этих кривых характерно наличие горизонтального участка, идущего влево от точки минимума, и линейный спад к началу координат. Следует отметить, что наклон левой части кривой не зависит от природы газа. Правая часть кривой от точки минимума представляет собой начало обычной кривой пробоя Пашена. Левая часть кривой на рис. 198 описывает скорее гипотетическую, чем действительную картину, наблюдающуюся при атмосферном давлении.

По данным рис. 199 была построена кривая, представленная на рис. 200. Начало кривой, соответствующее автоэлектронной эмиссии, следует рассматривать как аппроксимацию. Кривая на этом участке имеет крутой наклон, соответствующий напряженности $7{,}5 \cdot 10^5$ *в/см*, что приблизительно совпадает с величиной,



Р и с. 199. Кривые зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами для малых зазоров вблизи минимального значения $p \times d$ для воздуха при атмосферном давлении и платиновых электродах (по данным работы [350]).



Р и с. 200. Модифицированная кривая Пашена (сплошная линия) и кривые зависимости напряжения в зазоре от величины зазора (пунктирные линии) для двух листов майлара.

V_a — приложенное напряжение; V — напряжение поверхностного заряда на майларе; воздух при атмосферном давлении.

найденной при последующих экспериментах. Этот наклон зависит от материала поверхности, испускающей электроны.

На рис. 200 приведены те же кривые напряжений в зазоре, что и на рис. 198. Следует отметить, что при более высоких значениях $V_a + V_c$, например 2000 *в*, кривая на участке, изображенном на рис. 200, не пересекается с кривой Пашена, а проходит над ней. При этих условиях перенос зарядов в зазорах менее 8 *мк* происходит за счет автоэлектронной эмиссии.

Явление автоэлектронной эмиссии, наблюдающееся при очень малых зазорах, оказывает заметное влияние на условия переноса заряда, описываемые левой от точки минимума частью кривой Пашена. Если принять, что на рис. 200 дана истинная картина пробоя воздуха при атмосферном давлении, то перенос зарядов возможен и при очень малых зазорах. С учетом автоэлектронной эмиссии для условий, представленных на рис. 200, и при приложенном напряжении более 1200 *в* перенос зарядов может происходить в том случае, когда поверхности находятся в контакте.

4.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В БОЛЬШИХ ЗАЗОРАХ

На рис. 201 показано продолжение кривой Пашена, соответствующее зазорам до 1000 *мк* [1]). Для значений, бо́льших 100 *мк*,

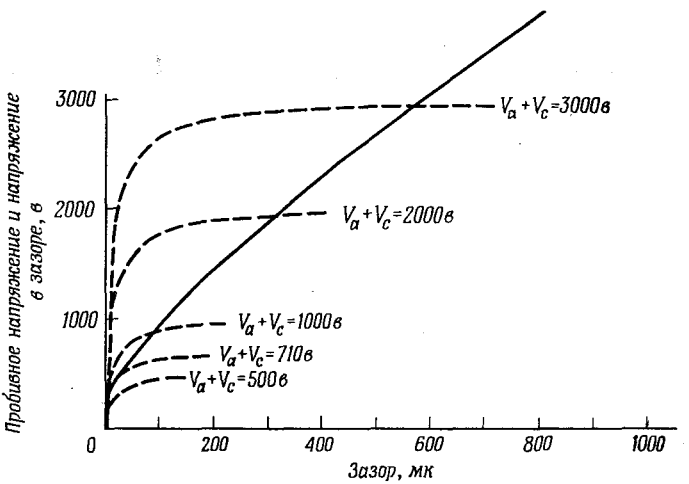


Рис. 201. Кривая Пашена для больших воздушных зазоров и ее пересечения с кривыми зависимости напряжения в зазоре от величины зазора.

наклон кривой становится меньше $6{,}2 \cdot 10^4$ *в/см*. На этом рисунке видно, что точки пересечения кривых, вычисленных по формуле

[1]) Этот участок кривой построен на основании данных, приведенных в работе [340].

(113), с кривой Пашена лежат в области больших зазоров. Заметим, что кривые для значений $V_a + V_c = 2000$ *в* и $V_a + V_c = 3000$ *в*, которые на графике для малых зазоров не пересекались с кривой Пашена, теперь пересекаются с ней.

Здесь важно отметить, что при исследовании переноса электростатических изображений необходимо учитывать условия, возникающие в процессе сближения двух поверхностей. Так, при больших значениях $V_a + V_c$ перенос зарядов может начаться в тот момент, когда поверхности только приближаются друг к другу, причем это может произойти при довольно большой величине зазора. В этом случае, по-видимому, будет наблюдаться расширение элементов изображения и снижение разрешающей способности. Поэтому необходимо так подбирать потенциал заряда скрытого изображения и приложенное напряжение, чтобы при сближении диэлектрических поверхностей перенос зарядов был невозможен. На этом этапе может возникнуть необходимость приложить напряжение обратной полярности.

4.5. ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕНЕСЕННОГО ЗАРЯДА

Для определения величины поверхностного заряда, сообщенного фотопроводящему или диэлектрическому слою, обычно электрометром измеряют потенциал данной поверхности относительно его токопроводящей подложки. Таким образом, напряжение V_c, фигурирующее в уравнении (113), служит мерой заряда, сообщенного нижнему диэлектрическому слою (см. рис. 196). Этот слой приготавливается либо из фотопроводящего электроизоляционного материала, либо из диэлектрика. Напряжение V_c является функцией поверхностной плотности заряда, толщины слоя и диэлектрической проницаемости материала слоя

$$V_c = \frac{\sigma_c L_s}{K_s \varepsilon_0}. \tag{114}$$

Аналогично, когда заряд переносят с одной поверхности на другую (например, на верхнюю диэлектрическую поверхность, показанную на рис. 196), напряжение на этом диэлектрическом слое, возникающее в результате переноса заряда при разделении поверхностей, определяется выражением

$$V_d = \frac{\sigma_d L_d}{K_d \varepsilon_0}, \tag{115}$$

где σ_d — поверхностная плотность перенесенного заряда; L_d — толщина диэлектрика; $K_d \varepsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость. Заметим, что V_c и V_d — напряжения на соответствующих слоях, когда они отделены друг от друга. Если же слои совмещены

(см. рис. 196), эти величины уже не определяют истинных напряжений на рассматриваемых слоях. В реальных условиях, показанных на рис. 196, напряжения слоев зависят от расстояния между ними и приложенного напряжения. Таким образом, необходимо различать напряжения, соответствующие схеме на рис. 196, и напряжения, характеризующие поверхностную плотность заряда.

С помощью уравнения (113) и модифицированной кривой Пашена можно найти условия, необходимые для возникновения разряда, т. е. для переноса зарядов. Величина перенесенного заряда будет зависеть от количества электричества, прошедшего через зазор между поверхностями за время разряда.

В процессе разряда на диэлектрических поверхностях накапливаются заряды, создающие в зазоре поле, обратное по знаку полю, созданному приложенным напряжением. Накопление зарядов на поверхности продолжается до тех пор, пока поле в зазоре не уменьшится до некоторой критической величины, при которой разряд не может происходить. Если при этом приложенное напряжение и величина зазора остаются неизменными, процесс переноса заряда прекращается.

Согласно выражению (113), напряжение в зазоре, соответствующее точке начала разряда на кривой Пашена, равно

$$V_{g0} = \frac{(V_a + V_c)\, z_0}{D + z_0}\,, \tag{116}$$

где z_0 — величина зазора в точке пересечения кривой уравнения (113) с кривой Пашена; V_{g0} — напряжение в зазоре для этой точки и $D = L_s/K_s + L_d/K_d$.

Если за время разряда на единицу площади каждой диэлектрической поверхности будет перенесен заряд, равный $\Delta\sigma_t$, то, выполняя расчеты, аналогичные описанным в разд. 4.1, можно показать, что результирующее напряжение в зазоре будет равно

$$V_{g1} = \frac{V_a + V_c - \dfrac{\Delta\sigma_t L_d}{\varepsilon_0 K_d} - \dfrac{\Delta\sigma_t L_s}{\varepsilon_0 K_s}}{D + z_0}\, z_0, \tag{117}$$

где V_{g1} — напряжение в зазоре в момент прекращения разряда.

Решая это уравнение относительно $\Delta\sigma_t$, получим

$$\Delta\sigma_t = \frac{\varepsilon_0}{D}\left[V_a + V_c - V_{g1}\left(\frac{D + z_0}{z_0}\right)\right]. \tag{118}$$

Вычитая выражение (117) из (116), найдем падение напряжения в зазоре ΔV_g в процессе разряда

$$\Delta V_g = \frac{\Delta\sigma_t D z_0}{(D + z_0)\,\varepsilon_0}\,. \tag{119}$$

В результате переноса заряда $\Delta\sigma_t$ на внутренние поверхности диэлектрических слоев происходит снижение эффективного приложенного напряжения между диэлектриками до величины

$$V_{af} = V_a + V_c - \Delta\sigma_t D/\varepsilon_0. \qquad (120)$$

Априорных сведений о поведении кривой Пашена, на основании которых можно было бы определить точку прекращения разряда, возникшего в результате пробоя воздушного промежутка, пока нет. В работе [343] установлено, что разница между напряжениями в зазоре в начальный и конечный моменты разряда невелика. Расчеты [344] показывают, что величина заряда, переносимого на диэлектрическую поверхность за время одного этапа разряда, составляет $\sim 10^{-9}$ *к/см*^{2}. Величина заряда, переносимого за несколько этапов разряда, колеблется в довольно широких пределах [343]. Однако нельзя утверждать, что характеристики этих этапов заметно зависят от приложенного напряжения или величины зазора. Результаты работы [343] были получены при напряжениях, достигавших 9000 *в*; перенос заряда начинался при напряжении 3000—4000 *в*. Это значит, что при использовании довольно толстых диэлектриков, например полистирола, имеющего толщину 0,104 *см*, разряд может происходить при зазоре от 20 до 200 *мк*. С помощью выражения (119) находим, что при условиях, принятых в работе [343], перенос заряда величиной 10^{-9} *к/см*^{2} приводит к уменьшению напряжения в зазоре на 20—150 *в*. При меньших зазорах ΔV_g будет незначительным. Так, при зазоре 10 *мк* и переносе заряда 10^{-9} *к/см*^{2} на пленку майлара, имеющую толщину около 50 *мк* и $D = 13$ *мк*, снижение напряжения в зазоре равно ~ 64, *в*.

На основании приведенных выше данных нельзя, конечно, произвести строгий расчет напряжений, при которых прекращается пробой воздушного промежутка. Следует, однако, подчеркнуть, что при малых зазорах напряжение прекращения разряда лишь немного меньше напряжения его возникновения. Это значит, что разряд, возникший в тот момент, когда напряжение в зазоре соответствовало кривой Пашена, будет продолжаться только до тех пор, пока в результате накопления зарядов на диэлектрической поверхности это напряжение не снизится до точки, лежащей на несколько вольт ниже кривой Пашена.

Если принять, что разность между напряжениями в зазоре в момент возникновения и в момент прекращения разряда, определяемая кривой Пашена, достаточно мала по сравнению с пробивным напряжением, то можно вычислить общую величину перенесенного заряда при данных конкретных условиях. Во всяком случае погрешность такого расчета не превысит величины приращения перенесенного заряда за время одного этапа разряда.

4.5.1. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА ПРИ ПОСТОЯННОМ ЗАЗОРЕ

Изложенное выше относится только к тем случаям разряда, когда напряжение в зазоре совпадает с соответствующей точкой кривой Пашена для данной величины зазора. Если же напряжение в зазоре больше пробивного, величина заряда, переносимого на диэлектрические поверхности, будет, безусловно, больше. Рассмотрим снова схему, представленную на рис. 196. Если величина зазора z поддерживается постоянной и к электродам мгновенно подводится напряжение, достаточное для того, чтобы напряжение в зазоре соответствовало точке, лежащей выше кривой Пашена, то разряд продолжается до тех пор, пока напряжение в зазоре не снизится до точки, лежащей немного ниже этой кривой.

К моменту падения напряжения в зазоре до этого уровня величина перенесенного заряда будет равна

$$\Delta\sigma_t = \frac{\varepsilon_0}{D}\left[V_a + V_c - V_g\left(\frac{D+z_c}{z_c}\right)\right]. \qquad (121)$$

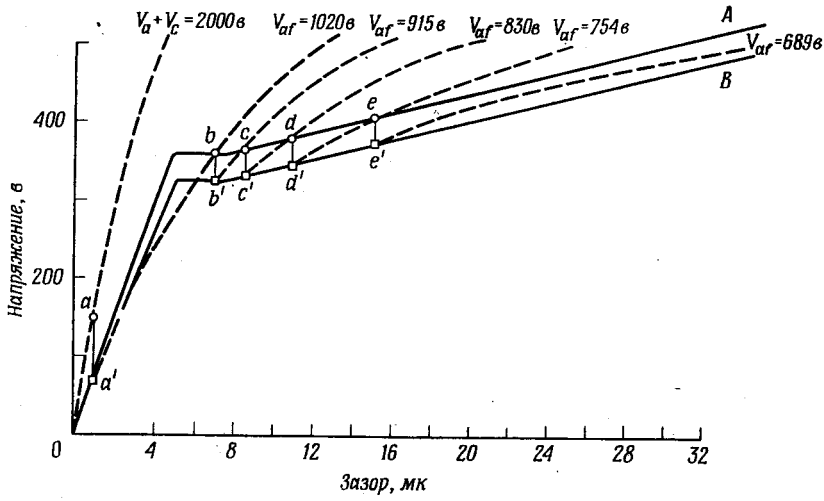
Эта зависимость по форме аналогична уравнению (118), однако здесь вместо z_0, обозначающего величину зазора в точке пересечения кривых, введено z_c — постоянная величина зазора. Кроме того, величина V_g отличается от V_{g1}.

4.5.2. ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Сохранение постоянной величины зазора в процессе переноса электростатических изображений на практике представляет довольно сложную задачу. Поэтому обычно диэлектрические поверхности сначала совмещают, а затем отделяют друг от друга; в процессе их разделения (разнесения) и происходит перенос заряда. В этом случае максимальный перенос наблюдается в момент совпадения напряжения в зазоре с напряжением, определяемым по кривой Пашена. Процесс переноса зарядов при этих условиях представляет собой серию элементарных этапов, соответствующих этапам разнесения поверхностей.

Гипотетический случай такого ступенчатого разряда представлен на рис. 202. Предполагается, что величина зазора между поверхностями, находящимися в практически полном контакте, равна 1 *мк*. Если проследить серию последовательных разрядов, начиная с величины $V_a + V_c = 2000$ *в*, то можно установить, что начальный разряд будет происходить в точке a, лежащей в области автоэлектронной эмиссии. В результате переноса зарядов напряжение в зазоре уменьшается до точки прекращения

разряда a', а эффективное приложенное напряжение [уравнение (120)] снижается до 1020 *в*. В ходе разделения поверхностей происходит второй разряд, начинающийся в точке b и прекращающийся в точке b', где эффективное приложенное напряжение снижается до 915 *в*. При дальнейшем разъединении поверхностей возникнет последовательность разрядов в точках c, d и e. В точке e' эффективное приложенное напряжение упадет ниже минимума,



Р и с. 202. Ступенчатый разряд, происходящий при разделении пленок майлара.

A — модифицированная кривая Пашена; *B* — гипотетическая кривая, представляющая зависимость напряжения в зазоре в момент окончания разряда от величины зазора.

необходимого для пробоя воздушного промежутка, и перенос зарядов прекратится. Величина заряда, перенесенного при этом, будет равна сумме всех зарядов, перенесенных на каждом отдельном этапе. Если начать с величины $V_a + V_c = 1020$ *в*, то в момент фактического контакта поверхностей разряд не возникает и общий перенесенный заряд определяется четырьмя разрядами, происходящими в точках b — e. Аналогично, если начальная величина $V_a + V_c$ будет равна 915 *в*, произойдет только три разряда и т. д. С уменьшением начального значения $V_a + V_c$ количество этапов разряда в процессе разделения поверхностей уменьшается.

Величина заряда, переносимого на каждом данном этапе разряда, может быть вычислена по уравнению (118) при условии, что напряжение в зазоре в момент прекращения разряда V_{g1} известно. По кривой Пашена определить эту величину нельзя.

Но так как V_{g1} лишь немного меньше V_{g0}, напряжения в зазоре в момент возникновения разряда, определяемого кривой Пашена, то в уравнение (118) вместо V_{g1} можно подставить V_{g0}.

Величина зазора z_0, при которой начинается разряд согласно кривой Пашена, может быть вычислена из известных характеристик этой кривой.

Кривая Пашена для зазоров 8—100 *мк* практически представляет собой прямую линию. Обозначая величину пробивного напряжения для воздушного зазора V_b, можно написать

$$V_b = 312 + 6{,}2z, \tag{122}$$

где z дается в микронах. В точке пересечения кривой напряжения в зазоре, описываемой уравнением (113), с кривой Пашена для зазоров 8—100 *мк* V_g равно V_b. Таким образом, объединяя уравнения (113) и (122), получим

$$\frac{(V_a + V_c)\, z}{D + z} = 312 + 6{,}2z. \tag{123}$$

Преобразуя это выражение, найдем следующее квадратное уравнение:

$$6{,}2z^2 - (V_a + V_c - 312 - 6{,}2D)\, z + 312D = 0, \tag{124}$$

откуда, пользуясь широко известной формулой, находим

$$z = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \tag{125}$$

где

$$a = 6{,}2, \quad b = -(V_a + V_c - 312 - 6{,}2D), \quad c = 312D.$$

Следовательно, если все эти параметры известны, можно вычислить величину зазора.

Итак, для каждой данной величины $V_a + V_c$ можно рассчитать z, если кривая, описываемая уравнением (113), пересекает кривую Пашена на ее прямолинейном участке, лежащем справа от точки минимума.

Из формулы (125) следует, что существует два значения z, которые соответствуют двум различным величинам воздушного зазора, при которых начинается перенос заряда, т. е. происходит пробой. Если две диэлектрические поверхности вначале находятся в контакте, а затем отделяются друг от друга, то разряд возникает при меньшей величине зазора z. Если же поверхности в исходном положении разнесены и затем сближаются, то перенос заряда начинается при большей величине z.

Минимальные условия, при которых обеспечивается перенос заряда, определяются выражением

$$b^2 = 4ac, \tag{126}$$

из которого находим

$$(V_a+V_c)_m=\sqrt{7737{,}6D}+312+6{,}2D. \qquad (127)$$

Соотношение (127) определяет минимальную величину суммы приложенного напряжения и напряжения, создаваемого поверхностным зарядом, в начальный момент разряда в воздушном зазоре. Если V_a+V_c меньше величины, удовлетворяющей данному уравнению, разряд не возникает.

Толщина воздушного слоя, соответствующая этим минимальным условиям, определяется из выражений (124) и (126)

$$z=\frac{(V_a+V_c)_m-312-6{,}2D}{12{,}4}=\frac{\sqrt{7737{,}6D}}{12{,}4}. \qquad (128)$$

Отметим, что указанные условия соответствуют только определенному участку кривой Пашена, лежащему в диапазоне воздушных зазоров от 8 до 100 *мк*. Если воздушный зазор несколько меньше 8 *мк*, то кривые, описываемые уравнением (113), будут пересекаться с горизонтальным участком кривой Пашена. Длина горизонтального участка определяется начальным наклоном крутой левой части модифицированной кривой Пашена. Этот наклон определяет также критическую величину поля для разрядов, происходящих при очень малых воздушных зазорах. На рис. 200 критическое поле для разряда, возникающего в результате автоэлектронной эмиссии, равно $7{,}5\cdot10^5$ *в/см*, а горизонтальный участок располагается примерно от 4,5 до 7,5 *мк*. Если критическое поле больше поля, показанного на рис. 200, то горизонтальный участок захватывает область еще более малых зазоров. На горизонтальном участке напряжение пробоя воздушного промежутка постоянно и равно $\sim$360 *в*. Следовательно, в точках пересечения кривых зависимости напряжения в зазоре от величины зазора с горизонтальным участком кривой Пашена напряжение в зазоре должно быть равным 360 *в*. На всем протяжении горизонтального участка справедлива следующая зависимость:

$$\frac{(V_a+V_c)\,z}{D+z}=360. \qquad (129)$$

Отсюда находим величину зазора

$$z=\frac{360D}{V_a+V_c-360}. \qquad (130)$$

4.5.2.1. СТУПЕНЧАТЫЙ ПЕРЕНОС ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Можно показать, что общая величина заряда, переносимого при разделении двух диэлектрических поверхностей, зависит от минимальных значений величин, обеспечивающих возникновение разряда и описываемых уравнениями (127) и (128).

Допустим, что V_{g1}, V_{g2}, V_{g3}, . . ., V_{gn} — напряжения в зазоре в момент окончания 1, 2, 3, ..., n-го разрядов, возникающих при разделении поверхностей. Значения зазоров, при которых происходят эти разряды, обозначим соответственно через z_1, z_2, z_3, . . ., z_n, а заряды, переносимые на единицу площади при каждом последующем разряде,— через $\Delta\sigma_{t1}$, $\Delta\sigma_{t2}$, $\Delta\sigma_{t3}$, . . ., $\Delta\sigma_{tn}$.

Используя уравнение (118), можно написать

$$\Delta\sigma_{t1}D/\varepsilon_0 = V_a + V_c - V_{g1}(D + z_1)/z_1. \qquad (131)$$

Учитывая, что, согласно выражению (120), эффективное приложенное напряжение для каждого последующего разряда уменьшается на $\Delta\sigma_t D/\varepsilon_0$, получим

$$\Delta\sigma_{t2}D/\varepsilon_0 = V_{g1}(D + z_1)/z_1 - V_{g2}(D + z_2)/z_2. \qquad (132)$$

Аналогично

$$\Delta\sigma_{t3}D/\varepsilon_0 = V_{g2}(D + z_2)/z_2 - V_{g3}(D + z_3)/z_3 \qquad (133)$$

и, наконец,

$$\Delta\sigma_{tn}D/\varepsilon_0 = V_{gn-1}(D + z_{n-1})/z_{n-1} - V_{gn}(D + z_n)/z_n. \qquad (134)$$

Суммируя все приращения заряда, переносимого в процессе разделения поверхностей, получим

$$\sigma_t D/\varepsilon_0 = \sum_1^n \Delta\sigma_{tn}D/\varepsilon_0 = V_a + V_c - V_{gn}(D + z_n)/z_n. \qquad (135)$$

Разряд прекращается в тот момент, когда $V_{gn}(D + z_n)/z_n$ становится меньше минимальной величины эффективного приложенного напряжения, определяемой выражением (127). Теоретически эта величина может быть меньше минимального эффективного приложенного напряжения на чрезвычайно малую, но конечную величину. Таким образом, с очень небольшой ошибкой можно принять, что

$$V_{gn}(D + z_n)/z_n = \sqrt{7737{,}6D} + 312 + 6{,}2D. \qquad (136)$$

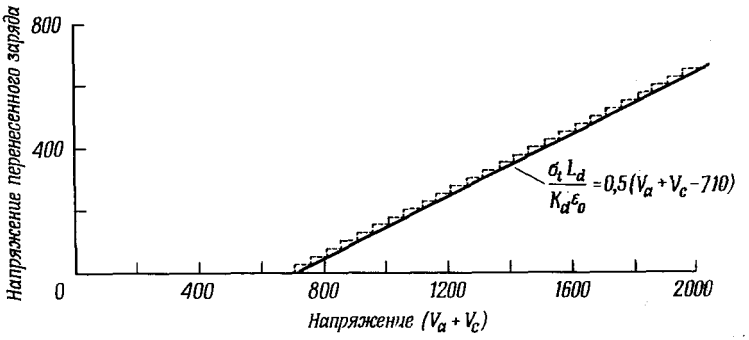
Подставляя это выражение в соотношение (135), получим

$$\sigma_t D/\varepsilon_0 = V_a + V_c - (\sqrt{7737{,}6D} + 312 + 6{,}2D). \qquad (137)$$

В действительности же последний разряд не всегда заканчивается при этом минимальном значении приложенного напряжения. Так, в гипотетическом случае, представленном на рис. 202, разряд

начинается при $V_a + V_c = 2000$ *в*, а последний разряд происходит при 754 *в*, тогда как минимальное расчетное напряжение для этого случая равно 710 *в*. Отметим, что выражение (137) справедливо только при следующем условии: $V_a + V_c \geqslant \sqrt{7737{,}6D} + 312 + 6{,}2D$.' Если $V_a + V_c$ меньше этой величины, переноса заряда не происходит.

График зависимости величины заряда, переносимого на диэлектрическую поверхность, от величины $V_a + V_c$ приведен на рис. 203. Перенесенный заряд здесь представлен в виде напряжения на слое диэлектрика после отделения поверхностей. Сплошная линия построена по значениям, рассчитанным по уравнению



Р и с. 203. Теоретическая кривая зависимости перенесенного заряда от величины $V_a + V_c$ при разделении двух пленок майлара.

(137). Ступенчатая пунктирная линия приближенно описывает явление, возникающее в результате существования конечной разницы между напряжениями возникновения и окончания разряда.

Величину поверхностного заряда на диэлектрической поверхности обычно выражают в единицах напряжения на слое диэлектрика. Подставляя выражение (115) в (137), получим следующее соотношение для напряжения, создаваемого перенесенным зарядом на верхнем диэлектрике:

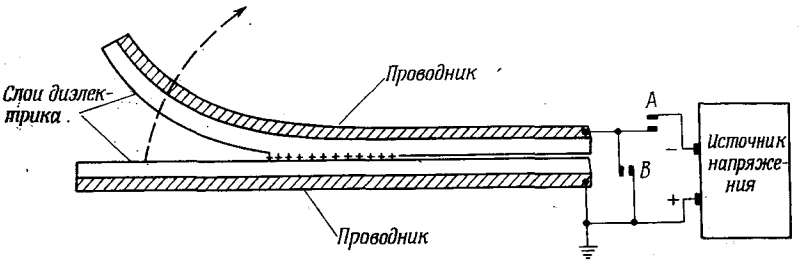
$$V_d \approx \frac{L_d/K_d}{D} [V_a + V_c - (87{,}96\sqrt{D} + 312 + 6{,}2D)]. \qquad (138)$$

Аналогично напряжение, создаваемое перенесенным зарядом на нижнем диэлектрике, равно

$$V_s \approx \frac{L_s/K_s}{D} [V_a + V_c - (87{,}96\sqrt{D} + 312 + 6{,}2D)]. \qquad (139)$$

4.5.2.2. ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДОВ В ПРОЦЕССЕ ОТДЕЛЕНИЯ ПЛЕНОК

Для обнаружения явления переноса заряда во время разделения двух диэлектрических поверхностей возьмем, например, два листа алюминированной пленки майлара и наложим их один на другой так, чтобы пленочные поверхности совместились



Р и с. 204. Схема установки для обнаружения переноса зарядов.

(рис. 204). Замкнув ключ A, приложим напряжение на алюминированные поверхности двух листов, а затем, не снимая напряжения, начнем постепенно отделять верхний лист от нижнего. В ходе отделения поверхностей толщина воздушного зазора проходит через критические точки, и в эти моменты происходит пробой воздушного промежутка.

4.5.3. ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ

Предполагается, что при очень малом зазоре и достаточно высоком приложенном напряжении возможен перенос зарядов за счет автоэлектронной эмиссии. В этом случае критические условия для процесса переноса зарядов определяются крутой наклонной частью кривой Пашена, расположенной слева от горизонтального участка. При высоких значениях величины $V_a + V_c$ кривые, вычисленные по уравнению (113), располагаются обычно выше этого крутого участка, определяющего критическое поле для данной области. В области малых величин зазора кривые не пересекаются с кривой Пашена. Если к находящимся в контакте поверхностям приложить высокое напряжение, то перенос зарядов может произойти при очень малой величине зазора, так как кривые зависимости напряжения в зазоре от величины зазора лежат выше критического поля для этой области. Для любой известной величины воздушного зазора и данного значения критического поля величина заряда, перенесенного на диэлектрические

поверхности, определяется по формуле

$$\sigma_t = \frac{\varepsilon_0}{D}[V_a + V_c - E_c(D + z_c)], \qquad (140)$$

где E_c — критическое поле, характеризуемое наклоном модифицированной кривой Пашена в области автоэлектронной эмиссии.

Между двумя гладкими поверхностями, находящимися в контакте, всегда имеется очень тонкая воздушная прослойка, средняя толщина которой может колебаться от долей микрона до нескольких микронов в зависимости от качества поверхностей и величины приложенного давления. Так, при виртуальном контакте отшлифованных и отполированных поверхностей зазор между ними составляет ~ 1 *мк* [345]; поверхности с оптической полировкой дают зазоры около 0,25 *мк* [346]. Величину зазоров в этом диапазоне нельзя вычислить обычным способом, исходя из значений других параметров. Как видно из выражения (140), при $D \gg z_c$ и малых зазорах величина перенесенного заряда почти не зависит от величины зазора.

4.5.3.1. МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ

Эксперимент с разделением пленок не позволяет обнаружить перенос заряда автоэлектронной эмиссией при очень малых воздушных зазорах, когда диэлектрические поверхности находятся в контакте. Однако, изменив несколько методику эксперимента, можно обнаружить перенос заряда и в этом случае. Для этого начальные этапы эксперимента оставляют без изменения, т. е. две диэлектрические поверхности совмещаются, а часть поверхности нижнего диэлектрика предварительно заряжается. Затем эксперимент осуществляется в три этапа: 1) с помощью ключа A (см. рис. 204) к двум диэлектрическим поверхностям, находящимся в контакте, подводится напряжение (ключ A замкнут); 2) размыкая ключ A, снимают приложенное напряжение и с помощью ключа B закорачивают токопроводящие электроды; 3) при закороченных электродах отделяют диэлектрические поверхности друг от друга.

Рассмотрим процессы, протекающие на каждом из этих этапов. Предположим, что начальный заряд, созданный на нижней диэлектрической поверхности, имеет положительную полярность, а направление приложенного напряжения подобрано так, что положительный полюс подсоединен к нижнему электроду. Предположим также, что пока две диэлектрические поверхности находятся в виртуальном контакте, величина очень малого воздушного зазора остается, по существу, постоянной. Величину зазора обозначим через z_c.

На этапе 1 заряд, перенесенный на диэлектрические поверхности, будет равен [согласно соотношению (140)]

$$\sigma_{t1}D/\varepsilon_0 = V_a + V_c - E_{c1}(D + z_c), \tag{141}$$

где E_{c1} — критическое поле для эмиссии из верхнего диэлектрика.

Минимальное эффективное приложенное напряжение, вызывающее перенос заряда, равно

$$(V_{af})_{m1} = E_{c1}(D + z_c). \tag{142}$$

После того как в условиях этапа 1 произойдет перенос заряда, электроды закорачиваются (этап 2), в результате чего напряжение V_a [уравнение (141)] падает до нуля. Однако при достаточно высоком начальном приложенном напряжении заряд, перенесенный на этапе 1, в условиях этапа 2 создает новое эффективное напряжение обратной полярности, определяемое выражением

$$V_{af1} = V_c - \sigma_{t1}D/\varepsilon_0. \tag{143}$$

Таким образом, на этапе 2 происходит перенос зарядов в обратном направлении. Следовательно, если V_{af1} создает в воздушном зазоре поле противоположной полярности, превышающее критическое поле для обратного переноса, то происходит обратный перенос заряда.

Заряд, перенесенный на этапе 2 в обратном направлении, на верхнюю диэлектрическую поверхность, равен

$$\sigma_{t2}D/\varepsilon_0 = V_{af1} - E_{c2}(D + z_c), \tag{144}$$

где E_{c2} — критическое поле для эмиссии из нижнего диэлектрика. Минимальное значение эффективного приложенного напряжения для обратного переноса зарядов определяется при этом по формуле

$$(V_{af})_{m2} = -E_{c2}(D + z_c). \tag{145}$$

По окончании процесса обратного переноса зарядов, происходящего на этапе 2, эффективное приложенное напряжение, создаваемое зарядами, оставшимися на обеих диэлектрических поверхностях, будет равно

$$V_{af2} = V_c - \sigma_{t1}D/\varepsilon_0 + \sigma_{t2}D/\varepsilon_0. \tag{146}$$

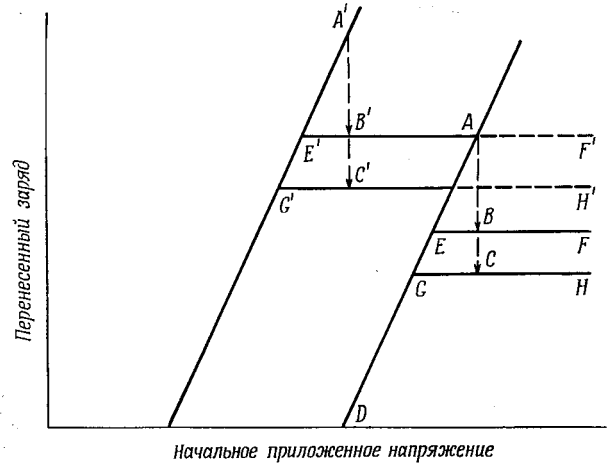
Если эффективное приложенное напряжение, описываемое формулой (146), равно или больше минимального значения, которое необходимо для пробоя воздушного промежутка на соответствующем участке кривой Пашена, то на этапе 3 во время разделения поверхностей может продолжаться обратный перенос. В этом случае дополнительный обратный заряд, переносимый на верхнюю диэлектрическую поверхность, будет равен

$$\sigma_{t3}D/\varepsilon_0 = V_{af2} - (87{,}96\sqrt{D} + 312 + 6{,}2D). \tag{147}$$

Окончательная величина заряда, перенесенного на диэлектрические поверхности, равна разности между величиной начального заряда, перенесенного на этапе 1, и величинами зарядов противоположного знака, перенесенных на этапах 2 и 3. Таким образом, окончательный заряд будет равен

$$\sigma_{tf} = \sigma_{t1} - \sigma_{t2} - \sigma_{t3}. \qquad (148)$$

На рис. 205 проиллюстрированы явления, происходящие на всех трех этапах. Здесь показана зависимость величины заряда, переносимого на верхнюю диэлектрическую поверхность, от



Р и с. 205. Зависимость заряда, переносимого на верхнюю диэлектрическую поверхность, от начального приложенного напряжения (метод виртуального контакта).

начального приложенного напряжения. Рассмотрим сначала процесс переноса зарядов в тех участках, где на нижней диэлектрической поверхности начального заряда не было ($V_c = 0$). В этом случае на этапе 1 перенос зарядов не начинается до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет критической величины, отвечающей формуле (142) (точка D). Начиная с этой точки, перенос зарядов, согласно выражению (141), прямо пропорционален приложенному напряжению до некоторой точки A. На этапе 2 перенос зарядов в обратном направлении будет уменьшать величину заряда на верхнем диэлектрике в соответствии с формулой (144) до тех пор, пока не возникнут условия, определяемые формулой (145) (точка B). Если минимальное эффективное приложенное напряжение, описываемое выражением (145), больше минимального пробивного напряжения для соответствующего

участка кривой Пашена, то обратный перенос происходит и на этапе 3 до точки C. Если же напряжение меньше минимального, то при разделении поверхностей обратного переноса не возникает, т. е. в этом случае величина $\sigma_{t_3} = 0$. Окончательный график зависимости переноса зарядов на верхний диэлектрик от приложенного напряжения в этом случае представляется ломаной DEF. Если же на этапе 3 происходит дополнительный обратный перенос зарядов, кривая пройдет через точки D,G,H. В частности, если на этапе 1 приложено напряжение, достаточное для достижения точки A, то при наличии обратного переноса зарядов на этапе 2 уменьшение заряда на поверхности верхнего диэлектрика будет представлено переходом от точки A к точке B. На этапе 3 будет наблюдаться дальнейшее уменьшение заряда от B до C, если σ_{t_3} не равно нулю. Напомним, что приведенный выше анализ справедлив только при идеальных условиях, т. е. когда оба диэлектрика являются идеальными изоляторами, а их поверхности гладкие. Аналогичные результаты получаются и для тех участков, где нижний диэлектрик имел начальный заряд, но величина перенесенного заряда в этом случае будет больше. (Буквы со штрихами.)

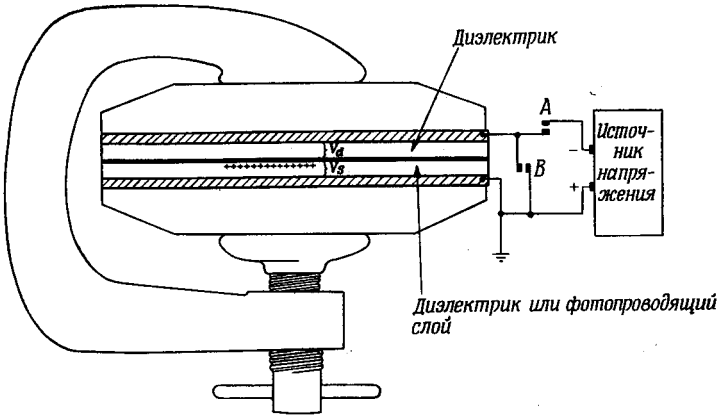
Приложенное напряжение, при котором начинается перенос заряда (точка D, рис. 205), определяется формулой (142). По этой формуле можно найти также величину критического поля E_{c1}, если известны все другие величины. Значения входящих в эту формулу величин, за исключением величины зазора z_c, можно определить экспериментальным путем. Наиболее рациональным способом оценки величины зазора служит подбор такого числового значения, которое наилучшим образом удовлетворяет результатам эксперимента, так как непосредственно измерить такие малые величины очень трудно. Если на этапах 2 и 3 происходит обратный перенос зарядов, то величина критического поля E_{c2} для обратного переноса определяется предельной величиной перенесенного заряда (EF и GH на рис. 205). Эту величину можно найти с помощью формул (144) и (148) при условии, что все остальные величины известны. Величина E_{c1} представляет критическое поле для эмиссии электронов с верхней диэлектрической поверхности, а E_{c2} — критическое поле для эмиссии электронов с нижней диэлектрической поверхности. Если обе поверхности изготовлены из одного и того же материала, то эти величины равны.

4.5.4. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА ПРИ НУЛЕВОМ ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ

Если две диэлектрические поверхности находятся в таком контакте, что между ними нет воздушного зазора, то перенос зарядов в этом случае все же возможен, но условия протекания процесса переноса и механизм перемещения зарядов с одной поверхности

на другую сильно отличаются от условий и механизма переноса при наличии воздушного зазора [1]). К условиям такого контакта приближается система, показанная на рис. 206, где два слоя очень гладкого гибкого диэлектрика соединены и находятся под давлением.

Если на некотором участке нижней диэлектрической поверхности до ее совмещения со вторым диэлектриком создать поверхностный заряд, обеспечивающий начальное напряжение на этом



Р и с. 206. Схема установки для экспериментов по прямому переносу зарядов.

диэлектрике, равное V_c, то начальная поверхностная плотность заряда σ_c на этой поверхности будет определяться выражением

$$\sigma_c = \frac{V_c K_s \varepsilon_0}{L_s} . \qquad (149)$$

После замыкания ключа B (рис. 206) напряжение V_d на верхнем диэлектрике, создаваемое поверхностным зарядом, будет равно напряжению V_s на нижнем диэлектрике. Допуская возможность свободного обмена зарядами между двумя поверхностями, имеем

$$V_d = \sigma_d \frac{L_d}{K_d \varepsilon_0} = \sigma_s \frac{L_s}{K_s \varepsilon_0} = V_s , \qquad (150)$$

где σ_d — поверхностная плотность заряда верхнего диэлектрика, а σ_s — поверхностная плотность заряда нижнего диэлектрика. Отношение плотностей зарядов имеет вид

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = \frac{L_s K_d}{K_s L_d} . \qquad (151)$$

[1]) Воздушный зазор действует как барьер, который необходимо устранить, чтобы мог произойти перенос зарядов.

Таким образом, отношение поверхностных плотностей зарядов равно отношению емкостей соответствующих слоев.

Так как никаких дополнительных зарядов при этом не создается, то

$$\sigma_c = \sigma_s + \sigma_d. \tag{152}$$

Из выражения (151) находим σ_s и, подставляя его в (152), получаем

$$\sigma_c = \sigma_d \left(1 + \frac{L_d K_s}{K_d L_s}\right). \tag{153}$$

Напряжение на верхнем диэлектрике, которое при этих условиях равно напряжению на нижнем диэлектрике, определяется следующей формулой:

$$V_d = \frac{V_c}{1 + \frac{L_s K_d}{K_s L_d}} = V_s. \tag{154}$$

Если устранить давление и, не размыкая ключа B, отделить поверхности друг от друга, то напряжение на верхнем и нижнем диэлектриках сохранится [1]), а начальный поверхностный заряд распределится между двумя поверхностями в отношении, определяемом выражением (151). После отделения поверхностей переноса зарядов, обусловленного пробоем воздушного промежутка, не происходит, так как поле между двумя диэлектриками, по существу, равно нулю.

Если же устранить давление только после размыкания ключа B и последующего замыкания ключа A, т. е. после подачи напряжения на слои, то при достаточно большой величине напряжения при разделении поверхностей можно получить дополнительный перенос зарядов. Однако если после подачи напряжения разомкнуть ключ A и замкнуть ключ B, то подача напряжения не обеспечивает переноса зарядов (конечно, при условии, что подача напряжения не приводит к утечке через диэлектрики). Если же приложенное напряжение настолько высоко, что происходит утечка через диэлектрические слои, то можно предполагать, что перенос зарядов в этом случае будет интенсивнее, чем при отсутствии напряжения.

Итак, при условии отсутствия утечки и пробоя диэлектрика переноса зарядов в незаряженных зонах не происходит. Следовательно, если перенос электростатических изображений производится описанным способом, можно ожидать, что на участки фона заряды не будут переноситься. Подача напряжения ничего не меняет, если токопроводящие подложки диэлектрических слоев закорочены.

---

[1]) Допускается, что при равновесных условиях между поверхностями происходит свободный обмен зарядами.

4.6. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Теория переноса зарядов при автоэлектронной эмиссии, пробое воздушного промежутка и обмене зарядами была подвергнута экспериментальной проверке. В качестве диэлектрического материала использовались пленки майлара, обладающие высоким удельным сопротивлением и высокой электрической прочностью. Можно считать, что пленки майлара по своим свойствам приближаются к идеальным изоляторам. В ряде экспериментов одним из диэлектриков служил аморфный селен, а пленка майлара использовалась в качестве верхнего диэлектрика, на который переносятся заряды. Так как в аморфном селене, особенно при высоком напряжении, наблюдается утечка, были проделаны также эксперименты по определению природы этой утечки. Кроме того, для испытывавшихся диэлектрических материалов определялось отношение толщины к диэлектрической проницаемости, поэтому производились измерения емкости этих материалов.

Были применены три различные методики эксперимента по переносу зарядов: методы отрыва, виртуального контакта и давления. В приводимом ниже описании экспериментов диэлектрический слой, на который переносят и на котором измеряют заряд, называется верхним диэлектрическим слоем, а диэлектрический слой (фотопроводящий слой), с которого переносят заряды, называется нижним диэлектрическим слоем. В ряде экспериментов использовался только один, верхний диэлектрический слой, так как заряды переносились с гладких металлических поверхностей.

Начальный подготовительный этап во всех трех методиках эксперимента практически один и тот же. С помощью коронного зарядника на половине поверхности нижнего диэлектрического слоя (аморфного селена или пленки) создают заряд. Затем на нижний диэлектрический слой накладывают верхний диэлектрический слой пленочной поверхностью вниз. В большинстве экспериментов были использованы эластичные пленки майлара с односторонним алюминиевым покрытием. В первых экспериментах брались прозрачные пленки майлара, у которых токопроводящие подложки представляли собой слой серебряной краски, нанесенной на пленку с одной стороны. В качестве слоев с аморфным селеном были использованы обычные пластины, предназначенные для копировальных аппаратов «Ксерокс». Функции нижнего электрода выполняла алюминиевая подложка этих пластин.

Рассмотрим этапы названных методик.

Метод отрыва. 1. Установка требуемой величины приложенного напряжения и подвод этого напряжения к верхнему и нижнему электродам системы.

2. Отделение диэлектрических поверхностей друг от друга при наличии приложенного напряжения.

3. Снижение приложенного напряжения до нуля и отключение напряжения.

4. Измерение заряда, перенесенного на верхнюю диэлектрическую поверхность, в участках, прилегающих к заряженным и незаряженным участкам нижнего диэлектрика (используется электрометр).

Метод виртуального контакта. 1. Установка требуемой величины приложенного напряжения и подвод его к двум электродам.

2. Снижение напряжения до нуля.

3. Отделение диэлектрических слоев в условиях закороченной цепи.

4. Измерение перенесенного заряда.

Метод давления. 1. Создание давления для получения полного контакта между диэлектрическими поверхностями.

2. Установка требуемой величины приложенного напряжения и подвод напряжения к электродам.

3. Снижение приложенного напряжения до нуля.

4. Снятие давления и разделение диэлектрических поверхностей.

5. Измерение перенесенного заряда.

4.6.1. ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА

В описываемых экспериментах в качестве коронного зарядника использовался процессор аппарата «Ксерокс». Во время зарядки половина нижнего диэлектрического слоя закрывалась экраном из алюминиевой фольги, поэтому заряд осаждался только на половине поверхности. Зарядное устройство позволяло получать либо положительный, либо отрицательный заряд.

Для измерения поверхностной плотности заряда, создаваемого на нижнем диэлектрическом слое, применялся электрометр, отградуированный в вольтах. Электрометр был соединен с самописцем. Измерения производились следующим образом. Заряженная поверхность медленно перемещалась под зондом электрометра, а показания прибора непрерывно фиксировались самописцем с тем, чтобы можно было вычислить среднюю величину напряжения для достаточно большой площади диэлектрической поверхности. Та же аппаратура и тот же метод использовались для измерения заряда, переносимого на верхнюю диэлектрическую поверхность, а в некоторых случаях и для определения заряда, остающегося на нижней диэлектрической поверхности после эксперимента.

Измерения емкости, на основании которых вычислялось отношение толщины к диэлектрической проницаемости (L/K) для данных материалов, производились с помощью установки, аналогичной изображенной на рис. 91.

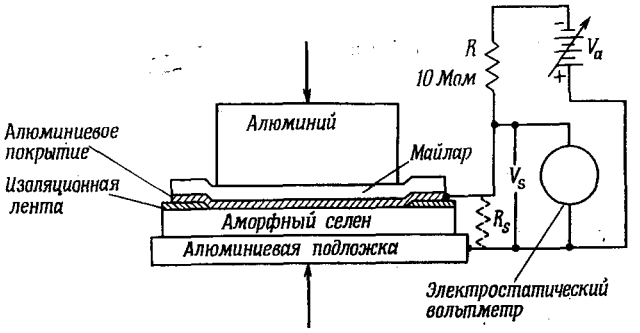


Рис. 207. Схема установки для измерения проводимости слоев аморфного селена в зависимости от приложенного поля. Давление 21 $\frac{кг}{см^2}$.

Схема измерения проводимости пленок аморфного селена при высоких напряженностях поля приведена на рис. 207.

Необходимое напряжение обеспечивалось источником постоянного тока.

4.6.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты проделанных экспериментов показаны на рис. 209—223. Представленные здесь расчетные и экспериментальные данные позволяют оценить степень приближения теории к эксперименту. Вычерчены графики зависимости перенесенного заряда от приложенного напряжения. В некоторых случаях показан также заряд, оставшийся на первоначально заряженном участке диэлектрического или фотопроводящего слоя. Расчетные величины перенесенного заряда получены из данных об отношении толщины пленки к ее диэлектрической проницаемости. Экспериментальные значения, полученные для различных диэлектрических пленок, представлены в табл. 4.

Так как пленка майлара обладает очень высоким удельным сопротивлением ($\sim 10^{19}$ *ом·см*), то при вычислении количества перенесенного заряда этот материал можно рассматривать как идеальный изолятор. Что же касается аморфного селена, то при наложении сильного поля его проводимость заметно возрастает. Результаты измерений, проведенных с помощью установки, показанной на рис. 207, представлены на рис. 208 в виде графика

Таблица 4

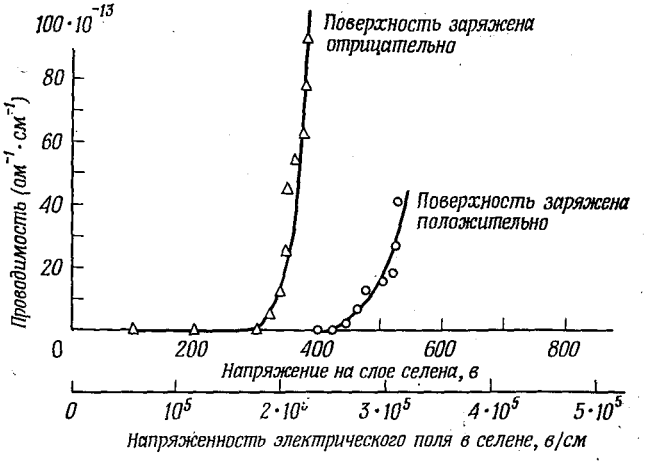
Отношение толщины пленки и ее диэлектрической [1]) проницаемости

Диэлектрик и его приблизительная толщина	Емкость, *пф*	L/K, *мк*
Аморфный селен, 20 *мк*	2110	2,7
Пленка майлара, покрытая серебряной краской, 0,013 *мм* [2])	1490	3,8
Пленка майлара, покрытая серебряной краской, 0,025 *мм*	800	7,1
Пленка майлара, покрытая серебряной краской, 0,051 *мм*	430	13,3
Пленка майлара, покрытая алюминием, 0,013 *мм*	2050	2,8
Пленка майлара, покрытая алюминием, 0,025 *мм*	880	6,5
Пленка майлара, покрытая алюминием, 0,051 *мм*	520	11,0
Пленка майлара, покрытая алюминием, 0,076 *мм*	410	14,0

[1]) Измерения емкости проводились на частоте 1 *кгц*.
[2]) Действительные толщины пленок майлара были обычно несколько ниже указанных.

зависимости проводимости слоя аморфного селена от напряженности электрического поля в селене и от напряжения на селеновом слое. Известно, что обычные ксерографические пластины с аморфным селеном выдерживают значительно более сильное поле в том случае, когда их поверхность заряжена положительно. Это подтверждается и результатами, представленными на рис. 208. Следует отметить, что при значениях отрицательного поверхностного потенциала, близких к $2 \cdot 10^5$ *в/см*, происходит резкое увеличение проводимости. Когда отрицательный поверхностный потенциал достигает величины ~ 400 *в* по отношению к подложке, проводимость становится такой большой, что слой аморфного селена в данном эксперименте по переносу зарядов приходится считать проводником. В случае положительного поверхностного потенциала проводимость возрастает заметно при $3 \cdot 10^5$ *в/см*, однако возрастание происходит не так быстро, как в случае отрицательного поверхностного потенциала. Следовательно, можно предположить, что в случае положительного поверхностного

потенциала утечка, которая позволяет слой селена считать проводником, возникает при значительно более сильных полях. Из практики известно, что для описываемых пластин с аморфным селеном предельный отрицательный потенциал обычно не превышает ~400 *в*; в случае же положительной зарядки эти пластины



Р и с. 208. Зависимость проводимости ксерографической пластины с аморфным селеном от приложенного напряжения и напряженности поля. Толщина селенового слоя равна 17 *мк*.

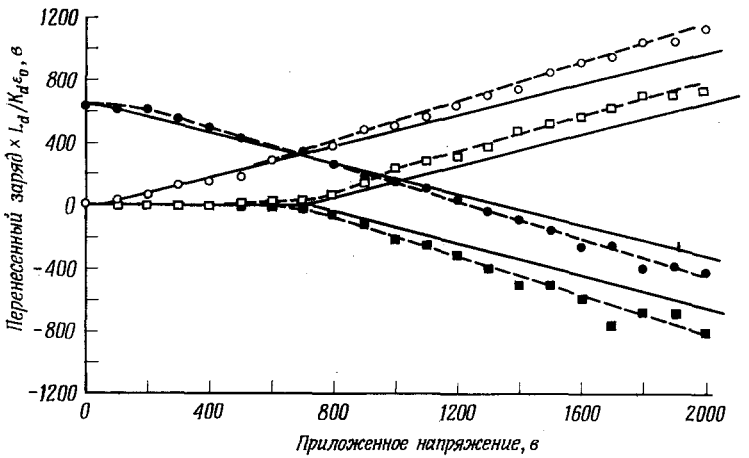
можно легко зарядить до 600—700 *в*. Этими свойствами аморфного селена и объясняются отклонения экспериментальных величин от расчетных, наблюдающиеся при переносе зарядов.

4.6.2.1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОТДЕЛЕНИЕМ ОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ДРУГОЙ

На рис. 209 приведены результаты, полученные при переносе зарядов методом отрыва для двух пленок майлара. Из рисунка видно, что теоретические данные довольно хорошо согласуются с экспериментальными, хотя, как правило, экспериментальные данные несколько выше расчетных величин, полученных с помощью формулы (138). В этом эксперименте направление приложенного поля было подобрано так, что на верхнюю диэлектрическую пленку направлялся положительный заряд, а на нижнюю — отрицательный. При этом следует ожидать, что на незаряженном участке перенос отрицательного заряда на нижнюю диэлектрическую пленку, по существу, будет зеркальным изображением переноса положительного заряда на верхний диэлектрик. Отрицательные заряды, переносимые на нижнюю диэлектрическую пленку,

сначала будут нейтрализовать имеющиеся на этой пленке положительные заряды до тех пор, пока начальный заряд нижней диэлектрической пленки не будет полностью нейтрализован, а затем будут накапливаться на ней, образуя остаточный отрицательный заряд.

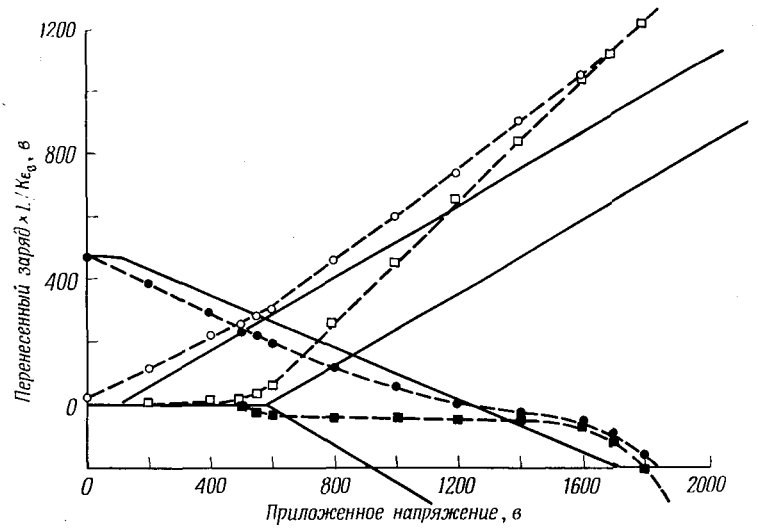
На рис. 210 приведена картина переноса для случая, когда нижним диэлектрическим слоем служит аморфный селен, а верхним — пленка майлара толщиной 0,013 *мм*. Так как при расчете



Р и с. 209. Перенос зарядов между двумя пленками майлара при разделении поверхностей.

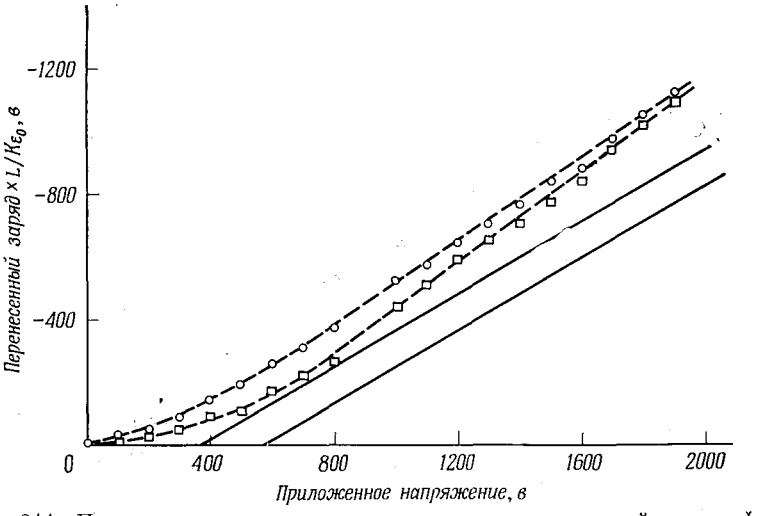
Напряжение заряженного участка равно +650 *в*. Экспериментальные данные: ○ для положительного заряда, перенесенного на заряженном участке; □ для положительного заряда, перенесенного на незаряженном участке; ■ для отрицательного заряда, перенесенного на заряженном участке; ● для остаточного заряда на заряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_d/K_d = 6{,}5$ *мк*.

принималось, что оба слоя являются идеальными изоляторами, то в результате утечки в селеновом слое, наблюдающейся при сильных полях, экспериментальные данные значительно отличаются от расчетных. Для незаряженного участка экспериментальные значения заряда, переносимого на пленку майлара, больше расчетных, причем разница между ними возрастает при повышении приложенного напряжения. Из рисунка видно, что, начиная от точки, соответствующей приблизительно приложенному напряжению 600 *в*, экспериментальная кривая идет под значительно бо́льшим углом наклона, чем расчетная кривая. Формулы (138) и (139) дают наклон расчетной линии, равный $(L/K)\cdot(1/D)$. В данном случае наклон расчетной кривой равен 0,585, тогда как наклон экспериментальной кривой в области высоких напряжений приближается к 1,0, т. е. к такому значению, которое можно было



Р и с. 210. Перенос заряда между пластиной с аморфным селеном и тонкой пленкой майлара (0,013 *мм*) при разделении поверхностей.

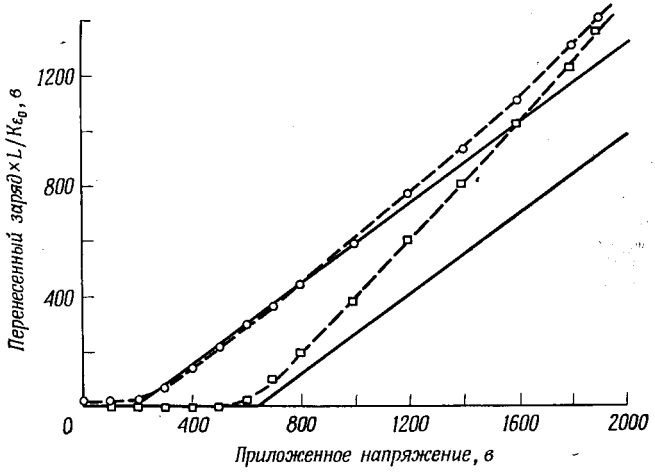
Среднее напряжение, создаваемое зарядами на слое селена, равно +472 *в*; ○ заряд, перенесенный на майлар на заряженном участке; □ заряд, перенесенный на майлар на незаряженном участке; ● остаточный заряд на заряженном участке селенового слоя; ■ заряд, перенесенный на селеновый слой на незаряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_S/K_S = 2{,}7$ *мк*, $L_d/K_d = 3{,}8$ *мк*.



Р и с. 211. Перенос отрицательного заряда между пластиной с аморфным селеном и пленкой майлара (0,013 *мм*) при разделении поверхностей.

Среднее напряжение, создаваемое зарядами, на слое селена равно —200 *в*; ○ заряд, перенесенный на пленку на заряженном участке; □ заряд, перенесенный на майлар на незаряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_S/K_S = 2{,}7$, $L_d/K_d = 3{,}8$ *мк*.

бы получить расчетным путем, если заменить слой селена хорошим проводником. На заряженном участке отклонение не так велико, и наклон экспериментальной кривой достигает значения 1,0 только при напряжении ~1600 *в*. Это объясняется тем, что положительный заряд на поверхности селена создает поле, обратное полю, создаваемому приложенным напряжением. Следует отметить также, что на незаряженном участке сохранялась очень

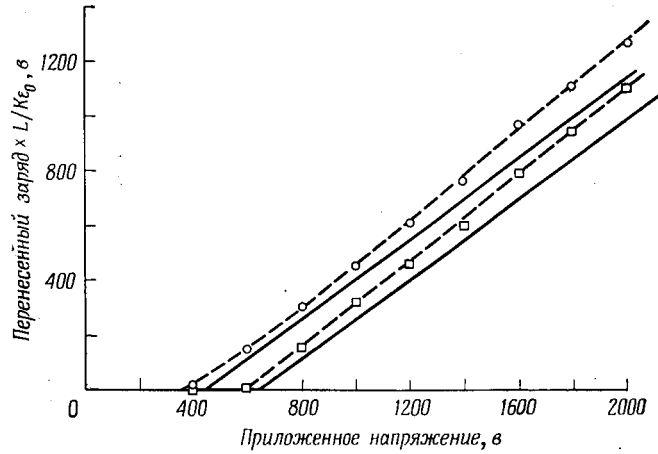


Р и с. 212. Перенос положительного заряда между пластиной с аморфным селеном и пленкой майлара (0,025 *мм*) при разделении поверхностей.

Среднее напряжение, создаваемое зарядами на слое селена, равно +450 *в*; ○ заряд, перенесенный на пленку на заряженном участке; □ заряд, перенесенный на пленку на незаряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_S/K_S = 2{,}7$ *мк*, $Ld/Kd = 7{,}1$ *мк*.

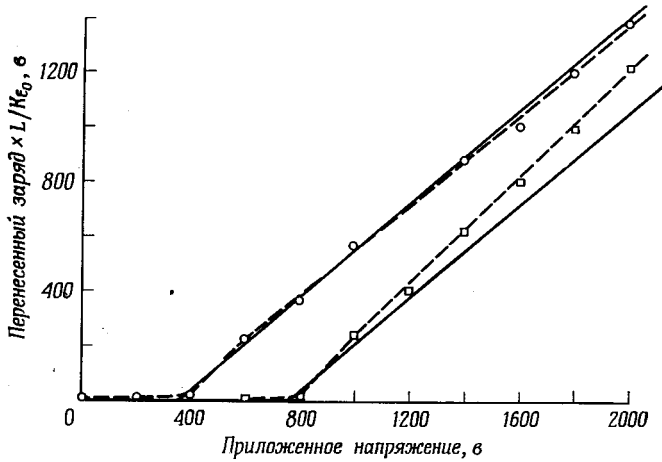
незначительная часть отрицательного заряда, перенесенного на селеновый слой. На рис. 211 показаны кривые для тех же материалов, но для случая отрицательной зарядки. Начальный заряд поверхности селена был отрицательным, и потенциал на заряженном участке равнялся 200 *в*. При этом также наблюдалось заметное расхождение экспериментальных и расчетных данных, однако наклон экспериментальных кривых в области сильных полей был ненамного больше наклона расчетных кривых. Это объясняется тем, что здесь направление поля, создаваемого приложенным напряжением, соответствует направлению поля при положительном потенциале поверхности селена, а утечка через слой селена в этом направлении слабее, чем в рассмотренном выше случае (см. рис. 208).

На рис. 212 и 213 приведены кривые, характеризующие перенос зарядов со слоя селена на пленку майлара толщиной 0,025 *мм*.



Р и с. 213. Перенос отрицательного заряда между пластиной с аморфным селеном и пленкой майлара (0,025 *мм*) при разделении поверхностей.

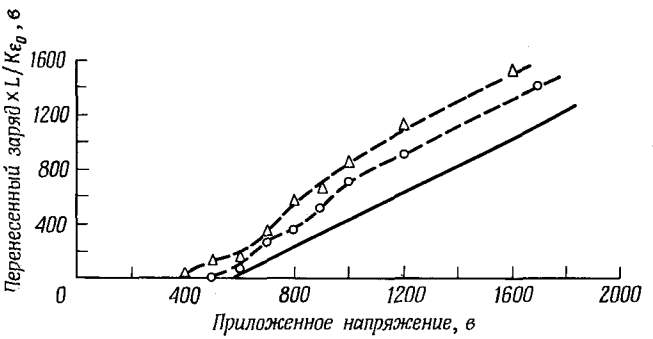
Среднее напряжение, создаваемое зарядами на слое селена, равно —200 *в*; ○ заряд, перенесенный на пленку на заряженном участке; □ заряд, перенесенный на пленку на незаряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_s/K_s = 2{,}7$ *мк*, $L/dKd = 7{,}1$ *мк*.



Р и с. 214. Перенос положительного заряда между пластиной с аморфным селеном и пленкой майлара (0,051 *мм*) при разделении поверхностей.

Среднее напряжение, создаваемое зарядами на слое селена, равно +400 *в*; ○ заряд, перенесенный на пленку на заряженном участке; □ заряд, перенесенный на пленку на незаряженном участке. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_s/K_s = 2{,}7$ *мк*, $Ld/Kd = 13{,}3$ *мк*.

На рис. 212 явно выражен эффект утечки через слой: наклон верхних участков экспериментальных кривых приблизительно равен 1,0, тогда как расчетная величина равна 0,724. Нижние участки кривой, описывающей процесс переноса на заряженном участке, где электрическое поле в селеновом слое мало, довольно близко подходят к расчетной кривой. На рис. 213 видно, что экспериментальные данные, полученные при переносе отрицательного заряда на пленку майлара, несколько выше расчетных,



Р и с. 215. Перенос заряда с полированной алюминиевой поверхности на майларовую пленку при разделении поверхностей.
Экспериментальные данные: ○ положительный заряд; △ отрицательный заряд. Сплошная линия соответствует расчетным значениям. $L1/K1 = 6{,}5$ *мк*.

выведенных для идеальных условий. Однако наклоны этих кривых почти одинаковы, что свидетельствует о меньшей утечке в селеновом слое.

При толщине пленки майлара 0,025 *мм* поле в слое селена, создаваемое приложенным напряжением, будет, конечно, слабее поля, создаваемого тем же напряжением при толщине пленки 0,013 *мм*. Поэтому и утечка через слой селена будет слабее.

На рис. 214 приведены зависимости, характеризующие перенос заряда с селена на пленку майлара толщиной 0,051 *мм*. В этом случае экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, особенно для заряженного участка. Однако наклон экспериментальной кривой, равный приблизительно 1,0 (расчетный наклон равнялся 0,83), свидетельствует об утечке на незаряженном участке.

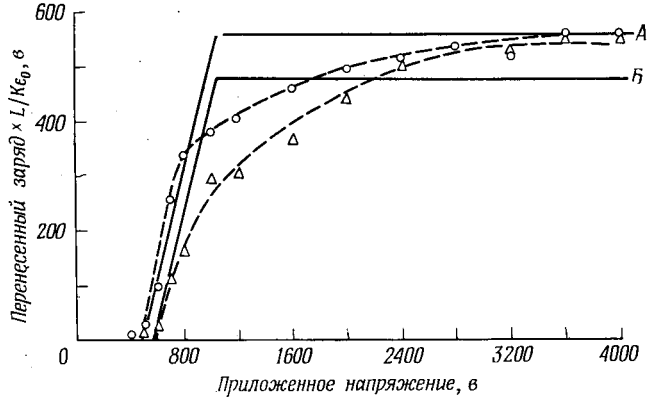
На рис. 215 представлены результаты эксперимента для полированной алюминиевой поверхности и пленки майлара. Он интересен тем, что металлическая поверхность не сохраняет заряда, перенесенного на нее при отрыве пленки майлара. Однако и в этом случае экспериментальные величины заряда, перенесенного на

пленку, значительно выше расчетных. Кроме того, экспериментальные значения в случае переноса отрицательного заряда получаются несколько выше, чем при переносе положительного заряда. Это свидетельствует о том, что перенос заряда в некоторой степени происходит также и за счет автоэлектронной эмиссии, возникающей до отрыва пленки от алюминия.

4.6.2.2. ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ ПРИ ВИРТУАЛЬНОМ КОНТАКТЕ

Эксперименты по методу виртуального контакта проводились для выяснения возможности переноса зарядов автоэлектронной эмиссией при очень малых воздушных зазорах.

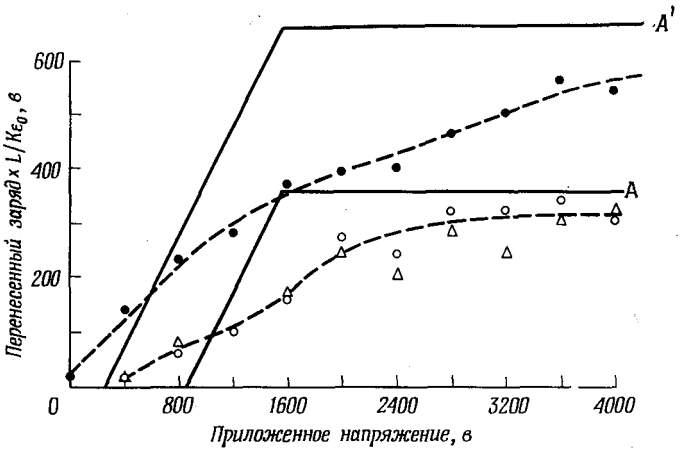
На рис. 216 приведены результаты для полированного алюминия и пленки майлара при виртуальном контакте. Экспериментальные и теоретические данные довольно хорошо согласуются.



Р и с. 216. Перенос заряда с полированной алюминиевой поверхности на пленку майлара по методу виртуального контакта.

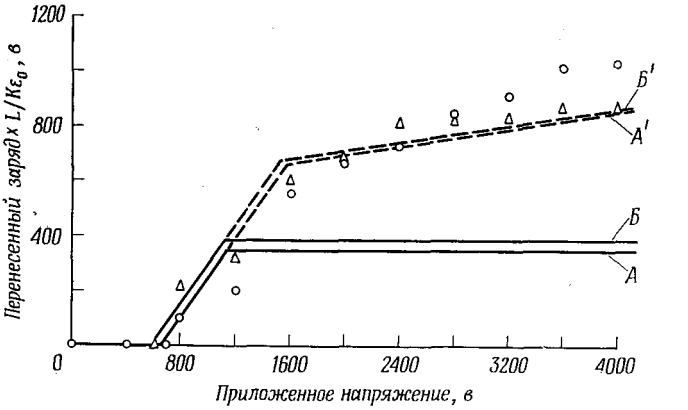
○ положительный заряд, перенесенный на пленку (металл соединен с положительным полюсом); Δ отрицательный заряд, перенесенный на пленку (металл соединен с отрицательным полюсом). Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. *А* — кривая для положительного заряда; *Б* — кривая для отрицательного заряда. $Ld/Kd = 6{,}5$ *мк*; для металла $Ec = 7{,}46 \cdot 10^5$ *в/см*; для майлара $Ec = 6{,}40 \cdot 10^5$ *в/см*.

По-видимому, различия между автоэлектронной эмиссией с пленки майлара, обеспечивающей перенос на эту пленку положительного заряда, и автоэлектронной эмиссией с металла, наблюдающейся при переносе на пленку отрицательного заряда, незначительны. Из уравнений, выведенных в разд. 4.5.3.1, и экспериментально найденных значений перенесенного заряда можно определить величины критических полей для автоэлектронной эмиссии либо по точке начала переноса заряда, лежащей на оси, по которой откладывается приложенное напряжение, либо по участку



Р и с. 217. Перенос заряда между двумя пленками майлара при виртуальном контакте.

Экспериментальные данные: ○ положительный заряд, перенесенный на верхнюю пленку на незаряженном участке; △ положительный заряд, перенесенный на нижнюю пленку на незаряженном участке; ● положительный заряд, перенесенный на верхнюю пленку с участка, предварительно заряженного до +610 *в*. Сплошные линии соответствуют расчетным величинам. *A'* — кривая для заряженного участка, *A* — кривая для незаряженного участка. $L_1/Kd = 6{,}5$ *мк*.



Р и с. 218. Перенос заряда с пластины с аморфным селеном на майларовую пленку при виртуальном контакте.

Экспериментальные данные: ○ положительный заряд, перенесенный на пленку; △ отрицательный заряд, перенесенный на пленку. *А* — расчетный уровень насыщения для переноса положительного заряда между идеальными изоляторами; *Б* — расчетный уровень насыщения для переноса отрицательного заряда между идеальными изоляторами; *А'* — расчетная кривая переноса положительного заряда с поправкой на утечку в селене в сильном поле; *Б'* — расчетная кривая переноса отрицательного заряда с поправкой на утечку в селене в сильном поле. $L_1/Kd = 6{,}5$ *мк*; $L_S/K_S = 2{,}7$ *мк*; E_C (Se) $= 5{,}88 \cdot 10^5$ *в/см*.

высоких напряжений, где величина перенесенного заряда стремится к насыщению.

Для построения кривых, представленных на рис. 216 сплошными линиями, вычисление величин, характеризующих автоэлектронную эмиссию, проводилось по точкам начала переноса положительных и отрицательных зарядов. Однако точное определение этих точек оказалось невозможным из-за большого разброса данных, поэтому расчетные величины для переноса зарядов были получены с помощью методов, описанных в разд. 4.5.3.1.

Зависимости, представленные на рис. 217, относятся к процессу переноса зарядов между двумя пленками майлара с односторонним алюминиевым покрытием. Здесь наблюдается заметное расхождение между экспериментальными и теоретическими данными. Заметим, что проведение этого эксперимента осложнялось возникновением трибоэлектрического эффекта. Расчеты показали, что на третьем этапе эксперимента, т. е. во время разделения пленок, происходит дополнительный обратный перенос зарядов.

На рис. 218 представлены результаты экспериментов по переносу зарядов между поверхностями аморфный селен — пленка майлара, находящимися в контакте. На графике показаны также точки, найденные с учетом утечки через слой селена, возникающей в сильном поле. С введением поправки на утечку достигается хорошее согласование между теоретическими и экспериментальными данными.

4.6.2.3. ОБСУЖДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчеты пробоя воздушного промежутка основаны на модифицированной кривой Пашена. Известно, что характеристики кривых Пашена для одного и того же газа несколько колеблются, особенно в области минимума этих кривых. Известно также, что положение минимума зависит от величины зазора [347] и материала поверхности [348]. Следовательно, кривую Пашена, на основе которой производится расчет величин, характеризующих перенос заряда, следует считать приближенной. Однако она вполне пригодна для объяснения рассматриваемых явлений.

Заметим, что ступенчатый перенос заряда, обусловленный существованием разности напряжений возникновения и окончания разряда, приводит к тому, что действительные значения параметров переноса зарядов оказываются в среднем выше значений, вычисленных по формулам (138) и (139).

Отметим также, что испытывавшиеся диэлектрические слои не всегда были однородны по толщине. Это приводило к разбросу результатов, особенно напряжений начала переноса заряда.

4.6.2.4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПЕРЕНОСУ ЗАРЯДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

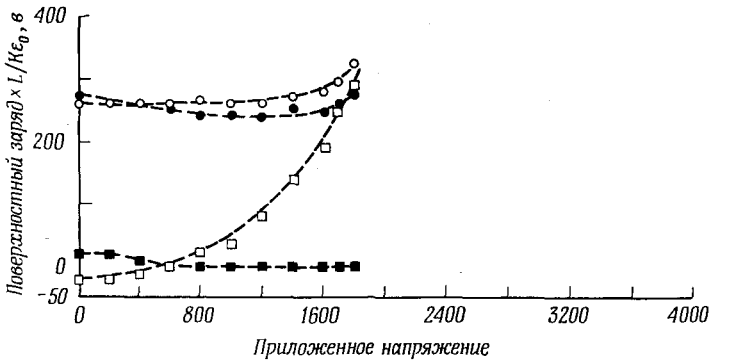
На рис. 219 представлены результаты экспериментов по переносу зарядов между двумя пленками майлара, находящимися под давлением. Расчет для идеальных изоляторов в этом случае показывает, что заряды должны переноситься только с предварительно заряженных участков. Кроме того, если нет утечки через пленки, перенос зарядов не зависит от приложенного напряжения. Из рис. 219 видно, что экспериментальные данные приближаются

Р и с. 219. Прямой перенос зарядов между двумя пленками майлара под давлением. Часть нижней пленки предварительно была заряжена до $+600$ *в*.
Экспериментальные данные: ○ заряд, перенесенный с заряженного участка на верхнюю пленку; ● заряд, оставшийся на заряженном участке нижней пленки; □ заряд, перенесенный с незаряженных участков на верхнюю пленку; ■ заряд, перенесенный с незаряженных участков на нижнюю пленку. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $Ld/Kd = 6{,}5$ *мк*.

к расчетным. В данном эксперименте были использованы две пленки майлара одинаковой толщины, и поэтому можно было ожидать, что на заряженных участках заряд разделится поровну между верхней и нижней пленками. В действительности же оказалось, что верхняя пленка, не имевшая начального заряда, получает несколько меньшую долю заряда. Это объясняется тем, что расчетные значения получены для условий идеального контакта и полного отсутствия воздушного зазора, а на практике даже при использовании давления условия полного контакта на отдельных микроскопических участках могут не соблюдаться.

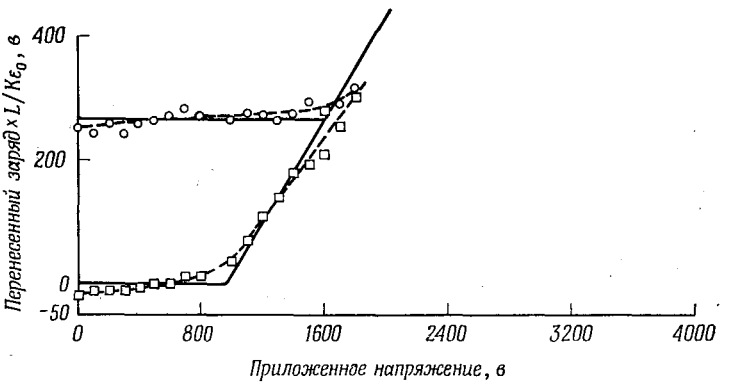
При высоких приложенных напряжениях, начиная приблизительно с 1200 *в*, на незаряженных участках происходит перенос заряда, что указывает на наличие утечки в пленке майлара. На заряженных участках утечка приводит к равенству величин перенесенного и оставшегося заряда. Это равенство сохраняется до величины приложенного напряжения 2400 *в*, после чего утечка

приводит к увеличению заряда, переносимого на верхнюю диэлектрическую пленку, и к уменьшению заряда, остающегося на нижней пленке.



Р и с. 220. Прямой перенос положительного заряда с пластины с аморфным селеном на пленку майлара (0,013 *мм*) под давлением. Часть селеновой поверхности предварительно была заряжена до +450 *в*.

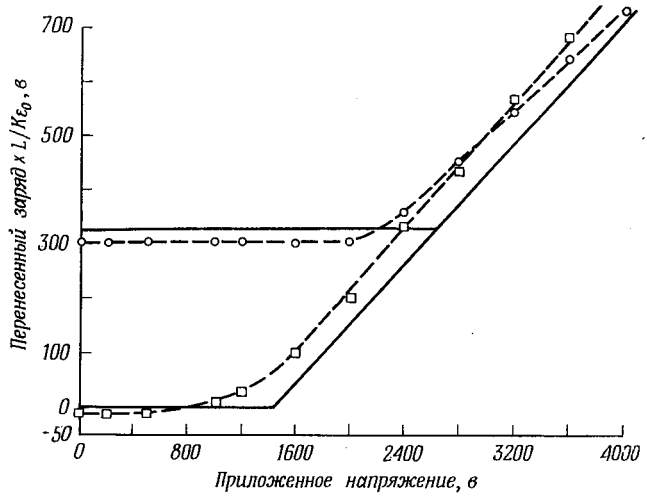
Экспериментальные данные: ○ заряд, перенесенный на пленку с заряженного участка; □ заряд, перенесенный на пленку с незаряженного участка; ● заряд, остающийся на заряженном участке селенового слоя; ■ заряд, остающийся на незаряженном участке селенового слоя.



Р и с. 221. Прямой перенос положительного заряда с пластины с аморфным селеном на пленку майлара (0,013 *мм*) под давлением.

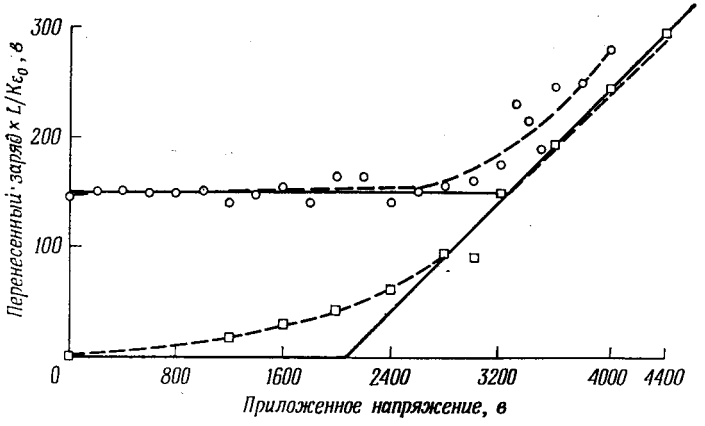
Экспериментальные данные: ○ заряд, перенесенный на пленку с заряженного участка; □ заряд, перенесенный на пленку с незаряженного участка. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_s/K_s = 2{,}7$ *мк* (Se); $Ld/Kd = 3{,}8$ *мк* (майлар).

На рис. 220 приведены кривые, иллюстрирующие влияние приложенного напряжения на перенос зарядов между аморфным селеном и пленкой майлара толщиной 0,013 *мм* под давлением. Видно, что при величине приложенного напряжения не более



Р и с. 222. Прямой перенос положительного заряда с пластины с аморфным селеном на пленку майлара (0,025 *мм*) под давлением. Часть селеновой поверхности была предварительно заряжена до +450 *в*.

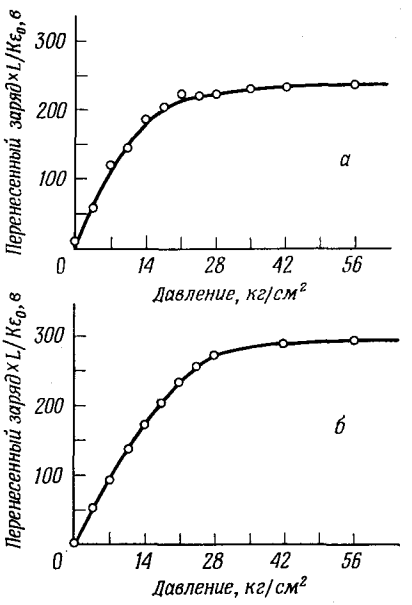
Экспериментальные данные: ○ заряд, перенесенный на пленку с заряженного участка; □ заряд, перенесенный на пленку с незаряженного участка. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_S/K_S = 2{,}7$ *мк* (Se); $L_d/K_d = 7{,}1$ *мк* (майлар).



Р и с. 223. Прямой перенос отрицательного заряда с пластины с аморфным селеном на пленку майлара (0,025 *мм*) под давлением. Часть селеновой поверхности была предварительно заряжена до —207 *в*.

Экспериментальные данные: ○ заряд, перенесенный на пленку с заряженного участка; □ заряд, перенесенный на пленку с незаряженного участка. Сплошные линии соответствуют расчетным значениям. $L_S/K_S = 2{,}7$ *мк*; $L_d/K_d = 7{,}1$ *мк*.

1500 *в* количество заряда, перенесенного на пленку, почти равно количеству заряда, оставшегося на селеновом слое. Когда же приложенное напряжение достигает 1500 *в*, утечка в селене приводит к дополнительному переносу зарядов. Следует отметить также, что на незаряженных участках при высоких значениях приложенного напряжения переносится значительный заряд, а утечка становится заметной уже при напряжении ~600 *в*. На рис. 221 представлены экспериментальные и расчетные данные для тех же материалов с учетом утечки через селен. При расчете было допущено (на основании данных рис. 208), что селеновый слой ведет себя как проводник, который испытывает влияние поля, приложенного в обратном направлении, соответствующего нанесенному на поверхность этого слоя отрицательному заряду, создающему напряжение 400 *в*. На рис. 222 и 223 приведены результаты для случая переноса зарядов под давлением между аморфным селеном и пленкой майлара толщиной 0,025 *мм*. Представленные на рис. 223 расчетные данные были вычислены с учетом влияния напряжения положительной полярности на проводимость селена. При этом предполагалось, что при переносе под давлением селен подобен проводнику; напряжение на селеновом слое равнялось +565 *в*.



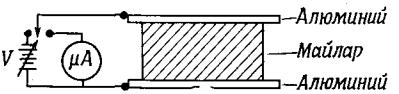
Р и с. 224. Зависимость заряда, перенесенного с аморфного селена на пленку майлара, от давления.

а — для пленки толщиной 0,013 *мм*; *б* — для пленки толщиной 0,025 *мм*. Слой селена предварительно заряжен до +500 *в*. *Приложенное напряжение равно* 0.

Влияние давления на перенос зарядов. Результаты измерений влияния давления на перенос зарядов с аморфного селена на пленку майлара представлены на рис. 224. Максимальный перенос зарядов достигался при давлении 21—28 *кг/см²*. Очевидно, что более гладкие поверхности требуют меньшего давления, чем поверхности, обладающие шероховатостью. Кроме того, хороший контакт между поверхностями получается и в тех случаях, когда по крайней мере одна из пленок обладает гибкостью или эластичностью.

4.6.3. ВНУТРЕННЯЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ МАЙЛАРА

Во время экспериментов было обнаружено, что пленки майлара обладают способностью к внутренней поляризации. Когда пленку майлара осторожно наложили на селеновую пластину, на поверхности которой было создано электростатическое изображение, на поверхности пленки образовалось электростатическое изображение противоположной полярности. Изображение сохранялось достаточно долго, так что его можно было проявить. Так как изображение на пленке имело противоположную полярность по отношению к изображению на селене, было высказано предположение, что это явление обусловлено внутренней поляризацией пленки майлара. Затем был поставлен эксперимент



Р и с. 225. Схема установки для измерения скорости деполяризации пленок майлара.

по определению природы внутренней поляризации. Схема установки показана на рис. 225. Опыт проводился следующим образом:

1. Между алюминиевыми электродами, разделенными пленкой майлара, создавалось напряжение (150 *в* при толщине пленки 0,013 *мм* и 500 *в* при толщине пленки 0,025 *мм*).

2. Система оставалась под напряжением в течение нескольких минут.

3. Приложенное напряжение снижалось до нуля и отключалось, а к алюминиевым поверхностям подсоединялся микроамперметр.

4. Определялось время, в течение которого ток деполяризации уменьшался до половины начальной величины.

Если принять, что уменьшение тока происходит экспоненциально, то время, необходимое для снижения тока до половины его начального значения, будет равно 0,69 τ, где τ — время релаксации. При уменьшении напряжения до нуля происходит нейтрализация поверхностного заряда, в результате которой напряжение на конденсаторе становится равным нулю. При подсоединении микроамперметра происходит деполяризация материала и заряды, нейтрализующие наведенный заряд, высвобождаются и протекают через прибор. Скорость спада тока при этом пропорциональна скорости деполяризации.

Эксперименты проводились на пленках майлара толщиной 0,013 и 0,025 *мм*. В обоих случаях время релаксации составляло 18 *сек*. Зависимость деполяризации диэлектрика от времени описывается формулой

$$P = P_0 e^{-t/\tau}, \qquad (155)$$

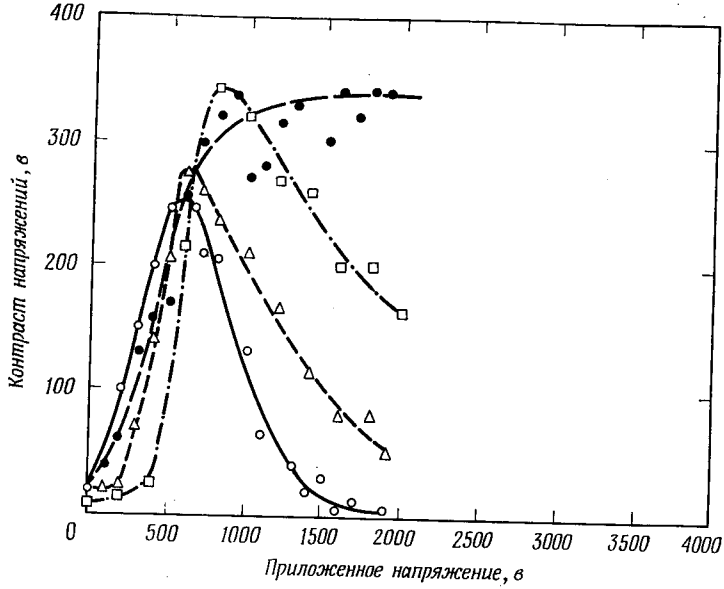
где P — поляризация по истечении времени t; P_0 — начальное значение поляризации; τ — постоянная времени деполяризации, определяемая как время, необходимое для того, чтобы поляризация изменилась в $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$ раз; e — основание натуральных логарифмов.

4.7. ВЫВОДЫ

Результаты исследований, описанных выше, имеют большое практическое значение. При переносе электростатических изображений первостепенную роль играют такие факторы, как электрический контраст, или контраст напряжений, и разрешающая способность перенесенного изображения. Под электрическим контрастом подразумевается разность напряжений, созданных зарядом, перенесенным с заряженных участков, и зарядом, перенесенным с незаряженных участков оригинального электростатического изображения. Разрешающая способность определяется как число различимых линий или пар линий на 1 *мм*.

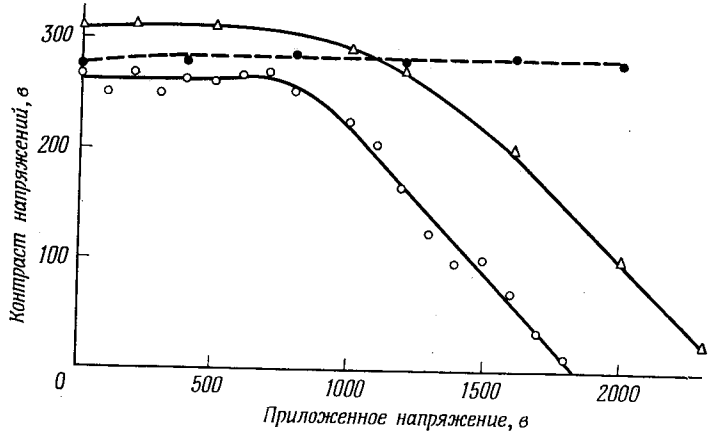
В описанных выше экспериментах по переносу зарядов были использованы большие заряженные участки. С помощью полученных данных можно определить электрический контраст. На рис. 226 приведены значения контраста напряжений, полученные из экспериментальных данных. Расчетные значения контраста, полученные при условии, что пленки являются идеальными изоляторами, дают зависимость контраста напряжений от приложенного поля в виде кривой, которая вначале довольно круто поднимается, а при достижении максимального значения становится более пологой. Из кривых рис. 226 видно, что заряд, переносимый с поверхности селена, сначала растет, достигает максимума, а затем при дальнейшем увеличении приложенного напряжения резко уменьшается. Таким образом, если перенос электростатического изображения с селена на диэлектрическую поверхность осуществляется методом отрыва и если требуется обеспечить максимальную контрастность изображения, то приложенное напряжение должно иметь величину, соответствующую максимуму кривой. Плотность проявленного электростатического изображения увеличивается с ростом контраста напряжений, хотя эта зависимость не обязательно должна быть линейной.

На рис. 227 показана зависимость контраста напряжений от приложенного поля для случая переноса заряда под давлением.



Р и с. 226. Зависимость контраста напряжений от приложенного напряжения при разделении поверхностей.

○ перенос с селена на майлар (0,013 *мм*); △ перенос с селена на майлар (0,025 *мм*); □ перенос с селена на майлар (0,051 *мм*); ● перенос с майлара (0,025 *мм*) на майлар (0,025 *мм*).



Р и с. 227. Зависимость контраста напряжений от приложенного напряжения для случая прямого переноса зарядов под давлением.

○ перенос с селена на майлар (0,013 *мм*); △ перенос с селена на майлар (0,025 *мм*); ● перенос с майлара (0,025 *мм*) на майлар (0,025 *мм*).

Из рисунка видно, что максимальный контраст достигается при нулевом приложенном напряжении.

Разрешающая способность перенесенного изображения обычно находится в обратной зависимости от величины зазора. Таким образом, можно ожидать, что перенос под давлением, при котором практически нет воздушного зазора, обеспечивает наилучшую разрешающую способность. На практике перенос электростатических изображений осуществляется тремя методами: методом отрыва, методом виртуального контакта и методом давления. Результаты проявления показывают, что методы отрыва и давления позволяют довольно легко получать хорошие изображения при переносе с селена на майлар. При переносе же по методу виртуального контакта качество изображений было довольно низким. Изображения были окружены ложными рисунками, образованными электрическими зарядами, источником которых, по всей вероятности, являются сильные поля и имеющийся обратный перенос зарядов. Что касается максимальных значений разрешающей способности, получаемых при первых двух методах, то пока еще нет надежных данных. Некоторые предварительные опыты, в которых использовался жидкий проявляющий состав с малым размером частиц, показали, что метод отрыва дает разрешающую способность до 33 *лин/мм*, а метод давления — до 90 *лин/мм*. Эти цифры просто характеризуют разрешающую способность, наблюдающуюся при этих экспериментах, и их не следует считать предельными.

На разрешающую способность переносимых электростатических изображений влияет много разных факторов, например разрешающая способность электростатического изображения, с которого переносится заряд (оригинал) и размер частиц проявителя.

По-видимому, метод отрыва будет вполне удовлетворителен при переносе электростатических изображений макроскопических размеров, т. е. изображений, легко различимых невооруженным глазом, тогда как для переноса электростатических изображений микроскопических размеров наиболее пригодным может оказаться метод давления.

4.8. МЕХАНИЗМ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ

Прохождение электрического тока через газы определяется следующими факторами: 1) давлением; 2) длиной разрядного промежутка; 3) напряженностью электрического поля; 4) энергией, приобретаемой свободными электронами; 5) вероятностью электронной ионизации в газе и 6) числом свободных электронов, имеющихся в начальный момент. (При очень малых разрядных

промежутках и сильных полях благодаря автоэлектронной эмиссии могут появиться дополнительные электроны.)

В тех случаях, когда длина разрядного промежутка в газе невелика, прохождение тока обеспечивается в основном движением электронов и положительных ионов [350]. При этом сначала возникает движение свободных электронов, которые ускоряются полем и сталкиваются с молекулами газа. В результате столкновений образуются положительные ионы и новые электроны, что приводит к возникновению так называемой электронной лавины Таунсенда.

Так как электронная лавина Таунсенда экспоненциально возрастает с длиной пути, пройденного электронами, важно установить, какие ограничения на этот процесс накладывают малые размеры зазоров.

4.8.1. ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ПРИ НЕИЗМЕННОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ

Если один электрон, перемещаясь в газе на расстояние 1 *см* по направлению поля, образует α новых электронов и положительных ионов, то увеличение количества ионов dn, вызванное n электронами на расстоянии dx, определяется по формуле

$$dn = \alpha n\, dx. \tag{156}$$

Интегрируя это выражение в пределах от $n = n_0$ при $x = 0$ до $n = n$ при $x = x$, получим

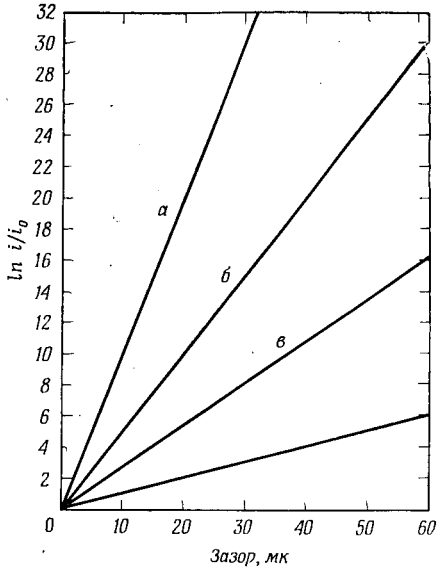
$$n/n_0 = e^{\alpha x}. \tag{157}$$

Так как проходящий через газ ток i пропорционален n, то $n/n_0 = i/i_0$, где i_0 — начальный ток, обусловленный n_0 свободными электронами, имеющимися в газе в исходный момент. Отсюда

$$\ln i/i_0 = \alpha x. \tag{158}$$

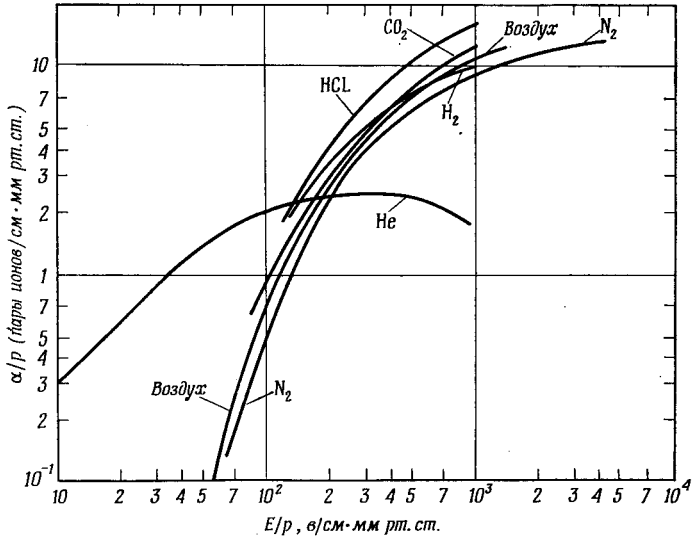
Эта зависимость, выведенная Таунсендом, справедлива для довольно большого диапазона величин зазоров, когда поле не зависит от x. В выражении (158) α — хорошо известный первый коэффициент Таунсенда [1]). Расстояние x принимается равным величине зазора. С помощью формулы (158) были рассчитаны кривые $\ln i/i_0$ для нескольких значений напряженности поля (рис. 228). Были рассчитаны также отношения токов для воздуха при 760 *мм рт. ст.* (значения α брались из рис. 229). Отметим, что при малых зазорах, например менее 5 *мк*, ток увеличивается незначительно.

[1]) При сильных полях и для больших величин x выражение (158) перестает быть линейным вследствие возникновения вторичных эффектов (второй коэффициент Таунсенда) [351]. При очень малых зазорах этими эффектами можно пренебречь.



Р и с. 228. Зависимость отношения токов для воздуха при 760 *мм рт. ст.* от зазора.

(*а*) $\alpha = 10\,000$, $E = 707\,000$ *в/см*; (*б*) $\alpha = 5000$, $E = 364\,800$ *в/см*; (*в*) $\alpha = 2700$, $E = 200\,000$ *в/см*; (*г*) $\alpha = 1000$, $E = 98\,800$ *в/см* (по расчетам Шафферта [338]).



Р и с. 229. Зависимость величины первого коэффициента ионизации Таунсенда α от напряженности поля для различных газов (по данным работы [352]).

4.8.2. ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Если отделение поверхностей происходит при постоянном напряжении, а это значит, что увеличение зазора сопровождается ослаблением напряженности поля, то при нахождении зависимости между током в газе и зазором следует учитывать зависимость α от напряженности поля (рис. 229).

Зависимость α/p от E/p имеет такую форму, которая путем соответствующего подбора некоторых констант A и B может быть представлена в виде эмпирической зависимости [356]

$$\alpha/p = Ae^{-Bp/E}, \tag{159}$$

где p — давление, *мм рт. ст.*, а E — напряженность поля в газе.

Так как нас интересуют в первую очередь малые разрядные промежутки и сравнительно высокие напряженности поля, выражение (159) было применено к верхней части кривой для воздуха (см. рис. 229). В этом случае $A = 15{,}6$ и $B = 400$ (рис. 230).

Подставляя α из выражения (159) в (156), получим

$$dn/n = Ape^{-Bp/E}\,dx. \tag{160}$$

Так как на расстоянии x падение напряжения в газе $V = Ex$, уравнение (160) принимает вид

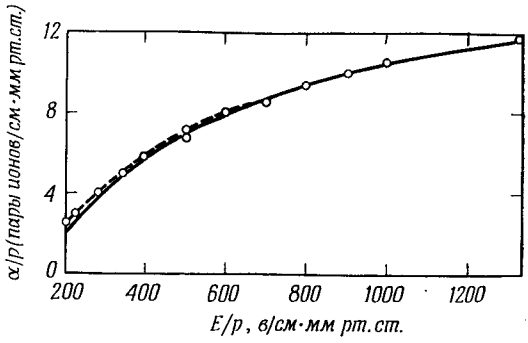
$$dn/n = Ape^{-Bpx/V}\,dx. \tag{161}$$

Интегрируя его в пределах от n_0 до n и от 0 до x, получаем

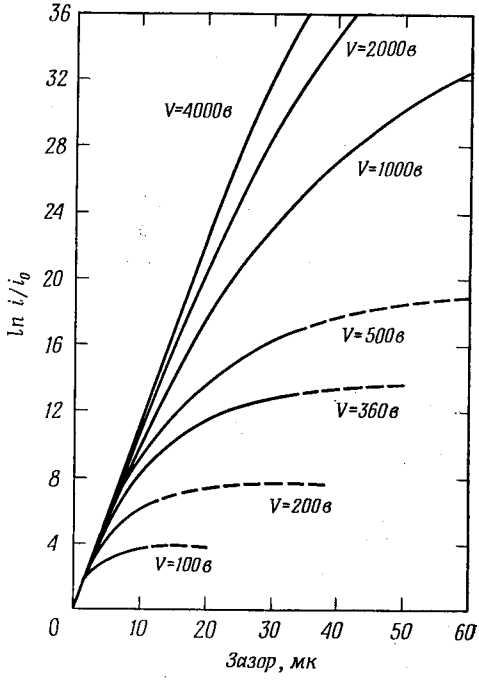
$$\ln n/n_0 = \ln i/i_0 = \frac{AV}{B}(1 - e^{-Bpx/V}). \tag{162}$$

С помощью этого уравнения можно определить отношение i/i_0 для различных напряжений и зазоров, так как величины A, B и p известны.

На рис. 231 приведены кривые зависимости i/i_0 от величины зазора для напряжений от 100 до 4000 *в*. При очень малых зазорах (приблизительно до 3 *мк*) величина $\ln i/i_0$ почти не зависит от напряжения. Эти значения соответствуют той части кривой рис. 230, которая лежит в области сильных полей (10^6—10^7 *в/см*). Отметим, что при больших значениях E/p отношение α/p стремится к насыщению. Возрастание тока при таких малых зазорах также мало; например, при зазоре, равном 2,5 *мк*, ток увеличивается не более чем в 15 раз, т. е. $\ln i/i_0 = 2{,}7$. Это объясняется тем, что величина зазора 2,5 *мк* не более чем на порядок больше длины свободного пробега электрона в воздухе при атмосферном давлении.



Р и с. 230. Зависимость α/p от E/p для воздуха.
Числовые значения взяты из рис. 229 и работы [354]. Сплошная линия: $\alpha/p = 15{,}6\, e^{-400\, p/E}$ (по данным Шафферта [338]).



Р и с. 231. Увеличение отношения токов в зависимости от зазора для нескольких значений напряжения.
Газ: воздух при 760 *мм рт. ст.* (по данным Шафферта [338]).

4.8.3. ВЕЛИЧИНА ТОКА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Найдем величину тока, необходимую для переноса определенной величины заряда за ограниченный отрезок времени. Так, если требуется получить на диэлектрической пленке с диэлектрической проницаемостью 3,0 и толщиной 25 *мк* заряд, создающий напряжение 300 *в*, необходимо перенести заряд плотностью $3{,}2\times$ $\times 10^{-8}$ *к/см*^{2}. Если принять, что время переноса заряда равно 0,001 *сек*, то необходимый ток будет равен

$$i = \frac{3{,}2\cdot 10^{-8}}{0{,}001} = 32 \text{ мка/см}^2. \tag{163}$$

При величине зазора 2,5 *мк* отношение $i/i_0 = 15$ (см. рис. 231) и, следовательно,

$$i_0 = 2{,}13 \text{ мка/см}^2. \tag{164}$$

При воздушном зазоре 1,0 *мк* отношение $i/i_0 = 3$ и

$$i_0 = 10{,}67 \text{ мка/см}^2. \tag{165}$$

Эти токи значительно больше тех, которых можно было бы ожидать, зная первоначальное количество свободных электронов в газовом слое даже при наличии сильного источника ионизации, например ультрафиолетового излучения. Отсюда ясно, что такие большие начальные токи могут быть получены только при наличии автоэлектронной эмиссии с поверхностей.

Аналогичный анализ правой части от точки минимума кривой Пашена показывает, что для переноса того же заряда за тот же отрезок времени (т. е. $3{,}2\cdot 10^{-8}$ *к/см*^{2} за 0,001 *сек*) требуются значительно меньшие начальные токи. В точке минимума (360 *в*, 8 *мк*) $i_0 \approx 2{,}67\cdot 10^{-12}$ *а/см*^{2}. При больших зазорах требуются еще меньшие начальные токи.

Время 0,001 *сек* взято только для сравнения, в действительности же переход электронов в условиях разряда происходит в более короткие отрезки времени.

Уравнение Фаулера — Нордхейма для токов автоэлектронной эмиссии с холодной поверхности обычно записывают в виде [354]:

$$i = 1{,}55\cdot 10^{-6}\frac{E^2}{\varphi}\, e^{\frac{-6{,}8\cdot 10^7\cdot \varphi^{3/2}}{E}\cdot f(y)}, \tag{166}$$

где i — плотность тока, *а/см*^{2}; E — напряженность поля, *в/см*; φ — работа выхода, *эв*; $f(y)$ — поправочный коэффициент, учи-

тывающий силы зеркального изображения и работу выхода. Численные значения $f(y)$ можно найти в таблицах работы [357].

В этом уравнении существенную роль играет численное значение φ. Токи, порядок величин которых определяется уравнениями (164) и (165), требуют, чтобы при поле напряженностью $2{,}0 \times \times 10^6$ *в/см* значения работы выхода лежали в диапазоне 1,0—1,1 *эв*. При переносе зарядов значения тока не соответствуют этим величинам эффективной работы выхода, так как в данном случае поверхности соприкасаются с воздухом и часто содержат микроскопические неровности и некоторое количество пыли, попадающей из воздуха, и поэтому локализованные поля могут быть значительно сильнее среднего поля, рассчитанного по величине приложенного напряжения и зазору. При испытании неровных, насыщенных газом поверхностей измеримые токи автоэлектронной эмиссии могут быть обнаружены даже при очень слабых полях ($4 \cdot 10^4$ *в/см*) [357].

4.9. МЕХАНИЗМ ПРЯМОГО ПЕРЕНОСА ЗАРЯДОВ

Из наблюдений процесса разделения зарядов при прямом переносе следует, что поверхностные заряды, создаваемые коронным разрядом, непрочно связаны с поверхностью. В пределах точности измерений можно сделать вывод, что свободный обмен зарядами между двумя поверхностями, находящимися в полном контакте, происходит даже тогда, когда заряд наносится вначале только на одну из поверхностей. Этот вывод противоречит гипотезе о том, что заряды, нанесенные на поверхности диэлектриков и фотопроводящих изоляторов с помощью коронного разряда, захватываются поверхностными уровнями.

Однако при полном контакте между материалами, достигаемом с помощью давления, можно считать, что происходит исчезновение поверхностных уровней и поверхностный барьер снижается до нуля. Это очевидно в том случае, когда контактируют поверхности из одного и того же материала, например две пленки майлара. Однако процесс разделения заряда происходит столь же эффективно и в том случае, когда контактирующими поверхностями являются селеновый слой и пленка майлара, где можно ожидать возникновения поверхностного барьера.

Имеющиеся немногочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что поверхностные заряды, по-видимому, довольно слабо связаны с диэлектрическим или фотопроводящим слоем изолятора. Вероятно, эта связь осуществляется лишь за счет притяжения зарядов к зарядам противоположного знака, наведенным в токопроводящей подложке. Этот вопрос еще требует дальнейших исследований.

V. ТЕОРИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ СКРЫТОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Применяемые в настоящее время способы электрофотографического проявления основаны на притяжении небольших заряженных частиц электрически заряженными участками, образующими электростатическое изображение. Эти частицы, называемые обычно частицами проявителя, переносятся в зону электростатического изображения различными типами носителей. При каскадном проявлении носителем служит бисер, а при проявлении магнитной кистью — железные опилки. В обоих случаях частицы проявителя удерживаются на поверхности носителей трибоэлектрическими силами. При жидкостном проявлении носителем служит жидкий диэлектрик, а при аэрозольном проявлении — газ (обычно воздух). Проявляющий состав в этих случаях представляет собой суспензию частиц проявителя в жидкости, или аэрозоль.

В основе разработанных недавно способов «фотопластического» проявления [46] и проявления по методу получения «изморози» [47] лежит явление теплового размягчения термопластического слоя, протекающее без участия заряженных частиц. В настоящее время эти методы находятся еще в стадии эксперимента, поэтому в данной главе будут рассмотрены более распространенные способы электрофотографического проявления с использованием частиц проявителя.

5.1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЧАСТИЦ ПРОЯВИТЕЛЯ

Для эффективного и полного проявления электрофотографического изображения необходимо до или во время процесса проявления зарядить частицы проявителя. Для проявителей в виде сухого порошка обычно используют метод давно известной, но не получившей строгого научного объяснения контактной электризации.

В случае жидких проявляющих составов взвешенные частицы заряжаются благодаря их электрокинетической взаимосвязи с окружающим жидким диэлектриком. Строгого научного объяснения этого процесса также пока еще нет.

5.1.1. ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ СУХОМ ПРОЯВЛЕНИИ

Хорошо известно, что при взаимном трении (или соприкосновении) двух электроизолирующих материалов на их поверхностях образуются электрические заряды. Это явление известно под названиями: электризация трением (трибоэлектричество), статическая электризация и контактная электризация. В ряде промышленных процессов это явление часто приводит к разного рода осложнениям и считается вредным и опасным. В электрофотографии же оно используется для создания электрических зарядов на частицах сухого проявителя. Применение контактной электризации при проявлении электрофотографического изображения описано в ч. I, разд. 2.5. Для определения знака заряда, получаемого разными материалами при их взаимном трении, составляют трибоэлектрический ряд этих материалов. Для этого испытуемые материалы соединяют по два, а затем отделяют друг от друга и с помощью электрометра определяют знак заряда на каждом из них. Затем составляется список этих материалов в порядке убывания величины заряда, начиная от наибольшего положительного заряда и кончая наибольшим отрицательным, так что каждый последующий материал оказывается отрицательным по отношению к любому вышестоящему. В качестве примера приведем трибоэлектрический ряд, представленный в работе [358]: (+) — этилцеллюлоза, казеин, перспекс (полиметилметакрилат), тафнол (слоистый материал на основе фенолформальдегидных смол), эбонит, ацетат целлюлозы, стекло, все металлы, полистирол, полиэтилен, тефлон (политетрафторэтилен — фторопласт-4); (—) — нитроцеллюлоза.

Экспериментально установлено, что контактная электризация — это чисто поверхностный эффект, при котором решающую роль играют различные факторы, влияющие на природу контактирующих поверхностей (такие, как наличие малейших загрязнений и др.). Этим объясняются часто встречающиеся расхождения экспериментальных данных, полученных разными исследователями для одних и тех же материалов. Леб [359] приводит следующие источники загрязнения поверхности твердого тела:

1. Пленки адсорбированной влаги с растворенными в ней веществами; толщина слоя от 2 до 10^4 Å.

2. Окисные пленки различной толщины, начиная от мономолекулярных слоев и выше, покрывающие практически все металлы. Они могут быть удалены путем химической обработки с последующей дегазацией и отжигом в вакууме при высокой температуре.

3. Пленки жиров или остатков органических веществ, которые обладают способностью отдавать или принимать ионы (от мономолекулярных слоев до слоев толщиной 10^4 Å).

4. Отпечатки пальцев.

5. Загрязнения неизвестного характера, в число которых входят, по-видимому, серная и сернистая кислоты, окись углерода, углерод, углеводороды и соли, образующиеся при «очистке и сушке» поверхности открытым пламенем.

6. Действие влаги, воздуха, света и пыли.

Перечисленные загрязнения можно обнаружить на поверхностях даже после самой тщательной промывки и очистки растворителями. Скорее всего именно эта очистка и служит источником загрязнения.

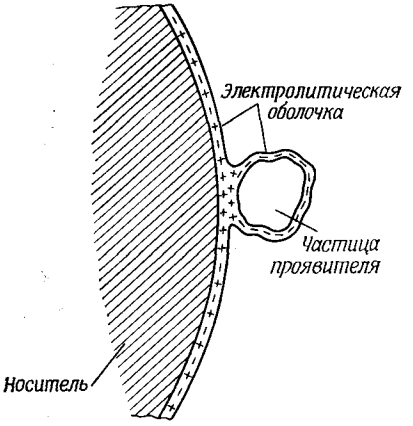
Таким образом, истинная природа поверхностей обычно не известна, а получить действительно чистую поверхность, по-видимому, невозможно. Учитывая это, можно сделать вывод, что попытка построить полные трибоэлектрические ряды материалов на основе опубликованных данных была бы преждевременной. Для этого необходим строгий контроль экспериментов, предусматривающий особо тщательное проведение операций подготовки образцов и обработки поверхностей и контроль окружающих условий. Условия же экспериментов, с помощью которых были получены опубликованные в настоящее время данные, редко отвечали указанным требованиям.

Природа явления, лежащего в основе процесса контактной электризации, представляет собой тему, которая заслуживает детального рассмотрения, причем имеются лишь разрозненные данные, которыми можно подтвердить выдвигаемые положения. Глубокий анализ этого процесса дан в работе Харпера [360], где высказано предположение, что процесс контактной электризации складывается из ряда процессов, которые в разных условиях могут выступать в разных сочетаниях.

В работе Харпера приводятся данные из ряда источников, на основании которых можно дать довольно правдоподобное описание процесса. Из данных следует, что при контактной электризации возможны два вида переноса зарядов между поверхностями: ионный и электронный. Предполагается, что при переносе ионов на одной или обеих поверхностях образуется электролитическая «оболочка», представляющая собой слой влаги, адсорбированной либо непосредственно поверхностью, либо слоем гигроскопичных загрязнений. Толщина этой оболочки очень мала, возможно менее 100 Å, и поэтому ее трудно обнаружить. Предполагается также, что электролитическая оболочка содержит и положительные, и отрицательные ионы и что при контакте поверхностей происходит перенос более подвижных ионов. Кроме того, считается, что под действием сил поля, создающего скрытое изображение, электролитическая оболочка сильнее притягивается к той поверхности, которая имеет бо́льшую диэлектрическую проницаемость. Согласно этой гипотезе, в тех случаях, когда поверхностные слои постав-

ляют подвижные ионы H^+, поверхность с более высокой диэлектрической проницаемостью заряжается положительно, а вторая поверхность — отрицательно; в тех случаях, когда выделяются свободные ионы OH^-, картина будет обратной. В подтверждение гипотезы переноса ионов Харпер приводит данные из работ [361—363].

Схема зарядки частицы проявителя, находящейся в контакте с поверхностью носителя, путем переноса ионов показана на рис. 232. Предполагается, что положительные ионы более подвижны и диэлектрическая проницаемость носителя больше, чем у частицы проявителя. При этих условиях частица проявителя после разделения поверхностей будет иметь отрицательный заряд.



Р и с. 232. Зарядка частицы проявителя при ионном переносе зарядов.

На процесс переноса электронов, как полагает Харпер [364], оказывают влияние контактные потенциалы, и зарядка путем переноса электронов происходит в тех случаях, когда оба материала либо полупроводники, либо металлы. Если же один или оба материала являются изоляторами, преобладает ионный перенос.

Некоторым подтверждением теории ионного переноса зарядов могут служить эксперименты по переносу заряда между диэлектрическими поверхностями, находящимися под давлением (см. разд. 4.5.4 и 4.6.2.4). В этих экспериментах поверхностный заряд создавался путем осаждения ионов, образующихся при коронном разряде. При хорошем контакте между поверхностями эти заряды легко переходили на незаряженный диэлектрик. Однако плотность поверхностного заряда в этом случае приблизительно на порядок больше, чем при контактной электризации.

В экспериментах Роуза и Уорда [358], где контакт между различными поверхностями достигался сжатием, получены плотности поверхностного заряда в интервале $7 \cdot 10^{-9}$—$1{,}8 \cdot 10^{-8}$ $к/см^2$, тогда как при экспериментах по переносу зарядов под давлением диапазон плотностей поверхностного заряда составлял $4 \cdot 10^{-8}$—$15 \cdot 10^{-8}$ $к/см^2$.

В этих экспериментах обнаружена также линейная зависимость между величиной создаваемого поверхностного заряда и площадью контакта для случаев, когда поверхности сначала

прижимают друг к другу, а затем разъединяют. Кроме того, плотность заряда приблизительно пропорциональна величине меньшей диэлектрической проницаемости для данной пары материалов.

Обычно при статической электризации одна из поверхностей является изолятором. Такая картина наблюдается, как правило, и при зарядке частиц проявителя, состоящего в основном из смолы. Проводящие материалы, по-видимому, теряют заряд, полученный ими при контакте. Однако при проявлении порошковым облаком частицы проявителя образуют аэрозоль после зарядки при контакте с другой поверхностью, причем здесь уже неважно, являются ли эти частицы проводящими, так как они будут сохранять свой заряд в течение всего времени, пока существует аэрозоль.

5.1.2. ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКИХ ПРОЯВЛЯЮЩИХ СОСТАВОВ

Используемые в электрофотографии жидкие проявляющие составы представляют собой суспензию частиц проявителя в жидком диэлектрике. Проявление электростатического изображения осуществляется путем электрофоретического переноса дисперсных частиц проявителя под действием поля скрытого изображения. Следовательно, эффективность процесса проявления зависит от подвижности заряженных частиц в дисперсной среде.

Электрофоретическая подвижность u (скорость на единицу напряженности поля) дисперсной заряженной частицы выражается следующей приближенной формулой [365]:

$$u = A\zeta\varepsilon/\eta, \tag{167}$$

где ζ — электрокинетический потенциал (дзета-потенциал); ε и η — соответственно значения диэлектрической проницаемости и вязкости для жидкости, в которой диспергированы частицы; A — константа, величина которой принимается обычно равной либо $^1/_4\ \pi$, когда толщина двойного электрического слоя мала по сравнению с радиусом частицы, либо $^1/_6\ \pi$, когда толщина этого слоя велика по сравнению с радиусом частицы. В работах [365, 366] рассматриваются условия, при которых эта зависимость не выполняется.

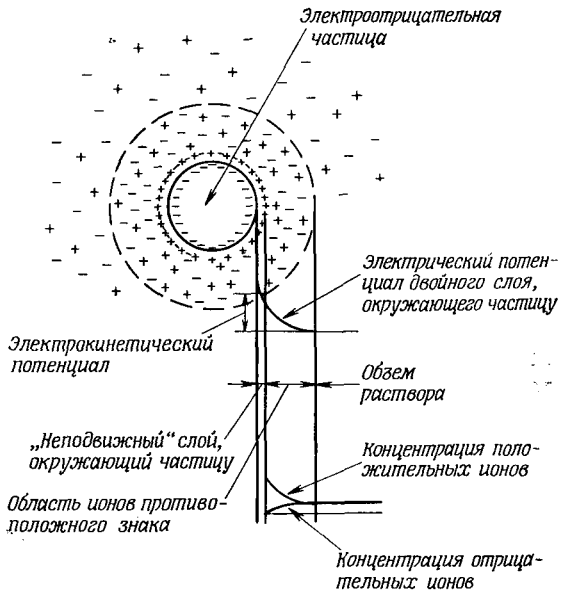
Двойной электрический слой состоит из двух слоев зарядов противоположного знака [367]. Один из них локализован на поверхности частицы, а второй по своей природе является пространственным зарядом жидкости, окружающей частицу (рис. 233).

Из формулы (167) следует, что электрофоретическая подвижность дисперсной частицы прямо пропорциональна произведению электрокинетического потенциала на диэлектрическую проницаемость жидкости и обратно пропорциональна вязкости.

Между электрокинетическим потенциалом и зарядом частицы существует следующая зависимость [369]:

$$\zeta = \frac{Q}{\varepsilon r}\left(\frac{1}{1+\varkappa r}\right), \tag{168}$$

где r — радиус частицы. Коэффициент $1/\varkappa$ называется радиусом



Р и с. 233. Двойной электрический слой и электрокинетический потенциал [368].

Дебая. Эта величина имеет размерность длины и обычно служит мерой толщины двойного слоя.

Подставляя выражение (168) в (167), получим

$$u = \frac{AQ}{\eta r}\left(\frac{1}{1+\varkappa r}\right). \tag{169}$$

Отсюда видно, что диэлектрическая проницаемость жидкости непосредственно в формулу для подвижности частицы не входит. Однако в электрофотографическом процессе электрическое поле изображения, образуемое поверхностными зарядами, связано с диэлектрической проницаемостью жидкой среды обратной зависимостью [см., например, уравнение (88)]. Таким образом, с увеличением диэлектрической проницаемости это поле будет ослабевать и соответственно будет уменьшаться скорость частицы. Следовательно, к свойствам жидкости предъявляются следующие тре-

бования: она должна иметь низкую диэлектрическую проницаемость и малую вязкость.

Кроме того, в электрофотографическом процессе большую роль играет проводимость жидкости. Если проводимость велика, то при проявлении электростатическое изображение будет искажаться. Следовательно, жидкий проявляющий состав должен обладать также высоким удельным сопротивлением. Нижние пределы удельного сопротивления жидкости не установлены. Они зависят от времени проявления и других факторов. В работе [42] найдено, что удельное объемное сопротивление должно быть выше 10^{10} *ом·см*, а диэлектрическая проницаемость — меньше 2,5, хотя никаких данных, подтверждающих этот верхний предел, не приведено. В работе [370] в качестве верхнего предела диэлектрической проницаемости приведена величина, равная 3,4.

На основании приведенных выше критериев из списка возможных электрофотографических проявляющих составов сразу же исключаются все водные составы и многочисленные безводные жидкости, такие, как спирты, ацетон и другие. Ассортимент веществ, пригодных в качестве жидкой среды для проявляющего состава, ограничивается, по-видимому, неполярными углеводородами и производными углеводородов типа бензола, циклогексана, толуола, четыреххлористого углерода и различных жидкостей, имеющих низкую вязкость, из группы предельных алифатических соединений.

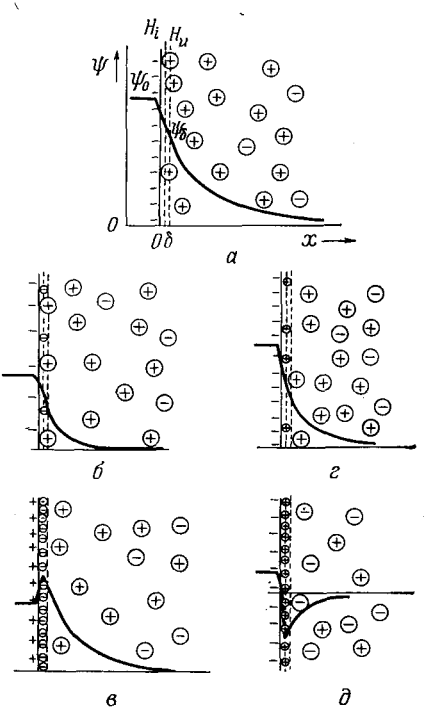
5.1.2.1. ЗАРЯДКА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Механизм процесса зарядки дисперсных частиц изучен пока еще неполностью. Однако имеется гипотеза о том, что заряд частицы регулируется избирательной адсорбцией ионов на поверхности частицы. Обычно считается, что в водных растворах ионами, определяющими потенциал частицы, являются ионы OH^-, а диффузная часть двойного электрического слоя состоит из ионов H^+ [371]. Если дисперсной средой служит жидкий диэлектрик, опыт показывает, что в этом случае одни типы частиц приобретают положительный заряд, а другие — отрицательный заряд. Знак получаемого заряда зависит в первую очередь от природы поверхности частицы. Так, например, частицы пигмента (монолайт красный), покрытые слоем адсорбированной ими жидкости, заряжаются отрицательно, а сухие частицы этого же вещества — положительно [42].

Суммарный заряд частицы зависит от электрокинетического потенциала [уравнение (168)], т. е. от разности потенциалов между внешней границей диффузной части двойного электрического слоя, окружающего частицу, и объемом жидкости (см. рис. 233). Величину и даже знак этого потенциала можно изменять путем введения веществ, создающих на поверхности частиц спе-

цифический адсорбционный слой (рис. 234). Слой толщиной δ состоит из двух плоскостей (или оболочек), параллельных поверхности частицы и носящих название внутренней (Hi) и внешней (Hu) плоскостей Гельмгольца. Внутренний слой представляет собой область адсорбции ионов и соответствует «неподвижному» слою на рис. 233. Внешний слой — это часть диффузной зоны двойного электрического слоя, содержащей наиболее близко расположенные ионы противоположной полярности.

На рис. 234, *а* показана отрицательно заряженная частица без специфической адсорбции, а на рис. 234, *б* и *в* — состояние той же частицы при наличии слабой и сильной специфических адсорбций. На рис. 234, *в* приведен случай сильной адсорбции, при которой на частице наводится некоторое количество положительных зарядов, несмотря на то что диффузная часть двойного электрического слоя также положительна. Однако суммарный заряд частицы остается еще отрицательным. На рис. 234, *г* и *д* показано влияние специфической адсорбции катионов. При сильной адсорбции катионов (рис. 234, *д*) заряд диффузной части двойного слоя может измениться и суммарный заряд частицы станет положительным.



Р и с. 234. Распределение ионов и потенциала в двойном слое по данным работ [367, 372].

а — отсутствие специфической адсорбции; *б* — специфическая адсорбция анионов (отрицательных ионов); *в* — сильная специфическая адсорбция анионов; *г* — специфическая адсорбция катионов (положительных ионов); *д* — сильная специфическая адсорбция катионов.

Суммарный заряд дисперсной частицы зависит не только от электрокинетического потенциала, но и от диэлектрической проницаемости жидкости и толщины двойного слоя $1/\varkappa$. Это очевидно, если уравнение (168) решить относительно Q:

$$Q = \varepsilon\zeta r(1 + \varkappa r). \qquad (170)$$

Из уравнения (170) следует, что процесс зарядки будет более эффективным в тех случаях, когда диэлектрическая проницае-

мость жидкости велика, а толщина диффузной части двойного электрического слоя мала. Толщина двойного слоя зависит от концентрации ионов в жидкости: при высокой концентрации ионов слой имеет малую толщину и наоборот.

Жидкости, пригодные для проявления скрытых электрофотографических изображений методом электрофореза, имеют низкую диэлектрическую проницаемость и низкую концентрацию ионов, что служит препятствием для создания достаточного заряда на дисперсной частице. Концентрация ионов может быть увеличена введением соответствующих добавок. Однако они увеличивают проводимость жидкости, и, следовательно, этим способом можно пользоваться только до некоторого предела. При этом, по-видимому, в первую очередь необходимо использовать поверхностноактивные вещества, которые изменяют свойства поверхности частицы, обеспечивая избирательную адсорбцию ионов. Этот способ позволяет получить жидкие проявляющие составы с необходимыми качествами. Составы такого типа описаны в работе Меткалфа и Райта [373], где установлено также, что в тех случаях, когда в жидкий диэлектрик в качестве регулирующей добавки вводится алкидная смола, частицы заряжаются положительно; если же регулирующей добавкой служит льняное масло, частицы заряжаются отрицательно.

5.1.2.2. УСТОЙЧИВОСТЬ СУСПЕНЗИЙ

Между зарядом, который получает частица, и устойчивостью суспензии существует тесная зависимость. В работе Каллмена [374] довольно подробно рассматривается устойчивость суспензий в неводных средах и описываются эксперименты по изучению устойчивости суспензий неорганических порошков в ксилоле (Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, C, TiO_2, $CaCO_3$, $BaSO_4$, Se и HgS). Ксилол и порошок смешивали в стеклянных колбах и в течение 5 *час* перетирали со стеклянными шариками. Было обнаружено, что суспензии без стабилизатора оседают менее чем за 1 *мин*. Добавление неионогенных детергентов типа олеиновой и стеариновой и других жирных кислот с более длинной цепью улучшало устойчивость суспензии: время оседания увеличивалось на несколько минут. Добавление же к суспензиям, содержащим жирные кислоты, 3—4% метилового спирта обеспечивало их высокую устойчивость.

При введении в суспензии ионогенных стабилизаторов, таких, как олеиновокислая медь, аэрозоль ОТ (диоктилсульфосукцинат натрия) и триизоамиламмонийпикрат, частицы не оседали полностью даже за несколько дней. Концентрация стабилизатора была равна 10 *ммоль/л*. В присутствии ионогенных стабилизаторов проводимость ксилола возрастала от $\sim 10^{-14}$ до $\sim 10^{-10}$ $ом^{-1} \cdot см^{-1}$.

Очевидно, что заряд дисперсных частиц также может меняться со временем. Установлено, что суспензии отрицательно заряженных субмикронных частиц хромата свинца в циклогексане по истечении нескольких дней почти полностью теряют свой заряд, несмотря на то что оседания частиц не наблюдается. В работе [375] отмечается, что коллоидная суспензия свинцового сурика в гексане может потерять свой отрицательный заряд за несколько часов, а в дальнейшем даже изменить знак заряда на обратный.

5.1.2.3. ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ ПРИ ДИЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ

Если дисперсные частицы поляризуются неоднородным электрическим полем, то под действием этого поля может начаться перенос частиц, направленный в сторону увеличения напряженности поля. Это явление носит название диэлектрофореза [376]. Его отличие от электрофореза состоит в том, что при диэлектрофорезе частицы в электрическом поле становятся диполями. В результате такой поляризации частицы образуются два равных количества положительных и отрицательных зарядов. Такое разделение зарядов может быть индуцированным (для обычных диэлектрических материалов) или постоянным (для сегнетоэлектриков). В первом случае снятие поля приводит к исчезновению поляризации, во втором случае диполи сохраняются и после снятия поля, что может отрицательно сказаться на устойчивости суспензии. В работе [376] выведена следующая формула эффективного дипольного момента μ_e для сферической частицы, взвешенной в жидком диэлектрике:

$$\mu_e = 4\pi r^3 \left(\frac{K_2 - K_1}{K_2 + 2K_1}\right) K_1 \varepsilon_0 E, \tag{171}$$

где r — радиус частицы, K_1 и K_2 — соответственно диэлектрическая проницаемость жидкости и частицы.

Эффективная сила F_e, под действием которой передвигается частица, определяется тогда следующим образом:

$$F_e = \mu_e \nabla E = 4\pi r^3 K_1 \varepsilon_0 \left(\frac{K_2 - K_1}{K_2 + 2K_1}\right) E \cdot \nabla E = 2\pi r^3 K_1 \varepsilon_0 \left(\frac{K_2 - K_1}{K_2 + 2K_1}\right) \nabla E^2. \tag{172}$$

Диэлектрофоретической силе противодействует сила вязкого сопротивления жидкости, определяемая по уравнению Стокса [376] в виде

$$F_d = 6\pi\eta r v, \tag{173}$$

где η — динамический коэффициент вязкости жидкости и v — скорость частицы.

Приравнивая выражения (172) и (173) и решая относительно v, найдем скорость частицы

$$v = \frac{2r^2K_1\varepsilon_0}{3\eta}\left(\frac{K_2-K_1}{K_2+2K_1}\right)E\cdot\nabla E. \tag{174}$$

Так как подвижность частицы $u' = v/E$, то

$$u' = \frac{2r^2K_1\varepsilon_0}{3\eta}\left(\frac{K_2-K_1}{K_2+2K_1}\right)\nabla E. \tag{175}$$

Диэлектрофорез протекает наиболее интенсивно при сравнительно крупных размерах частиц (например, при диаметре частицы, большем или равном 2 *мк*) и при наличии сильных полей, обладающих большой неоднородностью. Такие условия существуют на многих участках электростатического изображения, поэтому вполне вероятно, что при проявлении скрытого электрофотографического изображения жидким проявляющим составом возникает диэлектрофоретический эффект. Так, например, в работе [377] найдено, что положительно заряженные частицы сажи, взвешенные в жидком диэлектрике, могут с приблизительно одинаковой эффективностью осаждаться как на положительно заряженные, так и на отрицательно заряженные изображения. Это свидетельствует о том, что в данном случае преобладает процесс диэлектрофореза.

При электрофорезе на частицу с зарядом Q, находящуюся в электрическом поле, действует сила F, равная

$$F = QE. \tag{176}$$

Если допустить, что одновременно существуют электрофоретический и диэлектрофоретический эффекты, то результирующая сила будет равна

$$F_t = \pm F + F_e. \tag{177}$$

Диэлектрофоретическая сила F_e всегда действует в направлении увеличения напряженности поля, тогда как направление электрофоретической силы F зависит от знака заряда частицы. Таким образом, в одних случаях эти силы действуют навстречу друг другу, в других случаях направление их действия совпадает.

Если эти силы приравнять силе вязкого сопротивления среды, то, используя соотношения (172), (173), (176) и (177), можно получить следующее выражение для скорости частицы:

$$v = \frac{r^2K_1\varepsilon_0}{3\eta}\left(\frac{K_2-K_1}{K_2+2K_1}\right)\nabla E^2 \pm \frac{QE}{6\pi\eta r}. \tag{178}$$

Первый вектор правой части выражения (178) всегда направлен к поверхности изображения, а направление второго зависит от

того, совпадают ли знаки заряда поверхности и частицы. Если поле однородно, $\nabla E = 0$ и первый член уравнения (178) исчезает. Кроме того, если значения диэлектрической проницаемости частицы и жидкости мало отличаются друг от друга, этим членом также можно пренебречь. В этом случае перенос частиц обеспечивается только электрофорезом. Если частица имеет небольшой заряд, она может переноситься диэлектрофорезом. При большом заряде может преобладать электрофорез. Если оба эффекта приблизительно одной величины, может произойти неравномерное осаждение частиц, т. е. одни участки электростатического изображения будут проявлены сильно, а другие — слабо. При этом возможно также превращение позитивного растрового изображения в негативное.

5.2. КИНЕТИКА ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ПРОЯВЛЕНИИ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Осаждение частиц на поверхность изображения в электрофотографическом процессе происходит благодаря электрическому притяжению под влиянием полей, соответствующих электростатическим изображениям. Эти поля, которые вблизи поверхности скрытого изображения могут быть довольно сильными, с увеличением расстояния от этой поверхности быстро ослабевают и становятся неэффективными.

Поэтому частицы проявителя должны быть подведены к поверхности настолько близко, чтобы они попали в зону эффективного действия полей скрытого изображения. При жидкостном и аэрозольном проявлении осаждению частиц препятствуют только силы сопротивления дисперсионной среды [1]). Следовательно, частицы могут осесть на поверхность, несущую изображение, с довольно больших расстояний (несколько сот микрон и больше), даже если напряженность поля изображения относительно мала.

При каскадном проявлении и проявлении магнитной кистью частицы проявителя удерживаются на носителях электрическими силами, и для осаждения частиц на поверхности поле изображения должно их преодолеть. Для этого частицы проявителя должны подойти очень близко к поверхности, где напряженность поля изображения имеет наибольшее значение. На практике это соответствует контакту частиц с поверхностью.

5.2.1. ЖИДКОСТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Кинетика жидкостного проявления электростатического изображения на основе электрофоретической теории рассмотрена Анфиловым и Фридкиным [378] и Курита [379]. Анфилов и Фрид-

[1]) При этом считается, что жидкость находится в состоянии покоя.

кин трактуют этот вопрос с точки зрения сил, действующих на дисперсную частицу, и решение проблемы сводят к решению следующего уравнения:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = 2\pi(\sigma_0 - nqz)\,q - k\frac{dz}{dt}, \tag{179}$$

где m и q — соответственно масса и заряд дисперсной частицы; n — число частиц в единице объема; σ_0 — начальная поверхностная плотность заряда слоя; k — коэффициент Стокса; z — расстояние дисперсной частицы до ее начального положения.

Поверхностный заряд рассматривается ими как слой заряда в пустоте и не учитывается влияние диэлектрической проницаемости жидкости, электрофотографического слоя и токопроводящей подложки на электрическое поле, создаваемое распределенным поверхностным зарядом. В этом отношении формула (179) не отражает полностью действительной картины. Член nqz характеризует нейтрализующий эффект осаждаемых частиц при прохождении ими расстояния z от точки начального положения до поверхности.

Из выражения (179) можно получить зависимость между N — числом частиц, оседающих на единице площади, и временем осаждения

$$N = \frac{\sigma_0}{q}(1 - e^{-t/\tau}), \tag{180}$$

где $\tau = 3\eta r/q^2 n$ при $k = 6\pi\eta r$, r — радиус частиц и η — динамический коэффициент вязкости среды. Предполагается [380], что оптическая плотность проявленного слоя пропорциональна массе (на единицу площади) осажденных частиц, т. е.

$$D = AmN, \tag{181}$$

где A — коэффициент пропорциональности и m — средняя масса частицы. При этом зависимость между оптической плотностью проявленного изображения и временем проявления принимает вид

$$D = Am\frac{\sigma_0}{q}(1 - e^{-t/\tau}). \tag{182}$$

Курита [379] проблему жидкостного проявления рассматривает с точки зрения нейтрализации поверхностного заряда при учете влияния проводимости жидкости и процесса осаждения частиц на величину поверхностного заряда электрофотографического слоя. Приравнивая скорость разрядки и скорость перемещения заряженных частиц и ионов в жидкости, можно получить в этом случае дифференциальное уравнение вида

$$-\frac{d\sigma}{dt} = \left(\frac{aq_pK_i\zeta}{6\pi\eta} + c\right)E, \tag{183}$$

где σ — плотность поверхностного заряда электрофотографического слоя; a — концентрация частиц, $г/см^3$; q_p — заряд частицы, $к/г$; K_l — диэлектрическая проницаемость жидкости; ζ — электрокинетический потенциал; c — проводимость жидкости и E — напряженность электрического поля в жидкости.

При этом предполагается также, что между оптической плотностью и количеством осажденных частиц существует прямая пропорциональность. В этом случае скорость увеличения плотности проявленного изображения на электрофотографической поверхности пропорциональна концентрации ($г/см^3$) и скорости частиц, т. е.

$$\frac{dD}{dt} = D_0 a v, \tag{184}$$

где D_0 — коэффициент пропорциональности.

Решая уравнения (183) и (184), получаем следующую зависимость между оптической плотностью проявленного изображения и временем проявления:

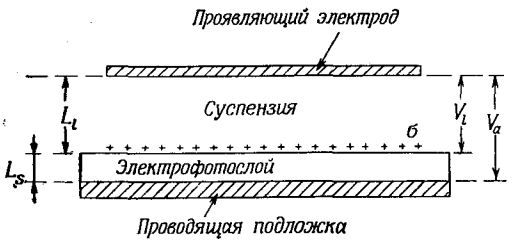
$$D = \frac{\alpha a D_0 H \sigma_0 \tau}{q_p C_s} (1 - e^{-t/\tau}), \tag{185}$$

где α — коэффициент пропорциональности, связывающий поле в жидкости с плотностью поверхностного заряда и емкостью на единицу площади электрофотографического слоя ($E = \alpha\sigma/C_s$); $\tau = \alpha\ (aH + c)/C_s$, где $H = q_p K_l \zeta/6\pi\eta$.

В обеих системах анализа предполагаются идеальные условия: электрическое поле в жидкости однородно; при перемещении частиц в направлении поверхности градиент поля отсутствует; концентрация частиц в жидкости остается постоянной, т. е. частицы, осаждающиеся из жидкости на поверхность изображения, непрерывно замещаются новыми. И, наконец, необходимо рассмотреть допущение о том, что оптическая плотность изображения пропорциональна количеству осажденного проявителя. Если частицы проявителя непрозрачны, максимальная плотность достигается тогда, когда частицы полностью покрывают поверхность; дальнейшее осаждение частиц не влияет на плотность. Следовательно, предположение о прямой пропорциональной зависимости между оптической плотностью и количеством осажденных частиц справедливо только для тех случаев, когда к моменту (или раньше) достижения максимальной плотности электрофотографическая поверхность оказывается полностью разряженной.

Большое разнообразие и сложность конфигураций электрических полей, соответствующих электростатическим изображениям, затрудняют математическое описание процесса осаждения частиц на поверхность скрытого изображения. Эта задача, несомненно, упрощается, если поле в жидкости, созданное зарядом на поверхности электрофотографического слоя, однородно. Такая

ситуация возможна в системах, где жидкость заключена между поверхностью, несущей скрытое изображение, и проявляющим электродом, а изображение расположено только в центральной части сравнительно большой площади, обладающей равномерной плотностью поверхностного заряда (рис. 235).



Р и с. 235. Схема создания однородного поля при жидкостном проявлении.

Если рассматривать только электростатические явления, то можно показать, что напряженность электрического поля в жидкости, создаваемого равномерным поверхностным зарядом σ и приложенным напряжением V_a, равна

$$E_l = \frac{V_a K_s / L_s + \sigma/\varepsilon_0}{K_s L_l / L_s + K_l}, \qquad (186)$$

где K_l и K_s — соответственно величины диэлектрической проницаемости жидкости и электрофотографического слоя; L_s — толщина слоя; L_l — расстояние от этого слоя до проявляющего электрода и ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума в системе МКС.

Знаки величин V_a и σ зависят от направления движения заряженной частицы под действием электрических полей, определяемых поверхностным зарядом и приложенным напряжением. Если оба поля направляют частицу к поверхности скрытого изображения, то в выражении (186) и V_a, и σ будут иметь знак плюс. Так, если поверхность заряжена положительно, а дисперсные частицы отрицательно, то положительный полюс источника напряжения должен быть присоединен к подложке ксерографической пластины, а отрицательный — к проявляющему электроду. Поле, созданное напряжением V_a, будет при этом действовать в том же направлении, что и поле заряда на поверхности слоя.

Скорость спада поверхностного заряда, происходящего в результате осаждения противоположно заряженных частиц проявителя (при условии непрерывного восстановления числа дисперсных частиц), согласно Курита [379], равна

$$-\frac{d\sigma}{dt} = (nqu + c) E_l, \qquad (187)$$

где n — число дисперсных частиц в 1 $см^3$; q — средний заряд частицы; u — подвижность частиц в жидкости и c — ионная проводимость жидкости.

Решая уравнение (186) относительно σ и дифференцируя, получаем

$$\frac{d\sigma}{dt} = K' \frac{dE_l}{dt}, \tag{188}$$

где $K' = (K_s L_l / L_s + K_l)\varepsilon_0 \cdot 10^{-6}$. Множитель 10^{-6} введен для перевода единиц из системы МКС в систему СГС, которая более удобна при описании явлений электрофореза.

Решая совместно уравнения (187) и (188), получаем

$$-\frac{dE_l}{dt} = \left(\frac{nqu + c}{K'}\right) E_l. \tag{189}$$

Интегрируя уравнение (189) и решая его относительно E_l, получаем следующую зависимость:

$$E_l = E_{l0} e^{-\left(\frac{nqu+c}{K'}\right)t}, \tag{190}$$

где E_{l0} — напряженность поля в жидкости в начале проявления ($t = 0$).

Подставляя выражение (186) в (190), получим выражение для плотности заряда σ на поверхности электрофотографического слоя как функцию времени проявления

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau} - V_a K'' (1 - e^{-t/\tau}), \tag{191}$$

где $\tau = K'/(nqu + c)$, а $K'' = (K_s \varepsilon_0 / L_s) \cdot 10^{-6}$.

Когда приложенное напряжение V_a создает поле, совпадающее по направлению с полем скрытого изображения, уравнение (191) показывает, что по истечении определенного периода времени величина положительного заряда падает до нуля и дальнейшее осаждение отрицательных частиц проявителя приводит к накапливанию на поверхности слоя отрицательного заряда. При продолжительном проявлении величина отрицательного заряда достигает максимума при $\sigma = -V_a K''$. В этом случае время, по истечении которого поверхностный заряд слоя полностью нейтрализуется, определяется выражением

$$t_0 = \tau \ln\left(\frac{\sigma_0}{V_a K''} + 1\right). \tag{192}$$

Общее число частиц N, осаждаемых на 1 $см^2$ поверхности изображения за период от $t = 0$ до $t = t$, находим по формуле

$$N = nu \int_0^t E_l \, dt = nu E_{l0} \int_0^t e^{-t/\tau} \, dt. \tag{193}$$

После интегрирования получаем

$$N = nu\tau E_{l0}\,(l - e^{-t/\tau}). \qquad (194)$$

Выражая эту зависимость через величины поверхностного заряда электрофотографического слоя и приложенного напряжения и принимая во внимание соотношение (186), уравнение (194) можно представить в следующем виде:

$$N = nu\tau \left(\frac{V_a K'' + \sigma_0}{K'}\right)(1 - e^{-t/\tau}). \qquad (195)$$

Можно показать, что при $V_a = 0$ уравнение (195) принимает форму уравнения (185), а если пренебречь проводимостью жидкости, то оно сводится к уравнению (180).

Полученные выше формулы были выведены без учета влияния соседних частиц на движение частицы в жидкости. Это, по-видимому, оправдано в тех случаях, когда рассматриваются устойчивые суспензии, где заряды частиц сбалансированы зарядами ионов противоположного знака в жидкости и общая сумма всех зарядов в жидкости равна нулю. Кроме того, можно пренебречь силами Ван-дер-Ваальса и обратной диффузией, так как они существенны только при очень малых размерах дисперсных частиц.

Скорость осаждения частиц на заряженную поверхность изображения, согласно выражению (195), равна

$$\frac{dN}{dt} = nu \left(\frac{V_a K'' + \sigma_0}{K'}\right) e^{-t/\tau}. \qquad (196)$$

Следовательно, скорость осаждения экспоненциально уменьшается со временем и прямо пропорциональна концентрации частиц в жидкости, их подвижности и начальной плотности заряда на поверхности электрофотографического слоя. Приложенное напряжение в зависимости от направления может быть использовано либо для увеличения, либо для уменьшения скорости осаждения. Подвижность частиц u является функцией заряда, радиуса частицы и вязкости жидкости [уравнение (169)], следовательно, она зависит только от свойств суспензии.

Отметим, что формула (195) справедлива только, когда в процессе проявления концентрация дисперсных частиц остается постоянной. В системах с проявляющим электродом и особенно в тех случаях, когда расстояние между поверхностью, несущей скрытое изображение, и электродом мало, это условие, по-видимому, не выполняется. Это значит, что запас частиц в жидкости может истощиться раньше, чем произойдет полная нейтрализация заряда поверхности электрофотографического слоя.

Результаты экспериментов, проведенных в работах [381, 377 380], качественно согласуются с уравнением (195).

Интересно отметить, что используемая в уравнениях (194)—(196) постоянная времени τ является функцией диэлектрической проницаемости и толщины электрофотографического слоя и, кроме того, зависит от свойств суспензии. Для рассматриваемого здесь случая

$$\tau = \frac{(K_s L_l / L_s + K_l)}{nqu + c} \varepsilon_0 \cdot 10^{-6}. \tag{197}$$

Следовательно, с увеличением толщины электрофотографического слоя L_s при неизменных прочих факторах τ уменьшается и процесс проявления ускоряется. Наоборот, если L_s уменьшается, процесс проявления замедляется. Это может послужить объяснением кажущегося расхождения результатов, полученных Черкасовым [382] при исследовании влияния толщины, плотности поверхностного заряда и поверхностного потенциала селеновых слоев при жидкостном проявлении. Так как во всех этих экспериментах время проявления оставалось неизменным, полученные результаты объясняются зависимостью постоянных времени проявления от толщины селеновых слоев.

Итак, отметим еще раз, что именно электрическое поле в зоне проявления определяет скорость и степень проявления электростатических изображений. Поверхностный заряд и поверхностный потенциал слоя лишь косвенно участвуют в этом процессе.

5.2.2. АЭРОЗОЛЬНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Теория аэрозольного проявления аналогична теории жидкостного проявления. Однако имеются следующие существенные отличия: 1) заряды на частицах, взвешенных в воздухе, не обязательно должны уравновешиваться зарядами противоположного знака, существующими в дисперсионной среде; 2) проводимостью воздуха можно пренебречь.

В работе [68] изучен процесс аэрозольного проявления с точки зрения снижения разности потенциалов в зоне проявления. В экспериментах с проявляющим электродом скорость уменьшения этой разности потенциала принималась равной

$$\frac{dV_e}{dt} = -kV_e, \tag{198}$$

где k — постоянная, V_e — разность потенциалов между проявляющим электродом и ксерографической пластиной по истечении t *сек* с момента проявления.

Производя интегрирование в пределах от $t = 0$ до $t = T$ и принимая $V_e = V + V_b$ в начале проявления и $V_e = V_d + V_b$ в конце проявления, можно получить выражение [68]

$$-\ln \frac{V_d + V_b}{V + V_b} = kT, \tag{199}$$

где V и V_d — начальный и конечный потенциалы пластины, V_b — разность потенциалов между пластиной и проявляющим электродом.

Разность потенциалов между поверхностью пластины и проявляющим электродом более точно определяется выражением

$$V_e = \frac{(V_b + V)\, z}{L_s/K_s + z}, \tag{200}$$

где z — расстояние между поверхностью пластины и проявляющим электродом, L_s и K_s — соответственно толщина и диэлектрическая проницаемость электрофотографического слоя. Однако если z намного больше L_s/K_s, что вполне вероятно при проявлении порошковым облаком, то уравнение (200) сводится к выражению, предложенному в работе [68].

Если плотность поверхностного заряда одинакова по всей площади скрытого изображения, уравнение (198) может быть записано в виде

$$\frac{dE_e}{dt} = -kE_e, \tag{201}$$

где E_e — напряженность поля в зоне проявления.

Интегрируя, получаем

$$E_e = E_{e0}e^{-kt}, \tag{202}$$

где E_{e0} — напряженность поля в зоне проявления при $t = 0$.

Сравнение уравнения (201) для частиц, взвешенных в воздухе (проводимость воздуха равна нулю), с уравнением (189) для суспензии показывает, что $k = n'q'u'/K'$, где n', q' и u' — соответственно число частиц на 1 $см^3$, заряд частицы и подвижность частицы в аэрозоле; $K' = (1 + zK_s/L_s)\varepsilon_0 \cdot 10^{-6}$, а диэлектрическая проницаемость воздуха принимается равной единице.

По аналогии с уравнением (193) количество частиц порошка, осажденных на 1 $см^2$ ксерографической пластины по истечении времени t, выражается следующим образом:

$$N = \frac{kK'}{q'} \int_0^t E_e\, dt = \frac{kK'E_{e0}}{q} \int_0^t e^{-kt}\, dt. \tag{203}$$

Интегрируя уравнение (203), получаем

$$N = \frac{K'E_{e0}}{q'} (1 - e^{-kt}). \tag{204}$$

Вводя в выражение (204) величины напряжения на пластине и приложенного напряжения, представленные в (200), получаем выра-

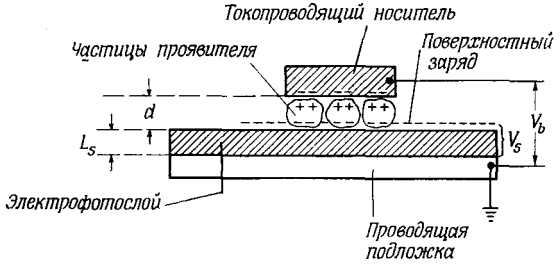
жение

$$N = \frac{K'(V_b + V)}{q'(L_s/K_s + z)}(1 - e^{-kt}). \qquad (205)$$

Здесь V — напряжение на пластине, создаваемое поверхностным зарядом, величина которого измеряется электрометром непосредственно перед проявлением при отведенном проявляющем электроде.

5.2.3. КАСКАДНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ И ПРОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ КИСТЬЮ

При жидкостном и аэрозольном проявлении для осаждения частиц на поверхность скрытого изображения электрическому полю необходимо преодолеть только силу вязкого сопротивления дисперсионной среды. При каскадном проявлении и проявлении магнитной кистью электрическое поле должно преодолеть трибоэлектрическую связь между частицей проявителя и ее носителем.



Р и с. 236. Схема проявления магнитной кистью.

Природа трибоэлектрической связи изучена пока недостаточно.

При проявлении магнитной кистью носитель состоит из цепочек токопроводящих частиц железа. Эти цепочки действуют как проявляющий электрод, отделенный от поверхности изображения частицами проявителя (рис. 236). В данном случае принято, что носитель покрыт слоем проявителя толщиной в одну частицу. В этой системе электрическое поле в месте контакта частиц проявителя с поверхностью носителя, создаваемое зарядом на поверхности электрофотографического слоя и приложенным напряжением, приближенно равно

$$E_j = \frac{V_b + V_s}{K_p L_s/K_s + d}, \qquad (206)$$

где V_b — приложенное напряжение; V_s — напряжение, созданное поверхностным зарядом электрофотографического слоя; K_s и K_p — диэлектрическая проницаемость соответственно слоя и частиц; L_s — толщина слоя; d — диаметр частиц.

Если напряженность поля в месте контакта частицы и носителя, обусловленная действием двойного трибоэлектрического слоя, равна E_c, то для осаждения частиц на поверхность изображения необходимо, чтобы E_j было больше E_c. Так, если $E_c = 3 \times \times 10^4$ *в/см*, $d = 10$ *мк*, $K_p = 3$ и $L_s/K_s = 3$, то суммарное напряжение, способное вызвать осаждение частиц, должно быть более 57 *в*. Это напряжение будет представлять собой пороговую величину для проявления электростатического изображения при данных условиях. Очевидно, существует возможность экспериментального определения силы трибоэлектрической связи для различных сочетаний проявителей и носителей. Однако в настоящее время опубликованных данных по этому вопросу нет.

5.2.4. СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Предположение о существовании прямой пропорциональной зависимости (см. разд. 5.2.1) между оптической плотностью и числом частиц на 1 *см*^{2} поверхности проявленного изображения справедливо только для тех случаев, когда максимальный эффект проявления достигается раньше, чем максимум плотности. Это значит, что при накоплении частиц на поверхности проявляемого изображения максимальная оптическая плотность может быть достигнута раньше, чем поверхностный заряд будет полностью нейтрализован зарядами частиц.

Поэтому естественно предположить, что скорость изменения оптической плотности с изменением физической плотности слоя частиц на поверхности пропорциональна разности между максимальной плотностью D_m, соответствующей полному покрытию поверхности частицами, и фактической плотностью проявленного изображения D. В этом случае можно написать

$$\frac{dD}{dN} = \beta (D_m - D), \tag{207}$$

где N — количество частиц, осаждаемых на 1 *см*^{2} поверхности изображения; β — коэффициент пропорциональности. Интегрируя это выражение и учитывая, что при $N = 0$ плотность $D = 0$, получаем

$$D = D_m (1 - e^{-\beta N}). \tag{208}$$

Подставляя выражение (194) в уравнение (208), получаем следующую зависимость между оптической плотностью и временем проявления для жидкостного проявления:

$$D = D_m [1 - e^{-\beta n u \tau E_{l0} (1 - e^{-t/\tau})}]. \tag{209}$$

Комбинация уравнений (204) и (208) дает аналогичное выражение для аэрозольного проявления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaprelian E. K., *Photo. Engr.*, **1**, 53 (1950).
2. Von Bronk O., англ. пат. 188030 (1922).
3. Hana P. S., голланд. пат. 5142 (1920).
4. Goldmann F., англ. пат. 464122 (1937).
5. Schmieschek U., Klutke F., герм. пат. 684619 (1939).
6. Carlson C. F., пат. США 2221776 (1938, 1940); 2297691 (1939, 1942); русский перевод: Вопросы электрографии, сб. переводов, ИЛ, 1960, стр. 11—21; пат. США 2357809 (1940, 1944).
7. Meulanaere M. De., бельг. пат. 389155 (1932).
8. Selenyi P., пат. США 1818760 (1931).
9. Selenyi P., *J. Appl. Phys.*, **9**, 637 (1938).
10. Dessauer J. H., Mott G. R., Bogdonoff H., *Photo Eng.*, **6**, 250 (1955); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 44—71.
11. *Fortune*, p. 155 (July 1962).
12. *Fortune*, pp. 113—122 (June 1949).
13. Wise E. N., пат. США 2618552 (1947).
14. Англ. пат. 658699; фр. пат. 985615; герм. пат. 813359.
15. Bixby W. E., пат. США 2970906 (1955).
16. Schaffert R. M., Oughton C. D., *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 991 (1948); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 22—33.
17. Young C. J., Greig H. G., *RCA Rev.*, **15**, 471 (1954); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 122—140.
18. Walkup L. E., пат. США 2825814 (1954).
19. Kallmann H., Rosenberg B., *Phys. Rev.*, **97**, 1596 (1955).
20. Фридкин В. М., Желудев И. З., Фотоэлектреты и электрофотографические процессы. Изд-во АН СССР, 1960.
21. Kallmann H. P., Rennert J., Sidran M., *Phot. Sci. Engr.*, **4**, 345 (1960).
22. Hughes A. L., Dubridge L. A., Photoelectric Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1932, pp. 320, 323.
23. Kallmann H., пат. США 2845348 (1952).
24. Johnson E. G., Neher B. W., пат. США 3010883 (1956).
25. IRE Standards on Electrostatographic Devices, *Proc. IRE*, **49**, 619 (1961); русский перевод: *Труды Института радиоинженеров*, **49**, № 3, 667 (1961).
26. Schaffert R. M., *Penrose Annual*, **48**, 99 (1954); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 148—151.
27. Mott G. R., *Penrose Annual*, **50**, 133 (1956).
28. Smith F., *Phot. Sci. Engr.*, **3**, 312 (1959).
29. Reuter H. G., *Photographic Engineering*, **7**, № 2, 73 (1956); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 151—164.
30—32. Smith F., *Phot. Sci. Engr.*, **1**, 180 (1958); **7**, 135 (1963); **2**, 48 (1958).

33. Young C. J., Greig H. G., *RCA Rev.*, **15**, № 4, 471 (1954); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 122—140; Sugarman M. L., Jr., *Proc. Techn. Association of the Graphic Arts*, 59 (1955).
34. Англ. пат. 683808 (1952).
35. Middleton A. E., пат. США 2663636 (1953); James R. W., Shulman J., герм. заяв. R-17949 (1956).
36. Wainer E., *Photographic Engineering*, **3**, № 1, 12 (1952).
37. Keck P. H., *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, № 4, 221 (1952).
38. Straughan V. E., Mayer E. F., *Proc. Nat. Electronics Conf.*, **13**, 959 (1958).
39. Bolton W. D., Goetz W. E., *Photographic Engineering*, **7**, № 3, 4, 137 (1956); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 182—197.
40. Landrigan R. B. et al., пат. США 2725304 (1955).
41. Lipton N. C., *Photography*, **34**, № 2, 50 (1954).
42. Metcalfe K. A., Wright R. J., *J. Sci. Instr.*, **33**, 194 (1956); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 33—44; *J. Oil & Colour Chem. Assn.*, **39**, 845 (1956).
43. Thomas A. M., *Brit. J. Appl. Phys.*, **2**, 98 (1951).
44. Glenn W. E., *J. Appl. Phys.*, **30**, № 12, 1870 (1959).
45. Repts. № 1—4, Contr. № AF 33616—6746, General Electric Co., 1959—1960.
46. Gaynor J., Aftergut S., *J. Appl. Phys.*, **34**, 2102 (1963).
47. Gundlach R. W., Claus C. J., *Phot. Sci. Engr.*, **7**, 14 (1963).
48. Gethmann R. B., *Proc. IRE*, **50**, 2381 (1962).
49. Hayford R. E., Bixby W. E., *Photographic Engineering*, **6**, № 3, 173 (1955).
50. Sabel E. R. et al., пат. США 2586484 (1952).
51. Mayo C. R., пат. США 2684301 (1954).
52. Claus C. J., *Phot. Sci. Engr.*, **7**, 13 (1963).
53. Schmiedel U., Fischer H., пат. США 3083117 (1958).
54. Пат. ФРГ 1079081, National Cash Register Co. (1960).
55. Copley H. E., пат. США 2484782 (1949); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 116—117; Insalaco M. A., пат. США 2772991 (1956).
56. Schaffert R. M., *Proc. Tech. Assn. Litho. Ind.* (*TAGA*), p. 104 (1951).
57. Medley H. C., IBM Corp., San Jose, Calif., 1962, частное сообщение.
58. Paris B., герм. заяв. H-20430 (1955); Mengali O. J., пат. США 2745327 (1956).
59. Фр. пат. 1121312, Horizons (1956).
60. Landrigan R. B., пат. США 2753308 (1956).
61. Walkup L. E., Wise E. N., пат. США 2638416 (1953); Greig H. G., Young C. J., пат. США 2735784-5 (1956).
62. Rheinfrank J. J., Jones W. D., англ. пат. 768293 (1957).
63. Wise E. N., пат. США 2618552 (1952).
64. Copley H. E., пат. США 2659670 (1953).
65. Bixby W. E., Andrus P. G., Walkup L. E., *Photographic Engineering*, 5, № 3, 195 (1954); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 87—94.
66. Ikeda T., Murakami T., Inaba A., Miura K., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 3, 49 (1961).
67. Neugebauer H. E. J., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, 57—58 (1961).
68. Bickmore J. T., Levy M., Hall J., *Phot. Sci. Engr.*, **4**, № 1, 37 (1960).
69. Metcalfe K. A., Wright R. J., пат. США 2907674 (1959).
70. Kiwaki H., Komeji S., Nakazone H., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 1, 27 (1961).
71. Фридкин В. М., *Кристаллография*, **2**, 130 (1957).

72. Carlson C. F., пат. США 2277013 (1939).
73. The Role of Solid State Phenomena in Electric Circuits, Polytechnic Institute of Brooklyn, Intersci. Publ., New York, London, 1957.
74. Contr. DA 36-039 sc-15297, Rept. № 9, Studies of Photoconductivity as a Fundamental Property of Phosphorescent Materials, New York Univ., 1954, p. 54.
75. Kallmann H., пат. США 2845348 (1952).
76. Amick J. A., *RCA Rev.*, **20**, 763 (1959).
77. Johnson E. G., Neher B. W., пат. США 3010883 (1956).
78. См. [76], стр. 765.
79. Cassiers P. M., *J. Photo. Sci.*, **10**, 57 (1962).
80. Ebert J. P., пат. США 3081165 (1957).
81. Berchtold J., *Sci. Industr. Photogr.*, **26**, 465 (1955); Berchtold J., пат. США 2866903 (1958).
82. Jacobs J., Frerichs R., пат. США 2764693 (1956).
83. Tokumoto S., Tanaka E., Hara C., Ogasawara O., Murata S., *Phot. Sci. Engr.*, **7**, 218 (1963).
84. Robillard J. J., *Phot. Sci. Engr.*, 8, 18 (1964).
85. *Business Week*, p. 41 (Febr. 27, 1954).
86. Huebner W. C., пат. США 2676100 (1952).
87. Jacob C. W., пат. США 2808328 (1957).
88. Sugarman M. L., пат. США 2758524 (1956).
89. Moncrieff-Yeates A. J., пат. США 2758525 (1956).
90. Англ. пат. 797027, General Dynamics Corp. (1958).
91. Sugarman M. L., пат. США 2758939 (1956).
92. Bertelsen B. I., пат. США 2924519 (1960).
93. Cassiers P. M., *Phot. Sci. Engr.*, **4**, № 4, 199 (1960).
94. Moncrieff-Yeates A. J., пат. США 2798959-60 (1957).
95. Walkup L. E., Carlton H. E., Jr., пат. США 2752271 (1956).
96. Rheinfrank J., Chapman J., пат. США 2741959 (1956); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 103—104.
97. Walkup L. E., пат. США 2833648 (1958); 2937943 (1960).
98. Fotland R., Mayer E., пат. США 2975052 (1961), англ. пат. 807079 (1959).
99. Carlson C. F., Bogdonoff H., пат. США 2982647 (1961).
100. Dreyfoos A., Mazza R., Radke W., Staley A., пат. США 3055006 (1962).
101. Walkup L. E., пат. США 2825814 (1958).
102. Parker D. J., Myers F. C., *J. SMPTE*, **69**, 744 (1960).
103. *Perspective*, **3**, 150 (1961).
104. Hayford R. E., Kaiser C. B., пат. США 3057720 (1962).
105. Rydz J. S., Johnson S. W., *RCA Rev.*, **19**, 465 (1958).
106. См. [16], стр. 998.
107. Wielicki H., пат. США 2986521 (1961).
108. Jarvis J. et al., пат. США 3003870 (1961).
109. Kucera T. J., *Perspective*, **4**, № 3, 133 (1962).
110. Schaffert R. M., McMaster R. C., Bixby W. E., пат. США 2666144 (1954).
111. Vyverberg R. G., Clark H. E., Dessauer J. H., *Non-Destructive Testing*, **13**, № 3, 35 (1955).
112. Taylor G. M., Tenney G. H., *Non-Destructive Testing*, **13**, № 6, 12 (1955).
113. Vyverberg R. G., Paper presented to New York Chapter Soc. for X-ray Technicians, Oct. 12, 1956.
114. Slauson D. B., *IRE Trans. on Medical Electronics*, **PGME-8**, 4 (1957).
115. Schaffert R. M., Hansen J. F., пат. США 2901349 (1959).

116. McMaster R. C., Non-Destructive Testing Handbook, vol. 1, Ronald Press, New York, 1959, стр. 13—12.
117. Campbell C. J., Roach J., Grisolia A., *Journ. of Bone and Joint Surgery*, **39A**, 577 (1957).
118. Sewell P. B., *Nature*, **179**, 773 (1957).
119. Yoshida K., Kawamura T., Kamiuchi S., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 1, 15 (1961).
120. Shimiya K., Toryu T., Sakomoto H., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **4**, № 1, 13 (1962).
121. Fowler J. M., Roos C. E., *Phys. Rev.*, 98, 996 (1955).
122. Jacobs J. E., *Electr. Engr's* (*N.Y.*), **70**, 667 (Aug. 1951).
123—124. См. [20], стр. 56 и 123.
125. Farmer F. T., *Nature*, **150**, 521 (1942).
126. Fowler J. F., Farmer F. T., *Nature*, **173**, 317; **174**, 136 (1954); **175**, 516, 590, 648 (1955).
127. Armistead F. C., Pennock J. C., Mead L. W., *Phys Rev.*, **76**, 860 (1949).
128. Warner A. J., Muller F. A., Nordlin H. G., *J. Appl. Phys.*, **25**, 131 (1954).
129. Takahashi T., Koda T., Kobayashi T., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **4**, № 1, 23 (1962).
130. См. [20], стр. 177.
131. Criscuolo E. L., O'Connor D. T., *Non-Destructive Testing*, **14**, 28 (1956).
132. Criscuolo E. L., O'Connor D. T., пат. США 2900515 (**1959**).
133. Youshaw R. A., Holloway J. A., *Non-Destructive Testing*, **17**, 297 (1959).
134. Carlson C. F., пат. США 2221776 (1940).
135. Epstein H., Proc. Western Joint Computer Conf., March 1955.
136. Epstein H., Harris G. A., Paper presented at AIEE Winter Generel Meeting, Febr. 1958.
137. Stowell P. A., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, pp. 234, 235 (1961).
138. *Chemical & Engineering News*, p. 66 (Nov. 10, 1958).
139. Schwertz F., пат. США 2978968 (1958—1961); 3023731, 3045644 (1957—1962); 3060432, 3064259, 3068481 (1960—1962).
140. Gray F., пат. США 2200741 (1937—1940).
141. Sukumlyn T., пат. США 2281638 (1940—1942).
142. Evans J. E., пат. США 2726289 (1951—1955).
143. McNaney J. T., пат. США 2777745 (1952—1957).
144. Clemens J. E., Johnstone B. B., пат. США 2829025 (1952—1958).
145. McCreary H. J., пат. США 2894799 (1956—1959).
146. Wehe H. G., пат. США 2883257 (1953—1959).
147. Crews R. W., Borden H. C., Rice P., Paper delivered at the IRE PGED Meeting, Washington, Oct. 26, 1956.
148. Stone J. J., Jr., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, pp. 221—229 (1961).
149. Evans W. E., Paper presented at Am. Documentation Inst. Symposium on Information Processing, Los Angeles, Calif., Sept., 29, 1961.
150. Schaffert R. M., *Am. Newspaper Publishers Assn., Mech. Bull.*, № 381, p. 118 (June, 17, 1949).
151. Schaffert R. M., *Penrose Annual*, **44**, 98 (1950).
152. Schaffert R. M., пат. США 2576047 (1948—1951).
153. Childress C., Kabell L., пат. США 3081698 (1960—1963).
154. *Research for Industry* (Stanford Research Institute), **13**, № 5, 2 (1961).
155. Radio Facsimile, vol. 1, RCA Inst. Techn. Press, Oct. 1938, p. 119.
156. Greig H. G., *Proc. IRE*, **36**, 1224 (1948).

157. Hotchkiss G., *Western Union Techn. Rev.*, **3**, 6 (1949).
158. Woodman H. F., Taylor P. H. J., *J. Brit. IRE*, **16**, № 3, 133 (1956).
159. Atkinson R. B., Ellis S. G., *J. Franklin Inst.*, **252**, 373 (1951); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 251—256.
160. Berry T. M., Hanna J. P., *General Electric Rev.*, **55**, № 4, 20 (1952).
161. Sims J. C., Jr., *Proc. Western Computer Conf.*, p. 160 (1953).
162. Hanna J. P., *Penrose Annual*, **48**, 96 (1954).
163. Gehman J. B., *IRE Nat. Conven. Rec.*, **6**, pt. 5, 198 (1958).
164. Begun S. J., *IRE Nat. Conven. Rec.*, **6**, pt. 5, 190 (1958).
165. Seehof J., Armstrong N., Farley G., Leinberger M., Markakis M., Smithberg S., *Proc. Eastern Joint Computed Conf. IRE*, p. 243 (1958).
166. Kucera T. J., *Reproduction Methods*, **1**, № 3, 48 (1961).
167. Tregay J. L., *Elect. Mfg.*, **63**, 146 (1959).
168. Hawken W. R., Enlarged Prints from Library Microforms, Am. Library Association (Chicago), 1963.
169. *Photog. Sci. & Engr.*, **4**, № 5, 331 (1960).
170. Sugarman M. L., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, p. 59—70 (1955); *Penrose Annual*, **50**, 129—130 (1956).
171. *Am. Business*, **25**, 41 (May 1955).
172. Ullrich O. A., Walkup L. E., Rossell R. E., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, p. 130 (1954).
173. Rheinfrank J. J., Kurz P. F., Myers F. C., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, p. 133 (1957).
174. Schaffert R. M., *Share Your Knowledge Review* (Techn. Digest), **29**, № 5, 33 (Febr. 1948).
175. Sinclair M., *Printing Equip. Engr.* (Nov. 1948).
176. *Inland Printer/Am. Lithographer*, p. 90 (Jan. 1962).
177. Parker D. J., Myers F. C., *J. SMPTE*, **69**, 744 (Oct. 1960).
178. Bixby W. E., *Natl. Microfilm Assoc. Proc.*, **11**, 228 (1962).
179. Smith F., *Phot. Sci. Engr.*, **3**, 246 (1959).
180. McNaney J. T., *Electronics*, **74** (Sept. 1958); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 216—223.
181. McNaney J. T., *IRE Conv. Rec.* (1955).
182. Olden R. G., *RCA Rev.*, **18**, № 3, 343 (1957); **22**, № 3, 582 (1961); русский перевод: Вопросы электрографии, стр. 202—209.
183. Lewis M., *Electronic News*, p. 6 (Dec. 3, 1962).
184. Mott G. R., Clark H. E., Dessauer J. H., *Phot. Sci. Engr.*, 5, 87 (1961).
185. Bickmore J. T., Ett A. H., *Phot. Sci. Eng.*, **5**, 136 (1961).
186. Vogt C. O., Westervelt J. C., *Indus. Phot.*, **6**, 52 (1957).
187. Broding R. A., Schroeder J. D., Westervelt J. C., *IRE Trans. on Instrumentation*, **1**, 220 (1957).
188. Oughton C. D., *The Glass Industry*, **30**, 662 (1949).
189. Bixby W. E., *Ceramic Forum*, **17**, 1 (1950).
190. Schwertz F. A., Van Wagner E. M., *IRE Conv. Rec.*, **4**, Pt. 6, 115 (1956).
191. Kinsella J. J., *Proc. IRE Conv. on Military Electronics*, p. 102 (1958).
192. Sugarman M. L., *IRE Trans. on Industrial Electronics*, **PGIE-11**, 33 (Dec. 1959).
193. Schwertz F. A., Haller M. N., Mazenko J. J., *J. Opt. Soc. Am.*, **44**, 745 (1954).
194. Nagashima S., Goto K., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 1, 32 (1961).

195. Black A. D., Cox W. F., *Brit. J. of Non-Destructive Testing*, **4**, № 1, 2 (1962).
196. Farmer P. J., *Aircraft Production*, **18**, 8 (1956).
197. Harrington D., *J. Photog. Sci.*, **7**, 103 (1959).
198. Немировский Е. Л., *Полиграфическое производство*, **38**, 21 (1962).
199. Фридкин В. М., Желудев И. З., Фотоэлектреты и электрофотографические процессы, Изд-во АН СССР, 1960.
200. Giaimo E. C., *RCA Rev.*, **22**, 780 (1961).
201. Devins J. C., Reynolds S. I., *Rev. Sci. Instr.*, **28**, 11 (1957).
202. Briere M., Weill J., *J. Phys. Radium*, **16**, 695 (1955).
203. Ohyama Y., Kurita T., Takahashi Y., *J. Soc. Sci. Phot. Japan*, **24**, № 1, 22 (1961).
204. Гренишин С. Г., Черкасов Ю. А., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 5, 433 (1960).
205. Shew L. F., *Phot. Sci. Engr.*, 8, 282 (1964).
206. Smith R. A., Jones F. E., Chasmar R. P., The Detection and Measurement of Infrared Radiation, Oxford Univ. Press, London, 1958.
207. Summer W., Photosensitors, Chapman & Hall, London, 1957.
208. McCurry R. E., IBM Corp., Endicott, N. Y., 1959, не опубликовано.
209. Keinath G., U.S. NBS, Circular № 585, Jan. 1958.
210—211. Walkup L. E., пат. США 2777957 (1957); 2879395 (1959).
212—215. Cobine T. D., Gaseous Conductors, Dover, New York, 1958, pp. 254—255, 256, 259—261, 259.
216. Von Engel A., Ionized Gases, Oxford Univ. Press, London, 1955, p. 19.
217. Von Hippel A., *Phys. Rev.*, **54**, 1096 (1938).
218. Mott N. F., Gurney R. W., Electronic Processes in Ionic Crystals, Oxford Univ. Press, London, 2nd ed., 1948, p. 172.
219. McCurry R. E., Schaffert R. M., *IBM Journ. of R. & D.*, **4**, 359 (1960).
220. Brown R. D., IBM Labs., Endicott, N.Y., 1958, не опубликовано.
221. Keck P. H., *J. Opt. Soc. Am.*, **41**, 53 (1951).
222. Schaffert R. M., Hansen J. E., пат. США 2901349 (1959).
223. Гренишин С. Г., Черкасов Ю. А., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **7**, 121 (1962).
224. Плавина И. З., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **7**, 145 (1962).
225. См. [52], стр. 6.
226. Kostelec J., *J. Appl. Phys.*, **31**, 441 (1960).
227. Плавина И. З., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 57 (1963).
228. Lobel L., Du-bois M., Sensitometry, ed. A. Kraszna-Krausz, Focal Press, London, 1955, pp. 31—37.
229. Von Hippel A. R., *J. Chem. Phys.*, **16**, 372 (1948).
230. Weimer P. K., *Phys. Rev.*, **78**, 171 (1950).
231. Krebs H., Semi-Conducting Materials, Acad. Press, New York, 1951, p. 246.
232. Stevels J. M., *Philips Techn. Rev.*, 8, 231 (1946).
233. Henkels H. W., The Electrical Properties of Selenium, докт. диссерт., Univ. of Pennsylvania, 1953.
234. Syrkin V. K., Dyatkina M. E., The Structure of Molecules and the Chemical Bond, Intersci. Publishers, New York, 1950, p. 300.
235. Рамазанов К. А., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **6**, 440 (1961).

236. Losco E. F., Microstructure of Selenium, Conf. Paper, Winter Meeting AIEE, New York, Jan. 22, 1954.
237. Наследов Д., Малышев Е., *Журнал технической физики*, **16**, 1127 (1949).
238. Moss T. S., Photoconductivity in the Elements, New York, 1952, pp. 185—187.
239. Spear W. E., *Proc. Phys. Soc.*, **69B**, pt. 11, 1139 (1956).
240. Шидловский М. К., *Журнал технической физики*, **24**, № 5, 837 (1954).
241. Spear W. E., *Proc. Phys. Soc.*, **70B**, pt. 7, 669 (1957).
242. Rose A., *RCA Rev.*, **12**, 362 (1951).
243. Eckart F., Rabenhorst H., *Annalen der Physik*, **19**, ser. 6, 381 (1957).
244. Tammann G., Boehme W., *Z. anorg. Chem.*, **197**, 4 (1931).
245. См. [238], стр. 190.
246. Stuke J., *Zeit f. Physik*, **134**, 194 (1953).
247. Gebbie H. A., Cannon C. G., *J. Opt. Soc. Am.*, **42**, 277 (1952).
248. Givens M., Siegmund W. P., *Phys. Rev.*, **85**, 313 (1952).
249. См. [238], стр. 202, 203.
250. Saunders A. P., *J. Phys. Chem.*, **4**, 462—469 (1900).
251. Handbook of Physics and Chemistry, 38th ed., Chemical Rubber Publ. Co., Cleveland, p. 2010.
252. Hughes A. L., Dubridge L. A., Photoelectric Phenomena, McGraw-Hill, New York, 1932.
253. Billig E., *Proc. Phys. Soc. London*, **65B**, 216 (1952).
254. Weimer P. K., Cope D. C., *RCA Rev.*, **12**, 314 (1951).
255. Fotland R. A., *J. Appl. Phys.*, **31**, 1558 (1960).
256. Dresner J., *J. Chem. Phys.*, **35**, 1628 (1961).
257. Schaffert R. M., Williams D. T., Walkup L. E., Quarterly Progress Repts., № 5, 6 (Sept.— Dec. 1949), pp. 430—433, 511—514, Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № W36-039 sc-36851 (ATI-178566).
258. Tsutsumi S., Nagami H., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **4**, № 1, 7 (1962).
259. Andrus P. G., Cleland B. B. et al., 4th Quarterly Progress Rept. (May — Aug. 1951), pp. 4—16, 4—17, Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № DA36-039 sc-123 (ATI-121342).
260—261. Li T. H., Regensburger P. J., *J. Appl. Phys.*, **34**, 1730, 1733 (1963).
262. Фридкин В. М., Барулин Ю. Н., *Физика твердого тела*, **4**, 2978 (1962).
263. Schaffert R. M., Williams D. T. et al., Quarterly Progress Rept. № 3, pp. 218—229 (Dec. 1948—March 1949), Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № W36-039 sc-36851 (AD 67866).
264. См. [257], Rept. № 5, p. 433.
265. Limb H. R., Metcalfe K. A., *Aust. J. Appl. Sci.*, **9**, 115 (1958).
266. Schaffert R. M., Williams D. T., Walkup L. E., Quarterly Progress Rept. № 4, pp. 348—349 (March — June 1949), Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № W26-039 sc-36851 (ATI-178565).
267. McNeil J. F., Jolly D., *J. Phot. Sci.*, **7**, 25 (1959).
268. Andrus P. G., Cleland B. B. et al., 7th Quarterly Progress Rept. (Jan.— March 1952), pp. 7—5 to 7—9, Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № DA36-039 sc-123 (ATI-158109).
269. Blakney R. M., Cranch J. E. et al., 2nd Quarterly Progress Rept. (Oct.—Dec. 1956), p. 8, The Haloid Co., Signal Corps Contr. № DA36-039 sc-72396 (AD № 132799).

270. Bardeen J., пат. США 3041166 (1962).
271. Albrecht H. W., Andrus P. G. et al., Interim Progress Rept. (Aug. 1950, Dec. 1951), pp. 23—36, Battelle Memorial Inst., Contr. № DA36-039 sc-123 (ATI-176932).
272. См. [223], стр. 124.
273. Schaffert R. M., пат. США 2863786 (1958).
274—275. См. [257], Rept. № 5, pp. 444—445; Rept. № 6, pp. 513—514.
276. Bixby W. E., Andrus P. G. et al., 10th and Final Progress Rept. (Dec. 1952), pp. 18—25; 4th and Final Progress Rept. (Jan. 1954), pp. 5—25, Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № DA36-039 sc123 and DA36-039 sc-42612 (AD № 14092 and 282776).
277. Dessauer J. H., Schwertz F. A. et al., Final Rept. (Oct. 1958), Haloid Xerox, Signal Corps Contr. № DA36-039 sc-72396 (AD № 208660).
278. Dessauer J. H., Photographic Science, ed. W. F. Berg, Focal Press, London and New York, 1963, pp. 293—314.
279. Nagami H., Ishida M., Okuno T., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 2, 32 (1961).
280. Nagami H., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **4**, № 1, 3 (1962).
281. Victoreen J. A., *J. Appl. Phys.*, **20**, 1141 (1949).
282. Mollwo E., Photoconductivity Conf., ed. Breckenbridge, Russell and Hahn, Wiley, New York, 1956, pp. 509—528.
283. Bube R. H., Photoconductivity of Solids, Wiley, New York, 1960, pp. 195—196; русский перевод: Бьюб Р., Фотопроводимость твердых тел, ИЛ, 1962.
284. Miller P. H., Semiconducting Materials, ed. H. K. Henisch, Acad. Press, New York, 1951, pp. 177—178.
285. Papazian H. A., Flinn P. A., Trivich D., *J. Electrochem. Soc.*, **104**, 84 (1957).
286. Thomas D. G., *J. Phys. Chem. Solids*, **9**, 31 (1938).
287. Collins R. J., Thomas D. G., *Phys. Rev.*, **112**, 388 (1958).
288. Lander J. J., *J. Phys. Chem. Solids*, **15**, 324 (1960).
289. Moss T. S., Optical Properties of Semiconductors, Butterworths, London, 1959, p. 203.
290. См. [283], стр. 420.
291. Yamaguchi T., Takahashi K., Kokado H., Inoue E., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 1, 12 (1961).
292. Inoue E., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts*, p. 175 (1962).
293. Brown W. F., *J. Chem. Phys.*, **23**, 1514 (1955).
294. Sakata T., Kikuchi S., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 2, 22 (1961).
295. Kinjyo K., Nagashima S., Shimazu K., Yoshitake K., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 3, 33 (1961).
296. Elder T., *J. Appl. Phys.*, **33**, 2804 (1962).
297. Amick J. A., *RCA Rev.*, **20**, 753 (1959).
298. Hoesterey D. C., *J. Appl. Phys.*, **33**, 992 (1962).
299. Nagashima S., *Bull. Techn. Assoc. Graphic Arts Japan*, **6**, № 11, 74 (1963).
300. См. [297], стр. 779.
301. Hauffe K., *J. Phot. Sci.*, **10**, 321 (1962).
302. См. [66], стр. 50.
303. См. [297], стр. 774.
304. Epping R., Pauckner L., Schwab G., Photoconductivity of Crystals Embedded in Resin, Deutsche Gesellschaft fuer Forschung in Graphischen Gewerbe (1962).
305. См. [297], стр. 776.
306. Левинсон И. Б., Плавина И. З., *ДАН СССР*, **143**, 822 (1962).

307. Arneth R., Lorenz B., *Reprographie*, 3, № 9, 199 (1963).
308. Giaimo E. C., *RCA Rev.*, 23, 96 (1962).
309. Inoue E., Yamaguchi T., *Bull. Chem. Soc. Japan*, 36, № 12, 1573 (1963).
310—311. Harazaki Y., Hasegawa H., Kirigaya K., *J. Chem. Soc. Japan, Ind. Chem. Section*, 66, 432, 435 (1963).
312. Фридкин В. М., Делова А. И., Герасимова Т. Н., Билялетдинов Х. С., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 2, 286 (1957).
313. Schaffert R. M., Williams D. T., Walkup L. E., Quarterly Progress Repts. № 4—8 (1949—1950), pp. 374, 460, 515, 585, 663, Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. № W36-039 sc-36851 (ATI-78565, 178566, 209056, 207837).
314. См. [283], стр. 165, 168.
315. Van Dorn W. G., Ullrich O. A., пат. США 2937944 (1957, 1960).
316. Schaffert R. M. et al., Quarterly Progress Repts. № 2, 3, pp. 93, 171, 256 (1948—1949), Battelle Memorial Inst., Signal Corps Contr. W36-039 sc-36851 (ATI-178558, AD-67866).
317. Nozaki H., Paper presented at 1st Internat. Congress on Reprography, Cologne, Oct. 14—19, 1963.
318. Hollander L. E., Castro P. L., *J. Appl. Phys.*, 33, 3421 (1962).
319. Kinjo K., Nagashima S., Yoshitake K., *Denshi Shashin (Electrophotography)*, 3, № 3, 29 (1961).
320. Morimoto K., Murakami Y., Inami A., *Denshi Shashin (Electrophotography)*, 4, № 2, 13 (1962).
321. Greig H. G., *RCA Rev.*, 23, 413 (1962).
322. Weigl J. W., Photographic Science, ed. W. F. Berg, Focal Press, London and New York, 1963, pp. 345—370.
323. Rydz J. S., Marquart V. L., *Proc. Techn. Assn. Graphic Arts* (14th Annual Meeting), p. 77 (1962).
324. См. [289], стр. 163.
325. Jaenicke W., Lorenz B., *Zeits. Elektrochem.*, 65, 493 (1961).
326. Hecht K., *Zeits. f. Physik*, 77, 235 (1932).
327. Mott N. F., Gurney R. W., Electronic Processes in Ionic Crystals, 2nd ed., Oxford Univ., Press, London, 1948, pp. 121—122.
328—329. Gerritsen H. J., Ruppel W., Rose A., *Helv. Physica Acta*, 30, 504, 495 (1957).
330. Фридкин В. М., Барулин Ю. Н., *ДАН СССР*, 145, 78 (1962).
331. См. [297], стр. 770—784.
332. Bube R. H., *J. Appl. Phys.*, 31, 2239 (1960).
333. Schaffert R. M., *Phot. Sci. Engr.*, 6, 197 (1962).
334. Neugebauer H. E., *J. Appl. Optics*, 3, 385 (1964).
335. Mazza R. V., Advanced Systems Devel. Div. IBM Corp., 1961, не опубликовано.
336. Bickmore J. T., Levy M., Hall J., *Phot. Sci. Engr.*, 4, 37 (1960).
337. Weber E., Electromagnetic Fields-Theory and Applications, Mapping of Fields, vol. 1, Wiley, New York, 1950, p. 387.
338. Schaffert R. M., *IBM J. of R. & D.*, 6, 192 (1962).
339. Hawk S. A., Punnett D. F. et al., OTS U.S. Dept. Commerce, Rept. PB-131336, 1956.
340. Knoll M., Ollendorff F., Rompe R., Gasentladung-stabellen, Springer-Verlag, Berlin, 1935, p. 84; см. также Am. Inst. of Physics Handbook, McGraw-Hill, pp. 5—179.
341. Ritow H., *J. Electronics & Control*, 7, 431 (1959).
342. Leob L. B., Basic Processes of Gaseous Electronics, Univ. of Calif. Press, Berkeley, 1955, p. 813.

343—344. Gross B., *Brit. J. Appl. Phys.*, **1**, 259, 265 (1950).
345. Balakrishnan C., *Brit. J. Appl. Phys.*, **1**, 211 (1950).
346. Stuckes A. D., *Proc. Inst. Electrical Engineers*, **103B**, 125 (1956).
347. Gambling W. A., Crawford F. W., *Can. J. of Phys.*, **35**, 564 (1957).
348. Penning F. M., Electrical Discharge in Gases, Cleaver-Hume Press, Ltd., 1957, p. 33.
349. Leob L. B., Basic Processes of Gaseous Electronics, Univ. of California Press, Berkeley, 1955; см. также Fundamental Processes of Electrical Discharges in Gases, Wiley, New York, 1939; русский перевод: Леб Л. Б., Основные процессы электрических разрядов в газах, Гостехиздат, М.—Л., 1950.
350. Ritow H., *J. Electronics and Control*, **7**, 423 (1959).
351—355. Leob L. B., *Basic Processes of Gaseous Electronics*, Univ. of Calif. Press, Berkeley, 1955, pp. 751; 667, 681, 713; 676, 719; 816; 817.
356. Von Engel A., Steenbeck M., *Elektrische Gasenladungen*, Springer-Verlag, Berlin, vol. 1, p. 106; Am. Inst. of Physics Handbook, McGraw-Hill, New York, 1957, pp. 5—168.
357. Burgess R. E., Kroemer H., *Phys. Rev.*, **90**, 515 (1953).
358. Rose G. S., Ward S. G., *Brit. J. Appl. Phys.*, 8, 121 (1957).
359. Loeb L. B., Progress in Dielectrics, ed. J. B. Birks and J. Hart, Acad. Press, New York, 1962, p. 266.
360. Harper W. R., *Advances in Physics*, **6**, 365 (1957).
361. Medley J. A., *Nature* (London), **171**, 1077 (1953).
362. Knoblauch O., *Z. Phys. Chem.*, **39**, 225 (1902).
363. Rudge W. A. D., *Phil. Mag.*, **23**, 852 (1912); **25**, 481 (1913); *Proc. Roy. Soc.*, **90A**, 256 (1914).
364. Harper W. R., *Contemporary Physics* (G. B.), **2**, 345 (1961).
365. Brinton C. C., Jr., Lauffer M. A., Electrophoresis, ed. M. Bier, Acad. Press, New York, London, 1959, pp. 431—438.
366. Creeth J. M., Electrical Phenomena at Interfaces, ed. J. A. V. Butler, The MacMillan, New York, 1951, p. 93.
367. Overbeek J. Th. G., Lijklema J., Electrophoresis, ed. M. Bier, Acad. Press, New York, London, 1959, pp. 8—30.
368. Spitze L. A., 1963, частное сообщение.
369. См. [366], стр. 91.
370. Alnutt D. B., *Reproduction Methods*, **2**, 50 (Apr. 1962); *Reprod. Rev.*, **12**, 28 (Jan. 1962).
371. M'Ewen M. B., Electrical Phenomena at Interfaces, ed. J. A. V. Butler, The MacMillan, New York, 1951, p. 139.
372. Grahame D. C., *Chem. Revs.*, **41**, 441 (1947).
373. Metcalfe K. A., Wright R. A., пат. США 2907674 (1959).
374. Koelmans H., *Philips Res. Repts.*, **10**, 161 (1955).
375. Pearson G. L., Feldman W. L., *J. Phys. Chem. Solids*, **9**, 28 (1958).
376. Pohl H. A., *J. Appl. Phys.*, **29**, 1182 (1958).
377. Inoue E., Kokado H., Takahashi K., Suzuki S., *Bull. Techn. Assoc. Graphic Arts Japan*, 5, № 9, 11 (1962).
378. Анфилов И. В., Фридкин В. М., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **5**, 367 (1960).
379. Kurita T., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 3, 26 (1961).
380. Анфилов И. В., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **6**, 220 (1961).
381. Ohyama Y., Kurita T., Takahashi Y., *Denshi Shashin* (*Electrophotography*), **3**, № 3, 16 (1961).
382. Черкасов Ю. А., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 214 (1963).

383. Поспелов В. В., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **9**, 5 (1964); **10**, 2, 5, 6 (1965).
384. Барулин Ю. Н., *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **10**, 2 (1965).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1.1. Электрофоточувствительные материалы

Sakata T., Photoconductors for Electrophotography, *J. Soc. Sci. Photog. (Japan)*, **21**, 12 (1958).

Goto H., Mokino K., The Relationship Between Electrostatic Sensitivity and Thickness of Selenium Plates, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **1**, № 1, 12 (1959).

Inoue E. et al., Study on the Photoconductive Properties of Zinc Oxide-Resin Dispersed Systems, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **1**, № 2, 27 (1959).

Kikuchi S., Nozaki H., Sakata T., The Effects of Temperatures and Humidity on Selenium Plates, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **1**, № 2, 39 (1959).

Levy M., Blakney R. M., Stability of Selenium Xerographic Plates to Nuclear Radiation, *Phot. Sci. Engr.*, **3**, 161 (1959).

Nakao K., Effects of Irradiation of ZnO Paper Before Static Charging, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **1**, № 3, 16 (1959).

Вишакас Ю. К. и др., Некоторые свойства электрофотографических слоев, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 211—219.

Yoshida K., Kawamura K., Hagita R., Photoconductive Plate with Rectangular Network Grooves on the Surface, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **1**, № 1, 18 (1959).

Жилевич И. И. и др., К вопросу о сенсибилизации окиси цинка в фотополупроводниковых слоях, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 25—32.

Cassiers P. M., Phosphor as an Image-Carrying Element in Electrophotography, *Bull. Soc. Belge Phys.*, **2**, 231 (1960).

Fridkin V. M., The Theory of Formation of Latent Electrophotographic Images on Photoelectrets, *J. Opt. Soc. Am.*, **50**, 545 (1960).

Kobayashi K., Kasu S., Sawada H., Dielectric Properties of ZnO-Resin Dispersion Systems, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **3**, № 3, 7 (1960).

Kokado H. et al., The Influence of Gases and Vapors on the Photoconductivity of ZnO, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **2**, № 2, 13 (1960).

Narita S., Hiruma H., Some Properties of Zinc Oxide Single Crystals, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **2**, № 2, 16 (1960).

Nozaki H., Kasuya K., The Manufacturing Conditions of Various Kinds of Zinc Oxide and Their Electrophotographic Characteristics, *Denshi Shashin (Electrophotography) (Japan)*, **2**, № 2, 9 (1960).

Подвигалкин П. М., Зависимость фотоэлектрических характеристик электрофотографических слоев от темнового спада фотополупроводников, *Оптика и спектроскопия*, 8, 77 (1960).

Sakata T., Kikuchi S., Some Observations on the Photoconductivity of Sintered ZnO, *Denshi Shashin (Elektrophotography) (Japan)*, **2**, № 1, 32 (1960).

Sokalowski N., Szymanowski W., Electrophotography on Macromolecular Substances, *Bull. de l'acad. Polanaise des sciences*, 8, 191 (1960).

Takahashi K., Yamaguchi Y., Kokado H., Phosphor Sensitization of Zinc Oxide (1st rept.), *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 2, № 1, 19 (1960).

Takahashi K., Yamaguchi T., Kokado H., Photoconductive Hysteresis of Zinc Oxide Dispersed in a Dielectric Resin, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 2, № 1, 24 (1960).

Wada M., Takahashi T., Shishido C., Dye Sensitization of Zinc Oxide (Repts. 1—3), *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 1, № 1, 20; № 2, 21 (1959); 2, № 1, 15 (1960).

Hayashi Y., Some Experimental Results of ZnS Electrophotosensitive Plates, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 2, 12 (1961).

Sumayama S., Dyeing Affinity of ZnO, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 3, 18 (1961).

Takahashi T. et al., Electrical Properties of Dyes, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 3, 9, (1961).

Адирович Е. И., Фридкин В. М., Отклонение от закона взаимозаместимости и форма изоопак, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 7, 187 (1962).

Фридкин В. М., Изоопаки в электрофотографии, *ДАН СССР*, 143, 825 (1962).

Harasaki Y., Hasegawa H., Sugihara S., Influence on Humidity on the Photoconductance of ZnO, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 4, № 1, 10 (1962).

Kasu S. et al., Persistent Internal Polarization of Anthracene Powder Dispersed in a Dielectric Resin, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 4, № 3, 21 (1962).

Sakata T., Kikuchi S., Mechanism of Formation of the Latent Electrophotographic Image in Zinc Oxide Papers, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 4, № 3, 28 (1962).

Harazaki Y. et al., Photoelectric Properties of Electrofax Paper (1) Effect of Atmosphere on Sintered Zinc Oxide, *Journ. Japan Techn. Assoc. Pulp and Paper Ind.*, 16, 807 (1963).

Harazaki Y. et al., Photoelectric Properties of Electrofax Paper (2) Effect of Binder Resin on Photoelectric Properties, *Journ. Japan Techn. Assoc. Pulp and Paper Ind.*, 16, 974 (1963).

Harazaki Y., Hasegawa H., Photographic Properties of Electrofax Paper and Electric Properties of Supporting Base, *Journ. Chem. Soc. Japan*, Ind. Chem. Sec., 66, 662 (1963).

Harazaki Y., Hasegawa H., Kirigaya K., Effect of Silicone Compounds on photoelectric Properties of Electrofax Paper, *Journ. Chem. Soc. Janan*, Ind. Chem. Sec., 66, 73 (1963).

Harazaki Y., Hasegawa H., Kirigaya K., Effect of Carbonium Dyes on Photoelectric Properties of Electrofax Paper, *Journ. Chem. Soc. Japan*, Ind. Chem. Sec., 66, 78 (1963).

Harazaki Y., Hasegawa H., Kirigaya K., Effect of Cyanine Dyes on Photoelectric Properties of Electrofax Paper, *Journ. Chem. Soc. Japan*, Ind. Chem. Sec., 66, 190 (1963).

Harazaki Y., Hasegawa H., Kirigaya K., Photoelectric Properties of Electrofax Paper in Relation to its Preparation, *Journ. Chem. Soc. Japan*, Ind. Chem. Sec., 66, 432 (1963).

Маркевич Н. Н., Изготовление электрофотографических бумаг с высокой светочувствительностью, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 135 (1963).

Namba S., Hishiki Y., Color Sensitization of Photoconductive Materials by Dyes. II. Supersensitization of Zinc Oxide, *Rept. Inst. Phys. Res.* (*Tokyo*), 39, 27 (1963). (Part I: *Rept. Inst. Phys. Chem. Res.* (*Tokyo*), 36, (1960)).

Oka S. et al., On the Photoconductive Organic Compounds I, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 2, 27 (1963).

Sakata T., Kikuchi S., Takahoshi Y., Characteristics of the ZnO Photoconductor Layer, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 2, 13 (1963).

Serizawa R., Susuki A., Influence of Ambient Humidity on Photoconductivity and Surface Phenomena of Zinc Oxide Fine Crystals, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 1, 5 (1963).

Таурайтене С. А. и др., К вопросу увеличения адгезии селенового электрофотографического слоя к подложке, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 267 (1963).

Yamanouchi T., Namiki R., Impedance Changes of ZnO-Resin Films by Light Irradiation, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 2, 17 (1963).

1.2. Процессы проявления и сенситометрия

Bixby W. E., Sensitometry of Continuous-tone Xerography, *Penrose Annual*, 49, 108 (1955).

Metcalfe K. A., Liquid Developers for Xerography, *J. Sci. Instr.*, 32, 74 (1955).

Анфилов И. В., Фридкин В. М., К теории проявления скрытого электрофотографического изображения и некоторые особенности работы проявляющих устройств в электрофотографическом копировальном аппарате, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 155—170.

Bickmore J. T., Hayford R. E., Clark H. E., A Method of Contrast Control in Continuous-tone Xerography, *Phot. Sci. Engr.*, 3, 210 (1959).

Гикене А. И., Хотянович С. И., Шилейкене И. С., Проявляющие материалы для электрофотографии и ферромагнитографии, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 138—154.

Hughes J., Xerographic Development Methods, *J. Phot. Sci.*, 7, 128 (1959).

Kiwaki H., Nakasone H., The Electric Properties of Electrophotographic Development Powder, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 1, № 2, 34 (1959).

Виноградов К. М., Некоторые особенности каскадного и жидкостного проявления, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 44—45.

Kiwaki H., Komeji S., Nakasone H., On the Development Process of Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 2, № 1, 38 (1960).

Kiwaki H., Komeji S., Nakasone H., On the Experiment of Electrophotographic Development, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 2, № 2, 22 (1960).

Зибутц Ю. А., Нюнько Л. И., Репродуцирование полутона в электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 5, 352 (1960).

Inoue E., Kokado H., Takahashi K., Basic Survey of the Liquid Development Method of Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 3, 20 (1961).

Kiwaki H., Komeji S., Nakasone H., Test Results on the Resolving Power of Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 1, 27 (1961).

Kolb O. K., Continuous Brightness Gradation and Contrast Control in Xerography, *Kino-Techn.*, 15, 178 (1961).

Nozaki H., A Suggestion on the Sensitometry of Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 3, № 1, 25 (1961).

Хотянович С. И., Гикене А. И., Методы получения электрофотографических изображений в жидких проявителях, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 7, 30 (1962).

Ikeda T., Noguchi K., Miura K., On Tone Reproduction by Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 4, № 2, 5 (1962).

Kiwaki H., Komeji S., Nakasone H., Reversal Development in Continuous Tone Electrophotography by the Magnetic Brush Method, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 4, № 1, 18 (1962).

Мешкуатене Е. А., Плавина И. З., Сенситометрические характеристики скрытых электрофотографических изображений на цинкооксидных слоях, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 7, 380 (1962).

Saheki Y., Negoro K., Akamatsu S., The Relation of Dispersant Structure to Dispersing Effect of Lampblacks in Hydrocarbon Solvents, *Bull. Fac. Eng. Hiroshima Univ.*, 11, 1 (1962).

Saheki Y., Akamatsu S., Negoro R., Mixing Effect of Dispersants on Dispersions of Lamp Black in Hydrocarbon Solvents, *Bull. Fac. Eng. Hiroshima Univ.*, 11, 11 (1962).

Сидаравичус И., Характеристики проявления в электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 7, 456 (1962).

Виноградов К. М., Некоторые вопросы проявления электрофотографических изображений, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 7, 60 (1962).

Анфилов И. В., О природе краевого эффекта в электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 105 (1963).

Manufacture of Electrostatic Inks and Toners, *Am. Ink Maker*, 41, № 12, 28 (1963).

Фридкин В. М., Об общей форме изоопаки электрофотографического процесса, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 8, 36 (1963).

Kimura T., Yokozawa M., Relation Between the Electrostatic Charge of ZnO Electrofax and Its Developed Density, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 2, 8 (1963).

Meguro K., Dispersion of Solid Particles in Liquid Media, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 5, № 1, 2 (1963).

1.3. Технология электрофотографии

Фридкин В. М., Электрофотография на фотоэлектретах, *Кристаллография*, 2, 130 (1957).

Фридкин В. М., Фотоэлектреты и формирование скрытого электрофотографического изображения, *ДАН СССР*, 118, 273 (1958).

Kasu S. et al., Color Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 1, № 2, 31 (1959).

Головин Б. М., Фотоэлектрическое состояние ZnS и два новых электрофотографических процесса, *Физика твердого тела*, 2, 1004 (1960).

Miura K., Kojima K., Tomaru M., A Method of Improving the Electrostatic Charge Distribution on Electrofax Paper, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), 2, № 1, 48 (1960).

Желудев И. З., Барулин Ю. Н., Фридкин В. М., Новые варианты электрофотографического процесса, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, 6, 300 (1961).

Kallmann H., Rennert J., Sidran M., Infrared Photography Using Persistent Internal Polarization in Phospor Plates, *Infrared Physics*, **1**, 58 (1961).

Kinoshita K., Nakamura K., Electrophotography with Persistent Internal Polarization, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **3**, № 1, 18 (1961).

Sato F., Maki H., Nakamura K., Electrophotographic Transferring, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **4**, № 2, 32 (1962).

Bureau W. H., Paper and electrostatic copying, *Graphic Arts Monthly*, **35**, 90, 92, 94, 96 (Sept. 1963).

Nakamura K., Persistent Internal Polarization of ZnCdS Phosphors and its Application, *Oyo Butsuri*, **32**, 213 (1963); **30**, 778 (1961).

Nakamura K., Kato H., A New Method of Forming and Transferring an Electrostatic Charge Pattern, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **5**, № 2, 21 (1963).

1.4. Измерительные приборы

Gillespie T., Langstroth G. O., An Instrument for Determining the Electric Charge Distribution of Aerosols, *Canad. J. Chem.*, **30**, 1056 (1952).

Dodd E. E., The Statistics of Liquid Spray and Dust Electrification by the Hopper and Laby Method, *J. Appl. Phys.*, **24**, 73 (1953).

Фридкин В. М., Герасимова И. Н., Электрофотографическая печать на люминофорах, *ДАН СССР*, **113**, 571 (1957).

Карпешко Ю. Е., К вопросу о критерии чувствительности электрофотографического процесса, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 55—60.

Kineri S., Kakii T., Nishitani T., A Study of the Sensitivity Test of Electrophotographic Papers and Its Method of Comparison, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **1**, № 1, 15 (1959).

Kiwaki H., Oyama H., Tomioka K., Experimental Data on Electrophotographic Material, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **1**, № 1, 30 (1959).

Ляликов К. С., Попова О. Г., Определение светочувствительности электрофотографических слоев, Электрофотография и магнитография, Вильнюс 1959, стр. 117—124.

Тихонов Б. И., Измерение электрических потенциалов селеновых электрофотографических слоев, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 161—169.

Фридкин В. М., Некоторые эффекты, полученные при исследовании люминесцентности цинко-сернистых электретов, *ДАН СССР*, **131**, 290—292 (1960).

Васильев П. Е., Козырев В. П., Динамический электрометр для изучения электрофотографических слоев, *Изв. Ленинградского электротехнического института*, **4** (1960).

Wada M., Takahashi T., Koda T., A Vibrating Reed Electrometer for Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **2**, № 2, 26 (1960).

Kiwaki H., Komeji S., Nakasone H., Studies on the Measurement of Electrophotographic Plate Potentials, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **3**, № 2, 27 (1961).

Friend R. A., Krause P., A New Method and Apparatus for Evaluating the Decay Rates of Electrostatic Charges, *Phot. Sci. Engr.*, **6**, 141 (1962).

Ohbuchi K., On the Digital Indicating Electrostatic Sensitometer for Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **4**, № 2, 1 (1962).

Suzuki S., Tomura M., Charge Measurement of Fine Particles (Parts 1—3), *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **4**, № 2, 20—25; № 3, 3 (1962).

Brubaker D. G., Testing of Electrophotographic Papers and Coating Formulations, *Tappi*, **46**, 312 (1963).

Yoshida K., Tatsuta Y., Kawamura T., On the Capacity of Photoconducting Layers, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **5**, № 1, 21 (1963).

Axford A. J. Q., Gilbert J., Characteristics of Electrophotographic Papers—Part I, *J. Photog. Sci.*, **12**, 20 (1964).

1.5. Ксерорентгенография

Oliphant W. D., Xerography and Its Radiographic Applications, *Discovery*, **15**, 182—184 (May 1954).

Harrison N. K., Soc. Proc. Royal Photographic Soc. The Medical Group Discuss «Xerography», *Brit. J. Phot.*, **102**, 206 (1955).

Roach J. F., Hilleboe H. E., Xeroradiography, *Am. J. Roentgenol*, **73**, 5 (1955).

Farmer P. J., Xeroradiography, Electrostatic Method of Developing and Recording X-ray Images, *Aircraft Production*, **18**, 8 (1956).

Norgard W. G. J., Electrophotography in Medicine, *Oil and Color Chem. Assn.*, **39**, 857 (1956).

Halmshaw R., Recent Advances in Radiographic Techniques, *J. Inst. Metals*, **86**, 207 (1958).

Каминскас А. И., Янулис А. П., Некоторые результаты применения электрофотографических методов в рентгенографии, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 204—210.

Yoshida K., Nakahori K., Undercutting of the Image in X-ray Xeroradiography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **1**, № 2, 24 (1959).

Yoshimura K., The Medical Applications of Xeroradiography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **1**, № 2, 14 (1959).

Gould H. R. et al., Xeroradiography of the Breast, *Am. J. Roentgenol. Rad. Therapy and Nuclear Med.*, 84 (1960).

Burns B. D., Durant R. L., Pollett C. G., Xeroradiography, *Progress in Non-Destructive Testing*, **3**, 31 (1961).

Nemet A., Black A. D., Cox W. F., Xeroradiography for the Testing of Plastics and Light Materials, *Plastics Inst. Trans. J.*, **30**, 192 (1962).

Dobbs H. E., The Use of Xerography for Autoradiography, *Internat. Journ. Appl. Radiation and Isotopes*, **14**, 285 (1963).

Farmer F. T., Fowler J. F., Haggith J. W., Megavolt Treatment Planning and the Use of Xeroradiography, *Brit. J. Radiology*, **36**, 426 (1963).

1.6. Применение и оборудование

Xerography. New Visual Effects with Powder and Electricity, *Portfolio*, **1**, № 1 (1950).

Walkup L. E., Lithographic Plates by Xerography, *Penrose Annual*, **45**, 134 (1951).

Lorant M., «Atom-Proof» two minute camera, *Functional Phot.*, **3**, № 10, 10 (1952).

La Fave A., Microfilm enlarging via Xerography, Proc. 4th Ann. Meeting Nat. Microfilm Assoc., vol. 4, Boston, Mass., March 24—25, 1955, pp. 73—78.

Weil B. H., Xerography: Dry photographic copying, Information Processing Equipment, ed. M. P. Doss, Reinhold Publ. Corp., New York, 1955, p. 105.

Electrofax dry—photographic enlarger, *Frankling Inst. J.*, **261**, 584 (1956).

Lewis M., Offenhauser H. O., Enlarging by Xerography, Microrecording, Interscience, New York, 1956, p. 208.

Mayer C. G., Electronic Photography (The Peter Le Neve Foster Lecture), *J. Roy. Soc. Arts*, **104**, 578 (1956).

Mott W. T., Photography and equipment records: Xerography speeds transfer of general equipment property costs records to punched card system, *Am. Gas Assn. Monthly* (Dec. 1956).

Extremely fast printout equipment, *Elect. Eng.*, **77**, 193 (1958).

Carlson H. E., Visual engineering changes through xerography, *Ind. Phot.*, **7**, 22 (1958).

Johnston B., Australian libraries and their methods, *Unesco Bull. for Libraries*, **12**, 7 (1957); *Am. Documentation*, **9**, 217 (1958).

Electrostatic unit prints photos dry, *Electronics*, **32**, 102 (1959).

Борисевич Е. С. и др., Использование электрографических методов в регистрирующих осциллографах и оптических самописцах, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 84—92.

Фридкин В. М., Высокочувствительные электрофотографические слои и электрофотографический копировальный аппарат, Электрофотография и магнитография, Вильнюс, 1959, стр. 33—43.

Kallmann H. P., Rennert J., Data Storage and display with polarized phosphors, *Electronics*, **32**, 39 (1959).

Kokue T., Naka K., High Speed Teleprinter System Using the Electrophotographic Device, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **1**, № 1, 8 (1959).

Xerography speeds Olympic results, *Ind. Phot.*, **9**, Sec. 2, 49 (1960).

Koana Z., Wakimoto Z., A Copying Lens for the Electrofax Process, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **2**, № 1, 8 (1960).

Koana Z., Wakimoto Z., Lenses Used in Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **2**, № 2, 30 (1960).

Kubota K. et al., High Speed Facsimile with Electrophotographic Paper, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **2**, № 1, 12 (1960).

Holmes D. C., Electrostatic Photoreproduction at the U. S. Library of Congress, *Unesco Bull. for Libraries*, **15**, 18 (1961).

Nakamwia K., Kinoshita K., Persistent Internal Polarization of Zn—CdS Phosphors and Applications, *J. Appl. Phys.* (*Japan*), **30**, 778 (1961).

Wakimoto Z., A Lens for High-Speed Printer Used in Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **3**, № 3, 45 (1961).

Harris builds electrostatic press for army map printing, *Inland Ptr/Am. lithogr.*, **148**, 90 (1962).

Arnett S. E., Electrophotography for graphic reproduction, *Graphic Arts Monthly*, **34**, 44 (1962).

Kallmann H. P., Rennert J., Burgos J., Optical display of latent persistent internal polarization images produced with infrared and visible radiation, *J. Phot. Sci. Eng.*, **6**, 65 (1962).

Nagashima S., Photoengraving by Orifax (III), *Bull. Techn. Assoc. Graphic Arts Japan*, **5**, № 11, 10 (1962).

High-Speed Facsimile: A System of Remote or Long-Distance Copying, *Graphic Arts Monthly*, **35**, 45 (1963).

Gibson S. W., Goals in Rapid Reproduction Methods, *TAGA Proc.*, 387 (1963).

Гренишин С. Г., Черкасов Ю. А., Электрофотографический метод регистрации спектра, *Кинотехника*, 8, 46, 293 (1963).

1.7. Процессы, родственные электрофотографии

Glenn W. E., Thermoplastic Recording, *J. SMPTE*, **69**, 577 (1960).
Hutter E. C., Inslee J. A., Moore T. H., Electrostatic Imaging and Recording, *J. SMPTE*, **69**, 32 (1960).
Sittel K., Electrostatic Deposition Processes, *Elec. Eng.*, **79**, 288 (1960).
New pressureless printing method developed at Stanford Research Institute, *Inland Ptr/Am. lithogr.*, **148**, 96 (1961).
Electrostatic printing: a workable technique for soft surfaces, *Elec. Eng.*, **80**, 876 (1961).
Jaenicke W., Albert L., Latent Charge Photographs in the Electron Microscope Using Non-Light Sensitive Films, *Z. Wiss. Phot.*, **55**, 154 (1961).
Kubota K. et al., Very High Speed Printing by Electrostatic Electrography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **3**, № 3, 39 (1961).
Белавзева Е. М., Фридкин В. М., Электрофотографические методы электронной микроскопии, *ДАН СССР*, **142**, 67 (1962).
Brophy J. J., Electrostatic Recording, *Frontier* (*Armour Research Foundation*), **23**, № 4, 22 (1962).
Krittman I. M., Inslle J. A., Discussion and Applications of Electrostatic Signal Recording, *RCA Rev.*, **24**, 406 (1963).
Trillat J. J. et al., A Procedure for Recording Electron Diffraction or Microscopic Images without Photographic Emulsion, *Sci. Ind. Phot.*, **34**, 37 (1963).

1.8. Обзорные статьи

Carlson C. F., Xerography — A New Industry, *Phot. Age*, **3**, 10 (1949).
Oliphant W. D., Xerography: Non-chemical Photographic Process, *Discovery*, **14**, 175 (1953).
Reid W. T., Xerography — from fable to fact, *Battelle Techn. Rev.*, **2**, 188 (1953).
Sugarman M. L., Jr., Electrofax: a new tool for graphic arts, *Am. Pressman*, **65**,33 (1955).
Xerography, *Aircraft Production*, **20**, 198 (1958).
Carlson C. F., Xerography, Progress in Photography, ed. D. A. Spencer, Focal Press, London, 1958, p. 11.
Cook W. A., Xerography and Its Applications, *J. Phot. Sci.*, **7**, 93 (1959).
Inoue E., Electrophotography, Kyoritsu Press, Tokyo, 1959.
Яликов К. С., Обзор иностранных работ по электрографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **4**, 68 (1959).
Яликов К. С., Достижения советской электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **4**, 149 (1959).
Sugarman M. L., Levine M. B., Steiner N. P., Electronic Photography, *IRE Trans. PGIE*, **11**, 26 (Dec. 1959).
Cassiers P. M., Electrophotography, *Ind. Chimique Belge*, № 2, 773 (1960).
Hauffe K., Xerography, *Angew. Chem.*, **72**, 730 (1960).
Kaprelian E. K., Leistner K., Signal Corps Role in Development of Continuous-Tone Electrophotography, *IRE Transaction on Military Electronics*, **MIL-4**, № 4, 591 (1960).
Nozaki H., The Theory of Photosensitivity and Development in Silver Halide Emulsions and Its Significance for Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **2**, № 2, 35 (1960).

Фридкин В. М., Симпозиум по физическим основам электрофотографического процесса, *УФН*, **74**, 567 (1961).

Фридкин В. М., Физические принципы электрофотографического процесса, *Вестник АН СССР*, **31**, 111 (1961).

Kucera T. J., Overseas developments; electrophotography and electrostatic printing, *Ind. Phot.*, **10**, 54 (1961).

Rheinfrank J. J., Walkup L. E., Electrostatography, *Reproduction Methods*, **1**, № 5, 25 (1961).

Дравин А. Б., Вторая научно-техническая конференция по вопросам электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **7**, 157 (1962).

Гренишин С. Г., Черкасов Ю. А., Современное состояние электрофотографии, *Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии*, **7**, 229 (1962).

Koellner H., Color Possibilities in Xerography, *Bild u. Ton.*, **15**, 34 (1962).

Ohashi K., Thoughts on Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **4**, № 3, 2 (1962).

Nakamura K., PIP and Electrophotography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **4**, № 3, 12 (1962).

Sakata T., Recent Developments in Electrophotography, *J. Soc. Sci. Phot.* (*Japan*), **25**, 193 (1962).

Starr A. T., Xerography, *J. Inst. Elec. Eng.*, 8, 529 (1962).

Sugarman M. L., Jr., Some Considerations in Document Copying via Electrophotography, *J. Phot. Sci.*, **10**, 206 (1962).

Dinsdale A., Chester F. Carlson: Inventor of Xerography, *Phot. Sci. Engr.*, **7**, 1 (1963).

Kollner H., Electrographic Recording Processes, *Bild u. Ton.*, **16**, 7 (1963).

Shono N., Xerography in Reprography, *Denshi Shashin* (*Electrophotography*) (*Japan*), **5**, № 2, 1 (1963).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5

ЧАСТЬ I
ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС
И ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Введение 11
1.1. Исторический обзор 13
1.2. Скрытое изображение в электрофотографии 15
1.3. Технологический процесс 17
II. Ксерография 20
2.1. Основы ксерографии 20
2.2. Технологические процессы 24
2.3. Очувствление, или зарядка 24
2.4. Экспонирование 26
2.5. Проявление изображения 26
2.6. Обращенное проявление 38
2.7. Скорость проявления 40
2.8. Перенос изображения 40
2.9. Закрепление 42
2.10. Очистка пластины 42
2.11. Размножение 43
2.12. Ксерографические материалы 44
2.13. Фотопроводящие покрытия 44
2.14. Проявляющие составы 49
2.15. Сенситометрия 51
III. Устойчивая внутренняя поляризация (фотоэлектреты) 63
3.1. Механизм устойчивой внутренней поляризации 63
3.2. Образование изображения с помощью внутренней поляризации 66
3.3. Фотоэлектретные материалы 71
IV. Устойчивая проводимость 76
4.1. Механизм устойчивой проводимости 76
4.2. Образование изображения путем использования явления устойчивой проводимости 77
4.3. Материалы с устойчивой проводимостью 80
4.4. Получение изображений на основе использования постоянной проводимости 83
V. Другие электрофотографические методы 85
5.1. Методы с одновременным экспонированием и проявлением 85
5.2. Способы с использованием фотопроводящих порошков . . . 89
5.3. Электротермография 91
5.4. Фотоэлектрическая термография 91
VI. Специальные вопросы 94
6.1. Вспомогательные технологические операции в ксерографии 94

6.2. Перенос скрытого изображения в ксерографии (TESI-процесс) 96
6.3. Процессы переноса с использованием предварительно образованного электростатического изображения 97
6.4. Процессы переноса, включающие образование электростатического изображения 103
6.5. Прямой перенос поверхностных зарядов изображения . . . 106
VII. Цветная электрофотография 108
7.1. Процессы, использующие перенос изображения 109
7.2. Цветные процессы на электрофотографической бумаге . . . 112
7.3. Общие замечания о цветной электрофотографии 112
VIII. Электрорентгенография 114
8.1. Ксерорентгенография 114
8.2. Ионография 121
IX. Электрографические печатные процессы 124
9.1. Электростатическая электрография 124
9.2. Электролитическая электрография 133
9.3. Искровая печать 138
9.4. Магнитная печать 139
X. Применение электрофотографии 142
10.1. Разработка оборудования в США 143
10.2. Конторские копировальные устройства без изменения масштаба 144
10.3. Изготовление копий на бумаге с микрофильмов 152
10.4. Печатание и размножение 158
10.5. Серийное оборудование для ксерорентгенографии 164
10.6. Специфические случаи применения 168
10.7. Разработка серийного оборудования за пределами США 181

ЧАСТЬ II

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

I. Фотоэлектрический метод получения электростатических изображений 193
1.1. Основные характеристики фоточувствительных материалов 193
1.2. Фотопроводящие диэлектрические материалы 224
II. Перенос заряда в фотопроводящих изоляторах 297
2.1. Темновой спад и зарядка слоя 297
2.2. Роль процесса рекомбинации в фотопроводящих изоляторах 301
2.3. Разряд в ксерографии 303
2.4. Теория разряда 304
III. Свойства электростатических изображений 320
3.1. Электрическое поле электростатического изображения . . . 322
3.2. Математический расчет электрического поля скрытого изображения 322
3.3. Разрешение поля и амплитуда электростатического изображения 333

3.4. Действие проявляющего электрода на поле скрытого изображения 340
3.5. Краткие выводы 347
3.6. Приложение А. Определение поля для синусоидального распределения заряда на диэлектрической поверхности . . . 349
3.7. Приложение Б. Определение уравнений силовых линий 353
IV. Перенос скрытых электростатических изображений на диэлектрические поверхности 355
4.1. Электростатические явления 355
4.2. Кривая Пашена и электрический разряд 357
4.3. Модифицированная кривая Пашена 360
4.4. Электрический разряд в больших зазорах 362
4.5. Вычисление величины перенесенного заряда 363
4.6. Методика эксперимента 379
4.7. Выводы 397
4.8. Механизм переноса заряда при электрическом разряде . . . 399
4.9. Механизм прямого переноса зарядов 405
V. Теория проявления скрытого электростатического изображения 406
5.1. Электризация частиц проявителя 406
5.2. Кинетика осаждения частиц при проявлении скрытого изображения 417
Литература 427

Р. Шаффорт
ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЯ

Редакторы *И. Андреева* и *М. Великовский*
Художник *А. Купцов*. Художественный редактор *Н. Фильчагина*
Технический редактор *Л. Кондюкова*. Корректор *А. Рыбальченко*

Сдано в производство 4/I 1968 г. Подписано к печати 24/V 1968 г. Бумага кн-жур. 60 × 90¹/₁₆=14 бум. л. 28 печ. л. Уч.-изд. л. 25,69. Изд. № 20/4319. Цена 1 р. 97 к. Зак. 11 (Темплан 1968 г. изд.-ва «Мир», пор. № 199)

■

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва, 1-й Рижский пер., 2

■

Московская типография № 16
Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР
Москва, Трехпрудный пер., 9