

537

H-31

Д. НАСЛЕДОВ и Л. НЕМЕНОВ

**ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ
и
ФОТОЭЛЕМЕНТЫ**

ЭТТН
1933

Д. НАСЛЕДОВ и Л. НЕМЕНОВ

537+6

H-3

ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ И ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

47011



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1933 МОСКВА

АННОТАЦИЯ.

Книга Наследова и Неменова «Твердые выпрямители и фотоэлементы» освещает и знакомит с физико-техническими основами одного из разделов физики — превращение световой энергии в электричество и вопросами выпрямления электрического тока.

Книга предназначена для широких масс рабочих изобретателей (правда с достаточной подготовкой) и имеет целью способствовать разработке вопросов внедрения этих новых объектов в промышленность.

В книге изложены лишь самые основные факты, применение их в технике и разъяснены связанные с ними физические процессы.

Посвящена
в 1933 г.

Отв. редактор П. И. Кудинов. Техн. редактор В. Д. Финити.

Онти № 214. Индекс Т-45г-4-6. Тираж 4.000. Сдано в набор 7/III 1933. Подп. в печ. 19/VI 1933. Формат бумаги 82 × 111. Печати. 10 л. Колич. бум. л. 2 1/2. Колич. печ. зн. в бум. л. 140.000 б. Заказ № 332. Ленгорлит № 13409. Выход в свет июль 1933.

3 я тип. Онти им. Бухарина. Ленинград, ул. Моисеенко 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

С каждым годом физика вводит в технику все новые и новые объекты. Многие из них еще не полностью изучены и это весьма затрудняет их широкое использование промышленностью. Только при условии хорошего знания механизма физических процессов, совершающихся в данном объекте, возможно полное, всестороннее его использование. Бурно развивающаяся в Стране Советов техника стимулирует также не менее бурный рост физики. Это и понятно, ибо каждый производственный процесс состоит из ряда физических процессов, которые необходимо понять и осознать в интересах же самой техники. В связи с этим усиленно развиваются все новые и новые отделы физических наук. Каждый из нас уже достаточно осознал важность лозунга «догнать и перегнать капиталистические страны в кратчайший срок». Для осуществления этого лозунга необходимо серьезно заняться овладением всех достижений капиталистической науки и техники. Последние годы физика выдвинула в технику новый материал — полупроводники. Использование их разнообразно. Особенный интерес представляет применение их для целей выпрямления электрического тока и для превращения световой энергии в электрическую. Перспективы уже на сегодняшний день в этом направлении — блестящие. У нас в Союзе уже целый ряд институтов и лабораторий занимается разработкой этого вопроса. Создана Всесоюзная сквозная бригада по твердым выпрямителям и фотоэлементам, которая охватывает целый ряд заводов, лабораторий и институтов, ведущих работу в этом направлении. Во главе

этой бригады стоит академик А. Ф. Иоффе, который руководит работами в этой области. На сегодня мы уже имеем ряд больших достижений на этом участке физики и техники, несмотря на то, что этим делом у нас занимаются лишь около двух лет.

Для успеха этого дела необходимо привлечь более широкие массы рабочих-изобретателей к разработке вопросов, связанных с внедрением этих новых объектов на службу нашему народному хозяйству.

Настоящая небольшая книга должна способствовать ознакомлению наших изобретателей с физико-техническими основами этого нового раздела физики. Разумеется трудно в столь небольшом объеме охватить все стороны физики и техники твердых фотоэлементов и выпрямителей. Мы постарались изложить лишь самые основные факты, связанные как с пониманием физических процессов, так и с применением их в технике. Одновременно в некоторых случаях указаны те пути, по которым вероятно будет развиваться это новое дело. Читатели, заинтересовавшиеся излагаемым материалом, смогут детально ознакомиться с ним по оригинальной литературе, список которой приводится в конце книги.

Опыт систематического изложения этого нового материала является первым не только у нас в Союзе, но и за границей. До сих пор книг подобного содержания не было. В этом отношении мы являемся новаторами и возможно, что в связи с этим нами допущен ряд промахов.

Но повторяем, в некоторых случаях мы умышленно опускали изложение ряда фактов для того, чтобы не сделать книгу слишком громоздкой.

Если нам удастся заинтересовать широкие изобретательские массы этим новым для физики и техники материалом и толкнуть их мысль в этом направлении, то цель этой книги будет достигнута.

Ленинград,
Ноябрь 1932 г.

I. ОБЩАЯ ЧАСТЬ.

1. Введение.

В этой книге читатель познакомится с новой областью науки и техники, которая создалась в течение последних трех, четырех лет. Многие находят еще в стадии усиленной проработки. Физика эти новые проблемы рассматривает как одни из основных, ибо они уже за столь короткое время своего существования дали существенный вклад в промышленность. В этом случае мы особенно рельефно сможем ощутить неразрывную связь между физикой и техникой. В технике назрел такой период, когда необходимо было ввести в обиход новый вид материалов — полупроводники, о которых так мало было известно прежде, и физика немедленно серьезно занялась их исследованием, успев за небольшой сравнительно период не только многое понять из известного прежде, но и открыть новые явления, сулящие большой выход в промышленность.

Последние годы развития физики, в течение которых были созданы области, являющиеся предметом нашего изучения, показали лишней раз, насколько неполно до сих пор различные вещества использованы человеком в качестве того или иного материала. Ежедневные настойчивые требования промышленности побуждают физиков к изысканиям новых веществ, физические свойства которых в состоянии удовлетворить запросам техники на ближайшее время.

Еще не так давно одной из существенных проблем физики являлась проблема изоляции. Огромное внимание было

при этом обращено на такие вещества, которые отличаются крайне дурной способностью пропускать через себя электрический ток и которые могут выдерживать большие напряжения, не испытывая при этом пробоя.

Нужно заметить, что здесь, как и во всех почти случаях, для наилучшего решения задачи необходимо было выяснить физическую природу тех процессов, которые происходят в изоляторах. Действительно, только зная механизм процессов, происходящих в каком-либо теле, мы можем создать такие условия, при которых их ход будет для техники наиболее выгоден.

По этому пути и пошла физика изоляторов.

Была проделана огромная работа, привлекавшая крупные научные силы, в результате которой очень многое, до тех пор неясное и туманное, сделалось довольно хорошо понятным. Сущность изолятора или, как еще говорят, диэлектрика, была в значительной степени вскрыта. Все это было полностью использовано электротехникой, для которой, как нам хорошо известно, проблема изоляции является весьма важной.

Другая проблема, которая для электротехники всегда являлась столь же важной, была проблема проводников.

Каждому теперь известно, что комбинации проводников и изоляторов есть основные элементы электротехники.

Хорошие проводники также важны для нее, как и хорошие изоляторы.

Вполне естественно, что и в данном случае физике необходимо было затратить большие усилия для того, чтобы привести и этот вопрос к некоторой ясности. Многие из того, что прежде являлось покрытым туманом, в последние годы прояснилось. Пожалуй, можно без преувеличения сказать, что в вопросе металлического состояния веществ мы научились уже более или менее правильно разбираться.

При всем этом оставалась еще огромная группа веществ, свойства и поведение которых представляли много непонят-

ного. Мы говорим в данном случае о так называемых полупроводниках, которые занимают по своим свойствам промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Науке был известен целый ряд их свойств, но все это вместе взятое представляло собой мешанину самых разнообразных фактов, усмотреть среди которых какие-либо закономерности было крайне трудно. Имелось некоторое количество чисто эмпирического материала, не подчиненного теории и вдобавок еще весьма часто противоречивого.

Все это не покажется нам странным, если мы вспомним, что для электротехники полупроводники не были столь интересны и нужны, как проводники и изоляторы.

Это и понятно.

Сама жизнь побуждала физиков все более и более работать в направлении, продиктованном промышленностью. А вместе с тем в полупроводниках таилось многое, скрытое от взглядов человека, что могло ввести совершенно новую струю и в технику, и в науку.

Бурное развитие техники за последние годы не оставило в стороне и эту область. Электротехнике полупроводник потребовался.

Многие ее области настойчиво затребовали такого рода материал, а широкое применение его, как уже указывалось выше, невозможно без хорошего знания его свойств. Возникла новая проблема — проблема полупроводников, которую жизнь поставила на одном из первых мест физики сегодняшнего дня.

Нашей задачей не является обзор свойств полупроводников. Это даже теперь слишком большая по своему объему задача.

В последующем мы займемся изучением двух свойств полупроводниковых систем: выпрямлять переменный электрический ток и непосредственно превращать световую энергию в электрическую. Первое и второе свойства имеют огромное техническое значение.

Но прежде чем переходить к изучению этих вопросов, мы познакомимся вкратце с основными нашими представлениями о строении вещества вообще и в частности, что особенно для нас важно, со строением проводников, изоляторов и полупроводников. Это необходимо нам для того, чтобы мы могли более легко разбираться в тех процессах, которые в них происходят при прохождении через них электрического тока.

2. Общие представления о строении твердых тел.

По современным представлениям каждое из окружающих нас тел состоит из мельчайших частиц, называемых атомами. Каждая из этих частиц является сложной системой еще более мелких элементов, протонов и электронов, связанных с наименьшими порциями положительного и отрицательного электричества. Атом отрицательного электричества называется электроном, частицы с массой атома водорода, заряженные положительным электричеством, называются протонами. Электрон и протон имеют одинаковые по величине, но противоположные по знаку, электрические заряды, и обладают различными массами. Как показывает опыт, масса протона в 1840 раз больше массы электрона. Масса электрона выраженная в граммах, равна: $9 \cdot 10^{-28}$ г.

Протон обладает массой равной массе атома самого легкого из всех химических элементов — водорода. Что касается заряда электрона и протона, то он равен, как показали измерения: $4,77 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц количества электричества. Это очень малые величины, но несмотря на это они измерены с большой точностью (методы современной экспериментальной физики позволяют это сделать).

Атом каждого химического элемента представляет собой систему электронов и протонов. Он состоит из положительно заряженного ядра и некоторого числа вращающихся вокруг него по замкнутым кривым электронов. Относительно ядра

атома мы знаем пока мало. Нам известно только, что оно в общем случае состоит из протонов и электронов, образующих в силу мощных электрических взаимодействий крайне устойчивую систему. В самое последнее время опыты ряда ученых заставили нас включить в ядро атома еще третий сорт частиц, имеющих ту же массу, что и протон, но с зарядом равным нулю. Природа этих частиц еще недостаточно выяснена. В силу своей нейтральности в электрическом отношении они получили название нейтронов. Итак в состав ядра атома могут входить нейтроны, протоны и электроны. Правда, физики теперь склонны думать, что в состав ядра не входят электроны в свободном виде. Повидимому они связаны там с протонами, образуя нейтроны. Заряд ядра определяет основные свойства атома, ибо число внешних электронов определяется целиком им. Простейшим атомом является атом водорода, состоящий из одного протона и вращающегося вокруг него одного электрона. Вот таковы в самых общих чертах наши представления об устройстве атомов. Мы видим, что атомы являются иногда весьма сложными электрическими системами.

Группы атомов, связанных прочно друг с другом электрическими силами, образуют так называемые молекулы.

В природе мы наблюдаем существование веществ в трех состояниях: в жидком, твердом и газообразном. Каждое вещество может находиться в зависимости от условий в любом из этих состояний.

Резкое различие свойств газов, жидкостей и твердых тел обусловлено исключительно характером взаимодействия между его атомами или молекулами.

В газах это взаимодействие совершенно ничтожно, чем и объясняются все свойства газового состояния. Атомы или молекулы в этом случае имеют возможность совершенно свободно перемещаться друг относительно друга, образуя систему хаотически двигающихся частиц.

В жидком теле это взаимодействие значительно больше

и хотя отдельные частицы его и могут перемещаться относительно свободно внутри объема, занимаемого жидкостью, но выйти за пределы этого объема для них представляет большое затруднение. В этом случае силы взаимодействия между каждой отдельной частицей и всем коллективом частиц настолько значительно, что процесс отрывания ее от всей группы связан с большой затратой энергии.

В твердом теле это взаимодействие становится уже настолько большим, что частицы теряют возможность свободно перемещаться друг относительно друга и занимают вполне определенные места в пространстве, совершая лишь колебания около этих мест. Эти колебания всецело зависят от температуры тела. Чем выше температура, тем интенсивнее колеблются частицы внутри твердого тела.

Для твердого тела является характерным вполне закономерное распределение атомов в пространстве. Под действием электрических сил, существующих между его атомами, последние занимают положения, составляющие правильную геометрическую пространственную сетку.

Это распределение атомов рано или поздно всегда наступает, ибо ему соответствует максимальная устойчивость всей данной системы атомов. В таких случаях говорят, что тело имеет кристаллическое строение, а сами тела называют кристаллами. Следовательно, для твердого тела характерным является кристаллическое строение.

Такие же тела, в которых атомы расположены совершенно беспорядочно, называются аморфными телами.

Примером первых тел могут служить: все металлы, поваренная соль, сахар, алмаз и т. п.

В качестве примера аморфных тел можно указать на все почти жидкости, стекло, смолы и т. п.

На рис. 1 показано распределение атомов натрия и хлора, образующих кристалл поваренной соли. Здесь атомы натрия и хлора обладают электрическими зарядами, ибо атом натрия потерял один электрон, а атом хлора приобрел один электрон.

Следовательно атом натрия имеет положительный заряд, а атом хлора — отрицательный. Атомы, имеющие заряд того или иного знака, называются ионами. Таким образом кристалл поваренной соли состоит из ионов натрия и хлора. Эти ионы располагаются в строго определенном порядке, образуя как бы некоторую решетку. Подобные расположения назы-

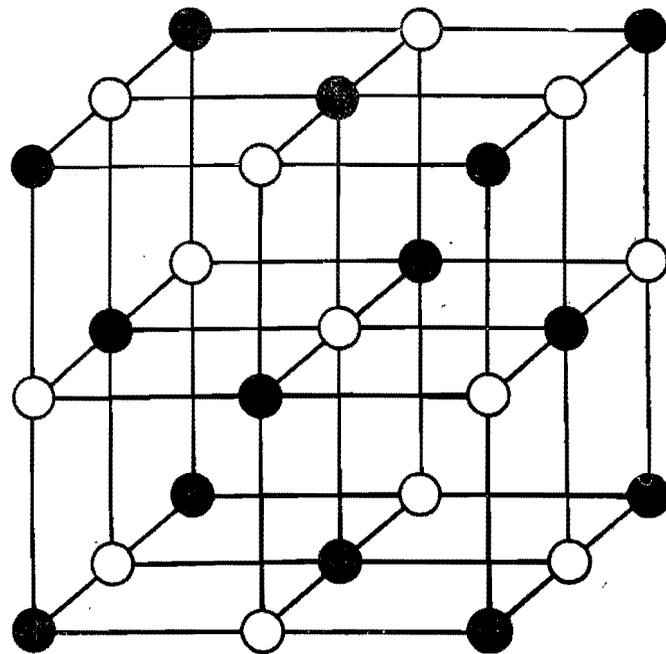


Рис. 1. Схема кристаллической решетки каменной соли (NaCl)

- — ионы натрия (Na^+)
- — ионы хлора (Cl^-).

ваются кристаллическими решетками. Различные твердые тела имеют различные кристаллические решетки. Так, например, поваренная соль образует кубическую кристаллическую решетку, ибо ионы натрия и хлора, чередуясь друг с другом, располагаются в вершинах правильных

кубиков. Кристаллическое строение твердого тела, характер его решетки определяют целый ряд свойств данного тела.

В природе чаще всего мы наблюдаем тела в виде собрания отдельных мелких кристалликов, крепко связанных друг с другом. Примером может служить любой металл, кусок сахара и т. д. Такие тела называются мелкокристаллическими.

В справедливости этого легко убедиться рассматривая эти тела под микроскопом.

Ниже мы рассмотрим детальнее строение проводников, изоляторов и полупроводников для того, чтобы сделать понятными их электрические свойства. Мы увидим в дальнейшем, что в зависимости от устройства атома, вернее от характера движения в нем электронов, а также от распределения атомов в пространстве, мы будем иметь дело с тем или иным видом твердого тела. Электрические свойства их почти целиком определяются этими факторами.

Все сообщенные здесь сведения будут необходимы нам при рассмотрении интересующих нас вопросов. В дальнейшем мы свободно будем пользоваться установленной здесь терминологией.

3. Проводники.

Роль проводников в технике общеизвестна. Нашей задачей сейчас является более подробное рассмотрение физических свойств проводников и их внутреннего строения, особенности которого и сообщают им эти свойства.

Как известно, типичными и наиболее важными для нас представителями проводников являются металлы. Поэтому мы и рассмотрим прежде всего этот класс проводников.

Металлы по своим свойствам резко выделяются среди всех других тел природы. Они обладают способностью легко пропускать через себя электрический ток или, как говорят, большой электропроводностью. Параллельно с этим они не менее легко передают теплоту, т. е. имеют большую тепло-

проводность. Эти два свойства металлов, несмотря на кажущееся различие между ними, связаны друг с другом теснейшим образом, как это будет видно ниже. Кроме того металлам свойственен характерный, так называемый металлический блеск. При электролизе растворов солей каких-либо металлов в воде разложение соли под действием электрического тока, проходящего через раствор, всегда происходит таким образом, что металл выделяется на той пластине, к которой прикладывается отрицательный потенциал. Последнее свидетельствует о том, что атомы металлов, ионизируясь, т. е. превращаясь в ионы, всегда приобретают в этих условиях положительные заряды. Или, что то же самое, обладают способностью легко терять один или несколько принадлежащих им электронов. Целый ряд опытов показывает также, что прохождение электрического тока через металлы не вызывает перемещения в них атомов и молекул. Этот род проводников вследствие этого не претерпевает под действием протекающего электрического тока никаких химических изменений. Такие проводники называются проводниками первого рода в отличие от проводников второго рода, к которым принадлежат растворы солей в воде, кислоты, щелочи и т. п. Уже сейчас на основании этих фактов мы можем высказать соображение, что в металлах электрический ток обуславливается движением электронов, которых в них имеется очевидно большое количество, в то время как в проводниках второго рода носителями электричества служат ионы. Вот почему говорят, что металлы имеют электронную проводимость, а электролиты, т. е. вещества, разлагающиеся в результате прохождения электрического тока, — ионной проводимостью.

Посмотрим теперь, чем объясняются современной теорией строения вещества указанные выше свойства металлов.

Различные химические элементы имеют различным образом построенные атомы. Различие это выражается не только в разном количестве электронов, вращающихся вокруг поло-

жительно заряженного ядра, но и в распределении этих электронов в пространстве. В некоторых веществах атомы обладают одним или несколькими электронами, двигающимися по крайне вытянутым орбитам. Примером такого рода атомов может служить атом любого металла.

Легко сообразить, что такие атомы в состоянии будут при некоторых условиях с большой легкостью терять эти слабо связанные электроны. Если мы из подобного рода атомов построим кристаллическую решетку, то эти слабо связанные электроны сделаются общим достоянием всех атомов.

Они начнут двигаться в междоатомных промежутках с относительно большой свободой, двигаясь аналогично газовым молекулам. Это так называемые свободные электроны, собрание которых образует внутри кристаллической решетки электронный газ. Оказывается, все металлы наполнены такими свободными электронами, присутствие которых так резко выделяет эти вещества среди всех прочих тел природы.

Так, например, тот факт, что все металлы являются хорошими проводниками электричества, объясняется наличием в них свободных электронов, которые под действием электрических сил могут перемещаться внутри металла и этим своим перемещением создавать электрический ток.

Следовательно, процесс прохождения электрического тока по металлическим проводникам заключается в движении в них электронов. Чем легче электронам двигаться в междоатомных промежутках, тем меньше сопротивление проводника.

Если бы электроны металла сами по себе не совершали движения, а только получали бы его, при наличии электрических сил, то сопротивление металла было бы минимально. Но дело все в том, что в то время как электрические силы стремятся создать упорядоченное движение электронов, — их тепловое движение, беспорядочное по своей природе, стремится расстроить этот порядок. Этим объясняется тот факт,

что с повышением температуры сопротивление металлов растет.

Не случайно также то, что все металлы являются хорошими проводниками тепла. Легко заметить, что тепло плохо проводит обычно изоляторы, т. е. вещества, плохо проводящие электричество. Объясняется это тем, что в нагретой части куска металла свободные электроны приобретают большую энергию движения и благодаря своей подвижности переносят эту энергию в другие участки его. Так как в металлах имеется много свободных электронов, то вполне понятно, почему все металлы являются хорошими проводниками тепла.

Из всего сказанного выше можно вывести следующее заключение.

Явления электропроводности и теплопроводности, несмотря на свое различие, обязаны своим существованием наличию в металлах огромнейшего количества свободных электронов, скорость движения которых зависит от температуры металла.

Спрашивается: почему же металл, находясь в обычных условиях, не выбрасывает из себя в окружающее пространство электронов?

Почему электронный газ в металле ограничен поверхностью последнего и не разлетается в разные стороны?

Разберем кратко этот вопрос, так как ниже нам придется еще иметь дело с фактами, вытекающими из него. Для этого нам нужно рассмотреть свойства поверхности металла.

Представим себе, что один из свободных электронов благодаря большой скорости своей приблизился к поверхности металла и попытался выскочить во внешнее пространство. Сейчас же, по выходе его из металла, в последнем возникает индуктированный положительный заряд, ибо электрон несет отрицательный заряд. Индуктированный положительный заряд связан с куском металла.

В учении об электрических явлениях доказывается, что индуцированный на проводящей плоскости заряд будет в окружающем пространстве создавать такое электрическое поле, которое создал бы заряд той же величины, но сосредоточенный в одной точке на продолжении перпендикуляра, опущенного из индуцирующего заряда на эту плоскость. При этом расстояние этого индуцированного заряда от граничной плоскости равно расстоянию индуцирующего заряда от нее. Это показано на рис. 2.

Между этими обоими электрическими зарядами возникает взаимодействие и в том случае, когда вылетевший электрон не обладает достаточно большой энергией, эта сила взаимодействия способна вернуть его обратно в металл.

Отсюда видно, что только те электроны, которые вылетают с достаточно большой скоростью, в состоянии вырваться из металла и вовсе покинуть его. Ясно теперь для нас, что свободным электронам металла нужно вообще говоря сообщить дополнительную энергию для того, чтобы они могли оставить металл. Каким методом при этом мы воспользуемся — безразлично.

В качестве примера можно привести раскаленный металл, служащий мощным источником электронов и находящий себе применение в устройстве рентгеновских трубок, катодных ламп, кенотронов и т. п. В этом случае электроны начинают двигаться с все большей и большей кинетической энергией, что и связано по существу с нагреванием тела. В конце концов их энергия может оказаться достаточной для отрывания от поверхности металла.

Со всем этим мы еще, как было уже сказано, встретимся ниже при изучении так называемого фотоэлектрического эффекта.

Изоляторами или диэлектриками называются тела, очень плохо проводящие электрический ток. Примером такого рода тел могут служить: кварц, янтарь, алмаз, сера, различные смолы, масло, керосин и т. д. В электротехнике изоляторы находят себе огромное применение для целей защиты линий от всякого рода утечек электричества и других вредных явлений. По своим электрическим и некоторым другим свойствам изоляторы или диэлектрики занимают среди всех прочих тел природы место, противоположное проводникам. Естественно, что искать причину столь коренного различия этих двух родов тел надо в различии их внутреннего строения. В настоящее время нам очень хорошо известны эти причины, так как и строение изолятора и механизм совершающихся в нем процессов выяснен физикой в достаточной мере полно.

Тот факт, что изоляторы или диэлектрики обладают крайне дурной электропроводностью, свидетельствует об отсутствии внутри его свободных носителей электрических зарядов, т. е. ионов и электронов, могущих перемещаться под действием электрических сил внутри этих веществ.

Отсюда можно сделать тот вывод, что атомы вещества, обладающие свойствами изолятора, не отдают так легко свои электроны, как это имеет место в случае металлов. В силу этого междуатомное пространство в изоляторах не содержит электронного газа даже малой концентрации.

Опыт однако показывает, что, несмотря на это, каждый изолятор обладает некоторой электропроводностью. Правда, последняя имеет очень малую величину, но все же в ряде случаев ее необходимо знать и уметь учитывать при тех или иных явлениях. Мы не будем подробно останавливаться на этом вопросе, так как это не входит в нашу задачу. Но нам все же необходимо отметить те факторы, благодаря которым каждый изолятор отчасти проводит электрический ток. Уже

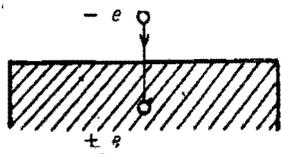


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая происхождение работы выхода электрона из металла.

наличие этого факта говорит о том, что совершенно незначительное количество носителей электричества в изоляторе имеется. Какова же их природа? Целый ряд опытов, специально для этой цели поставленных, приводит нас к тому заключению, что этими носителями являются ионы, т. е. механизм электропроводности изоляторов ионный.

При любой температуре возможно срывание ионов с их мест в тех случаях, когда они приобретают большие скорости своего раскачивания. При этом сорванные ионы начинают блуждать внутри кристаллической решетки, а в присутствии электрического поля двигаться в направлении действия электрических сил. Таков в общих чертах механизм прохождения электрического тока через изоляторы. Повышение температуры изолятора всегда приводит к увеличению электропроводности его. Это объясняется тем, что при более высоких температурах ионы, связанные друг с другом, начинают более интенсивно колебаться и вероятнее делается срыв их со своих мест. При очень низких температурах (температура жидкого воздуха) число сорванных ионов настолько ничтожно, что даже при самых чувствительных методах измерения проходящего через них тока обнаружить последний не представляется возможным.

При комнатной температуре возможно также сильно повысить электропроводность некоторых изоляторов. Для этого бывает достаточным направить на него пучок яркого света. При этом свет срывает с ионов и атомов изолятора электроны, которые и начинают принимать участие в электропроводности.

Это явление срывания электронов внутри твердого тела называется внутренним фотоэлектрическим эффектом. В этом случае изолятор частично приобретает электронную проводимость, но разумеется условия движения таких электронов внутри изолятора отличны от таковых в металлических телах.

Сообщенных здесь сведений достаточно для понимания дальнейшего материала. Теперь перейдем к изучению третьего класса твердых тел, являющегося для нас важнейшим.

5. Полупроводники.

В природе мы вообще говоря не встречаем резких подразделений твердых тел на классы в отношении их электрических свойств. Свойства эти непрерывно изменяются при переходе от одних тел к другим.

Так, например, различные тела обладают различной электропроводностью и эта величина непрерывно изменяется от крайне малых значений (изоляторы) до весьма больших (проводники). Отсюда следует, что должны существовать тела, занимающие в отношении своей электропроводности промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Строго разграничить эти три рода тел, как уже говорилось выше, невозможно и подобное деление отчасти искусственно.

Теперь мы рассмотрим вкратце электрическое свойство тел такого промежуточного класса. Эти тела называются полупроводниками.

Полупроводники за последние годы привлекают все большее и большее внимание физиков. Это обусловлено отчасти тем, что в этом случае мы сталкиваемся с новыми физическими явлениями, поняв которые, мы в состоянии будем разобраться в ряде процессов, совершающихся в изоляторах и проводниках и остающихся до сих пор неясными, отчасти также тем, что последние годы промышленность все больше и больше начинает интересоваться полупроводниками, используя их для целого ряда технических установок. Твердой, установившейся точки зрения на строение полупроводников пока еще нет, но мы уже значительно приблизились к этому.

Различные полупроводники обладают различным механизмом электропроводности. Некоторые из них имеют ион-

ную проводимость, некоторые же электронную. Встречаются также полупроводники, обладающие смешанной проводимостью. В последнем случае в процессе прохождения электрического тока принимают участие и ионы и электроны. Этот тип проводимости является наиболее сложным в силу своей запутанности.

Ионная проводимость характеризуется, как мы уже знаем, тем, что в теле под действием электрических сил происходит перемещение ионов обоих знаков. Достигая электродов, эти ионы отдают свои заряды последним и осуществляют тем самым электрический ток. Отдавая свои заряды, ионы превращаются в нейтральные частицы. На электродах таким образом происходит выделение продуктов распада молекул полупроводника. Отсюда следует, что при этом происходит химическое разложение вещества электрическим током. Это является вообще характерным для ионной проводимости.

Отличие подобного рода полупроводников от изоляторов заключается в том, что в первых ионам легче сорваться со своих мест под действием теплового движения, чем во вторых. Этим и объясняется их относительно большая электропроводность. С ростом температуры электропроводность таких полупроводников возрастает, что объясняется так же точно, как и в случае изоляторов. Возникновение химических реакций, вызванных электрическим током, очень сильно усложняет картину процессов, происходящих в этих телах, что делает неудобным широкое использование их в отдельных случаях.

В некоторых полупроводниках ионы настолько прочно сидят на своих местах, что вероятность их срыва крайне ничтожна, но имеются электроны, не слишком сильно связанные с ними, которые благодаря тепловому движению могут легко от них оторваться. В таких полупроводниках каждой температуре будет соответствовать вполне определенное количество свободных электронов, которое быстро будет возрастать с температурой, сильно увеличивая тем самым электро-

проводность. Полупроводники с описанным электронным механизмом проводимости представляют для нас особенно большой интерес. В следующих главах нам почти исключительно придется иметь дело с ними. Последние годы при помощи специальных опытов было доказано самым непосредственным образом, что действительно в этой группе полупроводников имеется электронный газ малой концентрации. Можно показать, что полупроводник такого рода, в зависимости от условий, может быть и изолятором и проводником. В самом деле, охлаждая его до очень низкой температуры, мы очень сильно уменьшаем число свободных электронов, уменьшив тем самым его проводимость. Проводимость, в определенной области температур, будет настолько мала, что наш полупроводник превратится в изолятор. С другой стороны сильное нагревание его, увеличивая число свободных электронов, превращает полупроводник в проводник. В этом случае полупроводник приобретает все основные свойства металла.

Благодаря возможности так сильно варьировать электрические свойства полупроводников, мы в состоянии, уменьшая или увеличивая их электропроводность, очень близко подойти к изучению как проблемы металлического состояния, так и к изучению сущности изолятора или диэлектрика. Вот почему этот класс полупроводников так сильно последние годы занимает физиков. В результате имеющихся научных исследований мы уже научились во многом правильно разбираться. Типичными представителями этих полупроводников являются красная закись меди (Cu_2O) и кристаллическая форма селена (Se), о которых нам придется больше всего говорить ниже. Наконец, в третьем типе полупроводников оба вида проводимости существуют одновременно. Электроны и ионы в таких телах участвуют в переносе электричества. Степень участия их при различных условиях бывает различной, и очень часто, изменяя эти условия, мы можем смешанную проводимость рассматривать, как почти исключительно ионную или электронную.

Необходимо указать также на то, что повидимому не только природа вещества, но и его строение определяет собой тип проводимости полупроводника. Так часто изменение кристаллической структуры какого-либо вещества изменяет уже и тип проводимости, превращая его из ионного в электронный или наоборот.

Некоторые полупроводники обладают резко выраженными фотоэлектрическими свойствами: при освещении их электропроводность может довольно значительно возрасти. Нужно теперь же отметить, что для современной техники внутренний фотоэлектрический эффект в полупроводниках весьма интересен и находит себе уже теперь большое применение.

Этим мы закончим изучение электрических свойств твердых тел трех основных групп их: проводников, изоляторов и полупроводников.

Краткий обзор, приведенный нами, дает возможность построить модель различных тел в отношении механизма прохождения через них электрического тока.

Ниже приведена таблица 1, содержащая значения удельного сопротивления некоторых полупроводников, по большей части тех или иных химических соединений. Будем помнить, что удельным сопротивлением вещества мы называем сопротивление сделанного из этого вещества кубика с ребром равным одному сантиметру. Эта таблица дает нам возможность составить себе представление о порядке величины сопротивления полупроводников вообще. То, что мы выше называли электропроводностью, есть величина обратная сопротивлению. Изоляторы обладают удельным сопротивлением порядка 10^{14} — 10^{15} $\Omega \cdot \text{см}$.

В таблице 1 нами приведены преимущественно полупроводники с электронной проводимостью. Почти все они обладают чувствительностью к свету, изменяя в большей или меньшей степени свою электропроводность при освещении. Этот выбор полупроводников не случаен, ибо некоторые из

Т а б л и ц а 1.

Удельные сопротивления полупроводников (ρ) при комнатной температуре.

| Название | Химический состав | Тип проводимости | Удельное сопротивление ρ в $\Omega \cdot \text{см}$ | Примечание |
|--|-------------------------|------------------|--|---|
| Под | I | Электронная | $2 \cdot 10^7$ | Исследован недостаточно полно. |
| Сернистое серебро (аргентит) | Ag_2S | Смешанная | 10^8 | С повышением температуры возрастает роль электронов. |
| Сернистый таллий | Tl_2S | Невыяснена | 10^7 — 10^{10} | В технике применяется с примесями окислов таллия. |
| Трехсернистая сурьма (антимонит) | Sb_2S_3 | Электронная | 10^8 | Удельное сопротивление ρ — неизвестно. |
| Сернистый висмут (висмутинит) | Bi_2S_3 | » | | |
| Сернистый молибден (молибденит) | MoS_2 | » | 10^6 | Обычно содержит примеси. Совершенно чистая CuI изолятор. |
| Податая медь | CuI | » | $2,7 \cdot 10^6$ | |
| Селен (кrist. форма) | Se | » | $5 \cdot 10^5$ | Имеет большое практическое значение. Удельное сопротивление ρ сильно зависит от малейших примесей окиси меди (CuO). Начинает входить в технику. |
| Закись меди | Cu_2O | » | 10^3 — 10^6 | |

них с каждым годом приобретают все большее и большее промышленное значение, как это будет видно дальше. Мы видим из таблицы, что удельное сопротивление полупроводников изменяется в широких пределах (от 10^2 $\Omega \cdot \text{см}$ до 10^{10} $\Omega \cdot \text{см}$).

6. Проблема выпрямления электрического тока.

В современной электротехнике с каждым годом все более и более ведущую роль начинает играть постоянный ток. Это обусловлено тем, что для разрешения важнейших задач техники переменный ток оказывается не только невыгоден, но во многих случаях даже непригоден. Этим-то и объясняется все возрастающий интерес к постоянным токам, который можно наблюдать и за границей и у нас. Можно было бы указать очень много таких областей, для которых необходимо использование постоянного электрического тока. Для примера можно указать мощно развивающуюся радиотехнику, для ряда задач которой постоянный ток является принципиально необходимым.

В связи с этим, в электротехнике огромную роль играют такие устройства, при помощи которых возможно преобразование переменного тока в постоянный. Такие устройства называются выпрямителями.

Выпрямители бывают самых разнообразных типов и в различных случаях предпочтительно пользоваться тем или иным видом его. Так, например, различают механические выпрямители, кенотроны, газотроны, электролитические выпрямители, ртутные выпрямители и, наконец, твердые выпрямители, наиболее интересные для нас в данном случае. Каждый из этих типов выпрямителей должен решить задачу превращения пропускаемого через него переменного тока в постоянный. Это будет совершаться, очевидно, лишь в том случае, если наша выпрямительная система в двух противоположных направлениях будет пропускать ток различной силы или, что то же самое, если сопротивление ее в одном и другом направлениях будет различно. В таких случаях говорят также, что система обладает *униполярной проводимостью*, т. е. в одном направлении имеет малую проводимость, а в другом — большую. При прохождении переменного тока через такую систему мы должны наблюдать зна-

чительное уменьшение тока в одном направлении и сравнительно малое изменение его силы в противоположном. Если первоначально в отсутствии выпрямителя в электрической цепи сила тока в ней изменялась со временем так, как это графически представлено на рис. 3,

где на горизонтальной прямой откладывается время, а на вертикальной — сила тока, то при наличии в цепи выпрямителя характер изменения тока со временем резко изменится. В этом случае графически изобразить зависимость тока от времени можно при помощи кривой рис. 4. Мы

видим, что сила тока в одном направлении сильно уменьшается. Это уменьшение будет, очевидно, происходить в том

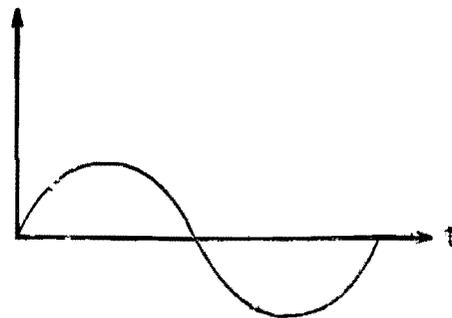


Рис. 3. График изменения силы тока со временем в цепи переменного тока при отсутствии выпрямляющей системы за один период.

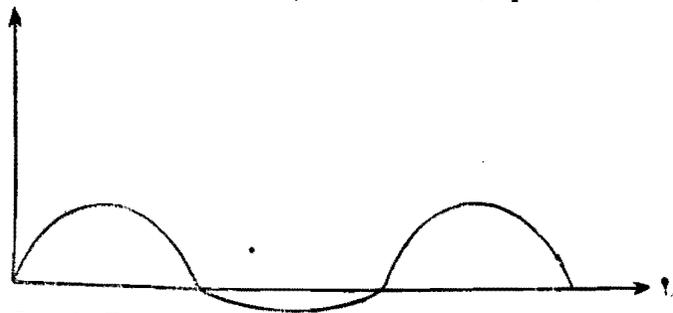


Рис. 4. График изменения силы тока со временем в цепи переменного тока со включенным в нее выпрямителем.

направлении, в котором выпрямитель запирает ток, т. е. обладает большим сопротивлением. Чем меньшее значение имеют эти «обратные токи», тем лучше работает выпрямитель, тем совершеннее его конструкция. Обычно отношение

силы тока, текущего в пропускающем направлении, к силе тока в запирающем направлении называется коэффициентом выпрямления системы. Если мы первую обозначим через I_a а вторую через I_b то коэффициент выпрямления K математически определится на основании вышесказанного следующим образом:

$$K = \frac{I_a}{I_b}.$$

Эта величина, являющаяся весьма важной характеристикой каждого выпрямителя, может зависеть от различных факторов.

В частности она может зависеть от разности потенциалов на зажимах выпрямителя.

Зависимость силы тока, протекающего через выпрямитель, от приложенного к нему напряжения называется «вольтамперной характеристикой». Последняя также важна для полного знания свойств выпрямителя, она в различных случаях может иметь различный вид. График этот строится таким образом, что на горизонтальной оси откладываются напряжения, а на вертикальной — силы тока, им соответствующие.

Твердые выпрямители, о которых будет идти речь ниже, вошли в технику довольно давно. Это так называемые детекторы, применение и роль которых в радиотехнике общеизвестны. Но в том виде, в каком они применялись в радиотехнике, они отличались целым рядом неудобств и несовершенств, вследствие чего вскоре после открытия катодных ламп они почти целиком были вытеснены последними. С 1927 г. выпрямители подобного рода вступили в новую фазу своего развития и этот тип твердых выпрямителей сразу же занял прочное положение в электротехнике. Совершенствование их с каждым годом и все лучшее и лучшее понимание процессов, в них совершающихся, внушают уверенность в том, что в весьма недалеком будущем роль их в технике значительно возрастет. Преимущества и недостатки твердых выпрямителей сделаются нам ясными ниже.

7. Генерация электрического тока.

Аппараты, при помощи которых возможно создание электрического тока, называются генераторами. Генераторы электрического тока бывают самых разнообразных типов, принцип действия которых часто резко отличается друг от друга. Но каждый из них должен решать следующую основную задачу. Он должен превращать какой-то вид энергии в электрическую энергию. Так, например, в динамо-машинах мы имеем дело с превращением механической энергии в электрическую, в аккумуляторах и гальванических элементах — химической в электрическую. Имеются также устройства, называемые термоэлектрическими батареями, в которых происходит превращение непосредственным образом тепловой энергии в электрическую. Правда, этот тип генераторов электрического тока не находит еще себе большого технического применения из-за своей неэкономичности. Ведь нужно иметь в виду, что необходимо не только иметь возможность превращать какой-либо вид энергии в электрическую, но и осуществлять это наиболее выгодным образом. Обычно мерилом этого служит коэффициент полезного действия генератора, который представляет собой отношение получаемой энергии к затраченной. Больше того, что мы вкладываем в наш аппарат, получить невозможно. Это вытекает из закона сохранения энергии. Поэтому максимальный коэффициент полезного действия может быть равен только единице, но обычно, в реальных условиях, он бывает меньше единицы. Если мы обозначим количество затраченной энергии через W , а добытой за ее счет через A , то коэффициент полезного действия определится следующей формулой:

$$\eta = \frac{A}{W}.$$

Эта величина и служит мерилом выгодности того или иного механизма для целей технической эксплуатации.

Существуют также аппараты, в которых происходит превращение световой энергии в электрическую. Они называются фотоэлементами. Фотоэлементы имеют различное устройство. До сих пор ими пользовались лишь в качестве так называемого «электрического глаза», для целей автоматизации и сигнализации. В качестве источников электрической энергии они не находили еще себе применения в технике. Это обуславливалось главным образом малостью их коэффициента полезного действия η , который достигает в большинстве случаев лишь долей процента. Принцип действия всех фотоэлементов основывается на явлении, о котором вскользь было упомянуто выше. Это явление заключается в том, что свет, падающий на какое-либо тело, при определенных условиях способен вырывать из него электроны. Мы не можем здесь подробно останавливаться на описании всех существующих типов фотоэлементов и применений их в различных областях техники. Для нас важно было только упомянуть об этом типе генераторов электрического тока и указать на основные области их применений.

В 1930 г. было сделано открытие большой важности, привлекавшее к себе внимание всех физиков. Оказалось, что система, состоящая из некоторых полупроводников, заключенных между двумя металлическими электродами, при ее освещении может служить самостоятельным источником электрического тока, в котором происходит самое непосредственное превращение световой энергии в электрическую. Коэффициент полезного действия этих новых «твердых фотоэлементов» был относительно мал, но простота устройства и возможность значительного повышения η уже тогда сулила этим новым фотоэлементам большое будущее. За последние два года у нас и за границей довольно много сделано для понимания природы тех физических процессов, которые в них происходят. В некоторых случаях удавалось даже достигать коэффициентов полезного действия около 2%. Это немного, вообще говоря, но уже этот факт говорит о том, что

в будущем можно достигнуть значительно лучших результатов. При условии достижения больших значений возможно будет разрешить задачу превращения энергии солнечных лучей в энергию электрического тока. Эта проблема для Советского Союза, обладающего огромными территориями, заливаемыми солнечными лучами в течение круглого года, представляется особенно заманчивой. Но для окончательного разрешения этой грандиозной задачи, как и во всех аналогичных случаях, нужно прежде всего понять сущность тех физических процессов, которые являются причиной наблюдаемого превращения света в электричество. Только после полного выяснения их возможно будет направить эти процессы таким образом, чтобы максимально использовать энергию падающего света, получив тем самым наибольший выигрыш. Здесь техника вплотную сталкивается с физикой и только их теснейшее взаимное переплетение даст возможность человечеству до конца разрешить поставленную задачу.

В последующем мы и займемся детальным изучением свойств тех полупроводников, при помощи которых возможно выпрямление электрического тока и также его генерация. Параллельно мы будем по возможности подробно освещать те области, в которых они уже нашли свое применение.

II. ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.

1. Типы твердых выпрямителей и механизм их действия.

В настоящем разделе мы подробно рассмотрим изготовление и свойства твердых выпрямителей, о которых выше уже многократно упоминалось.

Твердые выпрямители можно разбить на две группы. К первой относятся системы, состоящие из полупроводников, обладающих ионным механизмом проводимости, ко второй — электронным. Свойства и природа процессов, совершающихся в выпрямителях этих двух типов, различны, в силу чего и необходимо так резко разграничить их.

а) Твердые выпрямители с ионной проводимостью. Эти выпрямители обладают тем же самым механизмом электропроводности, что и жидкие электролиты. При прохождении электрического тока через полупроводники, из которых они состоят, происходит движение ионов, в силу чего наблюдаются явления аналогичные электролизу. Общее устройство их следующее. Полупроводник соответствующего рода в виде таблетки зажимается между двумя большими металлическими электродами. Этот полупроводник может состоять либо из сплавленной массы, либо из спрессованного порошка. В различных случаях употребляют оба способа изготовления таблеток. Ниже мы подробнее перечислим все типы употребляющихся выпрямителей этой группы. Еще в 1904 г. впервые были сконструированы выпрямители из сернистой меди (Cu_2S). Слой сернистой меди зажимался между двумя металлическими электродами. Один из них представлял собою алюминиевую пластинку, другой — мед-

ную. Позже, сплавленную сернистую медь заменили спрессованным порошком ее же. При этом продолжали употреблять те же самые электроды. Наконец, та же система осуществлялась еще иначе следующим образом. Две пластинки: алюминиевая и медная, сложенные близко друг с другом, опускались в раствор многосернистого аммония. Последний способ давал наилучшие технические результаты. Именно, такие выпрямители имели весьма малое внутреннее сопротивление, благодаря чему допустимая плотность тока могла быть довольно значительной. В этом случае она могла составлять один ампер на квадратный сантиметр площади электрода. Схематическое изображение устройства такого выпрямителя показано на рис. 5.

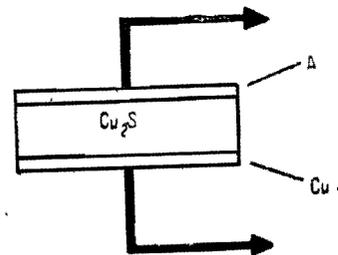


Рис. 5. Схематическое устройство твердого выпрямителя из сернистой меди.

Смесь сернистых и селеновых соединений. Выпрямители этого рода, предложенные Рубеном, имеют следующее устройство.

Латунная пластинка с содержанием меди (Cu) в 85% и цинка (Zn) в 15% амальгамируется, а затем при отсутствии кислорода при температуре около $800^{\circ}C$ подвергается действию паров серы и селена (Se), смешанных в отношении 1:4. Затем поверхность полученного соединения отполировывается и под большим давлением припрессовывается к куску магния (Mg). Одним электродом таким образом служит магниевая пластинка, другим же — непрореагировавшая часть латунной пластинки. Полученная этим путем выпрямительная система по литературным данным обладает большой устойчивостью и допускает те же самые нагрузки, что и выпрямители из сернистой меди (Cu_2S).

PbO_2 . В этом случае порошкообразная окись свинца

(PbO_2) спрессовывается под большим давлением (40—50 кг/см²) в таблетки и полученные этим путем пластинки зажимаются между электродами из окисленного цинка (Zn) и свинца (Pb). Для того, чтобы система обладала хорошими выпрямительными действиями, необходимо через нее пропускать предварительно в течение некоторого времени постоянный электрический ток. При этом происходит так называемая формовка. Эти выпрямители особенно детально изучал Д ю б а р.

Ag_2S , CuS , CuJ . Соответствующие соли (сернистое серебро, сернистая медь, иодистая медь) спрессовываются под давлением в таблетки и зажимаются между теми же самыми электродами, что и Cu_2S . Поведение их аналогично выпрямителям, изготовленным из последней. Тщательно исследовались эти выпрямители К о б е к о, К у р ч а т о в ы м и и С и н е л ь н и к о в ы м.

Приведенные выше рецепты изготовления выпрямителей из полупроводников с ионной проводимостью приводят обычно к образованию системы, направления выпрямления которой определяются металлом, на поверхности которого нанесен слой окисла (алюминий, магний, цинк).

При соединении этого электрода с отрицательным полюсом источника напряжения через систему проходит больший ток, чем в противоположном направлении. Но все эти выпрямители пригодны лишь при небольших частотах электрического тока (не свыше 500 пер/сек). В некоторых случаях коэффициент выпрямления при употреблении постоянного тока достигает 1000. При 50-периодном токе он же имеет значение 20—30.

Теперь поговорим немного о механизме процессов, совершающихся в указанных выше полупроводниках, приводящих к возникновению выпрямительного действия.

Мы уже видели в предыдущем, что при прохождении через упомянутые полупроводники электрического тока, благодаря движению ионов, на электродах выделяются про-

дукты электролиза. Тщательные исследования показали, что в случае твердого электролита металл на отрицательно заряженном электроде (катоде) выделяется в виде нитевидных образований (дендритов), которые очень быстро после включения напряжения прорастают через весь образец. На положительно заряженном электроде (аноде) образуется обычно скверно проводящий слой. Последний процесс носит название формовки. Эффект выпрямления можно объяснить благодаря возникновению столь резкой асимметрии электродов. Легко сообразить, что при подаче отрицательного напряжения на металл, покрытый окислами, разрушенными только в отдельных точках, в которых и имеется настоящий контакт, на этом электроде начнется усиленный рост дендритов. Это объясняется наличием в отдельных контактных точках большой плотности тока, которая необходима для быстрого роста дендритов. Эти дендриты замыкают два электрода, благодаря чему сопротивление образца в данном направлении резко падает. При положительном потенциале на окисленном металле дендриты могут уже образовываться лишь на противоположном электроде, ибо металл при электролизе всегда выделяется на отрицательном полюсе. Но этот противоположный электрод имеет большую поверхность контакта с полупроводником, благодаря чему плотность тока незначительна и рост дендритов происходит медленно.

Вот почему в этом направлении образец обладает большим сопротивлением. Таким образом делается ясным, почему подобные системы имеют униполярную проводимость. Происхождение последней объясняется образованием дендритов, скорость роста которых в двух прямо противоположных направлениях различна. Эта «дендритная» точка зрения была очень хорошо подтверждена целым рядом опытов и таким образом может считаться достаточно обоснованной. Нужно отметить в этом месте, что, вообще говоря, дендриты, быстро появляясь, могут не менее быстро исчезать, сгорая при протекании через них тока. Этим объясняется тот факт, что

электролитические твердые выпрямители в большинстве случаев не отличаются большой устойчивостью и часто могут изменять режим своей работы. Поэтому этот тип выпрямителей не нашел себе распространения в технике, и нужно думать, что вряд ли и найдет в будущем.

Гораздо интереснее выпрямители другого типа, сделанные из полупроводников с электронной проводимостью, открытые в 1927 г. работами Грондаля и Гейгера и работающие по иному принципу. К рассмотрению их мы сейчас и перейдем.

б) Твердые выпрямители с электронной проводимостью. Впервые, как уже указывалось выше, в 1927 г. Грондаль и Гейгер предложили выпрямитель, состоящий из закиси меди (Cu_2O), содержащей некоторую примесь черной окиси меди (CuO), образованную на медной пластинке при высокой температуре (около 1000°C). Таким образом одним электродом служила медь, не превращенная до конца в окислы. Другим электродом в этих первых опытах служила свинцовая пластинка, плотно прижимающаяся болтами к поверхности закиси меди. На рис. 22 показано схематическое устройство такого выпрямителя. Эти выпрямители получили название, удерживающееся и до настоящего времени, — купроксных выпрямителей. В то время литературных данных, касающихся технологии производства купроксных выпрямителей, почти не было. Большинству исследователей приходилось по большей части продвигаться в темноте, основываясь лишь на собственных эмпирических данных. Но уже из этих первых работ было ясно видно, что этот тип выпрямителей найдет себе большое применение в технике. Он отличался рядом преимуществ по сравнению с твердыми выпрямителями электролитического типа.

Эти преимущества следующие: 1) простота изготовления и дешевизна его, 2) устойчивость в работе, 3) высокий коэффициент выпрямления и 4) большие допустимые нагрузки.

Подробное описание их изготовления будет дано ниже. Здесь же мы должны познакомиться с их общей структурой и с механизмом их действия. При этом мы будем основываться на новейших данных, полученных благодаря целому ряду исследований, произведенных как у нас, так и за границей.

Новейшими исследованиями выяснено, что в процессе образования при высокой температуре тонкого слоя красной закиси меди на медной пластинке, на границе раздела полупроводника с электронной проводимостью, каковым является закись меди (Cu_2O), возникает тонкая прослойка третьего вещества, отличающегося меньшей электропроводностью, чем основной слой закиси меди.

Природа этого переходного или «запорного» слоя не вполне выяснена еще и до настоящего времени. Нам известен лишь порядок толщины этого переходного слоя. Большинство исследователей склоняется к той мысли, что он составляет приблизительно $10^{-5} - 10^{-6}$ см, т. е. является очень малой величиной. Закись меди получается всегда смешанной с определенным при данных условиях количеством черной окиси меди, что делает ее более электропроводной, чем чистая красная закись меди. Эти примеси повышают электропроводность всего образца, что является более выгодным в условиях его эксплуатации. Позже мы увидим, при каких условиях получают наилучшие результаты. Существенным же для нас сейчас является то обстоятельство, что в процессе возникновения слоя закиси меди, смешанной с окисью меди, на границе этой смеси и металла по неизвестным пока нам причинам появляется повидимому тонкая прослойка закиси меди, очень бедной примесями окиси меди. Таким образом здесь появляется тончайшая плохопроводящая прослойка. Плохопроводящей она будет в силу того, что чистая закись меди, мало содержащая примеси окиси меди, весьма скверно проводит. Эта прослойка и является тем переходным или запорным слоем, о котором было выше упомянуто. Роль этого переходного слоя в процессе прохожде-

ния электрического тока через образец — огромна. В его существовании кроются все основные свойства подобных систем. Возможны и другие толкования происхождения этого переходного слоя. Прежде думали, что он представляет собой обыкновенный зазор, дурной контакт, толщиной порядка $10^{-7} - 10^{-8}$ см, образовавшийся там благодаря ничтожнейшему отставанию в некоторых местах кристалликов закиси меди от кристалликов металлической меди. Но эта точка зрения, благодаря наличию некоторых опытов, большинством исследователей, работающих в этой области, ныне отвергается. Можно было бы высказать еще одну гипотезу о природе этого переходного слоя. Возможно, что в процессе окисления меди на границе раздела металла и закиси меди появляется тонкая прослойка недоокисей меди, образовавшихся там в виду скверного доступа туда кислорода воздуха. Такие случаи вообще говоря возможны. Трудно окончательно утверждать, какое из предложенных здесь объяснений правильно. Мы не имеем еще достаточного количества экспериментального материала, но уже имеющиеся факты заставляют нас склониться к правильности первого предположения. Итак, можно сказать лишь одно с полной уверенностью: на границе медь — закись меди имеется тонкий плохопроводящий переходный слой.

Представим себе теперь, что на верхний слой закиси меди мы нанесли каким-либо образом слой другого металла. В опытах Грондаля и Гейгера это был свинец, плотно прижатый ко всему образцу. В этом случае мы имеем систему: медь — переходный слой — закись меди — свинец. Однако, огромное количество опытов показало, что природа верхнего электрода совершенно безразлична. В качестве его может быть взят любой металл. Необходимо лишь, чтобы этот металл имел хороший контакт с закисью меди или, что то же самое, чтобы на их границе не возник переходный слой с большим сопротивлением. Полученная при этом система

будет обладать схематическим строением, представленным на рис. 6.

Если теперь пропускать ток через эту систему в двух противоположных направлениях, то окажется, что при этом проявляется униполярная проводимость. В том случае, когда нижняя основная медь соединена с отрицательным полюсом источника напряжения, в цепи протекает ток в сотни раз больший, чем при соединении ее с положительным полюсом. Система при этом следовательно действует как выпрямитель.

Теоретическое рассмотрение этой системы и процесса прохождения через нее электрического тока приводит нас к тому заключению, что присутствие переходного слоя должно обязательно привести к этому результату. Вытекает это из того, что мы имеем соприкосновение через тонкую прослойку металла и полупроводника. В первом из них имеется огромное количество свободных электронов, во втором — небольшое.

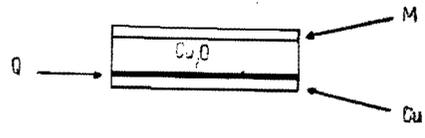


Рис. 6. Схематический разрез медно-закисного выпрямителя.
 М — верхний металлический электрод,
 Q — запорный слой.

Физика утверждает, что электронный газ большой и малой концентрации подчиняется различным статистическим закономерностям. При соприкосновении их через большое сопротивление, настолько тонкое, что через него могут проскакивать электроны лишь в том случае когда им сообщена дополнительная энергия, может произойти следующее явление. Представим себе, что на основную медь подан отрицательный потенциал, а на другой электрод — положительный. При этом на переходном слое будет существовать некоторое падение потенциала, стремящиеся электроны меди, несущие отрицательные заряды, перебраться из меди через переходный слой в закись меди. В цепи при этом нач-

нет циркулировать некоторый ток, сила которого будет определяться числом электронов, прошедших через переходный слой. Если теперь переменить знаки потенциала на образце, то картина изменится. В полупроводнике, благодаря малости свободных электронов, мы имеем другие скорости движения, другие закономерности их распределения, чем в металлах. Поэтому внешнее электрическое поле, установившееся на границе их соприкосновения в переходном слое, в состоянии будет перегнуть из полупроводника в металл меньшее количество электронов, чем наоборот. В силу этого и возникает эффект выпрямления электрического тока. Свойство переходного слоя, как очевидно, вытекает из этой точки зрения, определяет собою и свойства подобного рода выпрямителя. Любопытно также отметить, что эта теория, общепринятая в настоящее время, считает, что состав веществ при этом безразличен. Важно иметь только систему, состоящую из металла — переходного слоя — полупроводника с электронной проводимостью — металла. Каковы металлы, переходный слой, полупроводник — это не имеет значения. Таким образом можно строить такие выпрямители, с теоретической точки зрения, из самых разнообразных веществ. Необходимо только, чтобы удовлетворялась эта теоретическая схема. Меднозакисные выпрямители являются таким образом лишь частным случаем этой общей схемы. В них сам собой, в процессе окисления, возникает переходный слой, удовлетворяющий поставленным условиям, в силу чего мы впервые столкнулись с этим эффектом на них же. В том случае, когда переходный слой в силу создавшихся условий образовался у верхнего электрода, наша система изменяет знак своего выпрямления, как это вытекает из предыдущей схемы.

На рис. 7 показана эта общая теоретическая схема твердого выпрямителя с электронной проводимостью. Необходимо указать, что до сих пор мы имеем небольшое количество экспериментального материала, который бы подтверждал эту общую схему на большом числе полупроводников,

но меднозакисные выпрямители, их свойства и поведение, до сих пор еще не опровергли ее.

Блестящим доказательством справедливости всего вышесказанного являются селеновые выпрямители, известные уже довольно давно, но технически оформившиеся в сравнительно недавнее время. Оказалось возможным при определенных условиях осуществить систему: металл—селен — металл, которая обладает прекрасными выпрямительными свойствами. Эта система, как показали опыты, в электрическом отношении ведет себя аналогично меднозакисным выпрямителям. Можно с уверенностью сказать, что и в данном случае на границе металл — селен, с одной стороны, мы имеем переходный слой с теми же характеристиками, что и в меднозакисных выпрямительных системах. Свойства их будут изучены в дальнейшем. Селеновые выпрямители, изготовляемые рядом заграничных фирм, играют в технике также немаловажную роль.



Рис. 7. Общая теоретическая схема твердого выпрямителя с электронной проводимостью.

I — верхний металлический электрод. II — полупроводник, III — запирающий слой. IV — металлическая подложка.

Итак до настоящего времени наша теоретическая схема подтверждается в двух случаях: закиси меди и селена.

Как будет видно дальше, селеновые выпрямители можно изготовлять только из кристаллического металлического селена, который обладает электронной проводимостью, что находится в согласии со всем сказанным выше.

В литературе можно найти белые указания относительно выпрямительных свойств других полупроводниковых систем, но подробного описания их изготовления и физических свойств не приводится.

По всей вероятности, приведенное объяснение близко соответствует действительности, с теоретической точки зрения

это даже обязательно должно быть так, но повидимому воссоздать такие условия, при которых образовывается наиболее выгодный переходный слой на границе такого полупроводника с одним из электродов, крайне трудно, чем и объясняется редкость появления подобного рода явлений.

Все же, уже самый факт наличия определенной теоретической схемы является крайне отрядным, в виду сложности всех этих процессов. Здесь теоретическая схема является в руках экспериментатора путеводной нитью, помогающей ему выбраться из лабиринта отдельных эмпирических закономерностей и идти вперед к установлению все новых и новых фактов. Нет никакого сомнения в том, что в этой области в ближайшем будущем будут сделаны большие успехи, как в смысле более глубокого понимания протекающих процессов, так и в смысле все более широкого технического использования этого типа выпрямителей. К сожалению огромное количество экспериментального материала составляет секрет различных иностранных фирм. Учитывая это обстоятельство, нам приходится проделывать много излишней работы, связанной с технологией изготовления выпрямителей. Широкие рабочие изобретательские массы смогли бы оказать большую услугу науке и технике, если бы, заинтересовавшись этой областью, начали бы серьезно заниматься входящими в нее вопросами. Сейчас мы перейдем к описанию техники изготовления купроксных и селеновых выпрямителей. Мы увидим, что она не столь сложна, чтобы могла служить препятствием для своего продвижения в широкие массы рабочих изобретателей.

На этом мы закончим общее ознакомление с твердыми выпрямителями и перейдем к рассмотрению дальнейшего материала.

2. Изготовление купроксных выпрямителей.

Перейдем теперь к описанию способа изготовления купроксных выпрямителей. Исходным материалом для изгото-

вления служит красная электролитическая медь (медь, полученная на катоде путем электролиза).

Закись меди (Cu_2O) получается из меди путем температурной обработки. При этом образуется еще в большом количестве и окись меди (CuO), но при достижении температуры свыше 800° окиси меди (CuO) практически не существует. Что касается исходного материала, т. е. самой электролитической меди, то она должна быть свободна от всяких

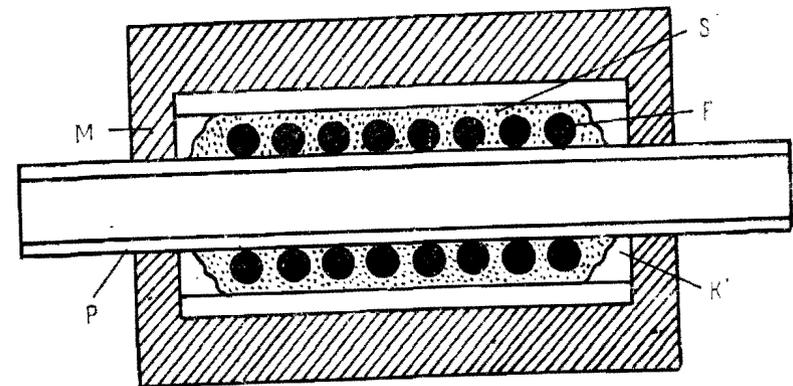


Рис. 8. Схематический разрез печи для получения высоких температур. P — фарфоровый цилиндр, F — платиновая или нихромовая проволока, S — окись магния (магнезия), K — шамотовый цилиндр, M — инфузорная земля или асбест.

примесей, так как качество закисы меди сильно зависит от чистоты исходного продукта.

Для получения высоких температур служат электрические печи. Устройство такой печи понятно из рис. 8.

На фарфоровую или кварцевую трубу P наматывается платиновая проволока F (последняя может быть заменена нихромовой проволокой или лентой, но они сравнительно быстро перегорают со временем). Затем следует слой окиси магния S, далее шамотовый цилиндр K, который в свою очередь покрывается толстым слоем асбеста или засыпается ин-

фузорной землей M , чтобы свести до минимума теплоотдачу.

Наиболее подходящая температура для получения хорошей закиси меди лежит между $1050—1070\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для того чтобы обрабатывать исходный материал при одной и той же температуре, в печь вводится термонара, соединяемая с милливольтметром, показания которого позволяют с большой точностью определять температуру в печи.

Как уже говорилось выше, купроксный выпрямитель может состоять из одной или нескольких пластинок.

Пластинка электролитической меди, желаемой толщины и формы, подвешивается в середине печи, где температура наиболее постоянна. Там пластинка выдерживается в течение нескольких минут. Закись меди образуется на поверхности основной электролитической меди. Толщина слоя закиси меди зависит от времени пребывания пластинки в печи: чем дольше пластинка подвергается температурной обработке, тем толще слой закиси меди успевает образоваться на ней.

Весьма существенным является процесс охлаждения пластинки изготовленного таким образом купроксного выпрямителя.

Желательно, чтобы этот процесс произошел достаточно быстро, для того чтобы на поверхности закиси меди не успело образоваться большое количество черной окиси (CuO).

Охлаждение пластинки может быть осуществлено двумя способами; в первом случае пластинке дают возможность упасть в какую-нибудь жидкость, например в воду, во втором случае пластинку охлаждают в парах кипящей воды. Последний способ по видимому дает наилучшие результаты.

Теперь скажем несколько слов о свойствах закиси меди.

Закись меди Cu_2O принадлежит к полупроводникам, обладающим электронной проводимостью, т. е. механизм их электропроводности обусловлен движением свободных электронов. Точка плавления закиси меди 1230°C .

Закись меди имеет кристаллическое строение. Пласти-

на чистой закиси меди имеет темнокрасный цвет; поверхность ее блестящая.

Пластинка закиси меди прозрачна для красной лучей. Сопротивление одного кубического сантиметра закиси меди, или как говорят, удельное сопротивление, колеблется от 10^2 до $10^{10}\ \Omega\cdot\text{см}$.

Как показали исследования, удельное сопротивление закиси меди зависит главным образом от примеси кислорода: ее можно рассматривать как губку, впитывающую в себя кислород. Если удельное сопротивление закиси меди измерить в вакууме, предварительно прокалив ее там при весьма высокой температуре (около 1000°C), то получаемое значение для удельного сопротивления возрастает до $10^{10}\ \Omega\cdot\text{см}$.

Многочисленные опыты показали, что чем больше процентное содержание кислорода в закиси меди, тем меньше ее удельное сопротивление. Таблица 2 численно иллюстрирует изменение удельного сопротивления в зависимости от процентного содержания кислорода.

Зависимость сопротивления закиси меди от температуры очень велика. Сопротивление закиси меди с повышением температуры сильно падает. Если же температура понижается, то сопротивление закиси меди возрастает; так при температуре жидкого воздуха закись становится почти изолятором. В таблице 3а приведены значения для изменения сопротивления закиси меди с изменением температуры.

В таблице 3б приведены данные для образца закиси меди, иллюстрирующие изменение его сопротивления в области низких температур.

Необходимо еще указать на весьма интересный и существенный факт, а именно закалку образцов закиси меди.

Получение пластинок чистой закиси меди производится таким же образом, как и получение купроксных выпрямителей, с той только разницей, что в закись превращается вся медная пластинка целиком; достигается это более длительной обработкой в печи при постоянной температуре.

При производстве закали пластинки закиси меди, пластинку, прежде чем охлаждать ее в парах кипящей воды, подвергают еще длительной температурной обработке в той же

Т а б л и ц а 2.

Изменение удельного сопротивления закиси меди в зависимости от процентного содержания в ней кислорода и окиси меди (по данным В. Жузе и Б. Курчатова).

| Способ изготовления образца | Содержание O ₂ в весовых % | Содержание O ₂ в атомных % | То же для окиси меди в весовых % | Удельное сопротивление в омах |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Прогретый в вакууме | Неопределенно | Неопределенно | Неопределенно | 3,7 · 10 ⁹ |
| Исходный материал | 0,053 | 0,0047 | 0,53 | 6 · 10 ⁸ |
| Образец, прогретый в вакууме и насосавший кислород после трехмесячного хранения | 0,043 | 0,0038 | 0,43 | 1,8 · 10 ⁸ |
| Выдержанный час при 1000° С и закаленный в воде | 0,060 | 0,0033 | 0,60 | 6,5 · 10 ⁸ |
| Выдержанный при 700° С 6 часов и закаленный в воде | 0,084 | 0,0075 | 0,84 | 2,5 · 10 ⁸ |
| Выдержанный при 600° С 6 часов и закаленный в воде | 0,090 | 0,0080 | 0,90 | 2,8 · 10 ⁸ |
| Выдержанный при 500° С в течение 6 часов и закаленный в воде | 0,101 | 0,0089 | 1,01 | 4,8 · 10 ⁸ |

печи, но при более низкой температуре. Таким образом удается получать из одного и того же исходного продукта образцы с различным сопротивлением.

Т а б л и ц а 3а.

Изменение удельного сопротивления чистой закиси меди в зависимости от температуры для одного и того же образца.

| Температура в ° С | Удельное сопротивление в омах | Температура в ° С | Удельное сопротивление в омах |
|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| 0 | 5,9 · 10 ⁸ | 259 | 1,4 · 10 ⁴ |
| 20 | 5,4 · 10 ⁸ | 341 | 4 · 10 ³ |
| 50 | 2,6 · 10 ⁸ | 441 | 5 · 10 ² |
| 115 | 7 · 10 ⁴ | 390 | 75 |

Т а б л и ц а 3б.

Изменение сопротивления чистой закиси меди в зависимости от температуры для одного и того же образца. (По данным Д. Наследова и Л. Неменова.)

| Температура в ° С | Сопротивление в омах | Температура в ° С | Сопротивление в омах |
|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| — 4 | 930 | — 134 | 1,5 · 10 ⁶ |
| — 12 | 1,1 · 10 ³ | — 143 | 1,3 · 10 ⁷ |
| — 84 | 1,16 · 10 ⁴ | — 168 | 3 · 10 ⁹ |
| — 109 | 1,2 · 10 ⁵ | — 183 | 3,610 ¹⁰ |

Т а б л и ц а 4.

Изменения удельного сопротивления закиси меди в зависимости от закали (по данным Вайбеля).

| Способ обработки | Температура в ° С | Удельное сопротивление в омах |
|--|-------------------|-------------------------------|
| I. а) Пластика закиси меди, обработанная обычным способом | 1050 | 1,7 · 10 ⁴ |
| б) Та же пластика, закаленная в воздушной атмосфере в течение 6 часов и охлажденная в воде | 320 | 68 |
| II. а) Пластика закиси меди, обработанная обычным способом | 1050 | 1,7 · 10 ⁴ |
| б) Постепенно охлажденная в течение 20 часов до 20° С. | 1050 | 388 |
| с) Затем эта же пластика, закаленная в течение 4-х часов и охлажденная в воде. | 540 | 100 |

Величина сопротивления всецело зависит от температурной обработки образца.

В таблице 4 даны значения удельного сопротивления для двух образцов в зависимости от условий, в которых производилась закалка.

Эта зависимость может быть также изображена графически, как это и сделано на рис. 9. По оси ординат откладывается сопротивление в произвольных единицах, а по оси абсцисс — температура.

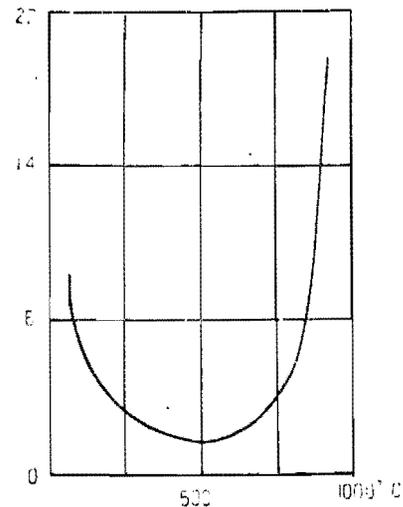


Рис. 9. Зависимость сопротивления чистой закиси меди от температуры, при которой производилась закалка. Сопротивление дано в произвольных единицах.

путем сошлифовывания срез слоя закиси меди до основной меди и затем сделать его микрофотографию, то оказывается, что кристаллики прорастают насквозь до самой основной меди (рис. 11).

Вернемся теперь непосредственно к самим выпрямителям. После того как выпрямитель удалось изготовить вышеуказанным способом, возникает весьма существенный во-

прос — как осуществить электроды. Один электрод получается уже в готовом виде в процессе производства — это

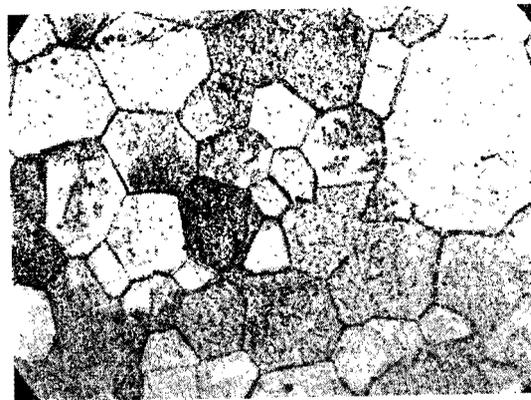


Рис. 10. Микрофотография поверхности образца закиси меди. Отчетливо видны отдельные кристаллы. Поверхность предварительно протравлена кислотой.

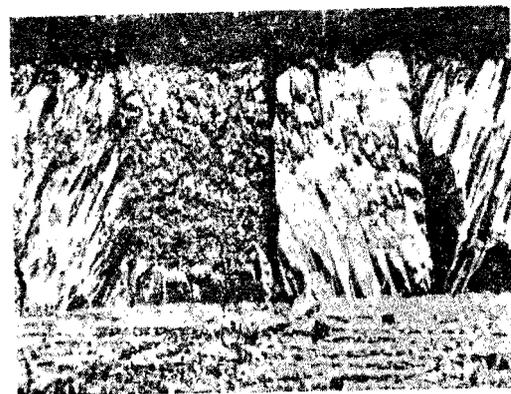


Рис. 11. Микрофотография среза. Видны отдельные кристаллы, прорастающие до основной меди.

пластинка основной электролитической меди; второй электрод должен быть получен каким-либо искусственным способом. Остановимся на двух способах.

Первый способ заключается в том, что пластинке дают возможность упасть в воду с примесью спирта. Дело в том, что закись меди при соединении со спиртом восстанавливается в основную медь, которая высаживается в виде металлического слоя на поверхности закиси меди. Толщина этого слоя всецело зависит от количества примеси спирта, а именно чем больше концентрация спирта, тем толще слой. Свойством восстанавливать закись меди в металлическую медь обладает также и глицерин, а также целый ряд других жидкостей, и в этом случае

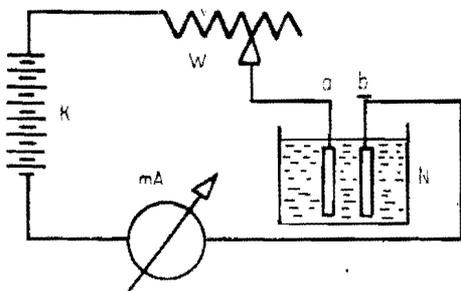


Рис. 12. Схема установки для нанесения электродов путем электролиза.

K — батарея аккумуляторов, *W* — реостат, *mA* — миллиамперметр, *N* — ванночка с раствором, *a* — анод, *b* — катод (выпрямитель).

сей металлический слой, и какая-нибудь другая пластинка, служащая анодом; катодом в данном случае будет служить наша медная пластинка с нарощенным на нее слоем закиси меди. К этой системе прикладывается напряжение в несколько десятков вольт.

Ток (рис. 12), регулируемый реостатом и измеряемый миллиамперметром, не должен превышать 10—15 миллиампер. на $см^2$.

Как следствие процесса электролиза на катоде будет высаживаться слой металлической меди, толщина которого будет зависеть от силы проходящего тока и длительности

обладает также и глицерин, а также целый ряд других жидкостей, и в этом случае опять-таки концентрация раствора определяет собой толщину слоя восстановленной металлической меди.

Второй способ нанесения электродов, способ электролитический, состоит в следующем: в ванночку с раствором медно-аммиачной соли помещается пластинка (выпрямитель), на которую должен быть нанесен

пребывания пластинки в ванне. Обработка путем электролиза может быть заменена немного видоизмененным способом, который в некоторых случаях может оказаться более удобным, а именно, вместо ванночки берется стеклянная трубка, в один из концов которой вставляется на замазке металлический электрод; трубка заполняется раствором медно-аммиачной соли и с другого конца затыкается ваткой.

Батарею аккумуляторов с последовательно-включенным реостатом и миллиамперметром соединяют с основной медно-купроксной пластинки и с вмазаным металлическим электродом. Стоит теперь только поводить ватой по слою нарощенной закиси меди, как на ней начнет высаживаться металлическая медь. В этом случае опять таки катодом будет служить медная пластинка с нарощенным на ней слоем закиси меди, а анодом — вата, пропитанная раствором медно-аммиачной соли.

Нанеся тем или иным путем металлический электрод на поверхность закиси меди, мы тем самым получаем систему: основная медь — запорный слой — закись меди — восстановленная медь, т. е. получим систему, обладающую выпрямительными свойствами, заключенную между двумя электродами. Такая пластинка или целый ряд таких пластинок могут служить для выпрямления переменного тока.

3. Изготовление селеновых выпрямителей.

Прежде чем перейти к описанию изготовления селеновых выпрямителей, необходимо сказать несколько слов о самом селене.

Селен (Se) элемент VI группы периодической системы Менделеева; порядковый номер его 34, атомный вес 79,2. Встречается селен в двух видах — аморфном и кристаллическом.

Аморфный селен имеет три формы: 1) стекловидная, 2) аморфная и 3) коллоидальная. Кристаллический селен встречается двух родов: 1) красный кристаллический селен и 2) серый металлический селен.

Последняя форма для нас представляет наибольший интерес.

Аморфный селен является непроводником, т. е. изолятором.

Металлический же селен является полупроводником с удельным сопротивлением $S = 5 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{см}$ и обладает электронной проводимостью, т. е. механизм его электропроводности обусловлен движением свободных электронов. Сопротивление селена сильно зависит от температуры. При этом наблюдаются скачки, соответствующие переходам селена из одного состояния в другое.

Изготовление селеновых выпрямителей отличается значительно большей сложностью, чем таковое для купроксных.

Исходным продуктом для изготовления селеновых выпрямителей служит аморфный селен, имеющий вид либо порошка бурого цвета, либо твердых кусочков со стеклянным блеском.

Аморфный селен может быть переведен в металлическое состояние путем термической обработки в печи, при температуре, лежащей около 200°C . Слой селена обыкновенно получается на каком-нибудь металле. Наилучшие результаты получаются в тех случаях, когда подкладкой служит железо.

Нанесение селена на металл производится путем испарения его в вакууме. На рис. 13 изображена схема установки для испарения селена в вакууме. Система ртутных насосов откачивает объем N , в котором в особом зажиме укрепляется одна или несколько металлических подкладок O , на которые должен быть испарен селен.

Под подкладками находится небольшая электрическая кварцевая печь PC с выводами наружу. В эту печь набирается селен. После того как получено достаточное разрежение, от 10^{-4} до 10^{-5} мм, что контролируется показанием манометра, в обмотку печи пускается ток. Селен начинает испаряться и садиться на противоположную металлическую подкладку, в виде ровного слоя красного цвета.

Толщина слоя испаренного селена зависит от расстояния подкладки от печи и интенсивности испарения. После того как достигнута нужная толщина слоя (это определяется длительностью испарения), в объем N напускается воздух и металлическая пластинка, с нанесенным на нее селеном, вынимается из установки: селен, нанесенный таким образом на металлическую подкладку, находится в аморфном состоянии. Но нам для того, чтобы создать униполярную проводимость (выпрямляющую систему), нужно перевести аморфный селен в металлическое состояние, т. е. подвергнуть его температурной обработке. Делается это в специальной печи, в которой при помощи особых приспособлений поддерживается строго постоянная температура. Дело в том, что очень часто слой селена после температурной обработки отскакивает от металлической подкладки. Это может быть следствием двух обстоятельств: либо поверхность подкладки была недостаточно чиста и хорошо отшлифована, либо имела место скачкообразное изменение температуры в печи. Термическая

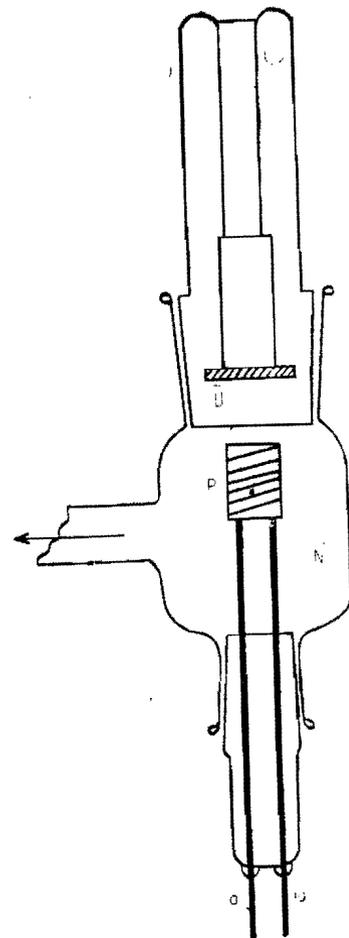


Рис. 13. Прибор для испарения селена в вакууме.

N — стеклянный сосуд. O — подкладка, на которую испаряется селен, P — электрическая печь с селеном, aa — выходы проводов печи. Откачка прибора производится по направлению стрелки.

обработки в печи длится несколько часов, вследствие этого для автоматического регулирования постоянства температуры лучше всего применять терморегуляторы, работающие на принципе релэ. Селен, подвергнутый термической обработке вышеуказанным способом, переходит в металлическое состояние. Слой селена получается темносерого цвета и имеет металлический блеск; при рассматривании под микроскопом видны отдельные кристаллики. Теперь возникает вопрос о создании второго электрода (одним служит металлическая подкладка, на которую был испарен селен). Он может быть осуществлен либо путем испарения металла в вакууме (об этом будет говориться подробнее ниже) на поверхность селена, либо изготовляться в виде свинцовой пластинки, механически прижимаемой каким-либо зажимом к поверхности селена.

Таким образом получается система: металл — запорный слой — селен — металл, обладающая униполярной проводимостью, т. е. выпрямительными свойствами.

Производство селеновых выпрямителей сосредоточено главным образом в городе Нюрнберге, в Германии. Этой фабрике принадлежат почти все патенты, имеющие отношение к производству селеновых выпрямителей. Понятно поэтому, что производственные процессы держатся этой фабрикой в секрете.

4. Электрические характеристики меднозакисных и селеновых выпрямителей.

Для того, чтобы иметь совершенно определенные данные об исследуемом выпрямителе, необходимо определить его электрическую характеристику.

Наиболее интересной для нас является так называемая вольтамперная характеристика, т. е. график, выражающий изменение силы тока в зависимости от приложенного напряжения.

Как известно, сила тока, напряжение и сопротивление

связаны уравнением, называемым законом Ома, которое имеет следующий вид:

$$I = \frac{V}{R},$$

где I — сила тока, протекающего в цепи, V — приложенная разность потенциалов и R — сопротивление системы.

Большинство полупроводников, обладающих электронной проводимостью, подчиняются закону Ома, т. е. у них сила проходящего тока растет прямо пропорционально приложенному напряжению.

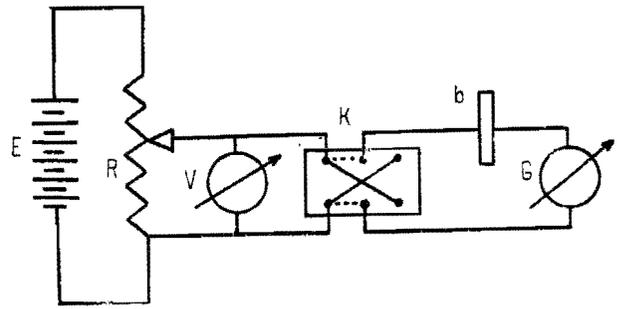


Рис. 14. Схема установки для снятия вольтамперных характеристик твердых выпрямителей. E — батарея аккумуляторов, R — потенциометр, V — вольтметр, K — переключатель, b — выпрямитель, G — гальванометр.

В том случае, когда мы имеем дело с системой: металл — запорный слой — полупроводник — металл, закон Ома не соблюдается вследствие того, что при прикладывании напряжения к вышеуказанной системе величина проходящего тока растет быстрее, чем ей следовало бы по закону Ома, иначе говоря сила тока не растет пропорционально прикладываемому напряжению, а быстрее его. Это обусловлено тем, что сопротивление запорного слоя зависит от напряжения и с возрастанием последнего уменьшается.

Для того, чтобы снять вольтамперную характеристику выпрямителя, обыкновенно поступают следующим образом (рис. 14): аккумулятор или батарея аккумуляторов E по-

дается на потенциометр *R*, который позволяет регулировать подаваемое напряжение. Для того, чтобы величина подаваемого напряжения была известна, параллельно в цепь включается вольтметр *V*. Далее провода подаются на переключатель *K*, дающий возможность менять знак прикладываемого напряжения в зависимости от положения перекидной вилки, указанной на рисунке пунктиром. Соответственно с изменением знака подаваемого напряжения, будет меняться и направление тока в цепи. Затем в цепь последовательно включается образец *b* и гальванометр *G*. Гальванометр *G* служит для измерения силы тока, протекающего в цепи. В том случае, когда сила тока в цепи достигает больших значений, гальванометр заменяют более грубым прибором.

Подобрав при помощи потенциометра желаемое напряжение и поставив переключатель *K* в положение, соответствующее определенному направлению тока, замыкают цепь и производят отсчет величины силы тока по показанию гальванометра.

Задача снятия вольтамперной характеристики заключается в том, чтобы измерить силу тока при различных напряжениях.

Произведя целый ряд таких измерений и отложив по оси абсцисс значения для приложенного напряжения, а по оси ординат соответствующие им величины для силы тока, мы можем построить график, дающий нам зависимость силы тока, проходящего через выпрямитель, от приложенного напряжения.

Таких графиков будет два — в зависимости от направления тока, т. е. от того, какого знака потенциал мы приложим к основному металлу. Как уже говорилось выше, запорный слой может находиться между полупроводником и либо основным металлом, либо верхним электродом. То или иное положение запорного слоя определяет запорное направление выпрямителя. А именно в случае, если запорный слой образован между основным металлом и полупроводни-

ком, при подаче положительного потенциала на основной металл через выпрямитель идет весьма незначительный ток, если же запорный слой лежит между полупроводником и верхним электродом, то при приложении к основному металлу положительного потенциала через выпрямитель идет большой ток.

Вольтамперная характеристика выпрямителя представляет собою два графика для различных направлений тока, дающих зависимость силы тока, проходящего выпрямитель от приложенного напряжения. Имея вольтамперную характеристику для двух различных направлений тока, можно определить одну из наиболее существенных величин, характеризующих выпрямитель.

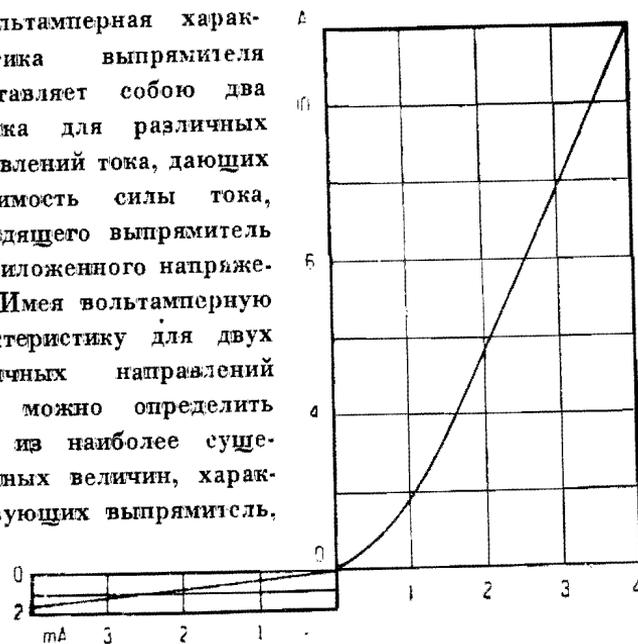


Рис. 15. Вольтамперная характеристика меднозакисного выпрямителя для двух направлений тока.

а именно — коэффициент выпрямления. Коэффициентом выпрямления называется число, выражающее отношение большего тока к меньшему, измеренных при одном и том же напряжении, но для различных направлений тока. Коэффициент выпрямления не является постоянной величиной, а меняется в зависимости от приложенного напряжения. На рис. 15 приведена типичная вольтамперная характеристика для меднозакисного выпрямителя.

Для того, чтобы можно было себе наглядно представить оба графика для двух различных направлений тока, масштаб для случая тока, идущего в заперном направлении, увеличен в 1000 раз.

На рис. 16 изображена вольтамперная характеристика для селенового выпрямителя. Из сравнения графиков, приведенных для меднозакисного выпрямителя, с таковыми для селенового явствует, что

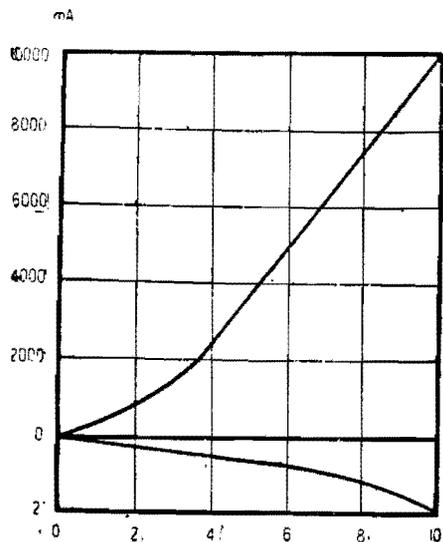


Рис. 16. Вольтамперная характеристика селенового выпрямителя для двух направлений тока.

никаких существенных отличий в характеристиках не наблюдается, что еще лишний раз указывает на тождественность механизма выпрямления в том и другом случае.

Уменьшение величины коэффициента выпрямления при переходе к большим напряжениям объясняется по видимому следующим образом: по мере того, как увеличивается прикладываемое напряжение, начинает расти также и сила тока.

Рис. 17 показывает, как меняется коэффициент выпрямления в зависимости от приложенного напряжения. При рассмотрении кривой бросается в глаза сначала резкое увеличение коэффициента выпрямления с напряжением, а затем замедление роста его. Около 5 вольт коэффициент выпрямления делается уже почти постоянным. При дальнейшем увеличении напряжения, коэффициент выпрямления начинает падать точно так же, как и в случае селена (рис. 18).

идущего через выпрямитель; выделяющееся при этом джау-лево тепло сильно нагревает заперный слой, сопротивление которого при этом сильно падает, следствием чего является все более и более возрастающий ток в заперном направлении. Сила тока, идущего в заперном направлении, начинает возрастать быстрее чем сила тока для пропускающего направле-

Рис. 17. Зависимость коэффициента выпрямления от приложенного напряжения для меднозакисного выпрямителя.

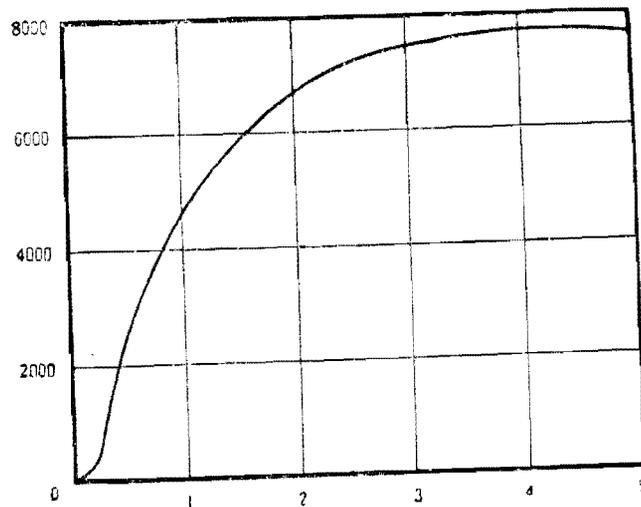


Рис. 17. Зависимость коэффициента выпрямления от приложенного напряжения для меднозакисного выпрямителя.

ния и вследствие этого коэффициент выпрямления, выражающийся отношением:

$$K = \frac{I_1}{I_2},$$

где K — коэффициент выпрямления, I_1 — сила тока в пропускающем направлении, I_2 — сила тока в заперном направлении, начинает уменьшаться.

На рис. 18 дан график изменения коэффициента выпрямления от приложенного напряжения для селенового выпря-

мителя в интервале от 0 до 10 вольт. Зависимость аналогична таковой и для меднозакисного выпрямителя.

Значение для коэффициента выпрямления у меднозакисных и селеновых выпрямителей в некоторых случаях может достигать значений около 7000.

В технике (об этом будет подробнее говориться ниже) обыкновенно применяются выпрямители, состоящие из целого

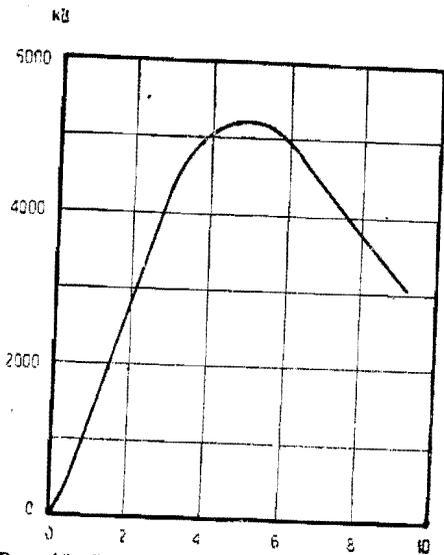


Рис. 18. Зависимость коэффициента выпрямления от приложенного напряжения для селенового выпрямителя. Максимум коэффициента выпрямления лежит при 5 вольтах.

Значение не должно превышать 4—5 вольт, ток при этом на единицу поверхности должен быть не больше чем 0,025—0,05 ампер.

Что касается селеновых выпрямителей, то длительно прикладываемое напряжение к одной пластине не должно превышать 15 вольт, а плотность тока 0,04—0,05 ампер на квадратный сантиметр. Если превзойти вышеуказанные дан-

ные для каждой отдельной пластинки в совокупности определяют качество и рабочий режим выпрямителя. Такая паспортизация отдельных пластинок делается на основании вольтамперных характеристик. Наиболее существенным фактором является предельное значение для прикладываемого напряжения и допускаемая при этом плотность тока.

Для меднозакисного выпрямителя эти данные таковы: прикладываемое к выпрямителю напря-

жение для того и другого типа выпрямителей, то вследствие чрезмерно большой плотности тока может возникнуть настолько сильное нагревание, что в запорном слое выпрямителя произойдут необратимые изменения, следствием которых явится порча выпрямителя.

Необходимо еще указать на влияние частоты переменного тока на выпрямительное действие. Исследования показали, что при увеличении частоты при 10 циклов в секунду, выпрямитель работает без каких-либо существенных изменений. При более высоких частотах выпрямительные свойства начинают снижаться вследствие все более и более увеличивающихся емкостных токов.

5. Тепловые свойства меднозакисных и селеновых выпрямителей.

Опыты показывают, что электрические свойства твердых выпрямителей весьма сильно зависят от температуры.

Здесь мы рассмотрим тепловые свойства выпрямителей, выделяя лишь явления, имеющие практическое значение.

Если увеличивать силу тока, проходящего через выпрямитель, то при этом легко обнаружить повышение температуры последнего, вследствие чего наблюдается резкое падение сопротивления выпрямительной системы.

Если увеличивать приложенное напряжение, то сила тока ему соответствующая также будет возрастать, вызванное при этом нагревание изменит сопротивление всего выпрямителя и особенно сильно скажется на сопротивлении запорного слоя.

Изменение сопротивления запорного слоя вызовет падение коэффициента выпрямления. Если продолжать увеличивать силу тока, идущего через выпрямитель, то нагревание в конце концов станет настолько большим, что испортит выпрямитель. Восстановить выпрямляющие способности такого испорченного выпрямителя не представляется возможным.

Для того, чтобы устранить возможность нагревания всей выпрямляющей системы, вернее для того, чтобы свести это

нагревание к наименьшему значению, выпрямители зажимаются между массивными пластинами, обеспечивающими хороший теплоотвод.

Об этом будет говориться подробнее ниже.

Исследования, произведенные с выпрямителями при различных температурах, показали, что коэффициент выпрямления сильно зависит от температуры, при которой находится выпрямитель. При внешних температурах до 60° выпрямителем можно еще пользоваться, при более высокой температуре выпрямитель вследствие вышеизложенных причин начинает работать хуже в силу изменений в запорном слое, о которых говорилось выше. Как видно из сказанного, наиболее существенную роль играет сопротивление запорного слоя. Многочисленные исследования показали, что большее влияние оказывает присутствие в полупроводнике примесей.

По всей вероятности ионы примесей при повышении температуры начинают приобретать все большую и большую подвижность и в конце концов могут диффундировать в запорный слой, тем самым снижая его сопротивление, что немедленно вызовет снижение коэффициента выпрямления.

До известного температурного предела этот процесс обратим, но при переходе этого предела выпрямитель можно считать безвозвратно погибшим. Одной из задач исследовательских лабораторий, работающих в этом направлении, нужно считать проблему подбора таких примесей, которые, входя в запорный слой, не снижали бы его сопротивления.

Большой интерес представляет зависимость коэффициента выпрямления в области отрицательных температур. Коэффициент выпрямления сначала даже растет в сторону отрицательных температур примерно до -15° C, затем при дальнейшем снижении температуры начинает резко падать, при температуре порядка -30° C падает почти до единицы. Объяснить это можно тем, что сопротивление полупроводника начинает сильно возрастать с понижением температуры и в этой области сопротивление полупроводника и запорного

слоя становятся одного порядка и в результате выпрямитель практически перестает выпрямлять. На рис. 19 и рис. 20 изображено изменение сопротивления меднозакисного выпрямителя в зависимости от температуры для двух направлений тока. На рис. 21 показано, как меняется коэффициент выпрямления меднозакисного выпрямителя с температурой.

В настоящее время у нас ведется целый ряд исследований, которые ставят себе целью вырабатывать тип твердого выпрямителя, который бы имел постоянство коэффициента выпрямления в температурном интервале от -40° C до $+60^\circ$ C. Большие надежды в этом направлении нужно возлагать на методику получения искусственных запорных слоев, и на подбор таких примесей, температурный ход сопротивления которых был бы того же порядка, как таковой для полупроводника.

6. Техническое применение твердых выпрямителей.

Как известно, один из самых важных приборов современной техники, трансформатор, работает на переменном токе,

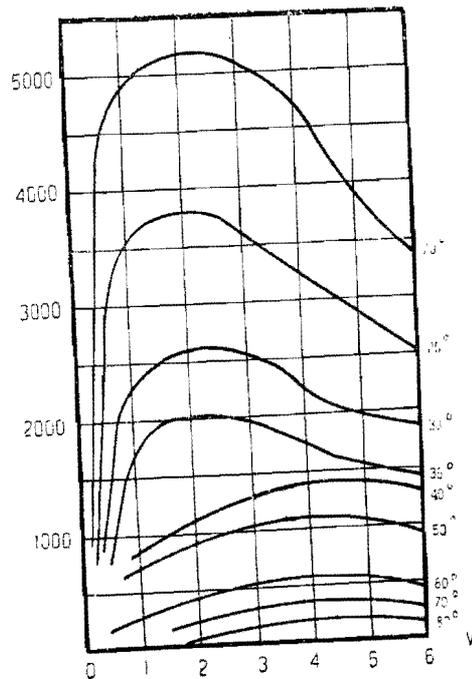


Рис. 19. Зависимость сопротивления меднозакисного выпрямителя от приложенного напряжения при различных температурах. Кривая дана для запорного направления.

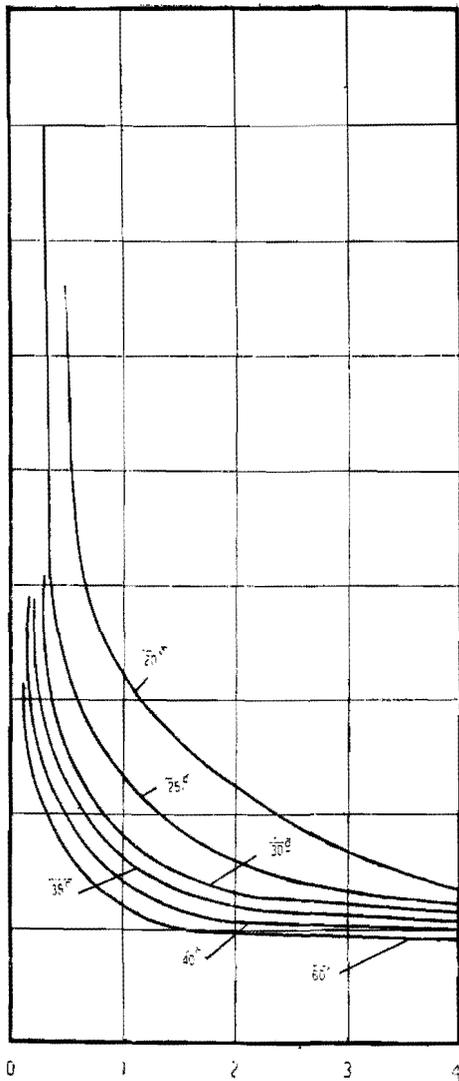


Рис. 20. Зависимость сопротивления медноцинкового выпрямителя от приложенного напряжения при различных температурах. Кривая дана для пропускающего направления.

вследствие чего роль постоянного тока в технике сведена до минимума. Постоянный ток применяется только в тех случаях, где переменным током принципиально по каким-либо причинам нельзя воспользоваться, или когда применение постоянного тока дает больший полезный эффект и экономию.

Применение постоянного тока ограничивается фактически тремя областями:

1) электролитическое действие постоянного тока:

а) зарядка аккумуляторов; б) техническая электрохимия;

2) создание электромагнитных полей;

3) измерительная техника и приборостроение.

В промышленности источником для получения постоянного тока в этих случаях служат электрические

машины. Но весьма часто, когда речь идет о мелких установках, работающих не повседневно, использование электрических машин не представляется выгодным, тогда именно встает во весь рост вопрос о выпрямителе.

Как уже говорилось, существует очень много типов выпрямителей. Большое распространение и применение в технике получили твердые выпрямители и среди них наиболее прочное место заняли меднозакисный и селеновый твердый выпрямители.

Объясняется это очень просто. Изготовление этих выпрямителей весьма несложно и дешево. Они не требуют никакого особого ухода за собой; всякие добавочные источники напряжения являются излишними.

Эти два типа выпрямителей в работе весьма устойчивы и долго-

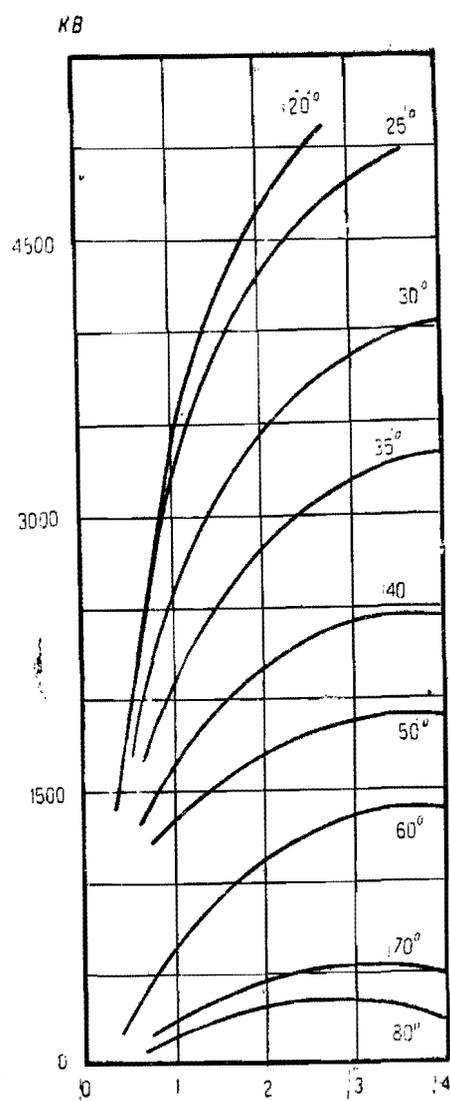


Рис. 21. Зависимость коэффициента выпрямления от температуры для меднозакисного выпрямителя в интервале от 20° С до 80° С.

вечны. За последнее время в особенности меднозакисный выпрямитель получил колоссальное распространение за границей. На многих заводах поставлено массовое производство меднозакисных выпрямителей в виде готовых изделий, речь о которых будет идти ниже.

Устройство купроксного выпрямителя, применяемого в технике, видно на рис. 22. Медная круглая шайба, с нанесенным на ней слоем закиси меди, зажимается между двумя латунными шайбами значительно большего диаметра.

Вторым электродом служит свинцовая шайба, находящаяся между закисью меди и одной из латунных шайб. Вся эта система затягивается при помощи болта и гайки С. Для изоляции системы болт вставляется в изолирующую втулку А.

Нажим применяется в том случае, когда имеется только один готовый электрод, а именно — основная медь. В этом случае вторым электродом служит прижимаемая свинцовая шайба.

Благодаря пластичности свинца получается хороший контакт с нарощенной закисью меди. Если же второй электрод нанесен путем восстановления меди одним из способов, описанных в предшествовавшей главе, то нажим не применяется, так как в этом случае достаточно одного касания.

Мы уже видели выше, что к одной пластине выпрямителя не может быть приложено напряжение больше 4—5 вольт, поэтому для осуществления выпрямителя на большие напряжения соединяют последовательно целый ряд пластин.

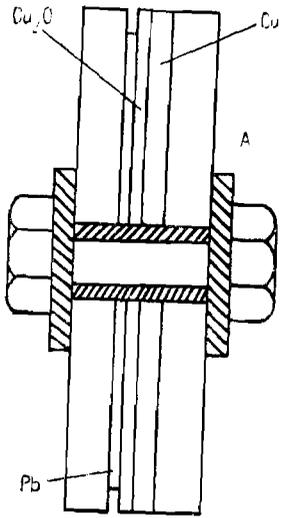


Рис. 22. Схематический разрез меднозакисного выпрямителя, применяемого в технике.
А — изолирующая втулка,
С — гайка для стягивания системы.

Как уже говорилось, плотность тока при этом для одной пластины не должна превышать 0,05 ампер на квадратный сантиметр ее поверхности. Для того, чтобы выпрямитель мог работать на больших силах тока, либо увеличивают площадь отдельных пластин, либо соединяют их параллельно. При очень больших токах, приходится делать и то и другое одновременно. Коэффициент выпрямления у таких отдельных пластин достигает 7000.

Твердый выпрямитель может быть представлен как схема, состоящая из сопротивления и емкости. Емкостное действие настолько мало, что при техническом использовании выпрямителя им можно пренебречь.

Если рассматривать теперь выпрямитель как униполярное, а еще лучше как ориентированное сопротивление и взять даже самое невыгодное соотношение сопротивлений для обоих направлений тока, скажем как 1 : 100, то сопротивление в одном направлении будет равняться 1 Ω, а в другом 100 Ω. При одном и том же напряжении для двух направлений тока отношение последних будет обратно пропорционально отношению сопротивлений; таким образом сила тока в запертом направлении и будет составлять лишь $\frac{1}{100}$ силы тока, идущего в пропускающем направлении. При силе прямого тока в 10 ампер, обратный ток будет равняться $\frac{1}{10}$ ампера. В этом случае в самом выпрямителе в запертом направлении выделяется количество энергии, равное:

$$I^2 R = \frac{1}{100} \cdot 100 = 1 \text{ ватт,}$$

где I — сила тока, R — сопротивление, т. е. получается, что мы теряем без пользы только 1 ватт. Коэффициент полезного действия выпрямителя зависит от омических потерь как в запертом, так и в пропускающем направлениях.

Кроме того, получают еще потери в замкнутой цепи используемого постоянного тока. Эти источники потерь должны только тогда учитываться, когда мы интересуемся коэффи-

циентом полезного действия всей системы; нас же больше должны интересовать потери только в самом выпрямителе. Пробойное напряжение ограничивает значение прилагаемого напряжения к отдельному выпрямителю. Это есть так называемое допусаемое запорное напряжение. Это и является одной из причин для сборки выпрямителя из целого ряда пластин; число последних может быть сколь угодно велико. Твердый выпрямитель имеет то преимущество перед кенотроном и ртутным выпрямителем, что у этих последних значительное напряжение садится на самом приборе и достигает значения от 15 до 20 вольт. Отсюда следует, что для малых напряжений оба эти прибора не выгодны, так как их коэффициент полезного действия будет весьма незначителен. Кроме того, к этим потерям добавляются потери в цепи накала и зажигания.

В отношении твердого выпрямителя дело обстоит значительно лучше; его общие потери могут быть сведены к 30%, что дает для коэффициента полезного действия внушительную величину — 70%. На рис. 23 изображен график коэффициента полезного действия в зависимости от приложенного напряжения как для твердого выпрямителя, так и для кенотрона (потери в цепи трансформатора учтены). Из сравнения графиков очевидно, что при достижении напряжения порядка 60 вольт коэффициент полезного действия становится примерно одинаковым. В пределах до 60 вольт, как видно, твердый выпрямитель является наиболее выгодным и экономичным прибором.

Кривая соответствует случаю мощности системы в 0,5 киловатт.

При больших мощностях коэффициент полезного действия обеих систем становится мало отличным.

Область действия твердого выпрямителя ограничена запорным напряжением пластины, т. е. толщиной слоя закиси меди или селена, которая в соответствии с потерями не может превосходить определенной величины. Вследствие этого, как

уже говорилось, не представляется возможным длительно выпрямлять одной пластиной напряжения выше 3—4 вольт. Но, как мы видели, эта причина может быть устранена путем соединения целого ряда пластин. Как видно из рис. 24, распределение напряжения на отдельных пластинках может быть весьма различным и колеблется в больших пределах. Очень выгодно происходит распределение как напряжения, так и тока при параллельно включенных пластинках выпрямителя.

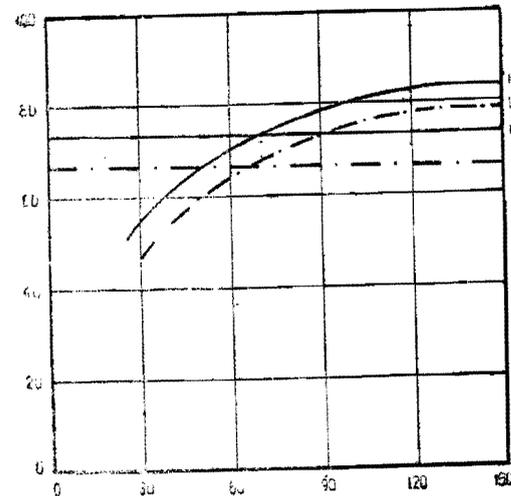


Рис. 23. Коэффициент полезного действия в проц. (по оси ординат) твердого выпрямителя и кенотрона. I — твердый выпрямитель без нагрузки, II — твердый выпрямитель с нагрузкой, III — кенотрон без нагрузки, IV — кенотрон с нагрузкой.

Но все же более целесообразным для больших плотностей тока является увеличение площади пластин и включение их последовательно; это облегчает монтаж системы и главным образом дает экономию в весе и возможность более интенсивного охлаждения отдельных пластин выпрямителя.

При исключительно больших токах, как это имеет место

в технической электрохимии, приходится осуществлять и то и другое одновременно.

Плотности тока в 40 миллиампер на квадратный сантиметр соответствует примерно вес от 15 до 20 г на ампер.

Опыты показали, что срок службы твердого выпрямителя (меднозакисного и селенового) не сравним ни с каким другим выпрямителем. Так, например, часы горения, определяющие жизнь кенотрона, во много раз меньше жизнеспособности твердого выпрямителя.

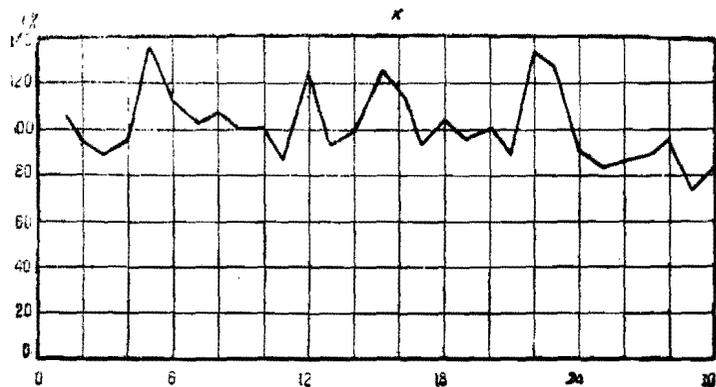


Рис. 24. График, дающий распределение напряжения в процентах на отдельных пластинах выпрямителя. По оси абсцисс отложены порядковые номера пластин.

На рис. 25 изображены наиболее распространенные схемы включения твердых выпрямителей в случае однофазного тока. Под каждой схемой имеется соответствующий график, изображающий изменение напряжения со временем в зависимости от схемы включения. Первая схема изображает включение одного выпрямителя с трансформатором. Как видно из графика, выпрямляется одна полуволна. На второй схеме изображено включение двух выпрямителей с трансформатором. Выпрямляются обе полуволны. Третья схема дает возможность выпрямлять обе полуволны при непосредственном включении выпрямителей в сеть переменного тока. Выпрямляются обе полуволны.

26 даны аналогичные схемы для включения выпрямителей в сеть трехфазного тока. Там же изображены соответствующие графики напряжения.

Из вышеуказанных схем понятно, как меняется график

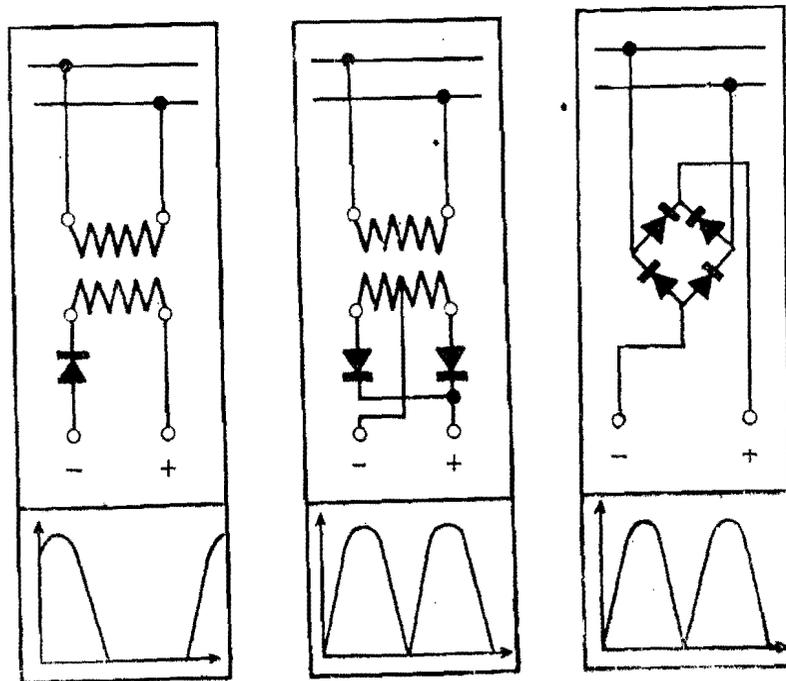


Схема I.

Схема II.

Схема III.

Рис. 25. Схемы включения твердых выпрямителей в сеть однофазного тока.

Схема I. Включение трансформатора с одним выпрямителем. Выпрямляется одна полуволна.

Схема II. Включение трансформатора с двумя выпрямителями. Выпрямляются две полуволны.

Схема III. Включение четырех выпрямителей непосредственно в сеть переменного тока. Выпрямляются обе полуволны.

напряжения в зависимости от выбранной схемы включения выпрямителей. Весьма существенным фактором является род нагрузки, даваемой в цепи постоянного тока. Ниже мы уви-

дим, что в зависимости от рода нагрузки характер графика тока будет резко меняться. На рис. 27 показано, как ведут себя наиболее типичные приборы, питающиеся выпрямленным током. Первая схема показывает, что обыкновенное сопротивление мало сказывается на характере кривой тока. Схема

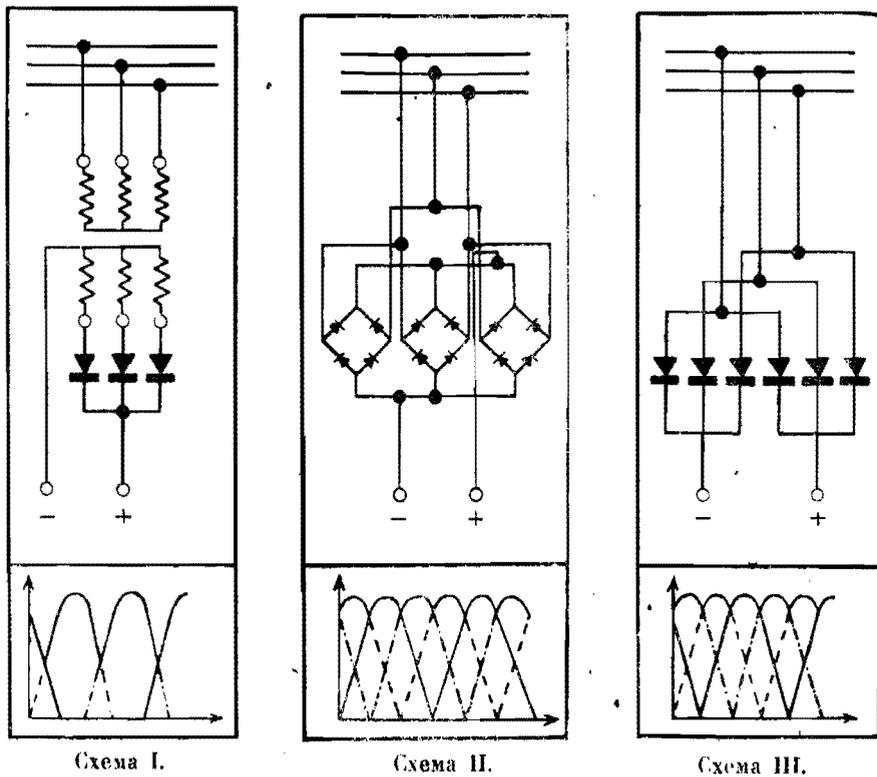


Рис. 26. Схемы включения твердых выпрямителей в цепь трехфазного тока.

вторая иллюстрирует случай, когда в выпрямительную сеть включена обратная электродвижущая сила (как это имеет место в случае зарядки аккумуляторов).

Ток идет уже только в течение некоторого периода времени. Максимум силы тока имеет уже большее значение, чем

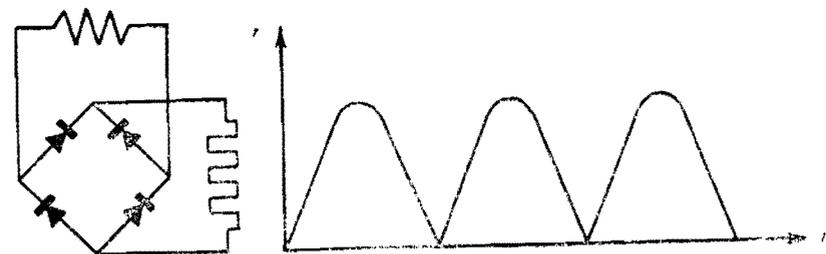


Схема I.

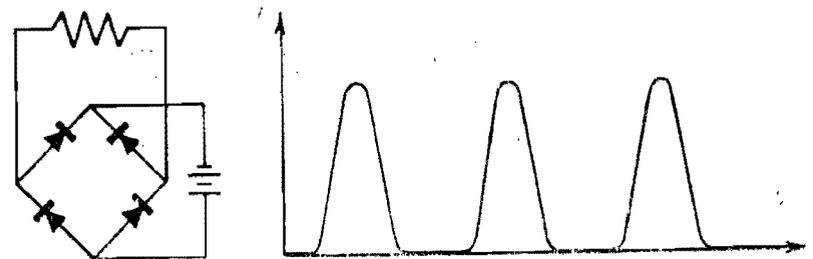


Схема II.

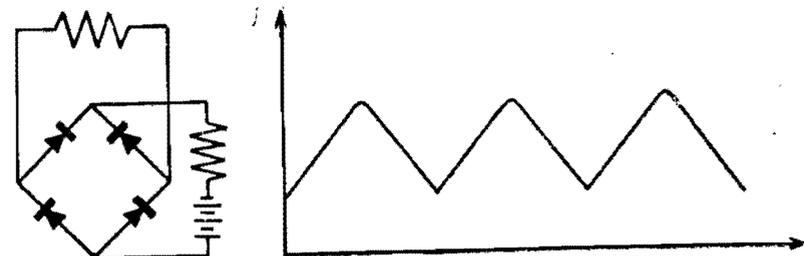


Схема III.

Рис. 27. Изменение графика выпрямленного тока в зависимости от рода нагрузки.

Схема I. Случай чисто омической нагрузки.
Схема II. В цепи имеется обратная электродвижущая сила (зарядка аккумулятора).
Схема III. В цепи имеется обратная электродвижущая сила и дроссельная катушка.

в случае чисто омической нагрузки, так как в этом случае приходится иметь дело с незначительными потерями напряжения в цепи потребления. Схема третья показывает, как резко меняется картина в случае включения, в цепь постоянного тока, индуктивного сопротивления. Ток не спадает до нуля, а идет незначительный длительный ток зарядки. Чет-



Схема IV.

Рис. 27. Изменение графика выпрямленного тока в зависимости от рода нагрузки.

Схема IV. В цепи имеется чисто индуктивное сопротивление.

вертая схема изображает случай, когда имеется только индуктивное сопротивление. Ток идет почти в течение всего периода, в противоположность случаю с чисто омической нагрузкой.

Падение напряжения в твердом выпрямителе определяется нижеследующей формулой:

$$U = irz.$$

U — падение напряжения, i — сила тока в некоторый момент времени (зависящая только от типа потребляющей установки, включенной в цепь выпрямленного тока), r — сопротивление одной пластины (сюда входит как сопротивление самой меди, так и окиси меди), z — число пластин выпрямителя.

Как видно, падение напряжения пропорционально нагрузке — с увеличением нагрузки увеличивается падение напря-

жения: характеристика нагрузки выпрямления медленно падает.

При параллельно включенных выпрямителях различной величины нагрузка распределяется равномерно на действительное поперечное сечение, т. е. на поверхность пластин.

Таким образом параллельное включение выпрямителей может быть произведено без каких-либо дополнительных устройств. Кроме того включенные в цепь трансформаторы дают возможность варьировать характеристики. Теперь перейдем к непосредственному описанию применения твердых выпрямителей в технике на ряде конкретных примеров.

а) *Зарядка аккумуляторов.* Как уже говорилось выше, областью, где твердый выпрямитель завоевал себе прочное место, является зарядка аккумуляторов; на ней мы сейчас и остановимся.

Нагрузка при зарядке аккумуляторов предъявляет к твердым выпрямителям совсем другие требования, чем нагрузка, вызываемая обыкновенным сопротивлением, так как приходится помимо сопротивления самого аккумулятора иметь дело с обратной электродвижущей силой. Обратная электродвижущая сила действует в цепи в течение большей части периода и вызывает обратный ток, вследствие чего график тока оказывается приподнятым на величину, соответствующую обратной электродвижущей силе (рис. 27, схема III).

При помощи твердого выпрямителя можно заряжать аккумулятор в самое короткое время до максимального предела. Все другие типы выпрямителей невыгодно использовать в тех случаях, когда приходится подзаряжать аккумуляторы, так как часы их существования ограничены.

В случае твердого выпрямителя вопрос о числе рабочих часов отпадает и мы можем аккумулятор подзаряжать небольшими порциями по мере того, как он разряжается. Это так называемая «капельная зарядка». Такой тип выпрямителя, разрешающий подзаряжать аккумулятор во время работы, является исключительно удобным приспособлением в том

случае, когда приходится работать с какими-либо электровакуумными приборами, накаливаемая спираль которых нуждается в постоянном режиме. Последнее в ряде случаев необходимо строго соблюдать, а питание накала непрерывно подзаряжающимися аккумуляторами в состоянии целиком решить проблему. К выпрямителю такого типа имеется особое приспособление, которое автоматически включает аккумулятор в цепь (для зарядки) как только он начнет разряжаться. В Германии выпущен выпрямитель типа «Протос», позволяющий одновременно подзаряжать несколько аккумуляторов. Ни один другой тип выпрямителя не дает возможности длительно заряжать аккумуляторы, находящиеся в работе, скажем в случае работы радиоприемника. От аккумуляторов берется довольно большой ток; выпрямитель должен работать на полной нагрузке, а число его рабочих часов, как уже говорилось, ограничено.

Совсем иначе обстоит дело с твердым выпрямителем: он может быть непосредственно приключен к сети переменного тока, а затем к аккумулятору. В тех случаях, когда потребляется совсем небольшой ток, он берется непосредственно через выпрямитель от сети переменного тока, а аккумулятор играет роль буфера, сглаживающего кривую тока. При более сильной нагрузке начинает работать и сам аккумулятор, но он не истощается, так как подзаряжается при помощи того же выпрямителя, как только напряжение на его зажимах начинает падать.

Таким образом кроме автоматической зарядки такое выпрямительное приспособление дает возможность использовать в течение больших промежутков времени аккумуляторы с весьма небольшой емкостью.

Если речь идет об аккумуляторах, которые в короткое время должны быть полностью заряжены, как например в случае автомобильных, то приходится работать на максимальном токе зарядки. В таких случаях с самого начала зарядки пропускают наибольший зарядный ток, допускаемый данным

типом аккумулятора. Когда напряжение на каждом отдельном элементе достигнет 2,4 вольта, зарядный ток во избежание быстрого износа аккумулятора уменьшается.

Измеряя напряжение на зажимах или контролируя плотность кислоты, убеждаются в нормальном состоянии аккумулятора и отключают выпрямитель от цепи переменного тока. Во второй половине процесса зарядки рекомендуется пользоваться током зарядки, не превышающим 50% нормального зарядного тока. Зарядка в короткие промежутки времени применяется главным образом на больших зарядных станциях, где приходится заряжать батареи аккумуляторов одну за другой, т. е. речь идет о продолжительном использовании выпрямительной системы с небольшими промежутками. Для того, чтобы исключить возможность перезарядки, имеется особый выключатель, который автоматически отключает выпрямитель от цепи переменного тока, как только на зажимах отдельных элементов устанавливается разность потенциалов 2,4 вольта. На рис. 28 дана схема такого выпрямительного устройства для трехфазного тока, служащего для быстрой зарядки аккумуляторов.

В цепи постоянного тока имеется дроссельная катушка, служащая для сглаживания тока зарядки и одновременно увеличивающая коэффициент полезного действия.

Выключатель, приводимый в действие рукою, дает возможность отключать систему от питающей сети переменного тока.

В заключение следует вкратце указать еще на некоторые области, в которых может быть применен твердый выпрямитель для случая зарядки батарей аккумуляторов.

Так, например, для небольших силовых установок, приводимых в действие водой или ветром, он может быть использован для зарядки батарей. На радиостанциях, сигнальных станциях твердый выпрямитель находит себе применение для тех же целей. Мало кто из радиолюбителей за границей пользуется теперь аккумуляторами — в этом случае твердый вы-

прямитель, подключаемый прямо к городской сети, завоевал себе прочное место. В любом гараже, в котором имеется проводка городской электрической сети, можно использовать для зарядки автомобильных аккумуляторов твердый выпрямитель. Электрические поковки, аппараты для чистки улиц, одним словом все, что работает на аккумуляторах (речь идет о заграничных устройствах), обслуживаются все тем же твердым выпрямителем.

б) Техническая электрохимия. Рассмотрим теперь область, указанную уже в начале главы, в которой твердый выпрямитель нашел себе не менее широкое применение, — это область технической электрохимии.

В гальванопластике, как например при изготовлении клише, необходим постоянный ток, который может быть получен при помощи выпрямителя, присоединенного непосредственно к городской сети переменного тока. Как известно, при гальванопластике процесс электролиза идет в ванне с соответствующим раствором. Удельное сопротивление такого раствора можно в среднем положить равным $0,93 \text{ } \Omega \cdot \text{см}$. При расстоянии между катодом и анодом в 15 см плотности тока — один ампер на квадратный дециметр, разность потенциалов в ванне

достигает 1,4 вольт. При быстрой гальванопластике можно доходить до силы тока в 5 ампер на квадратный дециметр; при такой большой плотности тока можно получить за полтора

часа клише толщиной в 1,1 мм. Разность потенциалов в ванне в этом случае равняется 6 вольтам. Производство негативов грамофонных пластинок может быть также осуществлено при помощи постоянного тока, получаемого путем включения в цепь переменного тока твердого выпрямителя. В этом случае необходимая плотность тока должна достигать величины от 2-х до 3-х ампер на квадратный дециметр, при разности потенциалов в 4 вольта. Таким же способом с участием твердого выпрямителя могут изготовляться штампы для производства тисненой кожи, приспособления для получения водяных знаков. Гальванопластика дает возможность получать небольшие металлические трубки без шва, жесть и т. д., но все это только возможно при наличии постоянного тока, т. е. и тут необходим твердый выпрямитель. Повсеместно, где только имеется переменный ток, никто теперь не употребляет гальванические элементы, они были в свое время заменены небольшими преобразователями переменного тока в постоянный (умформерами), но теперь у них явился серьезный конкурент в лице твердого выпрямителя, который все больше и больше начинает их вытеснять.

На рис. 29 изображена техническая модель выпрямителя, при помощи которого в цепи постоянного тока может быть получено 4 вольта при силе тока в 100 ампер. Клеммы постоянного тока такого выпрямителя могут быть непосредственно присоединены к гальванической ванне.

Такое приспособление дает возможность осуществить переносную гальваническую ванну, в которой можно меднить, никелировать, хромировать и покрывать цинком всевозможные изделия. Теперь нам надо рассмотреть применение выпрямителя для создания электромагнитных полей.

с) Создание электромагнитных полей. Современная электротехника требует наличия постоянного тока, когда мы имеем дело с электромагнитами, полюса которых сделаны из штампованного или литого металла, как это имеет место в возбуждающих приспособлениях для некоторых типов электри-

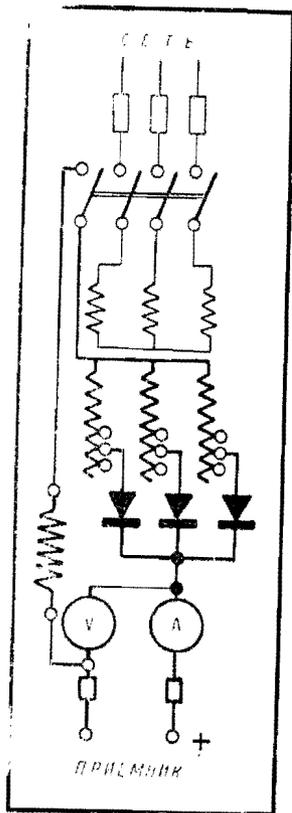


Рис. 28. Схема включения конструкции твердого выпрямителя для быстрой зарядки аккумуляторов. V — вольтметр, A — амперметр.

ческих машин и аппаратов. Постоянный ток применяется также в подъемных магнитах, магнитных кранах, тормозах, подъемных механизмах и т. д. При применении переменных токов для питания магнитов приходится металлические части последнего изготовлять не из сплошного металла, а в виде полос, для того чтобы избежать возникновения токов Фуко и связанных с ними потерь. Кроме того переменный ток (вследствие перемены направления) не годится для питания подъемных электромагнитов. Ясно, что в этой области примене-

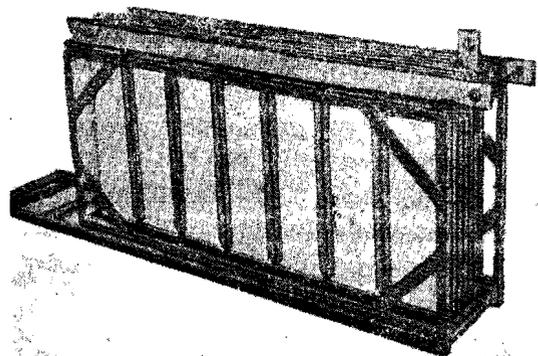


Рис. 29. Техническая модель кремникового выпрямителя на 4 вольта и 100 ампер.

ние постоянного тока является значительно более выгодным и отпадает возможность появления токов Фуко. Если же появляется необходимость в постоянном токе, то естественно возникает вопрос о выпрямителях, а в частности вопрос о твердом выпрямителе. Большинство возбуждательных приспособлений предусматривают использование постоянного тока в 220 вольт. В Германии сконструирован выпрямитель, который при непосредственном включении в цепь переменного тока может дать в цепи постоянного тока требуемые 220 вольт. В этих случаях твердый выпрямитель является

весьма выгодным: он занимает мало места, легко переносим и стоит весьма недорого и кроме того дает возможность иметь индивидуальное питание для каждой машины. К этой же области относятся выпрямительные приспособления для всевозможных конструкций подъемных магнитов, реле, магнитных предохранителей и т. д.

В заключение главы необходимо указать еще на применение твердого выпрямителя в области приборостроения и электрических измерений. В этой весьма еще молодой области советская техника имеет весьма ценные и значительные успехи.

d) *Приборостроение и измерительная техника.* Известно, что все измерительные приборы переменного тока весьма невыгодны, так как не могут служить для измерения малых токов и напряжений. Минимальное напряжение, которое может быть измерено техническим прибором такого типа, колеблется от 4-х до 5 вольт. Сила тока, регистрируемая прибором переменного тока, не может быть меньше 0,1 ампера. Наиболее совершенные и чувствительные приборы, употребляемые в современной измерительной технике, это тепловые и магнитоэлектрические. Первые могут служить как для измерений переменного тока, так и для постоянного, вторые же могут быть включены только в цепь постоянного тока. Мы не будем останавливаться на описании их конструкции, так как это не имеет непосредственного отношения к рассматриваемому вопросу, укажем лишь на то существенное обстоятельство, что магнитоэлектрические приборы для измерения тока при значительно большей чувствительности (по сравнению с приборами переменного тока) обладают весьма небольшим внутренним сопротивлением, благодаря чему потребляемая ими электрическая энергия значительно меньше, чем в случае приборов переменного тока. Твердый выпрямитель благодаря своей дешевизне и малоизнашиваемости дает возможность в случае измерений для переменного тока пользоваться магнитоэлектрическими приборами, т. е. благодаря наличию твер-

дого выпрямителя магнитоэлектрический прибор делается универсальным. Кроме того это обстоятельство дает возможность заменить тепловые приборы магнитоэлектрическими. Дело в том, что показания тепловых приборов не всегда постоянны и их приходится время от времени контролировать.

В настоящее время уже разработано много конструкций приборов, дающих возможность включать их в цепь переменного тока при помощи твердого выпрямителя. Так, например, при помощи включения твердого выпрямителя стрелочный гальванометр дает возможность в цепи переменного тока измерять силы тока порядка нескольких микроампер. Вольтметры и миллиамперметры, рассчитанные на малые напряжения, могут давать: первые от 0,5 до 1 вольта при силе тока в 5 миллиампер, вторые при токе в 50 миллиампер имеют сопротивление всего в 60 Ω , что еще лишний раз указывает на целесообразность такого включения. Для вольтметров, измеряющих более высокие напряжения, возможно подключение добавочных сопротивлений.

Такая комбинация дает вольтметрам такого типа большие преимущества над таковыми для переменного тока, обладающими малым внутренним сопротивлением. При помощи включения твердого выпрямителя построен целый ряд типов омметров и чувствительных пирометров. Необходимо отметить еще две конструкции, осуществленные советскими учеными Б. Остроумовым и С. Гвоздовым, а именно: универсальный прибор для измерения глубины модуляции амплитудных значений переменного тока и электродинамический громкоговоритель, работающий при помощи твердого выпрямителя. Подробное описание этих конструкций можно найти в другом месте. Из всего вышеизложенного ясно видно, как широка и многообразна область применения твердого выпрямителя.

Можно высказать уверенность, что твердый выпрямитель найдет себе еще очень много применений в современной и будущей технике.

Остается еще одна важная задача, которая надо надеяться, будет решена в положительном смысле — это, изготовление выпрямителей на небольшие напряжения, где современный выпрямитель отказывается служить (не выпрямляет).

Большие надежды нужно возлагать в этом направлении на разработку методов получения запорных слоев, искусственным путем. Возможно, что в будущем можно будет создавать такие запорные слои, при которых твердый выпрямитель сможет выпрямлять напряжения значительно меньшие, чем это удается в настоящее время.

волна проходит за время T одного периода световых колебаний. Под второй понимали число полных колебаний в одну секунду. Эти две величины λ и ν связаны, как легко сообразить, друг с другом следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

где c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Длину волны λ обычно измеряют в миллимикронах (м μ). Один миллимикрон равен одной миллионной миллиметра: $1 \text{ м}\mu = 10^{-6}$ м. Часто пользуются также единицей в десять раз меньшей. Ее называют ангстремом (\AA). $1 \text{\AA} = 10^{-7}$ м = 10^{-8} см. Все эти единицы весьма распространены в оптике различных длин волн λ . Для примера можно указать, что область лучей, воспринимаемых нашим глазом, лежит в пределах от 380 м μ до 760 м μ . Лучи меньшей длины волны уже невидимы, они называются ультрафиолетовыми, большей длины волны — инфракрасными. Эта волновая точка зрения на природу света господствовала в физике в течение целого столетия и все те опыты, которые в продолжение этого времени ставил человек, приносили все больше и больше экспериментального материала, подтверждающего справедливость подобного взгляда. Однако фотоэффект показал физикам, что не все свойства светового луча могут быть объяснены при помощи волновых представлений.

Прежде чем говорить об этом, перечислим основные законы фотоэффекта.

1. Максимальная скорость вылетающих фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а определяется исключительно частотой колебаний светового луча ν .

Таким образом свет малой интенсивности и очень большой вызывает появление одинаково быстрых электронов, если длина волны света остается при этом постоянной.

2. Число вылетающих фотоэлектронов

III. ТВЕРДЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ.

1. Фотоэффект и основные законы его.

Еще в конце прошлого столетия ряд ученых заметили, что изолированная металлическая пластинка при освещении ее ультрафиолетовыми лучами приобретает положительный электрический заряд. Если до освещения эта пластинка была заряжена отрицательным электричеством, то, как показали эти же опыты, она с течением времени этот заряд теряет. Эти факты говорят о том, что металлы под действием ультрафиолетовых лучей теряют каким-то образом отрицательные электрические заряды. Таким образом было заложено основание интереснейшей области физики, устанавливающей теснейшую связь между световыми и электрическими явлениями. Это явление получило название — фотоэлектрического эффекта или сокращенно — фотоэффекта. Позднее выяснилось, что сущность фотоэффекта заключается в выбрасывании из металла под действием света электронов, атомов отрицательного электричества. Точнейшие опыты показали, что это те же самые частицы, с которыми приходилось уже сталкиваться в целом ряде других явлений. Их заряд и масса имели те же самые значения. Электроны, вырывающиеся из металлов под действием света, носят название фотоэлектронов. Фотоэффект сыграл в истории физики выдающуюся роль, так как он заставил нас резко изменить свой взгляд на природу света. Прежде на свет смотрели как на волнообразный процесс электромагнитного происхождения, характеризующийся длиной волны λ или же частотой колебаний ν . Под первой понимали тот путь, который

пропорционально интенсивности падающего света (при постоянной длине волны λ).

Этот закон настолько точно соблюдается, что число вылетающих электронов может служить отличным мерилom интенсивности света. Это широко используется светотехникой для целей фотометрии.

3. При увеличении длины световой волны λ , при определенном ее значении, называемом граничной длиной волны (λ_0) фотоэффект исчезает.

Большие длины волн ($\lambda > \lambda_0$) не в состоянии произвести вырывание электронов. Таким образом существует порог фотоэффекта. Граничная длина волны λ_0 зависит только от природы освещаемого вещества и от состояния его поверхностного слоя. Так например целый ряд веществ при освещении видимыми лучами фотоэффекта не дает. Лишь ультрафиолетовые лучи в этих случаях оказываются активными.

Перечисленные выше закономерности фотоэлектрического эффекта во всех случаях без исключения блестяще подтверждались опытами и поэтому могут считаться твердо установленными. Но ни один из них не может быть получен из волновой теории света.

В качестве примера кратко разберем первый закон. В волновой теории света интенсивность светового потока определяется квадратом амплитуды электрического вектора. Чем амплитуда больше, тем больше интенсивность. При освещении какого-либо вещества лучами различной интенсивности, мы будем, следовательно, подвергать его электроны действию различных электрических сил.

Различные силы должны сообщать электронам и различные скорости. Таким образом в этом случае мы сталкиваемся с противоречием опыта волновой теории света.

Для того, чтобы выйти из создавшегося затруднительного для теории положения, была произведена рядом крупнейших ученых огромная работа по переделке теории света.

Было предположено, что свет состоит из потока некоторых частиц, атомов лучистой энергии, которые были названы световыми квантами или фотонами. Энергии каждого отдельного кванта света с частотой колебаний ν приписывается значение, равное:

$$e = h\nu,$$

где h — постоянная Планка. Измерения h привели к следующей величине ее:

$$h = 6,54 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

Таким образом световые лучи различной длины волны различаются друг от друга величиной энергии, соответствующей отдельным квантам.

Современная физика смотрит на световой поток с этих двух точек зрения. С одной стороны последний состоит из потока квантов, с другой стороны распространение этих квантов связано с определенным волновым процессом в пространстве.

Фотоэффект получил свое истолкование только после введения в физику квантовых идей. Мы сейчас увидим, что основные законы фотоэффекта действительно крайне просто получаются из квантовой теории света.

Допустим, что на некоторое тело падает световой поток длины волны λ , т. е. поток световых квантов $h\nu$. Обозначим через A ту работу, которую должен совершить электрон, проходя через поверхностный слой вещества. Физический смысл этой величины A был кратко разобран нами в разделе, посвященном строению металлов. Световые кванты при своем падении на данное тело будут встречать электроны, входящие в его состав. Последние в некоторых случаях будут в состоянии поглощать кванты, приобретая тем самым энергию $h\nu$, которая перейдет в их кинетическую энергию. При этом электроны приобретут некоторую скорость, благодаря чему смогут прорваться через поверхностный слой и вылететь наружу. Таким образом возникает фотоэффект. Обозначим

скорость, с которой вылетит во внешнее пространство электрон, через v .

Его кинетическая энергия при этом, как известно, будет равна $\frac{mv^2}{2}$, где m масса электрона.

Итак электрон полученную энергию $h\nu$ израсходует отчасти на совершение работы A , отчасти на приобретение кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$. Согласно закону сохранения энергии мы должны иметь следующее равенство:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A. \quad (1)$$

В этом уравнении h , m — постоянные величины для всех тел. Величина A для данного тела есть величина тоже постоянная. Отсюда следует, что скорость вылета фотоэлектрона из данного тела зависит только от частоты колебаний светового луча ν , т. е. мы получили первый основной закон фотоэффекта.

Представим себе теперь, что частота колебаний ν имеет такую величину, что энергии светового кванта достаточно только для совершения работы при прохождении поверхностного слоя вещества. В этом случае мы имеем равенство:

$$h\nu_0 = A.$$

При частотах меньших чем ν_0 — фотоэффект наблюдаться не будет, т. е. должна существовать граница фотоэффекта. Граничной частотой в данном случае будет являться величина:

$$\nu_0 = \frac{A}{h},$$

а соответствующая граничная длина волны определится из равенства:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}.$$

Таким образом мы получили третий основной закон фотоэффекта.

Уравнение (1) носит название закона Эйнштейна.

Нетрудно получить и второй закон. Интенсивность светового луча будет очевидно пропорциональна числу световых квантов. Но этому же числу будет пропорционально число фотоэлектронов, т. е. число фотоэлектронов для данной волны света λ должно быть пропорционально интенсивности света, его яркости.

Мы видим, что все три закона в квантовой теории света получают крайне простое истолкование, в то время как волновая теория не в состоянии была справиться с решением этой задачи.

Измерения показывают, что число фотоэлектронов также зависит и от длины волны λ . В нормальном случае это число возрастает с уменьшением длины волны. Кривая, изображающая эту зависимость, называется кривой спектрального распределения фотоэффекта. Она имеет большое практическое значение. Разумеется зависимость эту нужно исследовать всегда при одной и той же интенсивности световых лучей, независимо от длины волны последних. В некоторых случаях эта кривая имеет максимумы, приходящиеся на лучи с определенными длинами волн. Последние таким образом являются наиболее активными в фотоэлектрическом отношении.

Описанный вид фотоэлектрического эффекта носит название внешнего фотоэффекта, ибо в этом случае электроны вырываются светом из данного вещества во внешнее пространство.

В таблице 5 мы приводим результаты измерений работы выхода электрона из ряда металлов и соответственно граничную длину волны. При этом во втором столбце указывается область наблюдаемых работ выхода. В некоторых случаях колебания довольно велики, что в значительной степени объясняется трудностью получить металл с чистой поверхностью.

Вследствие этого возможны большие ошибки опытов. Работа выхода дается здесь в вольтах. Если мы ее обозначим через V_0 , то очевидно:

$$V_0 = \frac{A}{e},$$

так как:

$$A = e V_0,$$

где e — заряд электрона. В большинстве случаев изменения в работе выхода вызываются даже небольшим изменением состояния поверхностного слоя.

Как показывает опыт, достаточно для этого покрыть основной металл тончайшей пленкой какого-либо вещества. Иногда это способствует очень сильному уменьшению работы

Таблица 5.

Измерения работы выхода электрона из ряда металлов.

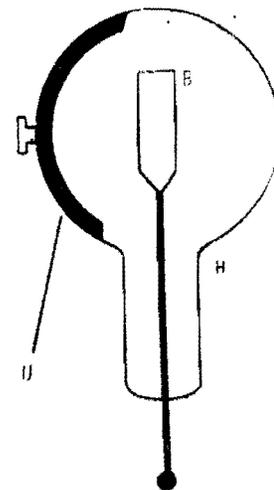
| Металл | Химический знак | Работа выхода в вольтах | Длина волны λ в μ м |
|----------|-----------------|-------------------------|---------------------------------|
| Литий | Li | 2,34 — 2,38 | 528 — 518 |
| Натрий | Na | 1,80 — 2,12 | 686 — 582 |
| Калий | K | 0,46 — 2,02 | 2680 — 611 |
| Рубидий | Rb | 1,2 — 1,45 | 1030 — 852 |
| Цезий | Cs | 0,7 — 1,36 | 1760 — 908 |
| Медь | Cu | 3,85 — 4,82 | 321 — 256 |
| Серебро | Ag | 3,09 — 4,71 | 399 — 262 |
| Золото | Au | 4,33 — 4,75 | 285 — 260 |
| Магний | Mg | 1,77 — 3,74 | 698 — 331 |
| Барий | Ba | 1,59 — 2,29 | 777 — 538 |
| Цинк | Zn | 3,02 — 4,10 | 408 — 301 |
| Кадмий | Cd | 2,60 — 4,05 | 475 — 305 |
| Ртуть | Hg | 4,05 — 4,75 | 305 — 260 |
| Алюминий | Al | 1,77 — 3,95 | 697 — 313 |
| Таллий | Tl | 3,43 | 360 |
| Торий | Th | 2,69 — 3,57 | 458 — 345 |
| Молибден | Mo | 3,22 — 4,33 | 383 — 285 |
| Селен | Se | 4,62 — 5,61 | 267 — 220 |
| Железо | Fe | 3,92 — 4,79 | 315 — 258 |
| Платина | Pt | 3,63 — 6,5 | 310 — 190 |

выхода электрона, а следовательно и повышению числа вылетающих фотоэлектронов.

Этот факт находит себе большое применение в технике и именно в тех случаях, когда желательно значительно увеличить число испускаемых электронов.

Остановимся сейчас немного на практических применениях фотоэффекта такого рода.

Практическое применение внешнего фотоэффекта находит себе место в так называемых фотоэлементах. Фотоэлемент имеет устройство, показанное на рис. 30. Стеклообразный баллончик H покрывают изнутри тонким слоем какого-либо светочувствительного металла. Особенно удобны для этой цели металлы натрий и калий, которые уже в области видимых лучей обладают достаточной чувствительностью. От этого слоя при помощи специального впая в стекло имеется вывод наружу. В центре же



баллончика помещается проволочная петля B , которая играет роль второго электрода. Если теперь соединить слой U с отрицательным полюсом батареи, а проволочную петлю B с положительным и пустить пучок света в наш баллончик, то в цепи появится фотоэлектрический ток, который при этом уже будет зависеть исключительно от яркости светового пучка и от состава его. В большинстве случаев воздух из баллончика A по возможности полностью удаляется при помощи насосов. Это делается для того, чтобы под действием воздуха не происходили какие-либо химические реакции в светочувствительном слое.

Достаточно указать на то, что небольшое окисление по-

Рис. 30. Схематический разрез вакуумного фотоэлемента.

H — стеклянный баллон, B — металлическая петля, U — металлический слой.

верхности этого слоя в состоянии уже значительно затруднить выход электронов наружу. Чувствительность фотоэлемента при этом сильно падает. В некоторых случаях баллончик *A* наполняют каким-либо инертным газом под небольшим давлением, т. е. таким газом, который не вступает в химическое взаимодействие с светочувствительным металлическим слоем. В первом случае фотоэлементы называются вакуумными, во втором — газонаполненными.

Фотоэлемент находит себе большое применение в тех случаях, когда необходимо световую энергию преобразовать в электрическую. Фотоэлемент — это своего рода электрический глаз. Он может быть назван так потому, что играет роль глаза, так как обладает способностью очень быстро и легко отзываться на действие света.

Легко представить себе важность того, что мы только что сказали.

В целом ряде случаев необходимо иметь приборы, регистрирующие с большой точностью изменения интенсивности, происходящие в световом потоке. Ясно, что для этой цели фотоэлемент является чрезвычайно удобным прибором. Можно токи, получающиеся при этом, усилить при помощи катодной лампы, а затем уже преобразовать их в настолько значительные, что делается возможной автоматическая запись их. Все изменения интенсивности в световом пучке можно при этом точнейшим образом обнаружить и измерить.

Фотоэлементы описанного типа нашли огромное применение в звуковом кино, радиотехнике, в той ее области, где она занимается передачей изображений на расстоянии, в различных автоматических и сигнализационных устройствах и т. д.

Для примера укажем роль фотоэлемента в звуковом кино.

Обычный кино-аппарат, как известно, фотографирует предметы так же, как и обыкновенный фотоаппарат. Отличие первого от второго заключается в том, что в нем возможно получать очень быстро следующие друг за другом фото-

снимки. Проблема параллельной записи звуков имеет огромное значение. Последние годы она была с успехом решена, благодаря широкому развитию радиотехники. Очевидно наша задача заключается в том, чтобы на той же пленке, на которой производится фотографирование предметов и людей, записать звуки с тем, чтобы при демонстрации кино-фильма возможно было снова воспроизвести все эти звуки. Фотоэлемент позволил это сделать.

Если при помощи микрофона преобразовать звуковую энергию в электрическую, то последнюю можно уже превратить в световую. Таким образом мы создадим световой пучок, колебания интенсивности которого будут в точности соответствовать тем звукам, которые были приняты микрофоном. Этот световой пучок можно направить на край кино-пленки, бегущей в аппарате во время съемки, и он оставит там свой след. Этим путем достигается запись звука на пленке. Но остается еще более сложная задача — воспроизведение этого звука. Вот здесь то и выступает на сцену фотоэлемент.

Если мы теперь уже во время демонстрации кино-фильма направим на край бегущей пленки световой луч от какого-нибудь яркого источника света, а затем после того, как он его пройдет, заставим наш луч падать на фотоэлемент, то благодаря изменениям в интенсивности луча, вызванным тем, что он будет проходить через различно зачерненные места, в электрической цепи фотоэлемента возникнет ток, который будет изменяться так же точно, как изменялся ток в цепи микрофона при съемке звука. Телефон в цепи фотоэлемента при этом воспроизведет первоначальные звуки. Включая несколько катодных ламп и усиливая будем при помощи громкоговорителя звуки передать всему залу. Вот и вся схема звукового кино.

При передаче изображений на расстояние тоже широко используется фотоэлемент.

Ведь и здесь основное — это преобразовать свет, исходя-

щий от объекта, в соответствующие электрические токи, а затем уже эти токи преобразовать снова в свет.

Недалеко то время, когда несколько фотоэлементов заменят на самолете глаз летчика, а небольшая антенна — его руки. Тогда из комнаты возможно будет управлять аппаратом и там же видеть то, что мы видели бы под собою, находясь на самолете во время его полета. Все это очень далеко от праздной фантазии. Ведь принципиально в лабораторной обстановке задача эта уже разрешена. Остается только разработка технических, конструктивных деталей.

Можно было бы привести еще много других примеров, показывающих огромную важность фотоэлементов для современной техники. Думается, однако, что сказанного достаточно для того, чтобы это осознать.

2. Внутренний фотоэффект.

Представим себе теперь, что мы имеем некоторое твердое тело, заключенное между двумя металлическими электродами. Допустим сначала, что это тело в нормальных условиях не проводит электрический ток, т. е. является изолятором или диэлектриком. В этом случае внутри тела не имеется свободных электронов или ионов, которые смогли бы принимать участие в переносе электричества. Если пронизать это тело световыми лучами, то, как показывает опыт, в целом ряде случаев можно наблюдать значительное повышение электропроводности. Это изменение электропроводности возникает под влиянием светового пучка и при прекращении действия последнего полностью исчезает. В качестве примера подобного рода изоляторов можно указать на кристаллы серы, кристаллы каменной соли (NaCl), предварительно освещенной рентгеновскими лучами и вследствие этого приобретшие коричневую окраску. В этих случаях обычный видимый свет в состоянии в миллионы раз увеличить электропроводность кристаллов. Последние при этом разумеется теряют уже в значительной мере свои изоляционные свойства. Можно было

бы указать на целый ряд других изоляторов, обладающих тем же свойством. Особенно активны в этом отношении рентгеновы лучи, под действием которых почти все изоляторы увеличивают свою электропроводность. Хотя здесь же нужно оговориться, что это в особенности относится к телам кристаллическим. В целом ряде аморфных тел указанный выше эффект повидимому не наблюдается. Перейдем теперь к объяснению описанных явлений.

В изоляторах, как мы видели выше, все электроны довольно прочно связаны с атомами, чем и обусловлена их ничтожная электропроводность. Под действием проходящего света некоторые из электронов, поглощая какой-либо из пролетающих световых квант $h\nu$, могут приобрести настолько значительную энергию, что последней делается достаточно для вырывания этих электронов из атомов. Роль света таким образом заключается в освобождении из атомов электронов. В электрическом поле, созданном внутри изолятора, эти электроны начинают двигаться в направлении действия электрических сил, т. е. через изолятор потечет электрический ток. Если вероятность срыва электрона из атома будет достаточно большой, то электропроводность может возрасти во много тысяч раз. В кристаллических телах, возможно в силу правильности расположения в них атомов, эти освобожденные электроны могут проходить относительно большие пути до тех пор, пока какой-либо из атомов не присоединит их к себе. Этот путь для большинства из изоляторов имеет величину порядка 10^{-6} см. Для аморфных тел, в которых атомы беспорядочно расположены в пространстве, этот пробег электрона повидимому настолько незначителен, что эффекта увеличения электропроводности под действием света невозможно обнаружить. В этом случае освобожденный светом электрон, пройдя незначительный путь, «прилипнет» к какому-либо атому, окончив тем самым свое существование, как фотоэлектрон. Возможно, что этим и объясняется отсутствие увеличения электропроводности аморфных тел под дей-

ствием света. Таков общий вид механизма описанных явлений.

Легко сообразить, что в этом случае мы имеем дело с обычным, известным из предыдущего, фотоэлектрическим эффектом. Различие между описанными двумя явлениями лишь в том, что в первом случае электроны вырываются светом из вещества наружу, а во втором они освободились внутри его.

Этот вид фотоэффекта в отличие от внешнего называется внутренним фотоэффектом.

Внутренний фотоэффект также характеризуется определенной кривой спектрального распределения с максимумом, соответствующим некоторой характерной для данного вещества длине волны. В этом случае также фотоэффект начинается лишь с определенной граничной длины волны λ , зависящей от природы вещества. Рентгеновские лучи способны почти во всех веществах вызывать внутренний фотоэффект в силу того, что длина волны их значительно меньше соответствующих граничных длин волн. Наличие граничной длины волны λ_0 или, что то же самое, порога внутреннего фотоэффекта, обусловлено вполне определенной величиной той работы, которую нужно совершить при отрывании электрона от атома. Если эта работа больше энергии светового кванта $h\nu$, то электрон лишь поднимется внутри атома на некоторую высоту, но не уйдет из сферы действия его притягательных сил.

Описанный вид фотоэффекта наблюдается не только в изоляторах. Целый ряд полупроводников под действием света увеличивают свою электропроводность. В них явления протекают аналогично вышеописанным. Различие лишь в том, что изменение электропроводности полупроводников при освещении их относительно электропроводности в темноте не столь велико, как в случае изоляторов. Но это делается понятным, если мы вспомним, что темновая их электропроводность в некоторых случаях бывает довольно значительной.

В качестве примеров такого рода полупроводников можно указать на закись меди (Cu_2O), серый кристаллический селен (Se), сернистый цинк (ZnS) и целый ряд других кристаллических соединений металлов с кислородом или с серой. В некоторых случаях порог внутреннего фотоэффекта лежит в далекой инфракрасной части спектра. Такова например закись меди.

Необходимо еще в заключение отметить, что в некоторых полупроводниках, как например в селене, первичный процесс вырывания электронов осложняется вероятно вторичными явлениями, связанными уже с продвижением этих электронов. Благодаря этим вторичным явлениям картина очень сильно запутывается. При прекращении освещения фотоэлектрический ток не сразу падает до нуля, при начале же освещения фототок не сразу устанавливается. Короче говоря наблюдается некоторое запаздывание явления. Образец обладает при этом своего рода инерцией. Типичным представителем подобных веществ служит селен. Это его свойство, как будет видно ниже, очень часто кладет предел применимости его в технике.

На этом мы закончим свое общее ознакомление с внешним и внутренним фотоэффектом и перейдем к третьему виду фотоэффекта, открытому совсем недавно и представляющему в данное время особенно большой для нас интерес.

3. Вентильный фотоэффект.

Несколько лет тому назад физике сделался известным новый вид фотоэлектрического эффекта, отличный по своим свойствам от внешнего и внутреннего, рассмотренных в предыдущих параграфах. Этот третий вид фотоэффекта получил название фотоэффекта в запорном слое или иначе вентильного фотоэффекта. Название свое он получил в силу того, что он имеет место, как показали экспериментальные исследования, на границе соприкосновения двух

гел. Именно в том случае, когда между двумя соприкасающимися телами существует очень тонкий зазор или же прослойка плохопроводящего вещества, и может возникнуть фотоэффект этого рода. Роль этого переходного слоя очевидно должна заключаться в задерживании свободного обмена электронами, принадлежащими соприкасающимся телам.

Опыты с несомненностью показали, что выпрямление, о котором выше уже шла речь, и вентильный фотоэффект тесно связаны друг с другом. Наличие фотоэффекта почти во всех случаях связано также и с существованием униполярной проводимости. Таким образом, можно утверждать, что тот переходный слой, о свойствах которого мы говорили в главе о твердых выпрямителях, играет основную роль и в фотоэлектрическом эффекте этого рода.

Правда, исследования последнего времени показывают, что в некоторых случаях вентильный фотоэффект существует и в отсутствии выпрямления. Повидимому это объясняется тем, что при этом сопротивление запирающего слоя невелико, в силу чего отсутствует и асимметрия тока.

Таким образом эти факты не противоречат нашим общим установкам.

Таким образом эти факты не противоречат нашим общим установкам.

Впервые этот вопрос получил свое развитие после появления в свет работы немецкого физика Ланге в 1930 г.

Ланге показал, что если на тонкий слой закиси меди, напущенный на последней уже известным нам способом, нанести полупрозрачный металлический электрод и замкнуть полученную таким образом систему через гальванометр, то при освещении ее в цепи возникает некоторый электрический ток. Схема Ланге изображена на рис. 31. Здесь F — си-

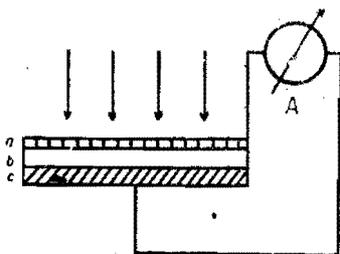


Рис. 31.

стема, состоящая из меди (Cu), закиси меди (Cu_2O) и полупрозрачного металлического электрода a, A — гальванометр не слишком высокой чувствительности. Стрелки указывают направление распространения света. В этом случае, как показывает опыт, электрический ток идет в направлении от верхнего электрода к нижнему. Движение электронов должно быть обратно направлению тока, так как они несут отрицательные заряды. Последнее говорит нам о том, что в указанном опыте электроны под действием света переходят из закиси меди в нижний медный электрод. Эта же система при включении в цепь какого-либо источника электрического тока обладает выпрямляющей способностью. Максимальный ток проходит в том случае, когда на нижний электрод подан отрицательный потенциал. Все это говорит ясно о том, что запирающий или переходный слой находится у нижнего электрода.

Самым замечательным во всем этом явлении есть бесспорно тот факт, что система обладает под действием света собственной электродвижущей силой, т. е. является источником электрического тока. Такого рода фотоэлемент, который ниже мы будем называть вентильным фотоэлементом, даст нам возможность непосредственным образом превращать световую энергию в электрическую.

Те же опыты показали, что действие вентильного фотоэлемента из закиси меди (Cu_2O) не ограничивается только областью видимого света. Фотоэффект оставался довольно значительным также и при освещении его инфракрасными, т. е. невидимыми, лучами. Порог фотоэффекта лежал при этом около $\lambda = 1,5$ микрона (μ).

Любопытно отметить здесь также тот факт, что Ланге свое открытие сделал при работе над изучением кристаллических детекторов, находящихся себе столь большое применение в радиотехнике. Изучая их характеристики, он заметил, что под действием света ход характеристики изменяется. Она смещается вниз. Таким образом она уже проходит не через на-

чало координат, а ниже, что говорит о существовании при нулевой разности потенциалов на детекторе некоторой дополнительной разности потенциалов, обусловленной действием света. Заинтересовавшись этим вопросом, Ланге подверг его серьезному изучению. В качестве образца детектора он взял также и купроксный выпрямитель и получил с ним те замечательные результаты, о которых было сказано выше.

Вскоре после открытия Ланге были описаны вентиляльные селеновые фотоэлементы. Оказалось, что если обычный селеновый выпрямитель сделать с верхним полупрозрачным металлическим электродом, то при освещении его он также способен давать электродвижущую силу, а следовательно и ток в замкнутой цепи. Только в этом случае направление тока всегда идет от нижнего электрода к верхнему во внешней цепи. Это говорит нам о том, что электроны под действием света вырываются из селена в верхний электрод, который в силу этого приобретает отрицательный электрический заряд. Итак запорный слой находится в этом случае сверху. Правда, это не исключает возможности существования такового и внизу, но там не будет получаться фототока, ибо свет не может пройти даже через тонкий слой селена в силу его непрозрачности. Поэтому активен в фотоэлектрическом отношении может быть лишь верхний запорный слой. Что касается выпрямления тока системой, то оно может происходить и на границе селена с нижним электродом. Все это повидимому будет определяться соотношением между нижним и верхним запорными слоями.

Многочисленные опыты показали, что не только закись меди и селен обладают свойством образовывать вентиляльные фотоэлементы, но и целый ряд других полупроводников могут им обладать. Известен, например, карборундовый вентиляльный фотоэлемент (Лосев), сернистосвинцовый (PbS) и целый ряд других. Но последние имеют пока еще неболь-

шое практическое применение и поэтому о них мы распространяться в дальнейшем не будем.

Необходимо еще указать на существование, в случае закиси меди, двух сортов вентиляльного фотоэффекта. Описанный уже Ланге вид вентиляльного фотоэффекта, происходящего у заднего электрода, носит название тылового фотоэффекта. Возможна также конструкция такого меднозакисного вентиляльного фотоэлемента, который при освещении дает ток обратного направления. В этом случае электроны под действием света переходят из закиси меди в верхний электрод. Такой вид фотоэффекта у переднего электрода называется фронтальным фотоэффектом. Он возможен очевидно в тех случаях, когда запорный слой, благодаря создавшимся условиям опыта, возникает на границе между закисью меди и верхним электродом. Фотоэлементы с фронтальным эффектом обладают обычно большей чувствительностью, что обуславливается тем обстоятельством, что в этом случае свету для того, чтобы достигнуть запорного слоя, не нужно проходить через весь слой закиси меди, а последний сильно ослабляет его вследствие поглощения.

Все эти опыты убедительно говорят за то, что описанный вид фотоэффекта является чисто электронным по своей природе, ибо никаких химических изменений при этом не наблюдается.

Какова же природа запорного слоя? Об этом мы уже говорили в главе о твердых выпрямителях. Все же напомним, что все опыты, известные нам и в области изучения вентиляльного фотоэффекта, говорят в пользу следующего предположения. Запорный слой представляет собою тонкую (порядка 10^{-6} см) прослойку бедной примесями закиси меди. В силу этого она обладает большим сопротивлением по сравнению с обычно употребляемой закисью меди.

Рассмотрим теперь вкратце теоретическую схему действия вентиляльного фотоэлемента. В физике давно встречались исследования, которые показывали, что вероятность вы-

рывания электронов из полупроводников больше, чем из металлов. Это означает, что одному и тому же количеству световых квант соответствует в случае полупроводников большее количество фотоэлектронов, чем в случае металлических тел. При освещении вентильного фотоэлемента благодаря указанному обстоятельству из полупроводника в металл будет итти больше электронов, чем из металла в полупроводники. Если на границе их соприкосновения имеется тонкий плохопроводящий слой, толщина которого такова, что через него могут относительно свободно проскакивать фотоэлектроны, то металл будет вследствие асимметрии электронного потока заряжаться отрицательно, а полупроводник положительно. Благодаря существованию переходного слоя на границе возникает скачок потенциала, который и будет во внешней цепи давать нам электрический ток.

Имеющиеся экспериментальные данные повидимому хорошо подтверждают справедливость этой точки зрения на природу вентильного фотоэффекта, хотя все же нельзя считать этот вопрос вполне выясненным.

Из сказанного ясно, что природа полупроводника, запирающего слоя и металла и в этом случае не должны играть существенной роли. До сих пор нам приходится к сожалению иметь дело с запирающими слоями, возникающими в естественных условиях. Между тем крайне интересно и важно было бы создать искусственный запирающий слой на границе металла и полупроводника с известными нам, заданными наперед, свойствами. Такие искусственные вентильные фотоэлементы сильно помогли бы нам разобраться в механизме всех этих явлений и, возможно, предоставили бы нам больше возможностей применения его для тех или иных практических целей. Такого рода попытки уже делаются и вероятно недалеко то время, когда мы получим определенные ответы на интересующие нас вопросы. Конечно, трудно утверждать, что все высказанные выше соображения правильны. Слишком недостаточным количеством экспериментального материала мы

располагаем на сегодняшний день. Здесь нужно еще сделать многое и многое для того, чтобы внести ясность в наши представления. Ниже мы и рассмотрим этот материал в объеме, допускаемом объемом настоящей книги. Но и сказанного уже здесь в столь общих чертах достаточно, чтобы заинтересоваться этими новыми физическими явлениями и подумать о возможностях их использования в науке и технике. В настоящее время, когда проблема превращения одного вида энергии в другой, проблема автоматизации и сигнализации, поставлена на одном из первых мест второго пятилетнего плана развития народного хозяйства Советского Союза, все эти вопросы приобретают особенную остроту. Вентильный фотоэлемент дешев, прост по своей конструкции и обладает кроме того еще рядом других преимуществ по сравнению с вакуумными фотоэлементами.

Имеется конечно и ряд недостатков. Но нужно подумать и выработать такую их конструкцию, которая являлась бы наиболее выгодной.

Перейдем теперь к описанию техники изготовления вентильных фотоэлементов.

4. Техника изготовления вентильных фотоэлементов.

В этом параграфе мы рассмотрим методику изготовления вентильных меднозакисных и селеновых фотоэлементов.

Наиболее существенной частью вентильного фотоэлемента является верхний полупрозрачный металлический электрод, получение которого иногда связано с большими экспериментальными затруднениями. Важность его роли вытекает как из того, что через него должен проходить свет определенного спектрального состава, так и из того, что в случае фронтального эффекта в условиях нанесения этого электрода на границе его с полупроводником должен образоваться запирающий слой, обеспечивающий получение сильно выраженного фотоэффекта.

Изготовление вентиляльных фотоэлементов в остальном мало чем отличается от изготовления твердых выпрямителей.

Исходным материалом для изготовления вентиляльных меднозакисных и селеновых фотоэлементов служит в одном случае медь с наросшим на ней слоем закиси меди, а в другом — металлическая подкладка со слоем металлического, кристаллического селена, полученного путем температурной обработки, уже описанной выше.

Как уже говорилось выше, вентиляльный фотоэлемент представляет собой одну из двух систем: металл — полупроводник — запорный слой — полупрозрачный электрод (в случае фронтového фотоэффекта), либо металл — запорный слой — полупроводник — полупрозрачный электрод (в случае тылового фотоэффекта). И в том, и в другом случае наиболее существенную роль играет верхний полупрозрачный электрод.

Полупрозрачный металлический слой лучше всего можно получить двумя способами: испарением металла в вакууме или катодным распылением. Кроме того возможно также получение этого слоя электролитическим путем или же, наконец путем восстановления меди

в виде тонкого слоя на пластинке закиси меди. Мы последовательно познакомимся с этими методами.

Нанесение металлических электродов путем испарения металла производится в хорошем вакууме порядка 10^{-5} мм ртутного столба. В стеклянном приборе (рис. 32) на стеклян-

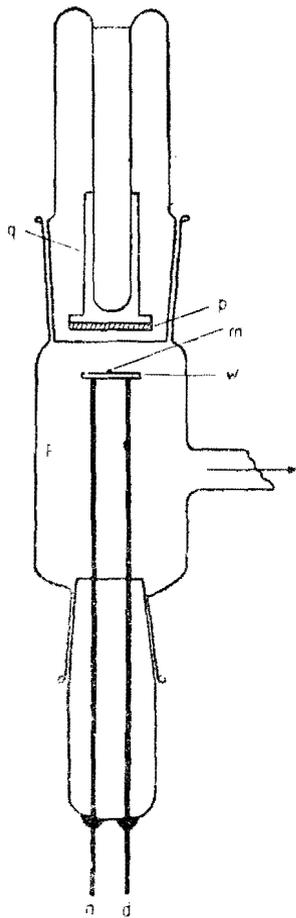


Рис. 32. Схема действия вентиляльного фотоэлемента по Ланге.

Р — стеклянный сосуд с двумя шлифами, *q* — металлическая втулка для крепления образца, одета на стеклянный палец, *р* — образец, *т* — испаряемый металл, *ш* — молибденовый или вольфрамовый желобок, *nd* — выводы к напряжению.

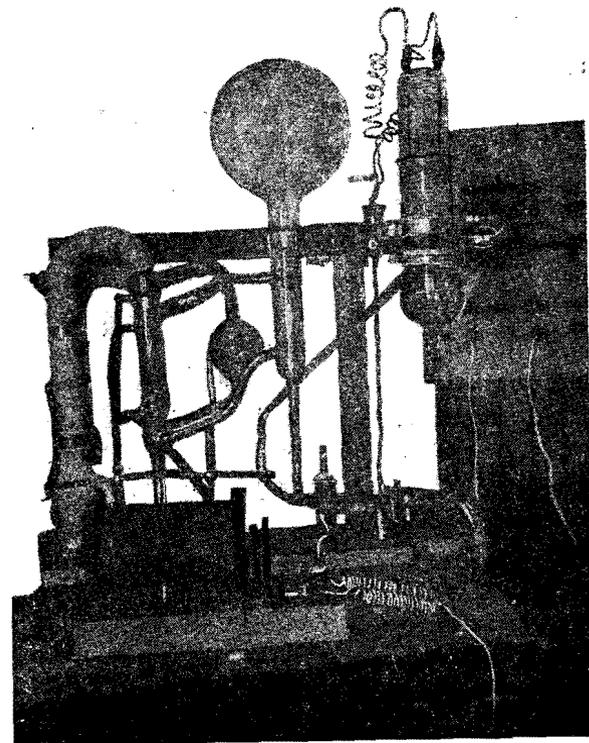


Рис. 33. Общий вид установки для испарения металла в вакууме.

ном пальце, охлаждаемом жидким воздухом, укрепляется фотоэлемент. Снизу, на стеклянном шлифе, вставляется электрическая печька в виде вольфрамового или молибденового

желобка, в котором помещается испаряемый металл. После того как показания манометра указывают на то, что в приборе достигнуто желаемое разрежение, включают электрическую печь, температуру которой можно регулировать включенным в цепь реостатом. Металл начинает плавиться и пары его конденсируются на холодной поверхности фотоэлемента в виде тонкого металлического слоя. Толщина этого слоя зависит от времени, в течение которого производилось испарение. Конечно, существенную роль при этом играет расстояние от фотоэлемента до печи, но его обычно выбирают постоянным при всех опытах.

На рис. 33 показан общий вид установки по испарению металлов в вакууме. На рисунке справа виден прибор, чертеж которого представлен на рис. 32. Слева видны стеклянные насосы Лангмуира. На переднем плане видна небольшая катушка Румкорфа, служащая для испытания вакуума в системе.

Нужно заметить, что, как показали многочисленные опыты, при нанесении верхнего электрода методом испарения металла в вакууме на границе его с полупроводником не образуется запорный слой. Таким образом этим способом очень удобно пользоваться лишь в тех случаях, когда запорный слой создан уже предварительной обработкой системы на границе нижнего электрода, т. е. в этом случае мы можем получить по видимому лишь тыловой фотоэффект.

Хотя нельзя не упомянуть также и о том, что в некоторых отдельных случаях получение слабо выраженного фронтального эффекта возможно даже и при использовании этого метода.

Другим методом получения хорошего верхнего электрода является метод катодного распыления, которым чаще всего и пользуются.

Давно известно, что в катодных трубках при ударах положительных ионов о катод из последнего вылетают не только электроны, но и нейтральные, т. е. незаряженные

атомы того металла, из которого сделан катод. Некоторые металлы особенно легко при этом отдают свои атомы. Таким образом с течением времени катод разрушается, так как вылетание атомов связано с расходом вещества, в противоположность вылетанию электронов, циркулирующих в электрической цепи.

Этот процесс носит название катодного распыления.

Установка, в которой путем катодного распыления наносится полупрозрачные слои металла, имеет следующий вид (рис. 34). К стеклянному диску *S* пришлифовывается стеклянный колокол *C*, соединенный с системой ртутных насосов. Особая регулирующая система, при помощи кранов, дает возможность изменять степень разрежения газа под колоколом. В стеклянном диске *S* имеются три отверстия. Через одно из них (*B*) производится откачка воздуха, заключенного под колоколом, а два других служат для закрепления металлического столика *N*, на котором помещается фотоэлемент, и стойки *P*, на которой висит распыляемый металл. Столик *N* устроен таким образом, что его можно поднимать и опускать по желанию, меняя тем самым расстояние от распыляемого металла до фотоэлемента. Для того, чтобы распылению подвергался только данный металл, металлическую стойку *P* по-

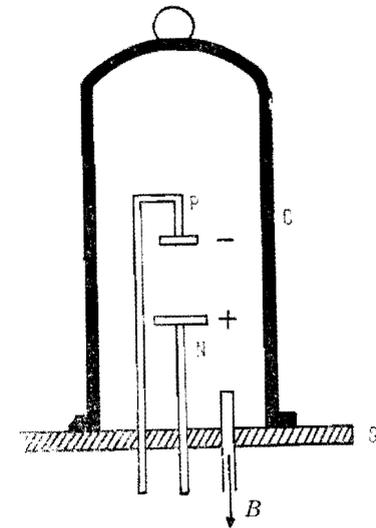


Рис. 34. Установка для катодного распыления металлов.

C — стеклянный колокол, *S* — стеклянная доска, *N* — столик для фотоэлемента, *P* — стойка с распыляемым металлом. Откачка колокола производится по направлению, указанному стрелкой.

мещают в стеклянной трубке. Этим устраняется возможность распыления металла, из которого делается стойка *P*. Вводные отверстия тщательно замазываются вакуумным сургучом или пастой, для того чтобы исключить течь газа.

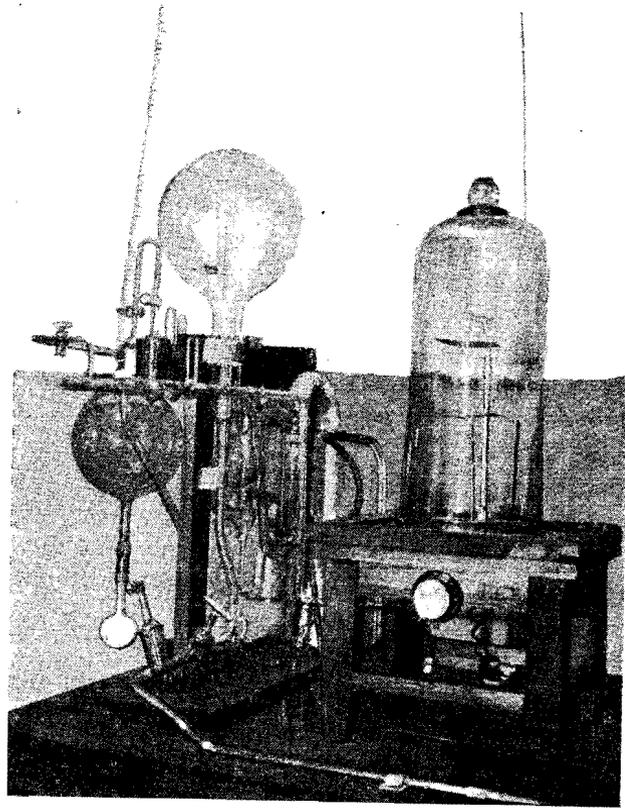


Рис. 34а. Общий вид установки для катодного распыления.

На рис. 34а показан общий вид установки для получения тонких металлических слоев путем катодного распыления. На нем справа виден стеклянный колокол, изображенный схематически на рис. 34. Слева видна система ртутных насосов

Лангмуира с приспособлением для получения водорода.

Между распыляемым металлом и фотоэлементом создается разность потенциалов по схеме, указанной на рис. 35. При этом на распыляемый металл подается отрицательное напряжение, ибо он должен служить катодом. Перейдем теперь к описанию схемы включения. Один полюс вторичной цепи трансформатора, служащего источником напряжения, заземляют, другой полюс подается к катоду кенотрона, анод которого уже соединяется со стойкой *P* (см. рис. 34). Сто-

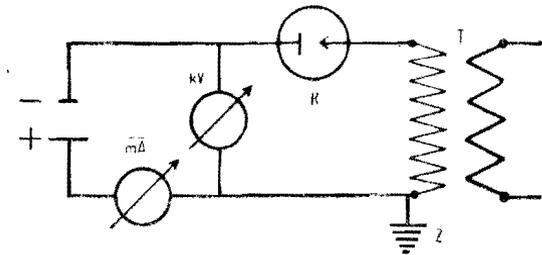


Рис. 35. Схема высоковольтной установки для катодного распыления. *T* — высоковольтный трансформатор, *K* — кенотрон, *kV* — электростатический киловольтметр, *mA* — миллиамперметр, *Z* — заземление.

лик *N* соединяется через миллиамперметр с землей. Между стойкой *P* и столиком *N* можно включить киловольтметр для измерения напряжения, прикладываемого к нашему аппарату. Миллиамперметр служит для измерения силы тока, протекающего через систему.

Под действием сил электрического поля положительные ионы, ударяясь о катод, будут выбивать из последнего атомы, которые в виде тонкого металлического слоя начнут садиться на поверхность нашего фотоэлемента. Толщина слоя распыленного металла зависит от расстояния столика *A* до катода, от продолжительности распыления и от силы проходящего в цепи тока. Наилучший режим для получения хороших слоев

металла создается при напряжении 1500 вольт и силе тока 25—40 миллиампер. При этом сила тока в цепи регулируется изменением степени разряжения газа под колоколом. Чем больше степень разрежения, тем меньше сила тока, протекающего в цепи.

Очень часто, об этом будет сказано ниже, распыление производят в разреженной атмосфере водорода. Для этого в установке имеется дополнительное устройство, изображенное на рис. 36. В изогнутой трубке, в которую вляяны два электрода, находится раствор едкого кали (KOH), через который пропускается электрический ток. Во время электролиза пузырьки водорода собираются в конце трубки у крана *N*. Весь остальной объем вакуумной системы предварительно откачивается до полного разрежения. Затем, поворачивая кран *N*, подводят жидкость до отверстия крана, вытесняя тем самым водород. Далее водород осушается при прохождении через хлористый кальций (CaCl_2) и поступает в колбу *M*, тщательно осушаемую фосфорным ангидридом *G* (P_2O_5). В колбе *M* образуется при этом запас водорода, которым отсюда уже можно заполнить пространство под колоколом, поворачивая кран *Q*. Остальные операции те же, что и в случае воздуха.

Преимущество катодного распыления перед испарением заключается в том, что при помощи его возможно получение вентиляльных купроксных фотоэлементов с фронтным эффектом. Последний же является более выгодным из-за большей своей величины. Таким образом можно сказать, что даже при отсутствии запорного слоя у нижнего электрода под действием бомбардировки верхнего слоя закиси меди атомами и электронами может возникнуть у верхнего электрода новый запорный слой достаточной силы. Вероятно при этом происходит очистка тончайшего слоя закиси меди от примесей, что неминуемо должно привести к возникновению запорного слоя согласно развитым выше соображениям. Рекомендуется перед нанесением верхнего электрода катодным распылением

протравить поверхность закиси меди азотной кислотой определенной концентрации. С селеновыми вентиляльными фотоэлементами повидимому происходит то же самое. В качестве

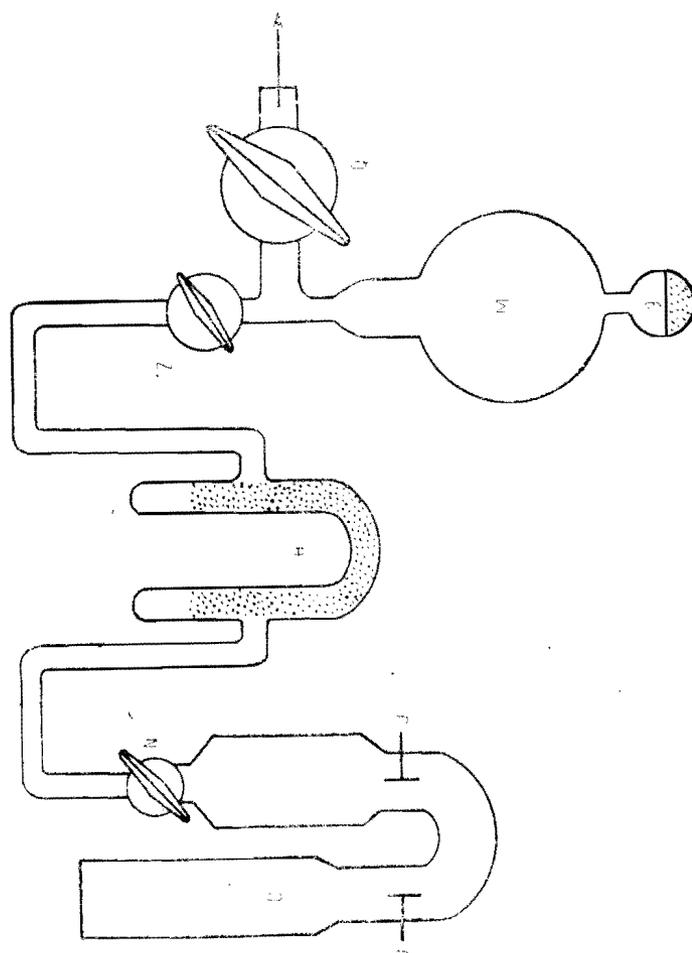


Рис. 36. Схема установки для получения водорода. *O* — электролизер с KOH, *JJ* — никелевые электроды, *N, Z, Q* — вакуумные стеклянные краны, *H* — сушилка с хлористым кальцием, *M* — объем, в котором скопится водород, *N* — сушилка с пятиокисью фосфора. Установка соединяется с колоколом по направлению, указанному стрелкой.

материала верхнего электрода меднозакисных фотоэлементов можно пользоваться любым металлом: серебром, платиной, золотом и другими. Для получения хороших селеновых

фотоэлементов следует пользоваться каким-либо благородным металлом (золото, платина), ибо все остальные металлы дают химическое соединение с селеном, вследствие чего чувствительность таких фотоэлементов может со временем очень быстро падать.

Вообще нужно отметить, что до сих пор еще не удалось добиться получения меднозакисных вентильных фотоэлементов с фронтным фотоэффектом, которые обладали бы большим постоянством. Чувствительность их со временем довольно быстро падает, что вызывается вероятно постепенным увеличением электропроводности запорного слоя. Добиться лучших результатов в этом отношении есть одна из основных задач эксперимента в этой области.

Удачными оказались опыты получения запорного слоя на закиси меди путем бомбардировки ее ионами определенных газов. Некоторые газы дают особенно хорошие результаты.

В этом направлении работают теперь многие исследователи.

Другой способ получения верхнего полупрозрачного электрода на закиси меди для фотоэлементов с тыловым фотоэффектом есть метод электролитический. В этом случае, как уже говорилось при описании методики получения выпрямителей, на закиси меди в результате электролиза медноаммиачной соли образуется тончайшая медная сетка, возникающая, как это хорошо видно под микроскопом, на границах соприкосновения отдельных кристаллов закиси меди. Подобрать определенную плотность тока и время его прохождения через электролит, возможно получение прекрасной медной сетки. Но можно повторить, что в этом случае получаются фотоэлементы только с тыловым эффектом, т. е. нужно быть уверенным, что у нижнего электрода существует уже запорный слой.

Аналогично можно получить на закиси меди серебряную сетку. Для этого берут раствор азотнокислого серебра.

Полученные таким образом фотоэлементы помещают часто в вакуированную трубочку для предохранения их от порчи от влияния кислорода воздуха. Этой же цели можно достигнуть, покрывая фотоэлемент каким-либо прозрачным лаком.

В заключение еще укажем на следующий метод получения меднозакисных фотоэлементов. Пластинка меди с образовавшимся на ней тонким слоем закиси прямо из печи выбрасывается в раствор глицерина в воде. При этом происходит восстановление меди. Последняя при соответствующей концентрации глицерина может представлять собой тонкий полупрозрачный слой. Такие фотоэлементы обладают довольно хорошей чувствительностью и показывают всегда фронтный фотоэффект, т. е. и в этом случае запорный слой возникает у верхнего электрода из восстановленной меди.

Сообщенных здесь сведений достаточно для того, чтобы составить себе ясную картину методики получения вентильных фотоэлементов из закиси меди и селена. Будем следовательно помнить, что в случае закиси меди в зависимости от метода нанесения верхнего электрода мы можем получить и фронтный и тыловый фотоэффект. Селен же всегда дает фронтный эффект в силу своей непрозрачности.

Теперь мы перейдем к описанию физических свойств этих фотоэлементов, а также к описанию методики измерения фотоэлектрических токов и фотоэлектродвижущих сил.

5. Методика измерения фототоков и фотоэлектродвижущих сил.

Фотоэлектрические токи купроксных и селеновых фотоэлементов обычно бывают порядка 10^{-3} — 10^{-7} ампера. Величина этого тока разумеется очень сильно зависит от размеров фотоэлемента (его освещаемой поверхности) и от интенсивности света. Кроме того играет большую роль также и спектральный состав излучения. О закономерностях, наблю-

дающихся в этих случаях, речь будет идти ниже, здесь же мы должны плавным образом коснуться вопроса о методике измерения фототоков. Что касается фотоэлектродвижущих сил, то в зависимости от способа изготовления фотоэлементов и интенсивности света они также колеблются в довольно широком интервале. Максимальные значения их, полученные в самое недавнее время в ряде лабораторий, составляют несколько десятых вольта (для купроксных $\varphi = 0,4$ вольта, для селеновых $\varphi = 0,24$ вольта). Вообще же говоря в подавляющем большинстве мы имеем дело с величинами порядка нескольких сотых вольта.

Отсюда мы ясно видим, что как фототоки, так и фотоэлектродвижущие силы в вентильных фотоэлементах не настолько малы, чтобы при этом необходимо было пользоваться приборами особенно высокой чувствительности. При помощи хорошего зеркального гальванометра, шунтируя его, мы в состоянии измерять с большой точностью фототоки. В некоторых случаях для этой цели можно пользоваться стрелочным прибором (пруффером и даже миллиамперметром). Величина тока зависит от сопротивления цепи, следовательно выгоднее пользоваться приборами с малым внутренним сопротивлением. Зная силу тока и сопротивление, нетрудно по формуле Ома вычислить и фотоэлектродвижущую силу. В некоторых случаях важно знать электродвижущую силу разомкнутого фотоэлемента. Для этой цели удобно пользоваться струнным или квадрантным электрометрами. Струнный электрометр состоит из тонкой ($d = 2-3$ микрона) металлической нити, натянутой между двумя металлическими же ножами, между которыми создается разность потенциалов определенной величины. Если мы теперь соединим один электрод фотоэлемента с нитью, а другой с землей, то нить, которую можно наблюдать в микроскоп, отойдет на определенное число делений. Проградуировав предварительно электрометр, нетрудно на основании этого найти электродвижущую силу разомкнутого фотоэлемента. На рис. 37 показана общая схема. Здесь H —

батарея, оба полюса которой соединены с ножами электрометра CC . Средняя точка батареи заземлена; r и r_1 — большие сопротивления, играющие роль предохранителей нити от сгорания, могущего возникнуть при прикосновении ее к одному из ножей; N — металлический кожух электрометра, соединенный с землей для защиты его от внешних электри-

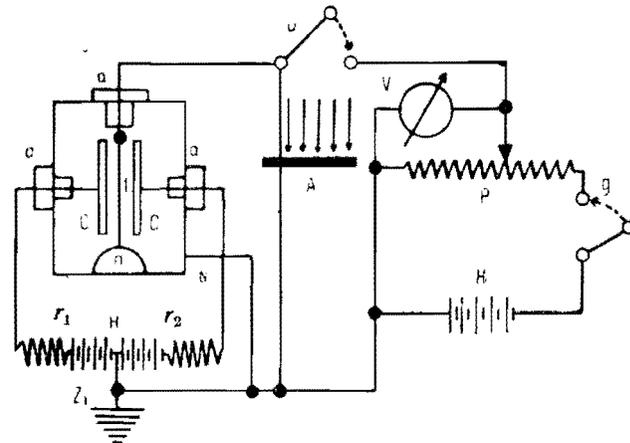


Рис. 37. Схема для измерения фотоэлектродвижущей силы разомкнутого фотоэлемента. a, a, a — янтари электрометра, C, C — ножи электрометра, f — нить электрометра, n — кварцевая дужка, r, r_1 — предохранительные сопротивления (порядка 10^6), H — батарея аккумуляторов, Z — заземление, u — ключ, A — исследуемый фотоэлемент, V — вольтметр, P — потенциометр, g — ключ, H — батарея аккумуляторов для градуировки электрометра. Свет падает по направлению, указанному стрелками.

ческих полей; n — кварцевая дужка, держащая нить в натянутом состоянии; f — нить, обычно сделанная из платины; a — янтарные изоляторы; A — фотоэлемент. Схема, помещенная сбоку и состоящая из батареи H , потенциометра P , вольтметра V и выключателей u и g , служит для градуировки электрометра. При помощи ее мы можем на нить подать известные нам потенциалы и таким путем определить цену каждого деления шкалы, находящейся в окуляре микроскопа.

Все остальное ясно без пояснений. Разумеется можно было бы показать еще большее количество других схем, но думается, что это излишне. Показанная схема является типичной для них.

На рис. 38 дана схема измерения фототоков. Здесь G — измерительный прибор (зеркальный гальванометр, прюффер, миллиамперметр), U — шунт к нему, B — фотоэлемент, W — добавочное сопротивление, K — выключатель, C — источник света, L — линза, дающая параллельный пучок лучей, и F — водяной фильтр. Последний при производстве опытов берется для того, чтобы

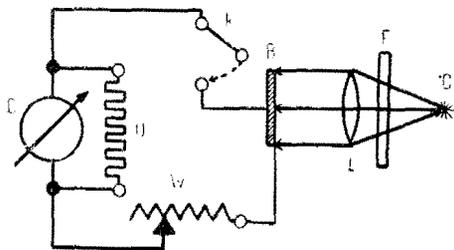


Рис. 38. Гальванометрическая схема для измерения фототоков. C — источник света, F — водяной фильтр, L — линза, B — исследуемый фотоэлемент, K — ключ, W — реостат, U — шунт к гальванометру, G — гальванометр.

свойством обладает вода. Неприятности, к которым может привести нагревание фотоэлемента, заключаются в следующем. Во-первых, при нагревании в цепи могут возникнуть термоэлектрические токи, которые, наложившись на фототоки, совершенно исказят результаты, и, во-вторых, при нагревании фотоэлемента изменяется его сопротивление, в силу чего фотоэлектрическое свойство его также изменяется. При сильном нагревании в нем могут даже возникнуть необратимые изменения в сторону уменьшения его чувствительности к свету.

Все же нужно еще раз заметить, что в некоторых случаях фототоки имеют столь большие значения, что их возможно измерять значительно более грубыми приборами, чем зеркальные гальванометры.

6. Фотоэлектрическая характеристика вентильного фотоэлемента.

Для изучения свойств данного вентильного фотоэлемента весьма важной является так называемая фотоэлектрическая характеристика его. Последняя представляет собой зависимость силы фотоэлектрического тока вентильного фотоэлемента от падения потенциала во внешней цепи его.

Если внутреннее сопротивление фотоэлемента мы обозначим через R_1 , а внешнее через R_2 , то сила фототока I на основании закона Ома выразится следующим образом:

$$I = \frac{\varphi}{R_1 + R_2},$$

где φ — фотоэлектродвижущая сила фотоэлемента.

Из уравнения можно написать:

$$\varphi = IR_1 + IR_2$$

или

$$IR_1 = \varphi - IR_2,$$

откуда

$$I = \frac{\varphi}{R_1} - \frac{IR_2}{R_1},$$

но $IR_2 = V$ — падение потенциала во внешней цепи. Таким образом:

$$I = \frac{\varphi}{R_1} - \frac{V}{R_1},$$

Предполагая независимость R_1 и φ от V , мы должны получить при графическом изображении зависимости I от V

прямую линию. При этом тангенс угла наклона этой прямой к одной из координатных осей (на которой откладываются значения $V = IR_2$) должен быть равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_1}.$$

Определяя на опыте угол α по графику, можно на основании последней формулы вычислить внутреннее сопротивление фотоэлемента R_1 .

Кроме того, отрезок, который делает наша прямая на оси ординат, $\frac{e}{R_1}$, дает нам фотоэлектродвижущую силу разомкнутого фотоэлемента. Из сказанного ясно, насколько ценно для нас знание подобной характеристики вентиляльного фотоэлемента.

Теперь познакомимся вкратце с тем, что показывают непосредственные измерения.

Схема опыта при этом обычная и не нуждается в подробном толковании.

Опыты показывают, что при некоторых интенсивностях света мы действительно получаем прямые линии. При больших интенсивностях наблюдаются отклонения от этого правила. Прямые линии искривляются, обращаясь при этом своей выпуклостью кверху. На рис. 39 показаны характеристики, полученные для селеновых фотоэлементов. На вертикальной оси отложены фототоки, на горизонтальной — падения потенциала во внешней цепи $V = IR_2$. Ясно видно искривление характеристик с ростом интенсивности L . Аналогичные результаты дает также исследование меднозакисных фотоэлементов.

Изучение фотоэлектрических характеристик указывает на то, что внутреннее сопротивление R_1 зависит от интенсивности падающего света. Это вытекает из того, что наклон прямых линий изменяется при изменении интенсивности света.

Указанные в этом параграфе закономерности особенно тщательно изучены для фотоэлементов с фронтальным эффектом. В случае тылового эффекта мы не имеем еще пока такого количества экспериментального материала.

Может показаться, что проще измерять сопротивление при помощи обычных методов измерения сопротивлений. Но это не так. Дело в том, что при пропускании электрического

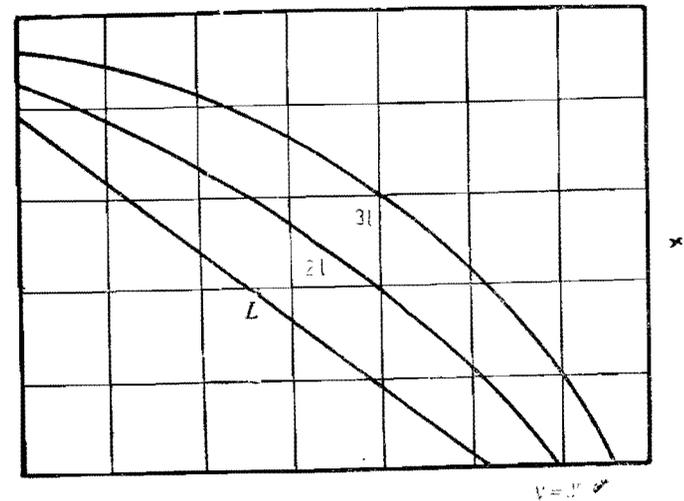


Рис. 39. Фотоэлектрические характеристики вентиляльного фотоэлемента при трех различных интенсивностях L (L , $2L$, $3L$).

тока через фотоэлемент от внешнего источника электродвижущей силы, входит много неопределенного. При этом могут возникнуть побочные явления, осложняющие общую картину. Поэтому метод фотоэлектрических характеристик является особенно ценным.

7. Зависимость фототока и фотоэлектродвижущей силы от интенсивности света.

Очень большой практический интерес представляет собой зависимость фотоэлектрического тока и фотоэлектродвижу-

шей силы вентильного фотоэлемента от интенсивности падающего света. В этой области накоплен уже за последние два года довольно обширный экспериментальный материал, хотя многое еще не совсем ясно с теоретической точки зрения. Сейчас мы перейдем к рассмотрению этого вопроса.

Прежде всего скажем еще несколько слов относительно механизма действия вентильного фотоэлемента. Мы уже знаем, что под действием света электроны будут переходить

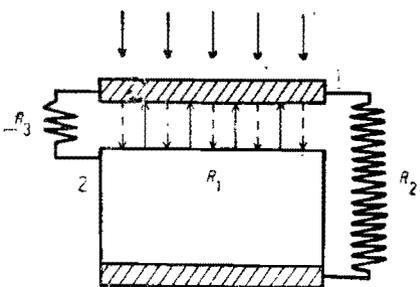


Рис. 40. Схема действия вентильного фотоэлемента. 1 — полупрозрачный металлический электрод, 2 — полупроводник, R_1 — сопротивление полупроводника, R_2 — сопротивление внешней цепи, R_3 — сопротивление, характеризующее обратный отток электронов. Свет падает сверху по направлению стрелок.

Таким образом общая схема действия вентильного фотоэлемента может быть представлена на рис. 40. Здесь R_1 — сопротивление основного слоя полупроводника, R_2 — внешнее сопротивление и R_3 — сопротивление, которое характеризует отток электронов из металла обратно в полупроводник. Последнее сопротивление, как ясно из всего предыдущего материала, не должно подчиняться закону Ома. Сплошными стрелками показано движение фотоэлектронов, пунктирными — их возвращение назад. Верхние стрелки показывают направление распространения света. Таким образом в данном случае мы имеем дело с фронтальным фотоэффектом.

из полупроводника через запирающий слой в металл. Если бы не было обратного оттока электронов, то условия являлись бы особенно благоприятными. Но опыты показывают, что такой отток, т. е. обратное возвращение некоторых электронов, существует. По всей вероятности наличие такого оттока обусловлено существованием мест хорошего, непосредственного контакта между металлом и полупроводником.

Очень хорошо можно представить себе процесс возвращения электронов, предполагая наличие вихревых коротких замыканий, благодаря местам хорошего контакта, как это видно на рис. 41. Этой схемой мы и воспользуемся для изучения дальнейшего материала.

В случае внешнего фотоэффекта в вакууме электродвижущая сила фотоэлемента не должна зависеть от интенсивности света. Она определяется только длиной волны падающего света или соответственно частотой ν его колебаний.

Последнее сделается ясным, если мы напишем уравнение Эйнштейна:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A.$$

Так как кинетическая энергия фотоэлектрона: $\frac{mv^2}{2} \equiv eV$, где e — заряд электрона, а V — электродвижущая сила, то:

$$h\nu = eV + A,$$

откуда можно определить V . Имеем:

$$V = \frac{h\nu - A}{e}.$$

Последний результат подтверждает высказанное выше положение.

В вентильных фотоэлементах дело обстоит иначе. Благодаря существованию оттока электронов электродвижущая сила будет зависеть от интенсивности света и никогда по видимому не сможет достигнуть значений, предписываемых законом Эйнштейна. По мере роста интенсивности света будет быстро расти количество возвращающихся назад электронов. Особенно резко выражено это будет при разомкну-

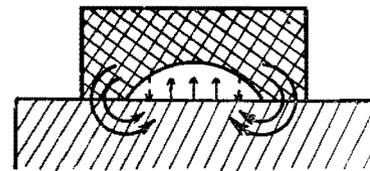


Рис. 41. Вихревые токи короткого замыкания в вентильном фотоэлементе.

том элементе. При малых интенсивностях света кривая, выражающая зависимость фотоэлектродвижущей силы разомкнутого фотоэлемента от интенсивного света, будет представлять собой прямую линию. С возрастанием интенсивности кривая будет загибаться вправо, стремясь к насыщению, и при достаточно больших интенсивностях света фотоэлектродвижущая сила перестает зависеть от интенсивности. Кривая идет при этом горизонтально. В некоторых случаях постоянство фотоэлектродвижущей силы достигается уже при сравнительно небольших интенсивностях света. Это наблюдалось в случае фотоэлементов с фронтовым эффектом с верхним электродом, образованным путем катодного распыления. Насыщение получалось при освещении фотоэлемента белым светом около полувольта. Правда, нужно заметить, что эти фотоэлементы обладали очень большим внутренним сопротивлением. Сделаны они были из сплошных меднозакисных пластинок. На рис. 42 показаны две кривые для зависимости фототока и фотоэлектродвижущей силы меднозакисного фотоэлемента с тыловым фотоэффектом от интенсивности света. Здесь через E обозначена фотоэлектродвижущая сила разомкнутого фотоэлемента, через S — фототок короткозамкнутого элемента. Кривая для E полностью подтверждает все вышесказанное. На горизонтальной оси при этом отложена интенсивность света в люменах,¹ на вертикальной — E в вольтах и соответственно I в амперах. Этот же чертеж показывает нам, что сила фототока I растет пропорционально интенсивности света в случае короткозамкнутого фотоэлемента. Последнее понятно, ибо в этом случае падение потенциала на запорном слое будет незначительным и вслед-

¹ Люмен равен световому потоку, излучаемому внутри единичного телесного угла, светящейся, равномерно излучающей точкой, сила света которой равна одной международной свече. Единичный телесный угол равен тому телесному углу, который вырезает из поверхности, описанной вокруг светящейся точки сферы произвольного радиуса, площадь равную квадрату этого радиуса. Международная свеча установлена в 1909 г.

ствие этого отток электронов будет также прямо пропорционален напряжению.

Последнее свойство вентильных фотоэлементов делает возможным их применение для фотометрических целей.

Оказалось, что все свойства вентильных фотоэлементов из закиси меди, описанные в этом параграфе, полностью под-

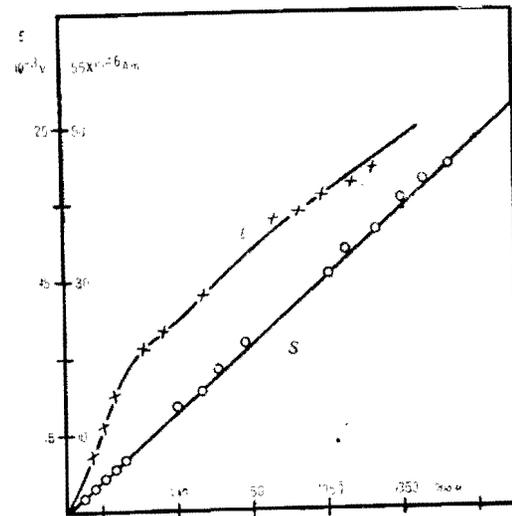


Рис. 42. Зависимость фототока в короткозамкнутом меднозакисном фотоэлементе и фотоэлектродвижущей силы разомкнутого фотоэлемента от интенсивности падающего света для тылового эффекта.

твердились в случае селеновых фотоэлементов. И здесь фотоэлектродвижущая сила растет с интенсивностью медленнее, чем последняя, приближаясь к насыщению. Максимальная фотоэлектродвижущая сила была при этом равна 0,24 вольта. Это говорит повидимому об одинаковости механизмов явлений.

Любопытно отметить, что никогда ни одним исследователем не наблюдались фотоэлектродвижущие силы той вели-

чины, которую требует закон Эйнштейна. Этот факт достоин удивления. Возможно, что в ближайшем будущем нам сделается понятным и он.

Некоторые авторы предлагают для зависимости фотоэлектродвижущей силы от интенсивности света следующую формулу:

$$V = \frac{L}{AL + B};$$

здесь L — интенсивность света, A и B — постоянные.

Эта формула довольно хорошо подтверждается на целом ряде опытов.

В заключение укажем на то, что несмотря на сложность закономерностей в этой области, их все же следует считать общими повидимому для всех вентильных фотоэлементов. Насколько правильно мы представляем себе весь механизм явления — другое дело. Определенного по поводу этого пока к сожалению ничего сказать нельзя.

8. Температурная зависимость вентильного фотоэффекта.

Рассмотрим теперь вкратце вопрос о поведении вентильных фотоэлементов при различных температурах.

Еще самые первые исследования температурной зависимости вентильного фотоэффекта в закиси меди, произведенные Тейхманном, показали, что в этом случае мы имеем дело с очень большим отрицательным температурным коэффициентом. Это значит, что фототок с возрастанием температуры фотоэлемента очень быстро убывает.

Позже Ланге произвел большое исследование этого вопроса. При этом конструкция его прибора позволяла ему исследовать поведение фотоэлементов в интервале температур от $+100^{\circ}$ С до -180° С. В этих опытах фототок измерялся при помощи зеркального гальванометра, а фотоэлектродви-

жущая сила по компенсационному методу. Сначала были исследованы фотоэлементы с тыловым эффектом. Верхним электродом служило золото, нанесенное путем катодного распыления. Оказалось, что фототок сначала по мере убывания температуры возрастал, достигал максимума, а затем быстро убывал. В интервале от -20° С до $+80^{\circ}$ С фототок непрерывно падал.

Довольно хорошо можно для данного интервала фототок выразить следующим образом в зависимости от температуры t :

$$I = I_0(1 + \alpha t),$$

где α , как показали опыты, равняется $-0,0086$. В некоторых случаях наблюдалось: $\alpha = -0,0116$. В среднем же можно положить α равным $-0,01$. Что касается фотоэлектродвижущей силы E , то для данного интервала она хорошо выражается следующей формулой:

$$E = E_0 e^{-\beta t},$$

где β — постоянный коэффициент, а $T = 273 + t^{\circ}$ (абсолютная температура); e — основание натуральных логарифмов.

Исследование фотоэлементов с фронтальным эффектом приводит к следующему значению коэффициента α (в интервале температур от -20° С до $+60^{\circ}$ С):

$$\alpha = +0,001.$$

В этом случае ток сначала возрастает с ростом температуры.

Аналогичные результаты были получены и с селеновыми фотоэлементами.

Однако, как показали исследования Курчатова и Синельникова, полученные результаты подлежат следующей трактовке.

На рис. 43 показана зависимость фототока в меднозакисном фотоэлементе с фронтальным эффектом от температуры при постоянной интенсивности падающего света и при трех

различных внешних сопротивлений (4000 Ω , 1000 Ω , 50 Ω). При понижении температуры (на рисунке — слева направо) фототок вначале растет, достигает максимума и затем снова

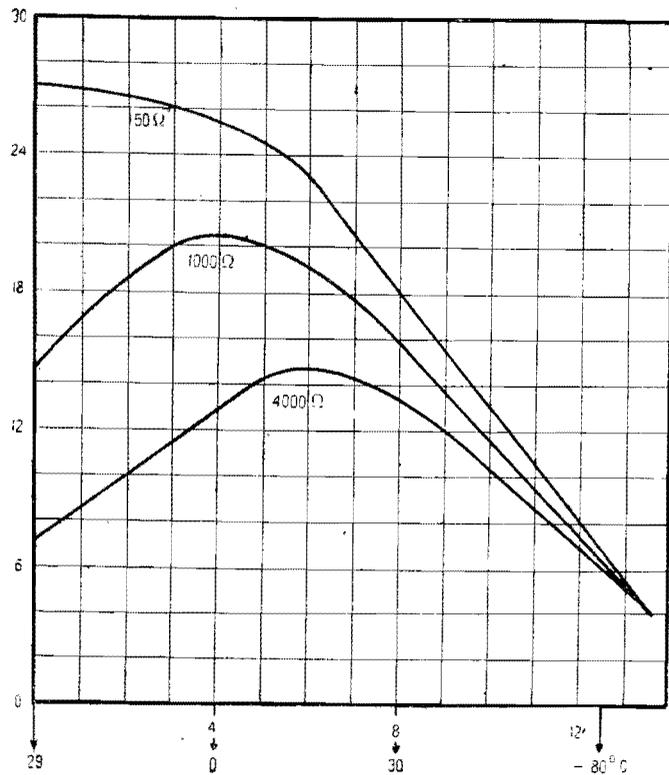


Рис. 43. Зависимость силы тока в меднозакисных фотоэлементах с фронтальным эффектом от температуры при постоянной интенсивности света и различных внешних сопротивлениях цепи.

спадает. Какова причина этого явления? Сам по себе электронный ток не должен зависеть от температуры. Это известно из целого ряда других опытов. Следовательно в нашем случае температурная зависимость должна являться след-

ствием каких-то других явлений. Естественнее всего предположить, что все эти изменения вызваны тем, что сопротивление запорного слоя само зависит от температуры (R_z на общей схеме вентильного фотоэлемента, см. предыдущий параграф). Увеличение тока при понижении температуры таким образом может быть вызвано увеличением сопротивления R_z , что должно привести к уменьшению оттока электронов назад. Это делается особенно понятным, если мы вспомним температурную зависимость выпрямления. Отсюда следует, что при понижении температуры большая часть тока будет отвечать во внешнюю цепь. Чем меньше внешнее сопротивление, тем меньшую роль будут играть отведенные через запорный слой электроны. Это ясно видно из хода кривой, соответствующей 50 Ω . В этом случае кривая идет значительно выше. В дальнейшем, при более низких температурах сильно возрастает сопротивление закисы меди R_1 , благодаря чему ток начинает снова падать. При этом сила тока почти перестает уже зависеть от внешнего сопротивления R_z . Мы видим ясно, что наш анализ, основывающийся на общей схеме вентильного фотоэффекта, дал нам возможность ясно представить себе те сложные температурные зависимости, которые показывает нам опыт.

При очень низких температурах [близких к температуре жидкого воздуха (-190°C)] фототок, как было уже показано, делается неизмеримо малым, но при этом фотоэлектродвижущая сила достигает своих максимальных значений. Последний факт повидимому следует объяснить тем, что в этом случае обратный отток электронов, благодаря большому сопротивлению запорного слоя, делается совершенно ничтожным.

Любопытным представляется следующий факт, иногда наблюдаемый на опыте. Если сплошную меднозакисную пластинку покрыть в отличном вакууме путем испарения металлом, образовав тем самым два электрода, то при комнатной температуре даже самые чувствительные электрометры не по-

называют существования фотоэлектродвижущей силы. Это говорит очевидно об отсутствии запорных слоев. При охлаждении же образовавшейся системы до температуры — 190° С появляется резко выраженный вентильный фотоэффект, который снова исчезает при возвращении к комнатной температуре. Это говорит нам о том, что при охлаждении может возникать запорный слой в виде плохопроводящей тончайшей прослойки, сопротивление которой при комнатной температуре делается сравнимым с сопротивлением основной записи меди, в силу чего и исчезает эффект.

При переходе к высоким температурам наблюдаются более сложные процессы.

Оказывается, что в этом случае возможны уже необратимые изменения, которые вероятно обусловлены коренными изменениями запорного слоя. Если представить себе последний в виде тонкого очищенного от примеси окиси меди слоя записи меди, то необратимый процесс связан с проникновением окиси в этот слой. Этот процесс, могущий быть необратимым, должен привести к сильному уменьшению сопротивления запорного слоя. Наступает хороший контакт и вентильный фотоэффект исчезает. Действительно, опыты показывают, что сильно перегретые фотоэлементы из записи меди перестают действовать. При их охлаждении фотоэлектрические свойства к ним уже не возвращаются. С аналогичными явлениями мы уже сталкивались при рассмотрении меднозаписных выпрямителей. Такой критической для вентильного фотоэлемента температурой следует считать температуру около 100° С.

Это свойство вентильных фотоэлементов (наличие сильной температурной зависимости) сильно препятствует более широкому применению их для промышленных целей.

Думается, что сказанного здесь достаточно для ознакомления читателя с тепловыми свойствами изучаемых фотоэлементов.

9. Зависимость вентильного фотоэффекта от длины волны падающего света.

Выше мы уже говорили о важности знания спектрального распределения чувствительности фотоэлемента. Это касается не только вакуумных и газовых, но и фотоэлементов вентильного типа. Только располагая этим экспериментальным материалом, мы в состоянии высказывать какие-либо соображения о природе явления и расширять границы его технического использования. Задача эта в экспериментальном отношении довольно трудная, так как решение ее требует работы со сложными оптическими приборами. Так например основной частью установки является так называемый монохроматор, т. е. прибор, при помощи которого мы можем получить световой луч определенной длины волны или, как еще говорят, луч монохроматический (одноцветный). По сути дела каждый спектрограф может служить монохроматором. В основном схема его устройства следующая. Свет от яркого источника попадает через узкую щель в трубу, из которой уже в виде параллельного пучка лучей он падает на преломляющую систему (система призм), после чего проходя через вторую трубу и щель, вырезающую уже нужный нам узкий участок спектра, он может быть направлен на фотоэлемент. Обычно область спектра, в которой можно пользоваться данным монохроматором, бывает ограниченной. Это зависит от природы материала, из которого сделана оптическая система. Так например известно, что ультрафиолетовые лучи очень сильно поглощаются стеклом и гораздо слабее кварцем. Поэтому монохроматор для ультрафиолетового участка спектра должен иметь всю оптическую систему, включая и призмы, сделанную из кварца. Аналогично, в случае инфракрасных лучей, удобно призмы иметь сделанными либо из кристаллов каменной соли, либо же из флюорита. Для детального ознакомления с устройством монохроматоров и работы с ними нужно было бы написать очень много. Вряд ли

однако это нужно для понимания дальнейшего. Поэтому мы ограничимся сказанным и перейдем к дальнейшему.

Чтобы иметь возможность построить кривую спектрального распределения чувствительности фотоэлемента, необходимо еще отнести результаты измерений к единице падающей энергии. Иначе измерения фотоэффекта при различных длинах волн не могут сравниваться друг с другом. В самом деле ведь в спектре данного источника света на различные участки приходится различная энергия. Для этой цели обычно пользуются чувствительным термоэлектрическим столбиком. При помощи его производят предварительно измерение распределения энергии на данном участке спектра. Зная это распределение, очевидно нетрудно уже отнести измерения фотоэффекта при различных длинах волн к единице падающей энергии. Таким путем достигают возможности сравнивать отдельные измерения друг с другом и по ним уже строить кривые спектрального распределения чувствительности того или иного фотоэлемента.

После этого небольшого вступления перейдем к изучению интересующего нас вопроса.

Можно думать на основании всего сказанного в предыдущих разделах, что вентильный фотоэффект тесно связан с внутренним фотоэффектом. Более того, по видимому только те полупроводники пригодны для нашей цели, которые изменяют свое сопротивление под действием света. Поэтому следовало бы ожидать совпадения между кривыми спектрального распределения этих двух эффектов. Правда, это может относиться только к тем частям спектра, которые достаточно удалены от границ фотоэффекта в этих двух случаях, которые вообще говоря не должны совпадать. Экспериментальные исследования целиком подтверждают сказанное. Все полупроводники, из которых изготавливаются вентильные фотоэлементы, обладают внутренним фотоэффектом и спектральные распределения обоих эффектов почти совпадают друг с другом.

Для вентильного фотоэффекта эти измерения произведены как для фронтального, так и для тылового эффектов.

На рис. 44 показан ряд кривых спектрального распределения для меднозакисных вентильных фотоэлементов с тыловым эффектом. Здесь на горизонтальной оси отложены длины волны света, выраженные в миллимикронах ($m\mu$),¹ на верти-

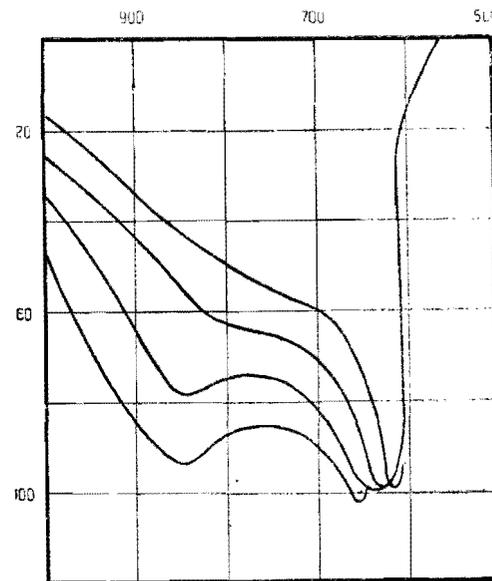


Рис. 44. Кривые спектрального распределения меднозакисных фотоэлементов с тыловым фотоэффектом при различных толщинах слоев записи меди.

кальной оси силы фототока, измеренные гальванометром с небольшим сопротивлением. Силы фототока отнесены к единице падающей энергии. Различные кривые относятся к фотоэлементам с различными толщинами слоев записи меди. Рассмотрение этих кривых показывает, что максимум чувстви-

¹ Миллимикрон ($1 m\mu$) равен 0,001 микрона (μ), т. е. (так как $1 \mu = 10^{-4}$ см): $1 m\mu = 10^{-7}$ см.

тейности фотоэффекта в данном случае лежит при 620—650 μ , т. е. в красной части спектра. При переходе к меньшим длинам волн мы наблюдаем резкий обрыв кривой и почти полное отсутствие fotocувствительности. Это делается понятным, если мы вспомним, что свет, прежде чем он попадет на заднюю границу раздела, должен пройти слой закиси меди. Последняя пропускает через себя лишь лучи с длиной волны большей приблизительно 600 μ . Остальные лучи сильно поглощаются. Лишь красные и инфракрасные лучи относительно свободно проходят через нее.

Учитывая это обстоятельство, нас не должен удивлять упомянутый выше обрыв кривых в определенном месте спектра.

Теперь о границе вентиляного фотоэффекта в закиси меди. Первые опыты, произведенные в 1930 г., привели к следующему ее значению: $\lambda_0 = 6600$ μ . Но это оказалось эксперимен-

тальной ошибкой. Позже целый ряд исследователей пришли к значению: $\lambda = 1400$ μ . Это число твердо установлено. Оно нам показывает, что вентиляный фотоэффект в закиси меди происходит еще в довольно далекой инфракрасной части спектра.

На рис. 45 дана кривая спектрального распределения фронтального фотоэффекта в закиси меди, построенная аналогично первой кривой. Ее ход отличен от такового в случае

тылового эффекта. Мы уже выяснили собственно говоря этот вопрос. Это различие обусловлено поглотительными способностями самой закиси меди. В этом случае максимум чувствительности лежит в зеленой части спектра около 450 μ . Граница фотоэффекта также лежит в инфракрасной части приблизительно там же, где она была при исследовании тылового эффекта. Сравнение двух приведенных нами кривых спектрального распределения ясно говорит нам о возможностях различного использования фронтального и тылового эффектов, благодаря несхождению их чувствительности в различных участках спектра.

Любопытно теперь сравнить полученные кривые с такими для внутреннего фотоэффекта в закиси меди. Последние приведены на рис. 46. Кривая 1 получена в том случае, когда свет непосредственно падал на исследуемую пластинку закиси меди.

Кривая 2 получена в том случае, когда между источником света и исследуемой пластинкой была помещена в качестве светового фильтра вторая пластинка из закиси меди. Все измерения отнесены к единице падающей энергии. Сравнение этих двух кривых для внутреннего фотоэффекта в закиси меди с таковыми для вентиляного фотоэффекта в ней ясно показывает на параллелизм этих двух явлений. Разумеется кривую 2 нужно сравнивать с таковой для тылового фотоэффекта, а кривую 1 — для фронтального. Для того чтобы избежать неясностей, укажем, что на последнем нашем чертеже по вертикальной оси отложены изменения сопротивления, вызванные действием света по отношению к основному темновому сопротивлению закиси меди. Граница внутреннего фотоэффекта в закиси меди должна находиться в еще более далекой инфракрасной части спектра. Это должно быть вызвано тем, что при вентиляном фотоэффекте сорванные светом электроны должны пройти через запорный слой, затрачивая при этом определенную работу. Вследствие этого граница вентиляного фотоэффекта должна быть смещена в сторону

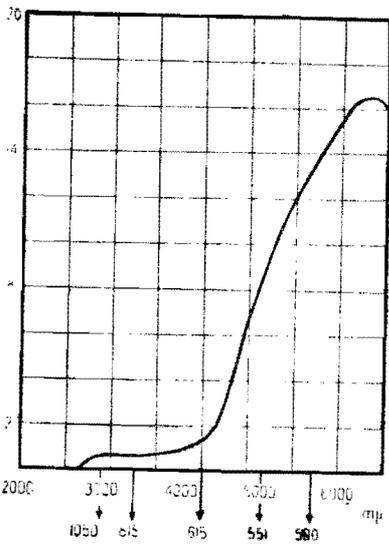


Рис. 45. Кривая спектрального распределения чувствительности меднозакисного фотоэлемента с фронтальным эффектом.

коротких волн. Вычисленная косвенным путем граница внутреннего фотоэффекта в закиси меди лежит приблизительно около 4000 $\text{m}\mu$ но измерена она до сих пор никем еще не была.

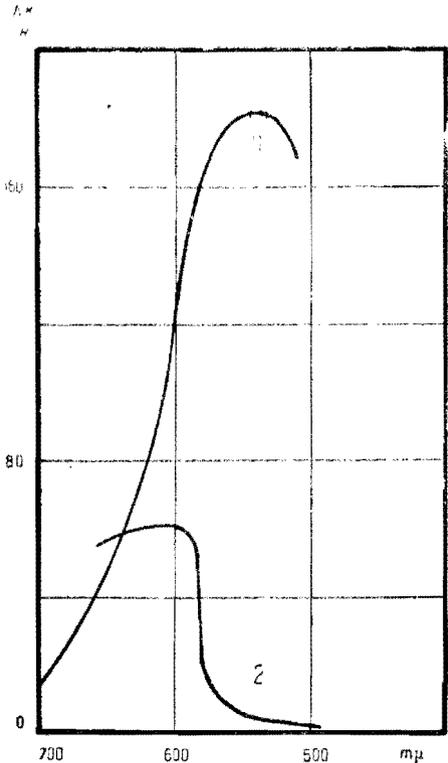


Рис. 46. Кривые спектрального распределения внутреннего фотоэффекта в закиси меди (по Пфунду).

Кривая I относится к прямому падению света. Кривая II относится к тому случаю, когда свет предварительно пропускается через слой закиси меди.

Граница фотоэффекта лежит около 800 $\text{m}\mu$, максимум же фоточувствительности находится при 550—530 $\text{m}\mu$.

Сформулированные выше вопросы изучались также и для селеновых фотоэлементов.

Результаты измерений приведены на рис. 47. Построение кривых ясно из предыдущего. Кривая 1 относится к распределению по спектру внутреннего фотоэффекта в селене, кривые 2 и 3 относятся к вентильному фотоэффекту в селене с верхним электродом из серебра (Ag) и золота (Au). Снова ясно виден параллелизм этих двух явлений и сдвиг границы фотоэффектов двух видов.

Многочисленные измерения спектрального распределения вентильного фотоэффекта в селене привели к следующим значениям для границы фотоэффекта и положения его макси-

Правда, нужно оговориться, что различно изготовленные образцы селена повидимому обладают различным спектральным распределением вентильного фотоэффекта. Вопрос этот неясен и нуждается в дальнейшей разработке.

Необходимо здесь еще упомянуть о следующем многократно наблюдаемом факте.

Граница вентильного фотоэффекта не зависит от природы того металла, из которого сделан верхний электрод. Этот факт лишний раз подтверждает ту общую теоретическую схему вентильного фотоэффекта, о которой мы говорили в самом начале своего изложения.

Настолько ли значительна роль внутреннего фотоэффекта в полупроводнике, как это мы указывали в предыдущем, сказать пока еще трудно. Во всяком случае иногда это не так хорошо подтверждается

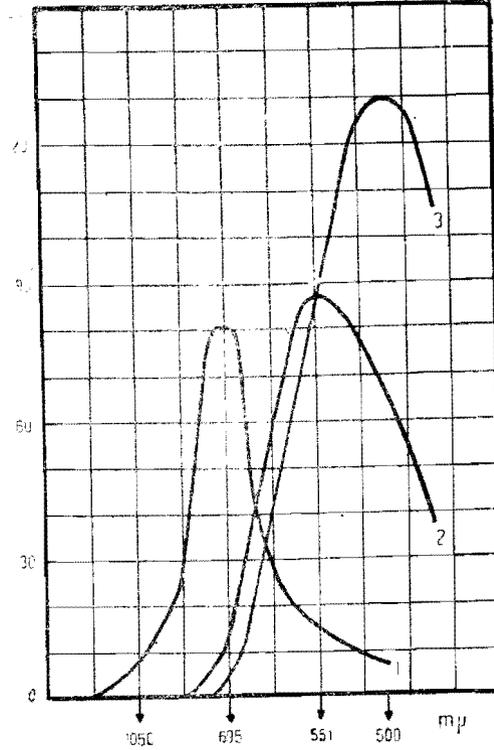


Рис. 47. Кривые спектрального распределения чувствительности вентильных селеновых фотоэлементов и внутреннего фотоэффекта в селене.

Кривая 1 — распределение по спектру внутреннего фотоэффекта в селене. 2 и 3 кривые относятся к вентильному фотоэффекту в селене с верхним электродом из серебра и золота.

на опыте. Поэтому не будем считать пока еще это твердо установленным. В ближайшем буду-

цем мы вероятно получим на этот вопрос исчерпывающие ответы.

В заключение укажем на то, что положение максимума чувствительности вентильного фотоэффекта зависит от температуры образца. С понижением температуры обычно наблюдается смещение максимума в сторону коротких волн. Эта закономерность наблюдалась как для фронтного, так и для тылового фотоэффекта.

В одной из лабораторий, занимающихся изучением вентильных фотоэлементов, были выработаны конструкции автоматически действующих установок, в которых осуществлялось снятие кривых спектрального распределения фотоэффекта в меднозакисных и селеновых фотоэлементах. В этих установках все манипуляции в схеме совершаются автоматически. На фотографической пластинке при этом получается полностью кривая спектрального распределения чувствительности фотоэлемента. Снятие всей кривой при этом продолжается в течение 2—3 минут. При помощи аналогичного устройства возможно также автоматическое получение вольт-амперных характеристик как фотоэлементов, так и выпрямителей. Это значительно упрощает изучение свойств вентильных фотоэлементов.

На этом мы закончим свое ознакомление с экспериментальным материалом, касающимся спектральной чувствительности вентильных фотоэлементов.

Основной вывод несомненно тот, что вентильные фотоэлементы в противоположность вакуумным и газовым обладают максимальной фоточувствительностью в области видимого света и сохраняют еще некоторую чувствительность к инфракрасным лучам и даже к ультрафиолетовым лучам. Это их свойство позволяет думать, что в некоторых случаях они с трудом могут быть заменены другими типами фотоэлементов. Чрезвычайно актуальная задача построения вентильного фотоэлемента, обладающего большой чувствительностью к инфракрасным лучам. Это дало бы нам возмож-

ность очень значительно расширить область их применений. По видимому решение этой задачи принципиально вполне возможно.

10. Физическая модель вентильного фотоэлемента.

Очень хорошим подтверждением правильности развиваемых соображений о механизме явлений, совершающихся в вентильных фотоэлементах, является физическая модель таких фотоэлементов, построенная Короши и Зелени.

Схема этой модели показана на рис. 48. Здесь Z — вакуумный фотоэлемент (с внешним фотоэффектом), G — твердый селеновый выпрямитель, C — конденсатор определенной емкости, r — сопротивление около 10000 омов и W — другое сопротивление.

В вакуумном фотоэлементе под действием света срываются электроны, которые отчасти идут во внешнюю цепь с сопротивлением W , отчасти через селеновый выпрямитель возвращаются обратно. В этой модели следовательно схематически представлены все те процессы, о которых мы говорили выше. Если механизм вентильного фотоэффекта, выражающегося в проскакивании электронов под действием света из полупроводника в металл, и механизм внешнего фотоэффекта — одинаковы, то следует ожидать большого

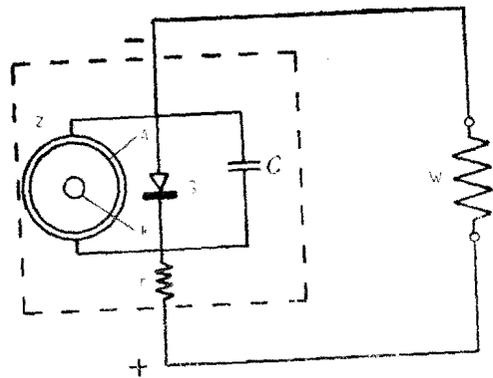


Рис. 48. Физическая модель вентильного фотоэлемента.

Z — вакуумный фотоэлемент, A — светочувствительный слой, K — проволочная петля, G — кристаллический детектор, C — конденсатор, r — сопротивление (около 10000 Ω), W — внешнее сопротивление.

сходства в поведении модели и вентильного фотоэлемента. Так, например, была исследована зависимость фотоэлектродвижущей силы разомкнутого селенового фотоэлемента для различных участков спектра от интенсивности света. То же самое было сделано и для модели.

Оказалось, что возможно так подобрать сопротивления в модели, что получается полное почти совпадение соответствующих кривых. Все это лишнее раз говорит нам о правильности наших предположений о существовании обратного оттока электронов с металла в полупроводник, вызывающего тот ход кривых, выражающих зависимость фотоэлектродвижущей силы вентильного фотоэлемента от интенсивности падающего света, о котором шла речь в соответствующем параграфе этой части книги. С другой стороны модель показывает нам, что между внешним фотоэффектом и вентильным фотоэффектом принципиальной разницы нет.

11. Инерционность вентильных фотоэлементов.

В целом ряде областей практического применения фотоэлементов играет огромную роль так называемая инерционность их. Разберем сейчас подробнее это свойство. Если процесс установления фототока, соответствующего данной интенсивности света, происходит в чрезвычайно малый промежуток времени, то независимо от того, будем ли мы освещать наш фотоэлемент часто прерывающимся светом или редко прерывающимся — максимальный фототок должен иметь одно и то же значение. Фототок в период освещения, несмотря на его малость, будет успевать возрастать до своего максимального значения, соответствующего данной интенсивности света. О таких фотоэлементах говорят, что они *б е з и н е р ц и о н н ы*. Обычно, разумеется, при больших частотах прерывания света, всегда наблюдается в случае вакуумных и газонаполненных фотоэлементов некоторое уменьшение фототока, что говорит о некоторой инерционности их.

Однако, особенно большого вреда это не приносит. Купроксные и селеновые фотоэлементы, в отношении их инерционности, до сих пор недостаточно полно изучены. В пределах звуковых частот во всяком случае их можно считать безинерционными. Как ведут они себя при больших частотах, пока еще невыяснено. Однако это имеет большое значение для техники. Главным затруднением при исследовании инерционности вентильных фотоэлементов является их большая собственная емкость. Вследствие этого, если предварительно не исключить емкостного эффекта, фотоэлементы обладают весьма значительной инерционностью, из-за чего в таких условиях этот тип фотоэлементов не может найти себе применения в целом ряде случаев. Возможность исключения емкостного эффекта указанного рода разрабатывается сейчас в ряде лабораторий и повидимому удастся сравнительно простым способом.

Известно из предыдущего, что вентильные фотоэлементы и в особенности меднозакисные ценны в том отношении, что они весьма чувствительны к инфракрасным лучам. Этим свойством ни вакуумные, ни газонаполненные — не обладают. Если они кроме этого были бы безинерционны, то область их технического использования значительно бы расширилась. Особенно важно это в телевидении, которое широко использует фотоэлемент и для которого существенно необходимо иметь дело с безинерционными фотоэлементами.

Использование чувствительности вентильных фотоэлементов к инфракрасным лучам дало бы возможность телевидения в темноте, что несомненно является исключительно важной проблемой. Обычно инерционность фотоэлементов изучается следующим образом. На фотоэлемент направляется пучок света, прерывающегося вращающимся диском определенное число раз в секунду. При этом, при помощи осциллографа, наблюдаются кривые изменения фототока во времени. Очевидно по этим кривым можно определить максимальную величину фототока. Эти кривые наблюдаются при различ-

ных скоростях вращения диска, т. е. при различных частотах прерывания света.

Полученные результаты дают возможность судить о степени инерционности данного фотоэлемента. Вентильные фотоэлементы трудно в этом отношении исследовать в виду малости их фотоэлектродвижущей силы, а следовательно и затруднения, связанные с возможностью применения осциллографа.

Во всяком случае можно ожидать, что инерционность вентильных фотоэлементов невелика, а следовательно возможно использование их в телевидении.

Правда, имеется еще одно препятствие использования вентильных фотоэлементов в этом направлении, о котором уже говорилось выше. Это большая собственная емкость их.

12. Влияние магнитного поля на вентильный фотоэффект.

Известно, что при движении электрона в магнитном поле, силовые линии которого перпендикулярны к направлению скорости движения электрона, последний испытывает закручивание. Если напряжение магнитного поля H постоянно во всех точках пространства, в котором движется электрон, то траектория его движения есть круг, плоскость которого перпендикулярна к направлению силовых линий поля. Поэтому следовало бы ожидать, что купроксный и всякий другой вентильный фотоэлемент должен изменять свое сопротивление, будучи помещен в магнитное поле, силовые линии которого параллельны плоскости металлических электродов. При этом электронам, проскакивающим через запорный слой, приходилось бы проходить, благодаря закручиванию их, больший путь, что и вызвало бы увеличение сопротивления фотоэлемента.

Опыты, поставленные для этой цели, подтвердили высказанные выше соображения.

Исследования производились с фотоэлементами с тыловым эффектом из закиси меди. При этом изучалось: зависимость изменения сопротивления в магнитном поле от напряжения его, от направления силовых линий, от длины волны света от температуры. Измерения производились следующим образом. Сначала измерялся фототок I при отсутствии магнитного поля ($H = 0$). Затем этот ток компенсировался и создавалось сильным электромагнитом магнитное поле. При этом в цепи появится некоторый ток ΔI . Изменение сопротивления фотоэлемента ΔR можно получить теперь следующим образом.

Без магнитного поля на основании закона Ома мы имеем:

$$I = \frac{E}{R + R_a},$$

где R — сопротивление фотоэлемента, R_a — внешнее сопротивление и E — фотоэлектродвижущая сила.

При включении магнитного поля мы будем иметь:

$$I + \Delta I = \frac{E}{R + \Delta R + R_a};$$

отсюда можно определить отношение $\frac{\Delta R}{R}$.

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta I}{I} \left(1 + \frac{R_a}{R} \right).$$

Измерения показали, что изменение сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$ зависит от напряжения магнитного поля H по следующему закону:

$$\frac{\Delta R}{R} = AH^2,$$

где $A = 6,6 \cdot 10^{-12}$ гаусс⁻² при 20° С. Значение этой постоян-

ной зависит от того, с каким фотоэлементом мы имеем дело. Соответственно для фототока мы имеем:

$$\frac{\Delta I}{I} = A'H^2,$$

где $A' = 2,9 \cdot 10^{-12}$ гаусс⁻².

Это закон был подтвержден для полей с напряжением H до 9000 гауссов.

В таблице 6 приведены данные измерения. В этом случае в первом столбце приведены напряжения магнитного поля H , выраженные в гауссах, во втором столбце относительное изменение силы тока $\frac{\Delta I}{I}$, в третьем — сопротивления фотоэлемента $\frac{\Delta R}{R}$, наконец, в четвертом — величина $\frac{\Delta R}{RH^2}$. Последняя, как видно из рассмотрения таблицы, практически постоянная, что и служит доказательством правильности вышеприведенных формул.

Т а б л и ц а 6.

Влияние магнитного поля на вентильный фотоэффект (по Рунду (сила фототока I имела порядок 10^{-4} ампер, направление магнитных силовых линий параллельно запорному слою).

| H в гауссах | $\frac{\Delta I}{I} \cdot 10^3$ | $\frac{\Delta R}{R} \cdot 10^3$ | $\frac{\Delta R}{RH^2} \cdot 10^6$ |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 4200 | 0,5 | 1,1 | 6,3 |
| 6400 | 1,2 | 2,8 | 6,8 |
| 7200 | 1,5 | 3,5 | 6,7 |
| 7800 | 1,7 | 3,9 | 6,4 |
| 8400 | 2,0 | 4,5 | 6,4 |
| 8800 | 2,2 | 5,0 | 6,5 |

Зависимость $\frac{\Delta R}{R}$ от длины волны света λ обнаружена не была, что представляется странным, так как по закону Эйнштейна скорость фотоэлектронов зависит от длины

волны λ . Очевидно скорости фотоэлектронов в среднем мало зависят от длины волны.

Эти исследования следовало бы поставить в более широком масштабе, так как они могут дать нам целый ряд ценных указаний, касающихся природы запорного слоя. Кроме того, вероятно, в некоторых технических установках возможно было бы использовать это явление. Разумеется, это возможно будет сделать только в том случае, если изменение фототока в магнитном поле будет достигать больших значений.

Во всяком случае обсуждаемый здесь эффект представляет большой интерес и с практической, и с теоретической точек зрения.

13. Постоянство вентильных фотоэлементов.

Для соответствующих отраслей техники, использующих фотоэлементы, чрезвычайно важно быть уверенным в постоянстве их работы. Поэтому естественно то, что в процессе производства фотоэлементов в лабораторной обстановке тщательно исследовалась работа их в зависимости от времени. Опыты показывают, что фотоэлементы с тыловым эффектом отличаются весьма большим постоянством. Чувствительность их к свету почти не изменяется с течением времени. Несколько хуже обстоит дело с фотоэлементами с фронтным эффектом. В этом случае чувствительность фотоэлементов иногда довольно быстро убывает со временем. Понять это вообще говоря не трудно. В последнем случае запорный слой находится сверху и легче доступен внешним воздействиям. Таковым может быть действие кислорода воздуха, который, проникая в запорный слой, будет постепенно увеличивать его электропроводность, что должно привести к увеличению обратного оттока электронов, а следовательно и к понижению чувствительности фотоэлемента.

Кроме того активную роль в этом случае играет верхний полупрозрачный металлический электрод, изменение кото-

рого также может оказать то или иное влияние на чувствительность. Для устранения действия этих факторов очевидно можно поместить фотоэлемент либо в вакуум, либо в атмосферу какого-нибудь инертного газа (аргон, азот и др.). Наконец, этой же цели можно достигнуть, покрывая фотоэлемент тонким слоем какого-либо неактивного в химическом отношении лака. Однако не всегда эти попытки приводят к желательным результатам, что говорит о возможности и других более сложных процессов, изменяющих чувствительность фотоэлемента и происходящих внутри самого образца. Это является большим затруднением, которое пока еще не преодолено. Однако, получающиеся в некоторых лабораториях результаты говорят повидимому о возможности создания устойчивых фотоэлементов и с фронтовым фотоэффектом. Вероятно, в ближайшем будущем этот вопрос будет окончательно разрешен.

Другой не менее важный вопрос заключается в следующем. До недавнего времени при изготовлении фотоэлемента приходилось доверять все игре случая. Иногда это давало весьма чувствительный фотоэлемент, иногда наоборот, он почти отказывался работать. Таким образом в процессе их производства существовало большое количество бракованных образцов. Последнее время в этом отношении достигнуты положительные результаты. Тщательное изучение технологии производства фотоэлементов дает возможность получать вполне повторяемые результаты. В особенности это относится к меднозакисным фотоэлементам с тыловым эффектом. Для селеновых фотоэлементов дело пока обстоит не очень блестяще. Но и здесь уже намечается перелом. В некоторых случаях удается изготовить селеновый фотоэлемент с верхним золотым электродом, сохраняющий постоянство своей чувствительности в течение ряда месяцев.

Сказанного здесь во всяком случае достаточно для того, чтобы заметить большое количество недостатков в самом процессе производства фотоэлементов. Однако, те темпы, кото-

рыми оно развивается в последнее время, дают право полагать, что и на этом участке коллективные усилия всех работающих в этой области помогут справиться со всеми затруднениями. Тем более, как видно из изложенного, что многие вопросы уже теперь можно считать разрешенными.

14. Чувствительность вентильных фотоэлементов.

Интересно сравнить чувствительность к свету вентильных фотоэлементов с таковой для вакуумных тазонаполненных. Очевидно под чувствительностью их следует понимать фотоэлектрический ток, рассчитанный на единицу силы падающего света. В таблице 7, заимствованной из обзорной статьи по поводу данного вопроса Ланге, приведена чувствительность различных фотоэлементов, а также величина поданного напряжения и граничная длина волны света. Эти данные относятся к 1931 году и поэтому претендовать на полное освещение современного положения не могут, но все же некоторый хотя и исторический интерес они представляют.

Таблица 7.
Чувствительность фотоэлементов (по Ланге).

| Тип фотоэлемента | Фототок на один люкс | | Напряжение в вольтах | Граница фотоэффекта λ_0 в μ |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|---|
| | Без напряжения, в 10^{-10} ампер | С напряжением, в 10^{-10} ампер | | |
| Калиевый вакуумный (Эльстер и Гайтель) | 0,1 | 3,0 | 206 | 560 |
| Калиевый газонаполненный, гидрированный (Пресслер) | 0,1 | 86 | 120 | 600 |
| Натриевый вакуумный | 0,05 | 4,0 | 200 | 560 |
| Натриевый вакуумный оксидированный | 0,1 | 20 | 200 | 740 |
| Меднозакисный фотоэлемент | 500,0 | — | — | 1500 |

Таблица 7 содержит лишь средние числа, которые удавалось получать при различных измерениях. Она очень показательна. Меднозакисные фотоэлементы обладают по сравнению с вакуумными и газонаполненными большими преимуществами и в этом отношении. Правда последнее время и техника получения высокочувствительных вакуумных и газонаполненных фотоэлементов также усиленно развивалась. Поэтому правильнее было бы сказать, что главное преимущество меднозакисных и селеновых фотоэлементов в простоте их устройства, в отсутствии необходимости пользоваться добавочным внешним напряжением и в большей все-таки чувствительности к свету. Что касается значения λ_0 , то в вакуумных фотоэлементах она уже теперь значительно превышает таковую для вентильных фотоэлементов. Недостаток же их тот, что до сих пор не удалось в простом виде осуществить усиление их фототоков при помощи катодных ламп, но об этом будет идти речь ниже.

15. Коэффициент полезного действия вентильных фотоэлементов.

В вентильном фотоэлементе мы встречаемся с непосредственным превращением световой энергии в электрическую. Это сулит в будущем использование их в качестве источника электрической энергии. В этом случае мы сможем превращать самым непосредственным образом энергию солнечных лучей в электрическую, проблема, которая имеет исключительно большое значение для нас. Известно, что каждый квадратный метр получает энергию около киловатта. Это совсем солидная величина. Меднозакисные и другие вентильные фотоэлементы, благодаря своей простоте и дешевизне, смогли бы особенно пригодиться нам для решения этой важнейшей задачи. Вопрос только упирается в величину коэффициента полезного действия. К сожалению, пока он очень незначителен и имеет порядок 0,01—0,1%, что конечно не решает поставленного вопроса. В некоторых отдельных случаях

удается достигать 2%. Это уже значительно лучше, но фотоэлементы, им обладающие, все же не могут найти пока еще своего применения на этом участке техники.

Резюмируя, скажем, что коэффициент полезного действия вентильных фотоэлементов пока еще слишком мал, и, вследствие этого, применять их в качестве источника энергии невыгодно. Это, конечно, не исключает возможности построения такого фотоэлемента, который обладал бы технически приемлемым коэффициентом полезного действия.

Последнее представляет собою одну из актуальнейших задач физики фотоэлементов.

16. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом.

Еще раньше чем появились вентильные фотоэлементы некоторое распространение в технике имели фотоэлементы, действие которых основано на внутреннем фотоэффекте. В этом случае, как известно из предыдущего, используется свойство некоторых веществ изменять свою электропроводность под действием света. Принцип действия фотоэлементов подобного рода заключается в следующем.

Представим себе некоторое вещество, обладающее этим свойством, заключенное между двумя электродами, дающими хороший контакт. Если мы между этими электродами создадим электрическое поле, приложив некоторую разность потенциалов, то в цепи появится в темноте некоторый ток. Будем этот ток называть в дальнейшем темновым током.

При освещении образца его электропроводность повысится благодаря внутреннему фотоэффекту и сила тока в цепи при этом возрастет. Образец будет действовать как фотоэлемент. Картина явления, разыгрывающегося внутри такого вещества, вообще говоря, довольно сложная. Первичный акт будет очевидно заключаться в вырывании из атомов светом электронов. Но на первичный эффект могут повидимому накладываться какие-то вторичные процессы. В общем явление

вследствие этого сильно усложняется. Все это вместе взятое приводит к целому ряду нежелательных для нас физических свойств этих фотоэлементов.

Изготавливаются такие фотоэлементы главным образом из селена и из теллурических соединений. В процессе производства их следует иметь в виду следующее. Светочувствительный слой должен иметь минимальную толщину, в то время как расстояние между электродами должно быть также по возможности меньше.

Первое вытекает из непрозрачности этих веществ, второе из их относительно большого удельного сопротивления. К селену при этом весьма часто примешивается некоторое количество теллура (10—15%).

К теллию также в большинстве случаев прибавляются различные примеси. Да и сам он берется в виде тех или иных химических соединений. Рецепты изготовления этих масс сохраняются обычно в секрете, в силу чего определенных сведений по этому поводу читателю здесь сообщить нельзя.

Укажем только на некоторые физические свойства этих селеновых и, как их называют, теллуридных фотоэлементов.

Они обладают большой чувствительностью к инфракрасным лучам. Граничная длина волны λ_0 для них порядка $1,25 \mu$, т. е. лежит в относительно далекой инфракрасной части спектра, что делает их удобными для некоторых специальных целей. Кроме того изучение спектрального распределения показывает, что максимальной чувствительностью они обладают также в инфракрасной части спектра. Длина волны, соответствующая максимуму светочувствительности, заключается обычно в пределах от $0,7$ и до $1,1 \mu$. В этом отношении, как мы видим, эти фотоэлементы имеют выдающиеся свойства. Широкому распространению их в технике препятствуют следующие большие их недостатки. Они обладают инерционностью, что вероятно объясняется наложе-

нием на первичный эффект ряда вторичных явлений, как это уже нами упоминалось. В силу же этих обстоятельств они не обладают большим постоянством.

Последние два недостатка фотоэлементов с внутренним фотоэффектом очень сильно препятствуют их значительному распространению.

Подводя итоги и сравнивая эти фотоэлементы с вентильными, можно сказать следующее. Вентильные фотоэлементы имеют ряд преимуществ по сравнению и с этим типом фотоэлементов из-за своего значительного постоянства и малой инерционности. В отношении чувствительности же к свету они приблизительно одинаковы. Появление вентильных фотоэлементов значительно понизило роль таких твердых фотоэлементов в технике, хотя в некоторых отраслях ее они могут быть использованы.

17. Усиление фототоков вентильных фотоэлементов.

Возможность широкого применения фотоэлементов в технике очень часто связана с проблемой усиления их фототоков при помощи катодных усилителей. Для газовых и вакуумных фотоэлементов эта проблема полностью уже разрешена и, как это будет видно дальше, обычно в условиях технической эксплуатации этих фотоэлементов постоянно производится усиление эффекта.

Этого нельзя пока еще сказать относительно вентильных фотоэлементов. Объясняется это обстоятельство тем, что вентильные фотоэлементы работают без дополнительного напряжения, а собственная фотоэлектродвижущая сила их относительно мала. При усилении же катодной лампы, необходимо подавать на сетку по возможности большие потенциалы (предел действия катодной лампы: 10^{-5} вольт, но это уже требует специальных, сложных приспособлений). Все другие фотоэлементы, как газонаполненные и вакуумные, так и основанные на внутреннем фотоэффекте, работают с до-

полнительным напряжением, что чрезвычайно сильно упрощает задачу усиления.

В связи с этими трудностями многие исследователи высказывали сомнение в возможности разрешения этой задачи в удобном для техники смысле. Нам представляется однако эта задача вполне разрешимой.

Относительно несложная усилительная схема, как показал целый ряд опытов, дает возможность достигать весьма значительного эффекта. Последнего вполне достаточно, чтобы приводить в действие громкоговоритель, относительно грубое реле и т. п. Полученные результаты нагляднейшим образом подтверждают все сказанное. В некоторых случаях возможно даже ограничиться одной усилительной лампой. Вспомнив простоту и дешевизну меднозакисного вентильного фотоэлемента, мы можем в крайнем случае идти на усложнение усилительного устройства для того, чтобы получить еще более максимальный эффект. В этом направлении работают сейчас многие лаборатории. Большинство полученных результатов пока еще не предано оглашению. Однако можно и в этом отношении высказать пожелание, чтобы наши изобретатели, имеющие опыт и навыки в радиотехническом деле, серьезно взялись за выработку типа усилителя, приспособленного специально для усиления фототоков вентильных фотоэлементов. Задача эта вполне разрешима, а решение ее дает нам возможность во многих случаях заменить дорогостоящий, требующий более усложненного обслуживания, вакуумный или газонаполненный фотоэлемент.

Решение этой задачи сулит очень значительный выход в промышленность.

18. Технические применения твердых фотоэлементов.

Выше мы познакомились с основным материалом, касающимся физических свойств вентильных фотоэлементов. Теперь мы можем уже поставить перед собой вопрос о воз-

можности использования их для тех или иных технических целей.

В то время как вакуумные и газонаполненные фотоэлементы нашли себе огромное распространение в разнообразнейших областях техники, вентильные фотоэлементы использованы относительно мало. И это несмотря на целый ряд больших их преимуществ. Объясняется это обстоятельство весьма просто. До самого недавнего времени техника изготовления вентильных фотоэлементов обладала целым рядом недостатков, о которых достаточно много говорилось уже выше. Кроме того непостоянство вентильных фотоэлементов также мешало сильному их распространению. За последнее время, как это уже нами отмечалось, большое количество препятствий преодолено и перед нами стоит важная задача внедрения меднозакисных и селеновых фотоэлементов в промышленность. Повидимому правильнее будет осветить вкратце те вопросы, которые вообще связаны с применением фотоэлементов. Из этого краткого обзора можно будет увидеть, в каком направлении нужно работать нашей изобретательской мысли.

Итак перейдем к рассмотрению этого материала.

а) **Фотоэлектрическая фотометрия.** Фотометрией называют тот раздел оптики, который занимается изучением методики измерения интенсивности света. Прибор, в котором производятся эти измерения, называется фотометром.

Фотоэлемент в фотометрии, как прибор, измеряющий интенсивность освещения, сыграл огромную роль, ибо в этом случае мы не только исключаем субъективизм измерений, но и значительно расширяем область применения фотометра. Последнее вытекает из возможности при помощи фотоэлемента измерения интенсивности не только видимого света, но и ультрафиолетового и инфракрасного. Кроме того чувствительность фотометров с фотоэлементом также весьма значительна.

Очевидно, в различных случаях, в зависимости от яркости светового пучка и от состава его, нужно применять тот или иной фотоэлемент. Меднозакисные фотоэлементы в этом отношении обладают тем преимуществом, что они чувствительны к инфракрасным лучам и не требуют для своего обслуживания сложных установок, вроде добавочного напряжения, специального усиления и т. п. Вот почему применение меднозакисных и селеновых фотоэлементов так сильно упростило всю фотометрическую технику. В основном фотометр представляет собой систему, состоящую из стандартных источника света, измеряемого источника света и фотоэлемента, ток которого измеряется гальванометром. При помощи стандартного источника света производится предварительно градуировка фотоэлемента, благодаря чему впоследствии возможно непосредственное получение по силе фототока интенсивности исследуемого освещения.

На вентильном фотоэффekte основано устройство так называемого дифференциального фотоэлемента (Ланге). Последний представляет собой фотоэлемент из закиси меди, имеющий с двух сторон чувствительные к свету слои. Если мы эти слои включим навстречу друг другу, то при условии равенства их чувствительности и одинаковости освещения гальванометр, включенный в цепи, будет стоять на нуле. Нарушение равенства освещенности приведет к возникновению некоторого тока. При различной чувствительности двух слоев необходимо, узнав их заранее, вводить соответствующую поправку. Самое измерение производится следующим образом. На специальной фотометрической скамье с одной стороны от фотоэлемента находится стандартный источник света, с другой исследуемый. Изменяя расстояние источников света от фотоэлемента, нетрудно добиться установления гальванометра на нуль. Отношение сил света будет равно при этом обратному отношению квадратов расстояний, умноженному на обратное отношение чувствительности двух слоев фотоэлемента. Отсюда видно, насколько упрощается техника

некоторых фотометрических операций, имеющих большое значение для осветительной техники.

Крайне выгодно также применение вентильных фотоэлементов для колориметрических целей и для определения цветных температур (Кэмпбелл). В последнем случае измерения производятся следующим образом. Световой луч данного источника света проходит через цветной фильтр, представляющий собой диск, одна половина которого красная, а другая голубая. Диск приводится в быстрое вращательное движение. За диском находится фотоэлемент, в цепь которого включен телефон. Диск при своем вращении попеременно пропускает то красную, то голубую составляющие данного светового пучка. Если они одинаковы по своей интенсивности, то через фотоэлемент будет проходить постоянный ток и телефон будет молчать. В противном же случае в цепи возникает переменный ток и телефон при этом даст звук определенного тона. Вдвигая теперь на пути светового пучка либо голубой, либо желтый клин, мы сможем добиться снова постоянства тока. Проградуировав предварительно наш фотоэлемент, мы сможем, по положению вдвигаемого клина, определить цветную температуру соответствующего источника света.

Очень велика роль фотоэлемента в микрофотометрах. Эти приборы служат для точного измерения почернения фотографических пластинок в различных местах ее. Они находят себе большое применение в спектроскопии, а также для определения отношения яркости звезд в астрономии. В этом случае световой луч, проходя через оптическую систему, разделяется на два составляющих одинаковой интенсивности. Один из них проходит через определенную точку исследуемой фотографической пластинки и в конце концов попадает на фотоэлемент. Другой же направляется на второй фотоэлемент. Фотоэлементы соединены с электрометром навстречу друг другу. Ток в одном фотоэлементе таким образом компенсирует ток в другом. Для измерения почернения пластинки

служит специальный проградуированный фотографический клин, т. е. пластинка с постепенно, по определенному закону, изменяющимся почернением.

Последнее время сконструирован в Германии микро-фотометр, использующий меднозакисный фотоэлемент.

Большое применение себе находят также микрофотометры с автоматической регистрацией.

На аналогичном принципе основано устройство приборов для целей химического контроля и анализа, в которых выдающуюся роль играют фотоэлементы. В этом случае также следовало бы серьезное внимание уделить вентильным фотоэлементам.

Так например при помощи таких фотоэлементов очень легко определяется поглощение света каким-либо раствором. Для этого достаточно измерить фототок в том случае, когда световой луч непосредственно попадает на фотоэлемент и когда на пути его поставлена поглощающая свет среда. Отношение фототоков сразу же дает нам пропускательность, ибо в том случае, когда внешнее сопротивление цепи незначительно, фототок можно считать строго пропорциональным интенсивности света, как это было показано выше. Таким образом возможно измерение степени помутнения раствора, что имеет большое значение в некоторых производственных процессах.

б) Применение фотоэлементов в световой сигнализации, передаче изображений, в звуковом кино. Очень велика роль фотоэлементов в световой сигнализации, которая за последние годы приобретает весьма большое значение. При этом важна не только сигнализация видимым светом, но и невидимым: ультрафиолетовыми лучами и, в особенности, инфракрасными. В последнем случае используются обычно селено-теллуrowые фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, токи от которых довольно легко усиливать при помощи катодных ламп.

На рис. 49 показано схематическое устройство приемника инфракрасных лучей. Здесь изменяющееся инфракрасное излучение падает на параболическое зеркало, в фокусе которого помещается твердый фотоэлемент (селено-теллуrow). Фототок усиливается при помощи двух катодных ламп с сопротивлением и емкостями. Схема передатчика в основном состоит из микрофона, токи которого усиливаются и поступают в специальную гелиевую лампу с большой плот-

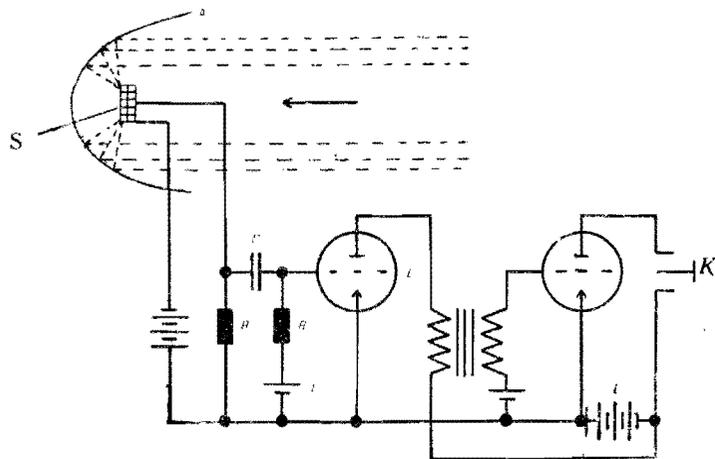


Рис. 49. Схема устройства приемника инфракрасных лучей, употребляющегося для цели световой сигнализации. A — параболическое зеркало, S — селено-теллуrowый фотоэлемент, E — батареи, R — сопротивления, C — конденсатор, L — катодные лампы, K — телефон.

ностью излучения. Специальный светофильтр задерживает все видимые лучи и пропускает только инфракрасные, которые после прохождения через оптическую систему идут мощным параллельным пучком. Таким путем можно передать речь на довольно большие расстояния. В таблице 8 приведены данные относительно дальности передачи такого типа.

| Авторы схем | Источник света | Длина волны | Род модуляции | Приемный фотоэлемент | Число ка-тодных ламп в усилителе | Дальность действия в километрах |
|----------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Белл 1800 | Дуга | Длинноволн. видимые | Отражение от мембраны | Селеновый | — | 0,25 |
| Симон, 1897 | " | " | Говорящая дуга | " | — | 1,3 |
| Румер, 1904 | " | " | " | Цинкди-ческий се-леновый | — | 7—15 |
| Тиринг, 1920 | " | " | " | Селеновый | 4 | 9,0 |
| Майорона, 1927 | Ртутная дуга | Ультрафио-летовые (0,365) | " | Фотоэле-мент с внеш-ним фото-эффектом | 1 | 16 |
| Циклер, 1928 | Дуга | Коротковол-нов. видимые | " | Кальцевый фотоэле-мент | Тройная лам-па Лёве | Нет данных |
| Шретер, 1930 | Желевая лампа с тлеющим разрядом | Инфракрас-ные | Элемент Кэрра | Галлофко-вые или се-лено-теллу-ровые | 4 | " |
| Шретер, 1930 | Дуга | Инфракрас-ные | Диск с от-верстиями | Селено-тел-луровые | 4 | 28,0 |

Последние числа весьма убедительны и заставляют нас внимательнее отнестись к этому рода передаче. Меднозакисные и селеновые фотоэлементы благодаря своей большой чувствительности к инфракрасным лучам и сравнительно небольшой инерционности смогли бы и в этом деле быть очень полезными.

Особенно велика роль фотоэлемента в передаче изображений по проводам и без провода. В последние годы достижения в этой области настолько велики, что эти опыты уже вышли за пределы лабораторий и получили большое техническое распространение. Известно, например, что ныне каждый из нас за небольшую плату может передать любое изображение из Москвы в Ленинград по телеграфу. Кроме того большие радиостанции нашего Союза уже производят опытную передачу изображений по радио. Для примера можно указать, что в 15-летие Октябрьской революции вид Красной площади в Москве передавался по радио. Недалеко то время, когда наши радиолюбители будут иметь возможность за недорогую плату приобретать приборы для приема изображений. Десять лет тому назад вряд ли кто-либо мог мечтать об этом. Но теперь это свершившийся факт. Фотоэлементу мы и здесь обязаны решением задачи. Лишний раз мы на этом примере убеждаемся в том, насколько большую роль в технике могут сыграть физические явления, кажущиеся в определенный период развития физики абстрактными, имеющими

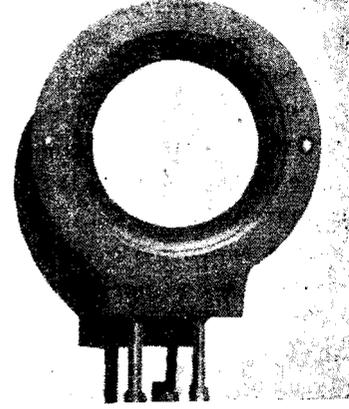


Рис. 50. Внешний вид технической модели меднозакисного фотоэлемента с фронтальным эффектом. Изготовлен в Ленинградском электрофизическом институте.

только научный интерес. Ведь несомненно, таковым, лет двадцать пять тому назад, представлялся фотоэлектрический эффект. Вряд ли целесообразно здесь подробно останавливаться на описаниях сложных современных схем по передаче изображений на расстояние. Это завело бы нас слишком далеко. К тому же в настоящее время имеется уже достаточное количество доступной литературы по данному вопросу. Роль же фотоэлемента в этом деле ясна. Фотоэлемент и в этом случае играет роль «электрического глаза». Его задача заключается в одном случае в том, чтобы превратить свет в электрический ток, подавая который в антенну радиостанции, мы получим возможность в окружающем пространстве создавать радиоволны, воспроизводящие изображение какого-либо предмета. В приемной радиостанции мы эти электрические колебания снова превращаем в свет, используя так называемые элементы Кэрра. Изменения света в последнем случае должны быть теми же самыми, что и при передаче. Таким образом возможно воспроизведение не только неподвижных объектов, но и движущихся. Для целей телевидения фотоэлементы не должны обладать инерцией. Поэтому элементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, вряд ли когда-либо найдут себе применение в этой области. Существенно было бы приспособить для этой цели вентильные фотоэлементы. Это несомненно задача ближайшего будущего.

Другим примером, ярко иллюстрирующим роль фотоэлемента в технике, служит звуковое кино, столь распространенное и у нас и за границей в настоящее время. По последним данным (1931 год) создано уже около 30.000 кино-театров с звуковым оформлением, в каждом из которых имеются фотоэлементы, необходимые именно при воспроизведении звука. При записи звука используется следующее. Акустические волны превращаются при помощи микрофона в электрический переменный ток. Этот ток либо изменяет горение лампы с тлеющим разрядом (неоновая лампа и т. п.), либо пользуются элементом Кэрра. Колебания яркости света — за-

печатываются на краю той же самой пленки, на которой производится одновременно съемка. При этом на краю пленки получается узкая полоса с различными степенями почернения. Другой способ записи звука основан на следующем. Между постоянным источником света и пленкой находится специальная щель. При отсутствии звука щель освещает ровно половину действующей полоски пленки. Таким образом при этом только половина ее освещается. Возникающие акустические волны и им соответствующие электрические токи вызывают захождение света в область тени и на пленке получаются амплитудообразные штрихи. Величина и вид этого штриха очевидно будут определяться характером звуковых колебаний. Для записи амплитуд пользуются либо колеблющимся зеркалом, либо осциллографом Герке. В последнем мы используем тот факт, что длина светящегося колпачка на электроде пропорциональна силе протекающего через трубку с разреженным газом тока. Длина этого колпачка и запечатлевается на краю пленки.

Теперь перейдем к описанию воспроизводящего звук устройства. Свет от 30-ваттной вольфрамовой лампы через линзу освещает узкую щель (0,17 мм) и в дальнейшем проходит через оптику микроскопа. Далее он попадает на край пленки, на которой при этом появляется освещенная полоска (высота 0,017 мм и ширина 2,1 мм). Это подобрано так, что вся ширина края пленки с звуковой записью покрывается светом. Световой луч, проходя через пленку, попадает на фотоэлемент. При этом в фотоэлементе возникает некоторый слабый электрический ток, величина которого зависит от степени почернения соответствующего места звукового края пленки. Этот слабый ток поступает затем в усилительное устройство, после чего уже усиленный попадает в громкоговоритель. Если теперь пленка будет двигаться с той же самой скоростью, что и при съемке (24 изображения в секунду), то громкоговоритель будет в точности воспроизводить записанные при съемке звуки. В последнее время звуковое

кино достигло высокой степени совершенства и искажения звуков в значительной степени устранены. Таково принципиальное устройство звукового кино. Без фотоэлемента и с этой задачей справиться мы не могли бы. Вентильные фотоэлементы до сих пор применены не были.

с) Другие применения фотоэлементов в технике. Существует еще огромное количество других применений фотоэлементов в технике и здесь вентильный фотоэлемент сможет заменить дорогие стоящие другие типы фотоэлементов. Правда, лишь полное решение задачи об усилении фототоков вентильных фотоэлементов сможет привести к такому результату.

Таковы задачи автоматизации. В последнее время например применяют фотоэлемент при автоматической прокатке раскаленного металла. В этом случае светящаяся масса металла действует в конце пути прокатки на фотоэлемент, сила тока в котором при этом возрастает. При определенном значении последней, фотоэлемент включает специальное реле, изменяющее направление хода станка проката. Руки человека при этом заменяются реле, а глаза — фотоэлементом.

Фотоэлементы применяются также для автоматического включения и выключения освещения, как на улицах, так и в общественных зданиях. По мере ослабления яркости дневного освещения ток в фотоэлементе ослабевает. При определенном минимальном значении его автоматически при помощи специального реле включается освещение. Это происходит вечером. Утром произойдет, очевидно, обратное.

На этом же принципе основаны и другие автоматически действующие установки, использующие «электрический глаз». Можно было бы указать для примера автоблокировку, охрану зданий, сигнализацию на производстве, диспетчерство на железных дорогах и на заводах, сортировку (автоматическую) различных объектов и бесчисленное множество других применений фотоэлемента. В любой установке глаз человека может быть заменен фотоэлементом, а руки его — авто-

матически действующим реле. Во второй пятилетке задача автоматизации производства будет поставлена во весь рост и наш долг вовлечь в эту важнейшую проблему широчайшие массы трудящихся. Вентильный фотоэлемент в этих вопросах незаменим по своей дешевизне и простоте. Ему повидимому здесь суждено сыграть крупнейшую роль.

д) Фотоэлемент как источник энергии. Выше мы уже подчеркивали многократно важность фотоэлемента как источника электрической энергии. Особенно любопытны при этом вентильные фотоэлементы, в которых происходит самое непосредственное превращение световой энергии в электрическую. Малость коэффициента полезного действия их не разрешает пока эту актуальнейшую проблему. Но это разумеется не значит, что мы не должны работать в направлении повышения коэффициента полезного действия их. Тем более, что принципиально решение этой проблемы представляется вполне возможным.

На этом мы закончим описание применений фотоэлементов в технике. Оно не может претендовать на полноту, что вполне понятно. В нашу задачу входило лишь дать набросок того громадного круга задач, для разрешения которых фотоэлемент часто ничем другим нельзя заменить. Область эта громадна, но сулит она еще больше. Освободить человека от ряда чисто механических обязанностей, заменить эту автоматическую работу руками работой настоящих машин-автоматов для того, чтобы он мог отдаться полностью творческой, направляющей работе и участвовать в общем гигантском труде покорения природы — вот одна из многих задач, которая стоит перед нами, стоящими у грани социализма.

О Г Л А В Л Е Н И Е.

| | Стр. |
|---|------|
| Предисловие авторов | 3 |
| I. Общая часть. | |
| 1. Введение | 5 |
| 2. Общие представления о строении твердых тел | 8 |
| 3. Проводники | 12 |
| 4. Изоляторы | 17 |
| 5. Полупроводники | 19 |
| 6. Проблема выпрямления электрического тока | 24 |
| 7. Генерация электрического тока | 27 |
| II. Твердые выпрямители. | |
| 1. Типы твердых выпрямителей и механизм их действия | 30 |
| 2. Изготовление купроксных выпрямителей | 40 |
| 3. Изготовление селеновых выпрямителей | 49 |
| 4. Электрические характеристики меднозакисных и селеновых выпрямителей | 52 |
| 5. Тепловые свойства меднозакисных и селеновых выпрямителей | 59 |
| 6. Техническое применение твердых выпрямителей | 61 |
| III. Твердые фотоэлементы. | |
| 1. Фотоэффект и основные законы его | 82 |
| 2. Внутренний фотоэффект | 92 |
| 3. Вентильный фотоэффект | 65 |
| 4. Техника изготовления вентильных фотоэлементов | 101 |
| 5. Методика измерения фототоков и фотоэлектродвижущих сил | 111 |
| 6. Фотоэлектрическая характеристика вентильного фотоэлемента | 115 |
| 7. Зависимость фототока и фотоэлектродвижущей силы от интенсивности света | 117 |
| 8. Температурная зависимость вентильного фотоэффекта | 122 |
| 9. Зависимость вентильного фотоэффекта от длины волны падающего света | 127 |
| 10. Физическая модель вентильного фотоэлемента | 135 |
| 11. Инерционность вентильных фотоэлементов | 136 |
| 12. Влияние магнитного поля на вентильный фотоэффект | 138 |
| 13. Постоянство вентильных фотоэлементов | 141 |
| 14. Чувствительность вентильных фотоэлементов | 143 |
| 15. Коэффициент полезного действия вентильных фотоэлементов | 144 |
| 16. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом | 145 |
| 17. Усиление фототоков вентильных фотоэлементов | 147 |
| 18. Технические применения твердых фотоэлементов | 148 |