

З.Ю.Готра
И.М.Николаев


**КОНТРОЛЬ
КАЧЕСТВА
И НАДЕЖНОСТЬ
МИКРОСХЕМ**

Учебник
для
техникумов

З.Ю.Готра
И.М.Николаев

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТЬ МИКРОСХЕМ

*Допущено
Министерством электронной промышленности
в качестве учебника
для средних специальных учебных заведений
по специальности 2002
«Производство изделий электронной техники»*

 Москва
«Радио и связь»
1989

ББК 30.14
Г 74
УДК 621.396.6.049

Рецензенты: Андрианов В. И., Колодий П. А.

Редакция литературы по электронной технике

Готра З. Ю., Николаев И. М.

Г 74 Контроль качества и надежность микросхем: Учебник для техникумов. — М.: Радио и связь, 1989. — 168 с.: ил.

ISBN 5-256-00257-0.

Рассматриваются главные направления теории надежности. Приводятся основные показатели качества и надежности, анализируются виды, причины и механизмы отказов интегральных микросхем. Определяется место неразрушающего контроля в системе управления качеством. Излагаются методики климатических и механических испытаний, методы контроля качества интегральных микросхем. Рассматриваются вопросы создания автоматизированных систем управления качеством.

Для учащихся техникумов по специальности «Производство изделий электронной техники».

Г 2302030700-109 Свод. план для сред.
046(01)-89 спец. учеб. заведений 133-89

ББК 30.1

Учебное издание

Готра Зенон Юрьевич
Николаев Игорь Моисеевич

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТЬ МИКРОСХЕМ

Учебник

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев
Редактор Н. И. Кузнецова
Технический редактор А. Н. Золотарева
Обложка художника С. Ю. Архаягельского
Художественный редактор Н. С. Шеин
Корректор Л. А. Буданцева

ИБ № 1003

Сдано в набор 19.01.89 Подписано в печать 5.04.89
Т-07790 Формат 60×90^{1/16} Бумага кн.-журнальная № 2 Гарнитура «Литературная»
Печать высокая Усл. печ. л. 10,5 Усл. кр.-отт. 10,75 Уч.-изд. л. 12,4
Тираж 24 000 экз. Изд. № 21225 Зак. № 5 Цена 35 к.
Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь». 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

ISBN 5-256-00257-0

© Издательство «Радио и связь», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Микроэлектроника как современное направление проектирования и производства электронной аппаратуры различного назначения является катализатором научно-технического прогресса. Автоматизация производств, создание гибких перестраиваемых роботизированных систем немислимы без применения интегральных микросхем.

Технология изготовления изделий микроэлектроники обеспечивает высокий уровень производительности труда, комплексную микроминиатюризацию электронной аппаратуры связи, автоматики, вычислительной техники и вбирает в себя передовой опыт и достижения многих отраслей науки и техники: от физики взаимодействия атомных и ядерных частиц с веществом до микрометаллургии и прецизионной химической технологии.

Вопросы обеспечения качества и повышения надежности микросхем — одни из наиболее важных при их разработке, производстве и эксплуатации.

Для определения качества и надежности интегральных микросхем в книге приводится статистический ряд и его характеристики, рассматриваются основные законы распределения случайной величины, гипергеометрический, биномиальный законы. Приводятся критерии согласия экспериментальных и теоретических законов распределения. Даны определения показателей надежности: наработки до отказа, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов. Изучаются вопросы организации контроля качества в производстве интегральных микросхем путем выборочного контроля, контроля технологического процесса с помощью среднего значения выборки, стандартного отклонения и с помощью контрольных карт. Важное место отводится анализу видов отказов, повреждений интегральных микросхем. В книге рассмотрены также основные методы контроля, вопросы стандартизации климатических и механических требований при испытаниях электронной техники, а также общая методология их проведения.

Авторы

Глава 1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И КАЧЕСТВО

1.1. КАТЕГОРИИ И ВИДЫ СТАНДАРТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В решении задач дальнейшего подъема народного хозяйства большое значение приобретает стандартизация как одно из важнейших средств ускорения технического прогресса, повышения качества продукции и создания основы для широкого развития специализации производства и внедрения комплексной механизации и автоматизации производственных процессов.

Стандартизация — установление и применение правил для упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон и, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении условий эксплуатации (использования) и требований безопасности. Она основывается на объединенных достижениях науки, техники и практического опыта, определяет основу не только настоящего, но и будущего развития и должна осуществляться неразрывно с прогрессом.

Стандарт — результат конкретной работы по стандартизации, полученный на основе достижений науки, техники, практического опыта и утвержденный компетентным органом. Стандарт является нормативно-техническим документом, регламентирующим нормы, правила, требования, понятия и обозначения. Стандарт формулирует определенные свойства конкретного изделия, устанавливает предел качества продукции, ниже которого она бракуется.

В Советском Союзе разрабатываются и внедряются системы (комплексы) государственных стандартов (ГОСТ) и технической документации. основополагающими стандартами являются:

- ГОСТ 1 — Государственная система стандартизации (ГСС);
- ГОСТ 2 — Единая система конструкторской документации (ЕСКД);
- ГОСТ 3 — Единая система технологической документации (ЕСТД);
- ГОСТ 4 — Система показателей качества продукции;
- ГОСТ 5 — Единая система аттестации качества продукции (ЕСАКП);
- ГОСТ 8 — Государственная система единства измерений (ГСИ).

ГОСТ 14 — Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Государственная система стандартизации (ГОСТ 1.0—68) — комплекс взаимосвязанных правил и положений, определяющих цели и задачи стандартизации, организацию и методику проведения работ по стандартизации во всех отраслях народного хозяйства СССР и союзных республик, порядок планирования, разработки, оформления, согласования, утверждения, издания, обращения, внедрения стандартов всех категорий и другой нормативно-технической документации, а также контроль за их внедрением. Основные цели стандартизации:

ускорение технического прогресса, повышение эффективности общественного производства и производительности труда;

улучшение качества продукции и обеспечение его оптимального уровня;

обеспечение увязки требований к продукции с потребностями народного хозяйства;

совершенствование организации управления народным хозяйством и установление рациональной номенклатуры выпускаемой продукции;

развитие специализации в области проектирования и производства продукции;

рациональное использование производственных фондов и экономия материальных и трудовых ресурсов;

обеспечение охраны труда;

развитие международного экономического, технического и культурного сотрудничества.

Для достижения этих целей должны быть решены следующие задачи:

установление требований к качеству готовой продукции;

установление единой системы показателей качества продукции, методов в области проектирования и производства продукции с целью обеспечения оптимального качества и исключения нерационального многообразия видов, марок и типоразмеров продукции;

развитие унификации промышленной продукции как важнейшего условия специализации производства, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов;

обеспечение единства и правильности измерений в стране, совершенствование эталонов, единиц, методов и средств измерений высшей точности;

установление единых систем документации, классификации и кодирования всей продукции;

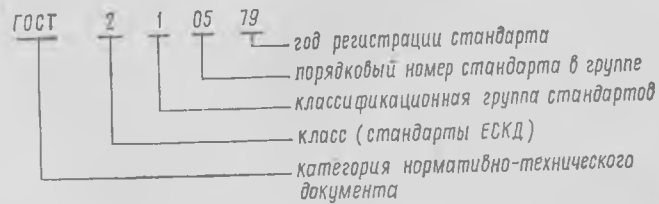
установление единых терминов, обозначений и величин в важнейших областях науки и техники.

Правила выполнения, оформления и обращения конструкторских документов в различных областях народного хозяйства регламентируются стандартами ЕСКД. Эта система не только формулирует правила выполнения и оформления конструкторских документов, но и обеспечивает их единство для одинакового пони-

мания на различных предприятиях страны, а также способствует сокращению количества документов, обуславливает возможность применения упрощенных чертежей, схем, устраняет из документации дублирующие данные и т. п. Стандарты ЕСКД способствуют также применению средств вычислительной техники при обработке информации, содержащейся в документации. Кроме того, стандарты ЕСКД обеспечивают преемственность при обработке документации в различных сферах (конструирование, снабжение, эксплуатация и т. д.) и содержат такие правила обозначения документации, которые максимально сокращают время поиска ранее спроектированных изделий и их составных частей.

Требования стандартов ЕСКД распространяются на все виды конструкторских документов: учетно-регистрационную документацию и документацию по внесению изменений в конструкторские документы; нормативно-техническую и технологическую документации, а также научно-техническую и учебную литературу лишь в той ее части, которая не регламентируется специальными стандартами и нормативами.

Комплексу стандартов ЕСКД присвоен номер второго государственного стандарта, т. е. нумерация стандартов, входящих в систему, начинается с цифры 2. Затем в обозначении стандарта (после точки) следует цифра, соответствующая шифру классификационной группы стандартов. Распределение стандартов ЕСКД по классификационным группам регламентирует ГОСТ 2.001—70. По данному ГОСТу, например группе стандартов «Общие положения», присвоен шифр 0, группе «Основные положения» — 1 и т. д. После шифра классификационной группы в обозначении стандарта указывают его номер в группе (двузначная цифра). В заключение (после тире) приводят двузначную цифру, соответствующую году регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта «Общие требования к текстовым документам» выглядит следующим образом:



Комплекс стандартов ЕСТД устанавливает единые правила выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации и состоит из 9 групп:

- 0 — основные положения;
- 1 — основополагающие стандарты;
- 2 — классификация деталей и обозначение технологических документов;
- 3 — правила учета применяемости деталей, изделий, технологической оснастки;

4 — правила оформления технологических документов, специализированных по видам работ;

5 — правила оформления технологических документов на испытание;

6 — вспомогательное производство;

7, 8 — для последующих стандартов;

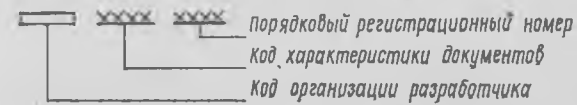
9 — нормативное хозяйство.

Основополагающие стандарты регламентируют стадии проектирования, виды документов, общие требования к ним, правила оформления документов общего назначения, комплектность и т. д.

ГОСТ 3.1102—81 устанавливает стадии разработки, виды и комплектность технологических документов. Установлено пять стадий проектирования технологии: техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект и разработка рабочей документации. Применяются следующие виды документов: маршрутная карта (МК), операционная карта (ОК), карта эскизов (КЭ), ведомость технологических документов (ВТД), технологическая инструкция (ТИ), ведомость материалов (ВМ), ведомость технологической оснастки (ВО), комплектовочная карта (КК), ведомость расцеховки (ВР), карта технологического процесса (КТП), карта типового технологического процесса (КТТП).

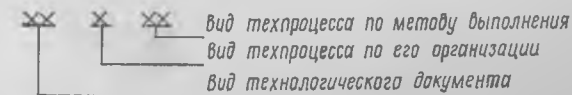
ГОСТ 3.1103—82 устанавливает основные надписи на картах, разбитых на графы, и на текстовых документах, например технологических инструкциях. В ГОСТ 3.1104—81 приведены общие требования к технологическим документам. ГОСТ 3.1105—84 содержит правила оформления технологических документов. ГОСТ 3.1107—81 регламентирует условные обозначения для опор и зажимов различных видов. ГОСТ 3.1109—82 охватывает все термины и определения основных понятий из области технологических процессов производства изделий.

Из ЕСТД 2-й группы отметим ГОСТ 3.1201—85, который устанавливает систему обозначения технологических документов. Каждому разработанному и выпускаемому документу должно быть присвоено обозначение. Устанавливается классификационная система обозначения документов по следующей структуре:



Код организации-разработчика присваивают по Общесоюзному классификатору предприятий и организаций.

Устанавливается следующая структура и длина кода характеристики документа:



Технологические документы кодируются следующим образом:

Код	Вид технологического документа
10	Маршрутная карта
20	Карта эскизов
25	Технологическая инструкция
30	Комплектовочная карта
40	Ведомость технологических документов
42	Ведомость технологической оснастки
43	Ведомость материалов
50	Карта технологического процесса
60	Операционная карта

Код	Вид техпроцесса по его организации
0	Без указания
1	Единый процесс (операция)
2	Типовой процесс (операция)
3	Групповой процесс (операция)

Код	Вид техпроцесса по методу выполнения
01	Технологический процесс изготовления изделия
02	Ремонт
03	Технический контроль
04	Перемещение
05	Складирование
06	Раскрой и отрезка заготовок
30	Холодная штамповка
40	Механическая обработка
50	Термическая обработка
70	Нанесение защитного и защитно-декоративного покрытия
75	Электрофизическая обработка
80	Пайка
90	Сварка

Примечание. Более полные данные приведены в ГОСТ 3.1201—85. Порядковые регистрационные номера начинаются с номера 00001 и заканчиваются 99999, они присваиваются службой организации-разработчика.

Единая система технологической подготовки производства представляет собой установленную государственными стандартами систему организации и управления процессом технологической подготовки производства, предусматривающую широкое применение прогрессивных типовых технологических процессов, стандартной технологии оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов и инженерно-технических работ.

Комплекс стандартов ЕСТП (класс 14) включает следующие группы стандартов:

- 0 — общие положения;
- 1 — правила организации и управления процессом технологической подготовки производства;
- 2 — правила обеспечения технологичности конструкции изделий;
- 3 — правила разработки и применения технологических процессов и средств технологического оснащения;
- 4 — правила применения технических средств механизации и автоматизации инженерно-технических работ;
- 5 — прочие стандарты.

Основная цель внедрения ЕСТП состоит в том, чтобы достичь полной готовности производства любого типа (единичного, серийного, массового) к выпуску изделий заданного качества в мини-

мальные сроки и при минимальных трудовых и материальных затратах. В частности, ЕСТП гарантирует:

единый для всех предприятий и организаций системный подход в выборе и применении методов и средств технологической подготовки производства, соответствующих передовым достижениям науки и техники;

выпуск изделий высокого качества при минимальных трудовых и материальных затратах;

гибкость производства, что позволит непрерывно его совершенствовать и быстро перестраивать на выпуск новых изделий;

рациональную организацию механизированного и автоматизированного выполнения инженерно-технических работ;

взаимосвязь технологической подготовки производства с другими автоматизированными системами и подсистемами (САПР, АСУП, АСУТП).

Назначение некоторых стандартов ЕСТП следующее. ГОСТ 14.201—83 предусматривает общие правила отработки конструкции изделия на технологичность. ГОСТ 14.303.73 обращает особое внимание на применение типовых технологических процессов и широкое использование ЭВМ. Правила разработки групповых технологических процессов изложены в ГОСТ 14.316—75. Выбор технологического оборудования производится в соответствии с ГОСТ 14.301—83.

Основополагающим стандартом четвертой группы является ГОСТ 14.401—73. Этот стандарт регламентирует основной порядок проведения работ по автоматизации, устанавливает этапы проведения работ, состав работ на каждом этапе и требования, которым должен удовлетворять результат каждой проведенной работы.

Необходимо отметить, что стандарты не являются чем-то неизменным, они непрерывно пересматриваются. При этом устаревшие стандарты изменяются частично. Все изменения отражаются в специальных периодических изданиях Госстандарта СССР.

Для электронной промышленности стандартизация имеет важнейшее значение ввиду весьма широкого применения изделий электронной техники во всех отраслях народного хозяйства и техники. Качество изделий электронной техники, их уровень непосредственно определяют качество и уровень разнообразнейших приборов, аппаратов, устройств и систем. Для изделий электронной техники характерны многообразие и высокий уровень требований, постоянный рост номенклатуры, сложность процессов разработки и производства, как правило массового и крупносерийного, высокие по сравнению с другими отраслями темпы роста объемов научных исследований и производства.

В изделиях электронной техники происходят сложные физико-химические процессы, а их изготовление требует десятков, сотен разнообразных технологических операций. Ежегодно заказывается огромное количество разработок новых приборов, причем каждый из заказчиков выдвигает свои особые требования. Посто-

янно растет потребность в создании все более сложных приборов. Это обуславливает особую важность, высокую эффективность и разнообразие работ по стандартизации. В электронной промышленности стандартизация развивается как комплексная система, базирующаяся на основополагающих государственных системах стандартов и охватывающая сферы проектирования, производства, применения и эксплуатации изделий электронной техники.

1.2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Улучшение качества продукции, ее надежности и долговечности на основе достижений науки и техники — важный фактор интенсификации производства. Каковы основные направления воздействия научно-технического прогресса на качество продукции? Прежде всего — создание и внедрение нового, более совершенного оборудования. В электронной промышленности особое внимание уделяется комплексной автоматизации участков и цехов на основе промышленных роботов.

Огромное значение для улучшения технико-экономических характеристик продукции имеет внедрение в производство принципиально новой техники с применением химических и электрофизических методов обработки, атомной и квантовой техники, лазера и ультразвука, магнитного поля и плазмы. На качество продукции существенное влияние оказывает совершенствование технологических процессов. На передний план сейчас выдвигаются внедрение прогрессивных методов комплексной переработки сырья, применение безотходных технологий, гарантирующих не только интенсификацию производственного процесса, но и охрану окружающей среды. Важное направление — внедрение в производство конструкционных материалов с высокими физическими, химическими и механическими свойствами — сверхпроводящих, сверхчистых и т. д. Каждое из направлений научно-технического прогресса обеспечивает улучшение качественных характеристик продукции, создает благоприятные условия для ускорения развития науки и техники.

Проблема повышения качества продукции не может быть решена отдельными конструктивными и техническими мероприятиями. Разрешение ее возможно на основе системы управления качеством, основные положения которой заложены в ГОСТ 15.467—70.

Система управления качеством охватывает все этапы создания изделий (проектирование, изготовление, эксплуатация) и увязывает в комплексе показатели качества сырья, материалов, полуфабрикатов и готовых изделий. Она базируется на стандартизации. Стандарты регламентируют требования к продукции, сырью, материалам и комплектующим ее элементам; определяют работы по управлению качеством; устанавливают методы и средства контроля качества и систему аттестации качества; определяют технологические процессы производства продукции; устанавливают ре-

жимы и правила эксплуатации продукции; предусматривают госнадзор и ведомственный контроль за качеством продукции.

Под *управлением качеством продукции* понимается установление, обеспечение и поддержание необходимого качества при ее разработке, производстве и эксплуатации, осуществляемые путем систематического контроля качества и целенаправленного воздействия на условия и факторы, влияющие на качество продукции.

Промышленная продукция, выпускаемая предприятиями, в зависимости от технического уровня подразделяется на три категории качества: высшую, первую и вторую. К высшей категории относится продукция, которая по показателям технико-экономического уровня превосходит лучшие отечественные и зарубежные достижения или соответствует им и является конкурентоспособной на внешнем рынке.

К первой категории относится продукция, которая по технико-экономическим показателям соответствует современным требованиям стандартов (техническим условиям) и удовлетворяет потребности народного хозяйства.

Во вторую категорию качества включается продукция морально устаревшая, не соответствующая современным требованиям. Такую продукцию надо модернизировать или снимать с производства и заменять новой.

Важной составной частью системы управления качеством продукции является аттестация качества. Аттестация качества продукции бывает государственная, отраслевая и заводская. На основе аттестации осуществляются: планирование объемов производства продукции по категориям качества; повышение технического уровня продукции: оценка деятельности предприятий и отраслей; стимулирование производства высококачественной продукции.

Для оценки качества продукции, ее технико-эксплуатационных свойств применяется система показателей. У каждого изделия есть свой главный обобщающий показатель, характеризующий его основное свойство. Критериями качества являются:

- надежность изделия в эксплуатации;
- долговечность, которая характеризует способность изделия сохранять полезные свойства до определенного временного предела, после чего его использовать либо нерационально, либо невозможно;
- технологичность изготовления изделия;
- экономические характеристики, к примеру уровень трудоемкости, материалоемкости, энергоемкости производства продукции, величина общих затрат и т. п.

При оценке качества продукции применяются еще показатели ее стандартизации и унификации, патентно-правовые, экологические, эстетические показатели и др. Каждый из них характеризует какую-то грань полезности изделия, а все вместе — его качество.

Задачи контроля, играющего важнейшую роль в управлении качеством на производстве, заключаются в основном в оценке ка-

чества и установлении соответствия качества заданным требованиям. Для оценки качества изделий используется показатель его уровня. Уровень качества продукции — это относительная характеристика качества, полученная путем сравнения его показателей с какими-либо базовыми (исходными) показателями. Оценка уровня производится по отраслевым методикам. Результаты оценки заносятся в карту технического уровня и качества продукции.

Глава 2. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Качество продукции — это совокупность ее свойств, обуславливающих способность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с назначением.

Надежность — свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, хранения и транспортировки.

Основное понятие, используемое в надежности, — понятие отказа, т. е. утраты работоспособности, наступающей либо внезапно, либо постепенно. *Работоспособность* — такое состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, предъявляемым к его основным параметрам. Показатели надежности нельзя противопоставлять другим показателям качества. Без учета надежности все другие показатели качества теряют смысл, точно также и показатели надежности становятся полноценными показателями качества лишь в сочетании с другими характеристиками изделия.

Интегральные микросхемы являются высоконадежными элементами радиоэлектронной аппаратуры, и обычные методы определения их надежности становятся все менее приемлемыми по мере снижения интенсивности отказов в ИМ. Для испытаний ИМ на надежность при нормальных условиях даже при значительном числе испытуемых ИМ потребуется несколько лет. Для сокращения сроков испытаний ИМ их проводят при нагрузках, значительно превышающих номинальные. Нагрузки должны быть такими, чтобы механизм отказов соответствовал отказам, возникающим в нормальном рабочем режиме.

Быстрое изменение и усовершенствование технологических процессов производства ИМ приводит к возникновению новых механизмов отказов, а следовательно, и необходимости новой оценки надежности.

Процесс контроля и испытаний сопровождается случайными событиями. *Случайными событиями* называются такие, которые могут произойти или не произойти при определенном комплексе ус-

ловий, тесно связанных с возможностью появления данных событий. Изучением случайных событий занимается теория вероятностей.

Так, например, время работы до отказа (время безотказной работы) ИМ, поставленных на испытание, будет у каждой отказавшей микросхемы различно, что связано с невозможностью идеально выдержать технологические режимы и строгую однородность физико-химической структуры. Неконтролируемые колебания их параметров влияют на продолжительность безотказной работы ИМ. Это приводит к тому, что за рассматриваемый конечный промежуток времени отказ каждой конкретной ИМ может произойти или не произойти, т. е. возникновение отказов испытываемых ИМ в разные промежутки времени представляет собой случайное событие.

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Если известно, что в готовой партии ИМ, состоящей из N штук, имеется D дефектных изделий, то вероятность извлечения из этой партии дефектной ИМ равна

$$Q = D/N. \quad (2.1)$$

Вероятность же извлечь бездефектную ИМ

$$P = \frac{N-D}{N} = 1 - Q, \quad (2.2)$$

т. е. зная вероятность того, что какое-либо событие произойдет, можно вычитанием ее из единицы определить вероятность того, что событие не произойдет.

Если в партии ИМ дефектные изделия отсутствуют полностью ($D=0$), то вероятность того, что будет извлечено бездефектное изделие, равна:

$$P = \frac{N-D}{N} = \frac{N-0}{N} = 1. \quad (2.3)$$

Такое событие называется *достоверным*.

Если партия состоит только из дефектных изделий, т. е. $N=D$, то вероятность извлечь бездефектное изделие равна:

$$P = \frac{N-D}{N} = \frac{N-N}{N} = 0. \quad (2.4)$$

Такое событие называется *невозможным*.

Если методами случайного отбора из ИМ сдаваемой партии составить выборку* объемом n и после проверки в выборке выявится d дефектных микросхем, то доля дефектных ИМ в выборке при

* Выборкой называют часть изделий, отобранных из общей их совокупности для получения информации о всей массе изделий, называемой общей или генеральной совокупностью.

опытной оценке ($q_{оп}$), называется *статистической вероятностью дефектных изделий* и равна:

$$q_{оп} = d/n. \quad (2.5)$$

Статистическая вероятность бездефектных изделий в выборке равна

$$p_{оп} = \frac{n-d}{n} = 1 - q_{оп}.$$

Вполне очевидно, что Q и P есть величины постоянные для данной партии изделий, определяемые тем, сколько в партии дефектных изделий, величины же $q_{оп}$ и $p_{оп}$ — случайные.

Величины Q и P называются *генеральными характеристиками*, а $q_{оп}$ и $p_{оп}$ — *выборочными характеристиками*.

При увеличении числа изделий в выборке статистическая вероятность $q_{оп}$ (или $p_{оп}$) все более теряет свой случайный характер. Случайные обстоятельства, свойственные малым выборкам, при увеличении их объема взаимно погашаются, а значение статистической вероятности $q_{оп}$ (или $p_{оп}$) приближается к генеральной (Q (или P)).

2.2. СТАТИСТИЧЕСКИЙ РЯД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Если замеряется какой-либо параметр в партии ИМ, то его конкретное значение для каждой ИМ является случайным событием. В результате замеров будем иметь совокупность случайных значений параметра. Расположение замеренных случайных значений в возрастающем или убывающем порядке создает *упорядоченный* или *ранжированный ряд* случайных величин x_i .

Если значения x_i повторяются несколько раз, то их объединяют, а число случаев для каждого из повторяющихся значений обозначают через m_i и называют *абсолютной частотой* или *статистическим весом*, а сам ряд случайной величины — *статистическим рядом*.

Статистический ряд описывают средним положением наблюдаемых значений и отклонением единичных значений от среднего. Среднее положение наблюдаемых значений в ряду характеризуется с помощью *средней арифметической*.

Если каждое из значений случайной величины встречается только один раз, средняя арифметическая определяется выражением:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2.7)$$

В случае статистического ряда (когда значению случайной величины x_i соответствует какая-то частота m_i) средняя арифметическая называется *средней взвешенной* и имеет вид

$$\bar{x} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (2.8)$$

Средние величины не учитывают рассеивание вокруг них отдельных значений. Рассеивание случайных величин характеризуется размахом

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (2.9)$$

где x_{\max} , x_{\min} — максимальное и минимальное значения случайных величин.

Колебание значений параметра в статистическом ряду характеризуется средним квадратом отклонения S^2 , который называют *выборочной дисперсией*.

Дисперсию невзвешенную вычисляют по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2.10)$$

При наличии соответствующих частот m_i дисперсия вычисляется по формуле для дисперсии взвешенной:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}{\sum_{i=1}^n m_i - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}{n-1}. \quad (2.11)$$

Размерность рассеивания совпадает с размерностью измеряемой случайной величины.

Среднее квадратическое отклонение для невзвешенной и взвешенной дисперсий имеет следующий вид:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.12)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}{n-1}}. \quad (2.13)$$

Колебания измеряемой величины характеризуют *коэффициентом вариации* V , т. е. отношением среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому значению случайной величины, выраженном в процентах (или в долях единицы):

$$V = 100S/\bar{x}. \quad (2.14)$$

Рассмотренные характеристики статистического ряда являются выборочными, т. е. полученными на основании выборки, сделанной из генеральной совокупности. Для характеристики среднего положения случайной величины в генеральной совокупности применяют математическое ожидание случайной величины, которое иногда также называют генеральным средним арифметическим значением.

Рассмотрим случайную величину X , которая может принимать дискретные значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ с соответствующими вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n$. Математическое ожидание этой случайной величины X , обозначаемое через $M[X]$, подсчитывается по формуле

$$M[X] = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i},$$

а, учитывая, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, будем иметь

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (2.15)$$

Вычисленное по формулам (2.7) и (2.8) выборочное среднее арифметическое значение всегда будет содержать элемент случайности, в то время как математическое ожидание является величиной постоянной для данной генеральной совокупности (например, сдаваемой партии изделий).

Дисперсия случайной величины X в генеральной совокупности обозначается через σ^2 и подсчитывается по следующей формуле

$$\sigma^2[X] = \sum_{i=1}^n \{M[X] - x_i\}^2 p_i \quad (2.16)$$

для случая, когда значения x в генеральной совокупности не повторяются, и

$$\sigma^2[X] = \frac{\sum_{i=1}^n \{M[X] - x_i\}^2 m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (2.17)$$

для случая, когда значения x повторяются.

2.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Случайные величины могут быть дискретными или непрерывными.

Распределения вероятностей появления дискретных случайных величин чаще всего описываются гипергеометрическим, биномиальными законами или законом Пуассона.

Гипергеометрический закон. Допустим, что в партии изделий объемом N имеется D дефектных изделий. Если взять из этой генеральной совокупности методом случайного отбора выборку объемом n , то вероятность того, что во взятой нами выборке окажется d дефектных изделий, в общем случае описывается гипергеометрическим законом

$$q_{nd} = \frac{C_D^d C_{N-D}^{n-d}}{C_N^n}, \quad (2.18)$$

где

$$C_D^d = \frac{D!}{d! (D-d)!}$$

— число сочетаний из D по d . Вместо D чаще используют отношение $D/N = Q$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по гипергеометрическому закону, определяются как:

$$M[d] = nQ; \quad (2.19)$$

$$\sigma^2[d] = nQP \left(1 - \frac{n-1}{N-1}\right), \quad (2.20)$$

где $P = 1 - Q$.

Если объем выборки n значительно меньше объема генеральной совокупности N , т. е. $n \leq 0,1N$, то математическое ожидание $M[d]$ будет оставаться неизменным, а дисперсия будет возрастать, стремясь к пределу, равному nQP . При этом гипергеометрический закон распределения сводится к биномиальному.

Биномиальный закон. При выборке $n \leq 0,1N$ вероятность того, что в выборке будет d дефектных изделий (в то время как в контролируемой партии их D), определяют по биномиальному закону:

$$q_{nd} = C_n^d Q^d (1-Q)^{n-d}, \quad (2.21)$$

где

$$C_n^d = \frac{n!}{d! (n-d)!}$$

— число сочетаний из n по d ; $Q = D/N$ — характеристика контролируемой партии.

Математическое ожидание и дисперсия имеют вид:

$$M[d] = nQ; \quad (2.22)$$

$$\sigma^2[d] = nQP. \quad (2.23)$$

Если число дефектных изделий в рассматриваемой партии мало (т. е. меньше $0,1N$), то биномиальное распределение практи-

Рассмотренные характеристики статистического ряда являются выборочными, т. е. полученными на основании выборки, сделанной из генеральной совокупности. Для характеристики среднего положения случайной величины в генеральной совокупности применяют математическое ожидание случайной величины, которое иногда также называют генеральным средним арифметическим значением.

Рассмотрим случайную величину X , которая может принимать дискретные значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ с соответствующими вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n$. Математическое ожидание этой случайной величины X , обозначаемое через $M[X]$, подсчитывается по формуле

$$M[X] = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

а, учитывая, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, будем иметь

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i. \quad (2.15)$$

Вычисленное по формулам (2.7) и (2.8) выборочное среднее арифметическое значение всегда будет содержать элемент случайности, в то время как математическое ожидание является величиной постоянной для данной генеральной совокупности (например, сдаваемой партии изделий).

Дисперсия случайной величины X в генеральной совокупности обозначается через σ^2 и подсчитывается по следующей формуле

$$\sigma^2[X] = \sum_{i=1}^n \{M[X] - x_i\}^2 / n \quad (2.16)$$

для случая, когда значения x в генеральной совокупности не повторяются, и

$$\sigma^2[X] = \frac{\sum_{i=1}^n \{M[X] - x_i\}^2 m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (2.17)$$

для случая, когда значения x повторяются.

2.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Случайные величины могут быть дискретными или непрерывными.

Распределения вероятностей появления дискретных случайных величин чаще всего описываются гипергеометрическим, биномиальными законами или законом Пуассона.

Гипергеометрический закон. Допустим, что в партии изделий объемом N имеется D дефектных изделий. Если взять из этой генеральной совокупности методом случайного отбора выборку объемом n , то вероятность того, что во взятой нами выборке окажется d дефектных изделий, в общем случае описывается гипергеометрическим законом

$$q_{nd} = \frac{C_D^d C_{N-D}^{n-d}}{C_N^n}, \quad (2.18)$$

где

$$C_D^d = \frac{D!}{d! (D-d)!}$$

— число сочетаний из D по d . Вместо D чаще используют отношение $D/N = Q$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по гипергеометрическому закону, определяются как:

$$M[d] = nQ; \quad (2.19)$$

$$\sigma^2[d] = nQP \left(1 - \frac{n-1}{N-1}\right), \quad (2.20)$$

где $P = 1 - Q$.

Если объем выборки n значительно меньше объема генеральной совокупности N , т. е. $n \leq 0,1N$, то математическое ожидание $M[d]$ будет оставаться неизменным, а дисперсия будет возрастать, стремясь к пределу, равному nQP . При этом гипергеометрический закон распределения сводится к биномиальному.

Биномиальный закон. При выборке $n \leq 0,1N$ вероятность того, что в выборке будет d дефектных изделий (в то время как в контролируемой партии их D), определяют по биномиальному закону:

$$q_{nd} = C_n^d Q^d (1-Q)^{n-d}, \quad (2.21)$$

где

$$C_n^d = \frac{n!}{d! (n-d)!}$$

— число сочетаний из n по d ; $Q = D/N$ — характеристика контролируемой партии.

Математическое ожидание и дисперсия имеют вид:

$$M[d] = nQ; \quad (2.22)$$

$$\sigma^2[d] = nQP. \quad (2.23)$$

Если число дефектных изделий в рассматриваемой партии мало (т. е. меньше $0,1N$), то биномиальное распределение практи-

чески совпадает с другим распределением, называемым законом Пуассона.

Закон Пуассона. Так как надежность ИМ высокая ($P > 0,9$) и объем выборки $n \ll N$, то во многих задачах практики случайные величины распределены по закону Пуассона. Вероятность того, что в выборке объемом n откажет d изделий, равна:

$$q_{nd} = \frac{a^d}{d!} e^{-a}, \quad (2.24)$$

где d может принимать значения $0, 1, 2 \dots$ и $a = nQ$ — некоторая положительная величина, называемая параметром закона Пуассона.

Математическое ожидание и дисперсия для распределения Пуассона имеют следующий вид:

$$M[d] = a; \quad (2.25)$$

$$\sigma^2[d] = a. \quad (2.26)$$

Тогда коэффициент вариации равен:

$$V = \sqrt{a}/a = 1/\sqrt{a}. \quad (2.27)$$

Рассмотрим законы распределения для непрерывных случайных величин.

Экспоненциальный закон. Случайная величина x распределена по экспоненциальному закону, если плотность вероятности имеет вид

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad (2.28)$$

где x — случайная величина, а λ — постоянная.

Если за случайную величину принять время работы до отказа изделия, то выражение (2.28) можно переписать в следующем виде:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2.29)$$

где t — время работы до отказа, а λ — интенсивность отказов.

Для характеристики непрерывных распределений используется так называемая функция распределения $F(t)$:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (2.30)$$

Подставив (2.29) в (2.30), получим значение функции распределения для экспоненциального закона:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2.31)$$

Графическое изображение уравнения (2.31) представлено на рис. 2.1. Физический смысл функции распределения $F(t)$ — это вероятность того, что случайная величина попадает в интервал от 0 до t . В общем случае в уравнении (2.30) интеграл берется от $-\infty$ до t .

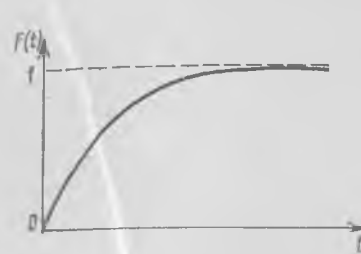


Рис. 2.1. Кривая экспоненциальной функции распределения $F(t)$ случайной величины

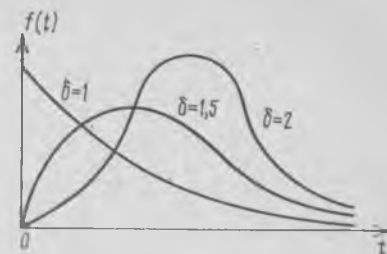


Рис. 2.2. Кривые плотности вероятности $f(t)$ для распределения случайной величины по закону Вейбулла при различных δ

Экспоненциальный закон распределения характеризуется математическим ожиданием (среднее время наработки на отказ), дисперсией и коэффициентом вариации:

$$M(t) = \frac{1}{\lambda}; \quad (2.32)$$

$$\sigma^2[t] = \frac{1}{\lambda^2}; \quad (2.33)$$

$$V = 1. \quad (2.34)$$

Экспоненциальный закон применяется только в тех случаях, когда наблюдается незначительное (или совсем отсутствует) стирание изделий, а их отказы обусловлены скрытыми дефектами и распределены равномерно в равных интервалах времени.

Закон Вейбулла. При распределении случайной величины по закону Вейбулла плотность вероятности равна:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{\delta}{t_0} t^{\delta-1} \exp\left[-\frac{t^\delta}{t_0}\right] & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (2.35)$$

где t — случайная величина (наработка изделия до отказа); t_0 и δ — постоянные параметры закона Вейбулла.

Параметр δ называется параметром формы. От его значения зависит форма кривой распределения плотности вероятности (рис. 2.2) и интенсивности отказов. При $\delta=1$ из уравнения (2.35) получается экспоненциальное распределение.

Распределение Вейбулла встречается при изучении долговечности ИМ. Большинство ИМ имеет распределение наработки до отказа, подчиняющееся закону Вейбулла с показателем формы δ , меньше единицы.

Нормальный закон распределения (закон Гаусса). Он определяет распределение вероятности непрерывной случайной величины, которая может принимать как отрицательные, так и положительные значения во всем диапазоне возможных значений — от ми-

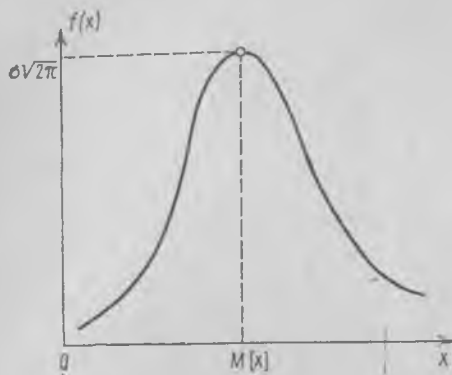


Рис. 2.3. Кривая плотности вероятности $f(x)$ для нормального закона распределения случайной величины

Нормальный закон часто используется для такой положительной величины, как время наработки до отказа. Кроме того, он обычно применяется при описании распределения ошибок измерений, которые могут быть как положительными, так и отрицательными.

Композиция распределений. Имеется целый ряд независимых случайных величин $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ с плотностями вероятности $f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), \dots, f_n(x)$.

Если взять величину Y , равную арифметической сумме указанных случайных величин, то будем иметь новую случайную величину $Y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ со своей плотностью вероятности $f(Y)$.

Закон распределения случайной величины Y называется композицией законов распределения случайных величин $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Если свойства композиций распределений не зависят от вида рассматриваемых законов распределения, то эти свойства называют общими.

Первое общее свойство. Математическое ожидание случайной величины Y равно арифметической сумме математических ожиданий случайных величин, законы распределения которых составляют композицию

$$M[Y] = M[x_1] + M[x_2] + M[x_3] + \dots + M[x_n]. \quad (2.37)$$

Второе общее свойство. Дисперсия случайной величины Y равна арифметической сумме дисперсий случайных величин, законы распределения которых составляют композицию

$$\sigma^2[Y] = \sigma^2[x_1] + \sigma^2[x_2] + \sigma^2[x_3] + \dots + \sigma^2[x_n]. \quad (2.38)$$

Из двух этих свойств вытекают два следствия:

1. Пусть

$$\sigma^2[x_1] = \sigma^2[x_2] = \sigma^2[x_3] = \dots = \sigma^2[x_n];$$

$$M[x_1] = M[x_2] = M[x_3] = \dots = M[x_n].$$

нус бесконечности до плюс бесконечности. Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности вида

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - M[X])^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.36)$$

где $M[X]$ — математическое ожидание, σ^2 — дисперсия случайной величины X в генеральной совокупности.

Кривая распределения по нормальному закону имеет симметричный вид (рис. 2.3).

Тогда

$$\sigma^2[Y] = n \sigma^2[X]; \quad M[Y] = nM[X]. \quad (2.39)$$

Найдем коэффициент вариации случайной величины:

$$V(Y) = \frac{\sigma(Y)}{M(Y)} = \frac{\sqrt{n} \sigma[X]}{nM[X]} = \frac{\sigma[X]}{\sqrt{n} M[X]}. \quad (2.40)$$

Из полученного выражения видно, что с ростом n коэффициент вариации убывает, а следовательно, мера точности возрастает пропорционально \sqrt{n} .

2. Если имеется две или более случайных величин, у которых резко отличаются средние квадратические отклонения, то в результате композиции влияние на суммарную дисперсию той случайной величины, которая имеет меньшую дисперсию, практически аннулируется.

Действительно, пусть имеем

$$Y = x_1 + x_2; \quad \sigma^2[x_1] = 0,01; \quad \sigma^2[x_2] = 1,$$

тогда согласно второму общему свойству будем иметь:

$$\sigma^2[Y] = 1,01; \quad \sigma^2[Y] = 1,005 = \sigma^2[x_2].$$

Частными свойствами называются композиции распределений, которые применимы к конкретным видам закона распределения. Посмотрим, получится ли экспоненциальное распределение из композиции двух экспоненциальных распределений.

Если случайные величины x_1 и x_2 имеют одинаковые экспоненциальные распределения с одним и тем же параметром λ , тогда

$$M[x_1] = M[x_2] = 1/\lambda \quad \sigma[x_1] = \sigma[x_2] = 1/\lambda.$$

Для $Y = x_1 + x_2$ в соответствии с общими свойствами

$$M[Y] = M[x_1] + M[x_2] = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\lambda};$$

$$\sigma^2[Y] = \sigma^2[x_1] + \sigma^2[x_2] = \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^2} = \frac{2}{\lambda^2};$$

$$\sigma[Y] = \frac{\sqrt{2}}{\lambda}.$$

Коэффициент вариации

$$V[Y] = \sigma[Y]/M[Y] = \sqrt{2}/2.$$

Значение коэффициента вариации показывает, что в результате композиции двух экспоненциальных распределений нового экспоненциального распределения не получилось, ибо при экспоненциальном распределении коэффициент вариации всегда равен единице.

Если бы мы взяли два распределения Вейбулла, то в композиции также не получили бы распределения Вейбулла. То же самое можно сказать и обо всех других законах распределения, за исключением закона Пуассона и нормального закона.

В то же время распределение Пуассона при большой величине математического ожидания (более 20) близко к нормальному закону, что наблюдается при композиции большого числа распределений Пуассона. Если же взять большое количество биномиальных распределений, то композиция также будет иметь распределение, очень близкое к нормальному, т. е. при большом количестве распределений любой природы композиция будет близкой нормальному распределению. Более того, в результате композиции большого количества (при $n \rightarrow \infty$) неодинаковых распределений независимых случайных величин с различными (но не очень сильно отличающимися друг от друга) дисперсиями и с различными математическими ожиданиями получается опять нормальное распределение. Это важное положение теории вероятностей называется *центральной предельной теоремой*, которая определяет особую роль нормального распределения в теории вероятностей.

С композицией распределений мы встречаемся в случае обобщения данных испытаний нескольких выборок, взятых из различных партий изделий.

Суперпозиция распределений. Если на испытания представлено на партия из N изделий, в которую входит N_1 изделий, имеющих плотность вероятности $f_1(X)$, и N_2 , имеющих плотность вероятности $f_2(X)$, то суперпозиция распределений $f_1(X)$ и $f_2(X)$:

$$f(Y) = \omega_1 f_1(X) + \omega_2 f_2(X), \quad (2.41)$$

где ω_1 и ω_2 соответственно равны N_1/N и N_2/N .

На практике суперпозиция распределений встречается, когда партия однотипных изделий получена при смешивании изделий, изготовленных из отличающихся партий сырья и полуфабрикатов, или на различных технологических линейках. Математическое ожидание случайной величины Y в суперпозиции распределений равно

$$M[Y] = \omega_1 M[x_1] + \omega_2 M[x_2]. \quad (2.42)$$

Дисперсия случайной величины Y равна:

$$\sigma^2[Y] = \omega_1 \sigma^2[x_1] + \omega_2 \sigma^2[x_2] + \omega_1 \omega_2 \{M[x_1] - M[x_2]\}^2. \quad (2.43)$$

2.4. КРИТЕРИЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Соответствие экспериментального закона распределения случайной величины теоретическому определяется критерием Пирсона, иногда называемым критерием χ^2 (хи-квадрат).

Проверим, согласуются ли экспериментальные данные распределения случайной величины d с предполагаемым теоретическим законом распределения, если за время t испытания выборки объемом n отказало d изделий и отказы фиксировались в различные моменты испытания.

По теоретическому закону распределения вычисляем ожидаемое число отказов изделий в определенных интервалах, на которые разбито время испытания. В результате получается теоретический ряд частот в k интервалах времени испытания: $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ после чего подсчитывается число отказавших изделий в этих же интервалах в результате опыта, т. е. получается экспериментальный ряд частот: $m'_1, m'_2, m'_3, \dots, m'_k$.

Согласованность теоретического и экспериментального распределений определяется мерой расхождения χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{(m'_1 - m_1)^2}{m_1} + \frac{(m'_2 - m_2)^2}{m_2} + \dots + \frac{(m'_k - m_k)^2}{m_k}$$

или

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m'_i - m_i)^2}{m_i} \quad (2.44)$$

и числом степеней свободы. Число степеней свободы ν равно числу интервалов k минус число ограничений κ :

$$\nu = k - \kappa. \quad (2.45)$$

Число ограничений равно числу параметров в рассматриваемом законе распределения, оцениваемых по результатам эксперимента, увеличенному на единицу.

Для распределения χ^2 составлены специальные таблицы, в которых для каждого значения χ^2 и числа степеней свободы ν можно определить вероятность P того, что за счет чисто случайных причин мера расхождения теоретического и экспериментального распределений будет не меньше, чем фактически наблюдаемое в данной серии опытов значение χ^2 . Если вероятность P весьма мала (настолько мала, что событие с такой вероятностью можно считать практически невозможным), то результат опыта следует считать противоречащим гипотезе о том, что закон распределения случайной величины X (в нашем случае $X=d$) есть $F(X)$. Эту гипотезу следует отбросить как неправдоподобную.

Если вероятность P сравнительно велика, можно признать расхождения между теоретическим и экспериментальным распределениями несущественными и отнести их за счет случайных причин. В этом случае гипотезу о том, что случайная величина X распределена по закону $F(X)$, можно считать правдоподобной, по крайней мере не противоречащей опытным данным.

На практике, когда P оказывается меньшим, чем 0,1, рекомендуется проверить эксперимент, если это возможно, и в случае, если заметные расхождения снова появятся, пытаться искать более подходящий для описания экспериментальных данных закон распределения.

Критерий χ^2 имеет смысл применять только в тех случаях, когда количество интервалов k (или число опытов) достаточно велико. Заметим, что при использовании критерия χ^2 достаточно больш

шим должно быть не только общее количество интервалов k , но и число наблюдений m_i в отдельных интервалах. На практике рекомендуется иметь в каждом интервале не менее 5... 10 наблюдений. Если число наблюдений в отдельных интервалах очень мало (около 1,2), имеет смысл объединить некоторые интервалы.

2.5. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Количественно надежность изделий оценивается с помощью как единичных, так и комплексных показателей.

Единичным показателем надежности называется такой, который относится к одному из свойств изделий (к безотказности, долговечности, ремонтпригодности или сохраняемости изделия). *Комплексным показателем* называется такой, который относится к нескольким свойствам, составляющим надежность изделия. Комплексные показатели надежности служат для количественной характеристики в основном только восстанавливаемых изделий, тогда как единичные показатели — для характеристики любых изделий.

Единичными показателями надежности невосстанавливаемых изделий, которые характеризуют их безотказность, являются наработка до отказа, вероятность безотказной работы и интенсивность отказов.

Средняя наработка изделия до отказа и вероятность безотказной работы. Под наработкой изделия до отказа подразумевается среднее время наработки изделия до отказа. Ввиду того что отказы изделий являются случайными событиями, то и выборочная статистическая характеристика — среднее время наработки до отказа за t — также является случайной величиной. Как правило, величина $t > 0$. Но в том случае, когда отказ происходит в момент подачи нагрузки на изделие (или в момент начала использования изделия), $t = 0$. Под вероятностью безотказной работы понимается вероятность того, что изделие будет выполнять заданные функции и сохранять параметры в установленных пределах в течение данного промежутка времени и при определенных условиях использования. Для количественной характеристики надежности удобна функция $P(t)$ — вероятность безотказной работы изделий до момента t

$$P(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt, \quad (2.4)$$

где $f(t)$ — плотность вероятностей.

Вероятность отказа до момента t равна:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (2.47)$$

Площадь между функцией $P(t)$ и осью абсцисс равна средней наработке изделий до отказа, а абсцисса точки пересечения кривой с перпендикуляром, восстанавливаемым из точки на оси ор-

динат, соответствующей заданной вероятности безотказной работы, дает значение гарантийной наработки на отказ ($t_{г.н}$).

Гарантийная наработка — наработка ИМ, до которой изготовитель гарантирует безотказную работу микросхемы (при условии соблюдения правил эксплуатации, в том числе правил хранения и транспортировки), не менее

$$P(t_{г.н}) = 1 - q/100, \quad (2.48)$$

где q — установленное техническими условиями число микросхем (в процентах) с отклонениями от технических условий, допускаемое за время гарантийной наработки $t_{г.н}$.

Вероятность безотказной работы за некоторый промежуток времени может быть определена статистическим путем по результатам наблюдений за выборкой как отношение числа изделий, оставшихся неисправными в конце рассматриваемого интервала времени Δt_i , к начальному числу изделий, поставленных на испытание:

$$P_{оп} = \frac{n - \Delta d_i}{n}, \quad (2.49)$$

где n — начальное число испытываемых элементов; Δd_i — число отказавших изделий за время Δt_i .

При стремлении числа изделий в выборке к числу изделий в генеральной совокупности величина $P_{оп}$ стремится к $P(t)$, т. е. в пределе равна истинному значению вероятности безотказной работы генеральной совокупности.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ показывает, какая доля исправных в данный момент изделий в выборке отказывает в единицу времени (для малых промежутков времени). Эта характеристика надежности может быть получена из опытных данных по формуле

$$\lambda_{оп} = \frac{\Delta d_i}{(n - d_i) \Delta t_i}, \quad (2.50)$$

где Δd_i — число отказов за промежуток времени Δt_i ; n — начальное число изделий, поставленных на испытание; d_i — общее число изделий, отказавших к началу рассматриваемого промежутка времени Δt_i . Функцию зависимости интенсивностей отказов $\lambda(t)$ от времени часто называют лямбда-характеристикой (рис. 2.4). Кривая имеет три явно выраженные области измерения $\lambda(t)$. В области I интенсивность отказов высока, что обусловлено выходом из строя изделий в первый период работы из-за наличия скрытых дефектов, которые не удалось обнаружить при контроле технологического процесса изготовле-

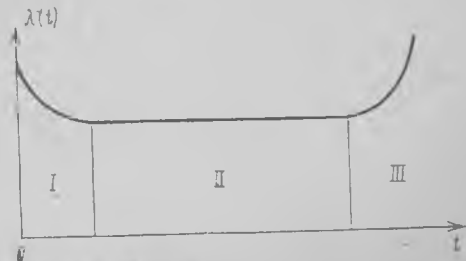


Рис. 2.4. Кривая зависимости интенсивности отказов от времени работы изделий под нагрузкой

ния изделий. Область II характеризуется постоянной или незначительно изменяющейся интенсивностью отказов и является рабочей областью изделий. Резкое возрастание интенсивности характеризует область III. Эти отказы связаны с явлениями износа и старения.

Лямбда-характеристика через вероятность безотказной работы выражается так:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.51)$$

Проинтегрировав уравнение (2.51), получим формулу, связывающую интенсивность отказов и вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.52)$$

Продифференцировав выражение (2.46) по t

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (2.53)$$

можно преобразовать уравнение (2.51) к виду

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) \quad (2.54)$$

Это выражение устанавливает связь между интенсивностью отказов и двумя другими единичными показателями — плотностью вероятности $f(t)$ и вероятностью безотказной работы $P(t)$. Для определения показателей надежности достаточно знать один из них.

Для вейбулловского закона распределения, которому подчиняются отказы некоторых ИМ, интенсивность отказов определяется соотношением

$$\lambda(t) = b/a (t/a)^{b-1}, \quad (2.55)$$

где a и b — постоянные (параметры распределения).

При экспоненциальном законе распределения отказов во времени, который применим для большинства ИМ, интенсивность отказов не зависит от времени ($b=1$, $x=1/a=\text{const}$). Поэтому для экспоненциального закона имеем

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t/a) \quad (2.56)$$

или

$$\ln P(t) = -\lambda t \quad (2.57)$$

Эти соотношения применяют для вычисления P при $\lambda t > 0,1$. Для этого же закона справедливо соотношение

$$P(t) \approx 1 - \lambda t \text{ при } \lambda t \leq 0,1. \quad (2.58)$$

Соотношение (2.58) наиболее часто используют для расчета P при известном значении λ и наоборот.

Если показатели надежности ИМ определяют по результатам испытаний, то производят опытную оценку величин P и λ . Так

если испытания в течение времени t_n подвергались N изделий, а к концу из них осталось годными $n(t_n)$, то опытная оценка

$$P_{\text{оп}}(t_n) = n(t_n)/N. \quad (2.59)$$

Опытная оценка интенсивности отказов в случае экспоненциального закона определяется как

$$\lambda_{\text{оп}}(t_n) = \frac{N - n(t_n)}{N t_n}, \text{ при } \frac{n(t_n)}{N} > 0,9; \quad (2.60)$$

$$\lambda_{\text{оп}}(t_n) = \frac{1}{t_n} \ln \frac{N}{n(t_n)}, \text{ при } \frac{n(t_n)}{N} < 0,9. \quad (2.61)$$

2.6. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Сведения о выборочном методе контроля. Контроль процесса производства ИМ основывается на выборочном методе, при котором о характеристиках генеральной совокупности судят по отобранной, так называемой выборочной, совокупности. Выборку производят повторным или бесповторным, дискретным (групповым) или периодическим, случайным или расслоенным методами. При повторном методе выборки однажды отобранное изделие может быть отобрано второй и третий раз. *Бесповторный выборочный метод* дает гарантию, что ни одно изделие два раза не попадает в выборку. Если требуется сделать выборку конкретного числа ИМ в определенный промежуток времени, и если выборка n будет делаться не сразу, а по частям в течение заданного времени, то такой метод выборки называется *периодическим*.

Дискретный (групповой) метод выборки отличается от периодического тем, что вся выборка числом берется одновременно.

Если выборка берется из всей генеральной совокупности безотносительно к источнику, то такая выборка называется *случайной*, например при получении одной и той же продукции из нескольких источников (например, изготовление контролируемой продукции несколькими технологическими линиями). Если в выборке имеется разное представительство от каждого источника, то выборка называется *расслоенной*.

При выборочном методе следует обеспечить равные шансы попасть в выборку каждому образцу в партии, из которой берется выборка. Если это выполняется, то говорят, что выборку называют *репрезентативной*. Ошибка репрезентативной выборки (представительства) — это разность между характеристиками выборочной и генеральной совокупности. По результатам такой выборки, сделанной на контролируемой операции технологического процесса, определяют, нарушен или не нарушен технологический процесс на данной операции. Оценку контролируемых параметров технологического процесса осуществляют по среднему значению и стандартному отклонению выборки.

Контроль технологического процесса с помощью среднего значения выборки характеризует настроенность технологического процесса. Обозначим среднее значение контролируемого параметра в выборке $\bar{X}_{\text{выб}}$, а среднее значение этого параметра в партии изделий, из которой взята выборка, — через $\bar{X}_{\text{ген}}$ (характеристика генеральной совокупности). Определим, имеет ли место нарушение технологического процесса. Для этого предварительно устанавливают допустимые границы изменения значений параметра ε , который определяет процент забракования изделий на контролируемой операции. Эта взаимосвязь количественно определяется правилом Ляпунова

$$P(-\varepsilon \leq \bar{X}_{\text{ген}} - \bar{X}_{\text{выб}} \leq +\varepsilon) = \Phi(\alpha), \quad (2.62)$$

где $\varepsilon = \alpha \sigma_{\bar{X}}$ и α — положительное число;

$$\Phi(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\alpha} e^{-\frac{\alpha^2}{2}} d\alpha. \quad (2.63)$$

Интеграл (2.63) называется интегралом вероятностей, значения для которого приведены в табл. 2.1. Задаваясь значением α с помощью табл. 2.1 определяют значение $\Phi(\alpha)$. Величину $\sigma_{\bar{X}}$ (стандартное отклонение средних значений контролируемого параметра в выборке) подсчитывают по формуле

$$\sigma_{\bar{X}} = \sigma_{\text{ген}} / \sqrt{n}. \quad (2.64)$$

Если, например, мы задались допустимым отклонением $\varepsilon = 0,7\sigma_{\bar{X}}$, то по табл. 2.1 находим, что вероятность того, что разность $\bar{X}_{\text{ген}} - \bar{X}_{\text{выб}}$ будет лежать в заданных пределах, равна 0,51 т. е. будет забраковано 48% изделий.

Для того чтобы иметь уверенность, что будет забраковано 10% изделий (вероятность забракования 0,1), необходимо брать допустимое отклонение $\varepsilon = 1,64\sigma_{\bar{X}}$. Если взять $\varepsilon = 3\sigma_{\bar{X}}$, то практически параметры всех изделий будут лежать в заданных пределах.

С возрастанием числа изделий в выборке n величина $\sigma_{\bar{X}}$ уменьшается. Часто при практическом применении равенства Ляпунова генеральное стандартное отклонение $\sigma_{\text{ген}}$ в формуле для стандартного отклонения средней $\sigma_{\bar{X}}$, которое бывает неизвестным, заменяют стандартным отклонением, полученным на основании выборки $\sigma_{\text{выб}}$.

Контроль технологического процесса с помощью стандартного отклонения. Величина стандартного отклонения характеризует качество технологического процесса. Общая изменчивость технологического процесса состоит из случайной и систематической изменчивостей. Сравнивая дисперсию, обусловленную только одним каким-либо фактором (случайным или систематическим), с общей (суммарной) дисперсией, с помощью дисперсионного анализа

Таблица 2.1. Таблица вероятностей $\Phi(\alpha)$

α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$
0,00	0,00000	0,40	0,31084	0,80	0,57629	1,20	0,76986	1,60	0,89040
0,01	00798	41	31819	81	58206	21	77372	61	89260
0,02	01596	42	32552	82	58776	22	77754	62	89477
0,03	02393	43	33280	83	59346	23	78130	63	89690
0,04	03191	44	34006	84	59909	24	78502	64	89899
0,05	03988	45	34729	85	60468	25	78870	65	90106
0,06	04784	46	35448	86	61021	26	79233	66	90309
0,07	05581	47	36164	87	61570	27	79592	67	90508
0,08	06376	48	36877	88	62114	28	79945	68	90704
0,09	07171	49	37587	89	62654	29	80295	69	90897
0,10	0,07966	0,50	0,38292	0,90	0,6318	1,30	0,80640	1,70	0,91087
11	08759	51	38995	91	0,6372	31	80980	71	91273
12	09552	52	38995	92	0,6424	32	81386	72	91457
13	10343	53	40389	93	0,6478	33	81648	73	91637
14	11134	54	41080	94	0,6528	34	81975	74	91814
15	11924	55	41768	95	0,6578	35	82298	75	91988
16	12712	56	42452	96	66294	36	82617	76	92159
17	13499	57	43132	97	66795	37	82931	77	92327
18	14285	58	43809	98	67291	38	83241	78	92492
19	15069	59	44481	99	67783	39	83547	79	92655
0,20	0,15852	0,60	0,45149	1,00	0,68269	1,40	0,83849	1,80	0,92814
21	16633	61	45814	01	68750	41	84146	81	92970
22	17413	62	46474	02	69227	42	84439	82	93124
23	18191	63	47131	03	69699	43	84728	83	93275
24	18967	64	47783	04	70166	44	85013	84	93423
25	19741	65	48431	05	70628	45	85294	85	93569
26	19741	66	49075	06	71086	46	85571	86	93711
27	21284	67	49714	07	71538	47	85844	87	93853
28	22052	68	50350	08	71986	48	86113	88	93989
29	22818	69	50981	09	72429	49	86378	89	94124
0,30	0,23582	0,70	0,51607	1,10	0,72867	1,50	0,86639	1,90	0,94257
31	24344	71	52230	11	73300	51	86696	91	94387
32	25103	72	52843	12	73729	52	87149	92	94514
33	25860	73	53461	13	74152	53	87398	93	94639
34	26614	74	54070	14	74571	54	87644	94	94762
35	27366	75	54675	15	74986	55	87886	95	94882
36	28115	76	55275	16	75395	56	88124	96	95000
37	28862	77	55870	17	75800	57	88358	97	95116
38	29605	78	56461	18	76200	58	88589	98	95230
39	30346	79	57047	19	76595	59	88817	99	95341
2,00	0,95450	2,40	0,98360	2,80	0,99489	3,20	0,99863	3,60	0,99968
01	95557	41	98405	81	99505	21	99867	61	99969
02	95662	42	98448	82	99520	22	99872	62	99971
03	95764	43	98490	83	99535	23	99876	63	99972
04	95864	44	98531	84	99549	24	99880	64	99973
05	95964	45	98571	85	99563	25	99885	65	99974
06	96060	46	98661	86	99576	26	99889	66	99975
07	96155	47	98649	87	99590	27	99892	67	99976
08	96247	48	98686	88	99602	28	99896	68	99977
09	96338	49	98723	89	99615	29	99900	69	99978

α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$	α	$\Phi(\alpha)$
2,10	0,96427	2,50	0,98758	2,90	0,99627	3,30	0,99903	3,70	0,99978
11	96514	51	98793	91	99639	31	99907	71	99979
12	96599	52	98826	92	99650	32	99910	72	99980
13	96683	53	98859	93	99661	33	99913	73	99981
14	96765	54	98891	94	99672	34	99916	74	99982
15	96844	55	98923	95	99682	35	99919	75	99983
16	96923	56	98953	96	99692	36	99922	76	99984
17	96999	57	98983	97	99702	37	99925	77	99985
18	97074	58	99012	98	99712	38	99928	78	99986
19	97148	59	99040	99	99721	39	99930	79	99987
2,20	97219	2,60	0,99068	3,00	0,99730	3,40	0,99933	3,80	0,99988
21	97289	61	99095	01	99739	41	99935	81	99989
22	97358	62	99121	02	99747	42	99937	82	99990
23	97425	63	99146	03	99755	43	99940	83	99991
24	97491	64	99171	04	99763	44	99942	84	99992
25	97555	65	99195	05	99771	45	99944	85	99993
26	97618	66	99219	06	99779	46	99946	86	99994
27	97679	67	99241	07	99786	47	99948	87	99995
28	97739	68	99263	08	99793	48	99950	88	99996
29	97798	69	99285	09	99800	49	99952	89	99997
2,30	0,97855	2,70	0,99307	3,10	0,99806	3,50	0,99953	3,90	0,99998
31	97911	71	99327	11	99813	51	99955	91	99999
32	97965	72	99347	12	99819	52	99957	92	99999
33	98019	73	99367	13	99825	53	99958	93	99999
34	98072	74	99386	14	99831	54	99960	94	99999
35	98123	75	99304	15	99837	55	99961	95	99999
36	98172	76	99422	16	99842	56	99964	96	99999
37	98221	77	99439	17	99848	57	99964	97	99999
38	98269	78	99456	18	99853	58	99966	98	99999
39	98315	79	99473	19	99858	59	99967	99	99999

за можно решить вопрос о значимости влияния этого фактора на общую дисперсию.

Отклонение любого параметра от его главного среднего значения можно разбить на две составляющие: на отклонение параметра от среднего значения и на отклонение среднего значения выборки от главного среднего. Сказанное можно записать в общем виде следующим образом:

$$(x_i - \bar{X}_{\text{выб}}) = (x_i - \bar{X}_{\text{выб}}) + (\bar{X}_{\text{выб}} - \bar{X}_{\text{ген}}), \quad (2.65)$$

т. е. полное отклонение равно отклонению внутри выборки $(x_i - \bar{X}_{\text{выб}})$ плюс отклонение между выборками $(\bar{X}_{\text{выб}} - \bar{X}_{\text{ген}})$.

Подсчитаем теперь значения трех несмещенных оценок дисперсии генеральной совокупности, из которой взяты выборки

S^2_n — полная дисперсия;

S^2 — дисперсия внутри выборки (характеризует случайную изменчивость);

$S^2_{\text{ср}}$ — дисперсия между выборками (характеризует систематическую изменчивость).

Выборки соответственно рассчитываются по следующим формулам:

$$S^2_n = \frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{X}_{\text{выб}})^2; \quad (2.66)$$

$$S^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X})^2 \right]; \quad (2.67)$$

$$S^2_{\text{ср}} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\bar{X}_i - \bar{X})^2. \quad (2.68)$$

Наиболее близка к значению генеральной характеристики оценка S^2_n . Это говорит о том, что рассмотренные характеристики не одинаково эффективны для оценки $\sigma^2_{\text{ген}}$: S^2_n наиболее эффективна, S^2 — средне, а $S^2_{\text{ср}}$ — малоэффективна.

Зная из опыта S^2 и $S^2_{\text{ср}}$, можно определить, чем объясняется изменчивость средних значений выборок: случайной или систематической.

Для этого берется дисперсионное отношение двух оценок S^2 и $S^2_{\text{ср}}$, причем в числителе ставится та оценка, числовое значение которой больше (чтобы иметь дисперсионное отношение больше единицы).

Найденное значение F сравнивается с теоретическим F_T , которое по числу степеней свободы и заданной достоверности находится из табл. 2.2, построенной для F -распределения, обладающей тем свойством, что случайные значения отношения дисперсий двух независимых выборок будут не менее F_T с заданной вероятностью P . Для практических целей достаточно иметь такие таблицы для $P=0,05$ и $0,01$.

Контроль технологического процесса с помощью контрольных карт. При статистическом методе контроля используют контрольную карту, на которой изображаются результаты последовательных выборок. На контрольную карту наносятся пять линий: одна — среднее значение контролируемого параметра, две крайние — контрольные пределы и две промежуточные — предупредительные. По оси ординат откладывается значение контролируемого параметра (признака), по оси абсцисс — номера выборок.

Если результаты последовательных выборок, нанесенных на карту в виде точек, выходят за контрольные пределы, следует считать, что технологический процесс отклонился от нормы; в таких случаях необходимо искать причину нарушения технологического процесса. Контрольную карту рассматривают в производственном процессе как средство обнаружения отклонения.

Значения F_T для различных доверительных вероятностей

ν_1	ν_2										ν_1										
	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞	
Для $P=0,05$																					
1	161,45	199,50	215,72	324,57	230,17	233,87	238,89	243,91	249,04	254,38	1	4052,10	4999,03	5403,49	5625,14	5764,08	5859,39	5981,34	6105,83	6234,16	6386,48
2	18,51	19,00	16,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50	2	98,49	99,01	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,42	99,46	99,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,55	3	34,12	30,81	294,46	28,71	28,24	27,91	27,49	27,05	26,60	26,12
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63	4	212,20	18,00	16,69	15,98	15,52	17,91	14,80	14,37	13,93	13,46
5	6,01	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,39	5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,27	9,89	9,47	9,02
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,69	6	13,74	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,72	7,31	6,88
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,26	7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,84	6,47	6,07	5,65
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,97	8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,67	5,28	4,86
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,75	9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,47	5,11	4,73	4,31
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,59	10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,06	4,71	4,33	3,91
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,46	11	9,65	7,20	6,22	5,67	5,32	5,07	4,74	4,40	4,02	3,60
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,35	12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,16	3,78	3,36
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,27	13	9,07	6,70	5,74	5,20	4,86	4,62	4,30	3,96	3,59	3,16
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,20	14	8,86	6,52	5,56	5,03	4,69	4,46	4,14	3,80	3,43	3,00
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,14	15	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,00	3,67	3,29	2,87
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,09	16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	3,89	3,55	3,18	2,75
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	2,04	17	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,79	3,45	3,08	2,65
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	2,00	18	8,28	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,71	3,37	3,01	2,57
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,96	19	8,00	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,63	3,30	2,92	2,49
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,93	20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,56	3,23	2,96	2,42
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,90	21	8,02	5,78	4,87	4,37	4,04	3,81	3,51	3,17	2,80	2,36
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,88	22	7,94	5,72	4,82	4,31	3,99	3,75	3,45	3,12	2,75	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,85	23	7,38	5,66	4,76	4,26	3,94	3,71	3,41	3,07	2,70	2,26
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,83	24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,36	3,03	2,66	2,21
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,81	25	7,77	5,57	4,68	4,18	3,86	3,63	3,32	2,99	2,62	2,17
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,80	26	7,12	5,53	4,64	4,14	3,82	3,59	3,29	2,96	2,58	2,13
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,78	27	7,68	5,49	4,60	4,11	3,78	3,56	3,26	2,93	2,55	2,10
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,76	28	7,64	5,45	4,57	4,07	3,75	3,53	3,23	2,90	2,52	2,06
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,75	29	7,50	5,42	4,54	4,04	3,73	3,50	3,20	2,87	2,49	2,03
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,74	30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,17	2,84	2,47	2,01
35	4,12	3,26	2,87	2,64	2,48	2,37	2,22	2,04	1,83	1,68	35	7,42	5,27	4,40	3,91	3,59	3,37	3,07	2,74	2,37	1,90
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,64	40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	2,99	2,66	2,29	1,82
45	4,06	3,21	2,81	2,58	2,42	2,31	2,15	1,97	1,76	1,61	45	7,23	5,11	4,25	3,77	3,45	3,23	2,94	2,61	2,23	1,75
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,13	1,95	1,74	1,59	50	7,17	5,06	4,20	3,72	3,41	3,19	2,89	2,56	2,18	1,68
60	4,00	3,15	2,75	2,52	2,37	2,25	2,10	1,92	1,70	1,55	60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,82	2,50	2,12	1,60
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,07	1,89	1,67	1,52	70	7,01	4,92	4,07	3,60	3,29	3,07	2,78	2,45	2,07	1,58
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,06	1,88	1,65	1,50	80	6,96	4,88	4,04	3,56	3,26	3,04	2,74	2,42	2,03	1,47
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,32	2,20	2,04	1,86	1,64	1,49	90	6,92	4,85	4,01	3,53	3,23	3,01	2,72	2,39	2,00	1,43
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	2,03	1,85	1,63	1,48	100	6,90	4,82	3,98	3,51	3,21	2,99	2,69	2,37	1,98	1,39
125	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,01	1,83	1,60	1,45	125	6,84	4,78	3,94	3,47	3,17	2,95	2,66	2,33	1,94	1,32
150	3,90	3,06	2,66	2,43	2,27	2,16	2,00	1,82	1,59	1,44	150	6,81	4,75	3,91	3,45	3,14	2,92	2,63	2,31	1,92	1,27
200	3,89	3,04	2,65	2,42	2,26	2,14	1,98	1,80	1,57	1,42	200	6,76	4,71	3,88	3,41	3,11	2,89	2,60	2,28	1,88	1,21
300	3,87	3,03	2,64	2,41	2,25	2,13	1,97	1,79	1,55	1,40	300	6,72	4,68	3,86	3,38	3,08	2,86	2,57	2,24	1,85	1,14
400	3,86	3,02	2,63	2,40	2,24	2,12	1,96	1,78	1,54	1,39	400	6,70	4,66	3,83	3,37	3,06	2,85	2,56	2,23	1,84	1,11
500	3,86	3,01	2,62	2,39	2,23	2,11	1,96	1,77	1,54	1,39	500	6,69	4,65	3,82	3,36	3,05	2,84	2,55	2,22	1,83	1,08
1000	3,85	3,00	2,61	2,38	2,22	2,10	1,95	1,76	1,53	1,38	1000	6,66	4,63	3,80	3,34	3,04	2,82	2,53	2,20	1,81	1,04
												6,64	4,60	3,78	3,32	3,02	2,80	2,51	2,18	1,79	

Первоначально контрольные карты начинают создавать для стандартных отклонений, а не для средних, так как к моменту начала контроля производства имеется мало (или вообще нет) оснований для оценки σ и, следовательно, для создания карты для средних значений контролируемого параметра.

Контрольная карта для стандартных отклонений. Возьмем, например, 20 выборок по n изделий в каждой выборке; замеряем значения параметров данных изделий, определим стандартные отклонения каждой выборки и нанесем их на контрольную карту. Далее определим центральную линию и контрольные пределы.

Центральная линия этой контрольной карты представляет собой среднее арифметическое стандартных отклонений:

$$\bar{\sigma}_{\text{выб}} = \sum_{i=1}^k \sigma_{\text{выб}i} / k = (\sigma_{1\text{выб}} + \sigma_{2\text{выб}} + \dots + \sigma_{20\text{выб}}) / 20 = a. \quad (2.73)$$

Контрольные пределы отстоят от центральной линии на постоянное, соответствующее трем оценкам стандартных ошибок, т.е. верхний контрольный предел

$$\sigma_{\text{макс}} = \bar{\sigma}_{\text{выб}} + 3\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}}, \quad (2.74)$$

а нижний контрольный предел

$$\sigma_{\text{мин}} = \bar{\sigma}_{\text{выб}} - 3\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}}, \quad (2.75)$$

где $\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}}$ — оценка стандартной ошибки стандартного отклонения, которая имеет следующее выражение:

$$\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}} = \sigma_{\text{ген}} / \sqrt{2n}. \quad (2.76)$$

Эффективной оценкой $\sigma_{\text{ген}}$ является S_n , которая может быть вычислена по формуле (2.66). Таким образом находим $\sigma_{\text{ген}} \approx Sn = b$ и

$$\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}} = b / \sqrt{2n} = c.$$

После этого по формулам (2.70) и (2.71) определим верхний и нижний контрольные пределы

$$\sigma_{\text{макс}} = a + 3c; \quad \sigma_{\text{мин}} = a - 3c.$$

При малом числе изделий в выборке (обычно $n \leq 5$) значение для нижнего контрольного предела очень часто получается отрицательным знаком. Это вытекает из того, что стандартное отклонение всегда имеет положительную асимметрию, $\bar{\sigma}_{\text{выб}} - 3\bar{\sigma}_{\sigma_{\text{выб}}}$ меньше нуля при $n \leq 5$. При увеличении объема выборки асимметрия постепенно уменьшается. Если получается отрицательное значение нижнего контрольного предела, то он берется равным нулю.

Контрольная карта для средних отклонений. Контрольную карту для средних отклонений строят аналогично карте для стандартных отклонений. Сначала определяют и наносят на ка-

центральную линию, затем — контрольные пределы. Центральная линия определяется величиной

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^k \bar{X}_{\text{выб}i} / k = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_k) / k. \quad (2.73)$$

Контрольными пределами являются

$$\bar{X}_{\text{макс}} = \bar{X} + 3\hat{\sigma}_{\bar{x}}; \quad (2.74)$$

$$\bar{X}_{\text{мин}} = \bar{X} - 3\hat{\sigma}_{\bar{x}}. \quad (2.75)$$

где

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \hat{\sigma}_{\text{ген}} / \sqrt{n}.$$

Глава 3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ, ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

3.1. ВИДЫ ОТКАЗОВ, ПОВРЕЖДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Надежность ИМ характеризуется вероятностью безотказной работы P и интенсивностью отказов в единицу времени λ . В нормальных условиях эксплуатации ИМ имеют интенсивность отказов $\lambda = 1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$. При оценке надежности ИМ используют следующие понятия:

критерий годности — параметр, по величине или изменению которого считают ИМ годной или отказавшей;

отказ — событие, заключающееся в полной утрате работоспособности ИМ или уходе одного или нескольких параметров, установленных техническими условиями в качестве критериев годности, за пределы заданных норм;

полный отказ — нарушение электрической, механической или тепловой прочности ИМ (короткое замыкание, пробой диэлектрика, отрыв вывода и пр.), а также уход параметров (критериев годности) за критическое значение, при котором ИМ становится практически неработоспособной в любом устройстве при допустимых условиях эксплуатации;

внезапный отказ — скачкообразное изменение одного или нескольких заданных параметров. Внезапные отказы часто называются катастрофическими отказами;

постепенный отказ — постепенное изменение одного или нескольких заданных параметров изделий во времени. Он возникает в результате отклонения значений этих параметров от крите-

рив годности. Постепенные отказы в практике часто называют условными, ибо при одном и том же значении критерия они в одном случае могут приводить к потере работоспособности устройства, а в другом — не повлиять на нее;

перемежающийся отказ — отказ, возникающий в изделии под внешних воздействиях и исчезающий после их снятия. Он выявляется в процессе механических (удары) и климатических испытаний ИМ (термические нагрузки) с обязательной подачей на него электрического режима.

С целью выяснения стадии изготовления изделия, на которой следует устранить причину отказа, последние разделяются на конструкционные, производственные и эксплуатационные.

Конструкционный отказ возникает в результате нарушения установленных норм конструирования.

Производственный отказ возникает в результате нарушения установленного технологического процесса изготовления изделия.

Эксплуатационный отказ возникает в результате нарушения установленных условий эксплуатации изделия.

Оптимальным подходом к проблеме надежности ИМ является совокупное использование физического метода исследования причин и механизмов отказов и статистического метода получения интенсивности отказов.

Испытания надежности ИМ основаны на исследовании механизма отказов, т. е. вместо длительных испытаний или параллельно с ними проводятся небольшие по объему ускоренные испытания и испытания на разрушение с целью выявления причин и механизма отказов и разработки практических мер для исключения или уменьшения отказов. Однако существующие статистические методы не позволяют эффективно решать эту задачу. В связи с изложенным вполне понятен интерес к различного рода косвенным методам оценки надежности ИМ и ускоренным испытаниям проводимым при форсированных режимах: ступенчатом изменении электрической нагрузки, механических перегрузок и при температурах, существенно превышающих рабочую. Связь между долговечностью и рабочей температурой ИМ для большинства механизмов отказов описывается уравнением Аррениуса:

$$R = R_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

где R — скорость реакции; R_0 — постоянная; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. При этом предполагается, что и время отказа подчиняется температурной зависимости уравнения Аррениуса, хотя скорость реакции связана с временем отказа некоторой неопределенной функцией.

Скорость физических и химических процессов, лежащих в основе ряда механизмов отказов, согласно закону Аррениуса

мерно удваивается на каждые 10 К повышения температуры, что позволяет сократить либо продолжительность испытаний, либо число образцов. Однако следует учитывать, что данный метод не является универсальным, так как с повышением температуры появляются новые, специфические причины отказов, и по мере уменьшения интенсивности отказов даже ускоренные испытания будут недостаточно быстрыми.

Ускоренные испытания оказались наиболее эффективными не для количественной оценки интенсивности отказов ИМ, а для стимулирования отказов. Кроме того, температурные испытания являются наиболее эффективным средством выявления дефектных ИМ. Поэтому в настоящее время неременным условием получения высоких показателей надежности ИМ считается проведение электротермотренировки в ужесточенных режимах и отбраковка дефектных ИМ по ее результатам. При исследовании видов и причин отказов основное внимание уделяется физическому анализу процессов возникновения и развития отказов и способам их описания.

Анализ отказов представляет собой исследование полностью отказавших ИМ с использованием электрических измерений и многих усовершенствованных аналитических методов физики, металлургии и химии для установления причин отказа и идентификации типа или механизма отказа.

Исследования отказов ИМ проводят в два этапа: первичный анализ и вторичный анализ отказов. Задача первичного анализа отказов состоит в установлении:

- признаков отказа ИМ, т. е. качественных или количественных показателей, отличающих отказавшую ИМ от работающих;
- вида отказа ИМ или оптимального признака отказа, вводимого в целях классификации;
- места отказа отказавшего элемента;
- вида отказа элемента;
- причин отказа — событий (явлений или совокупности явлений), приводящих к отказу;
- рекомендаций по определению выявленных причин отказа.

Задачей вторичного анализа отказов является выявление и уточнение причин и механизмов отказа ИМ, установление закономерностей их возникновения с помощью статистических, физических и физико-химических методов.

Анализ должен давать правильные выводы о причинах отказа, так как по его результатам проводят корректирующие действия в технологическом процессе, конструкции ИМ, процессе испытаний с целью устранения этих причин.

Для проведения анализа отказов используют следующие основные методы:

- оптические для визуального исследования ИМ с помощью различных микроскопов;

б) электрические с приспособлениями, допускающими перемещение зондов или ИМ относительно зондов для локального исследования электрических цепей ИМ;

в) простейшие химические (промывка, травление, очистка, растворение) и для удаления защитных покрытий;

г) физико-технические (электронная, рентгено-телевизионная сканирующая электронная микроскопия и др.) для исследования поверхностных и приповерхностных слоев структуры ИМ.

Анализ отказов осуществляют по заранее составленной программе — последовательности действий и операций, направленных на установление места и причины отказа. В основу программы закладывают также методы исследований ИМ и действия, которые не являются разрушающими с точки зрения влияния результатов последующих этапов анализа этой ИМ. Сначала исследование проводят на герметизированной, а затем на вскрытой ИМ.

Отказавшие ИМ, поступающие на анализ, сопровождаются документацией, в которой указываются: условия, при которых произошел отказ; режимы работы или испытаний; полные сведения об ИМ — тип, паспорт, номер партии и др.

Анализ отказов проводится в такой последовательности:

- а) повторные измерения электрических параметров;
- б) внешний осмотр корпусов и выводов;
- в) измерения вольт-амперных характеристик отдельных цепей на внешних зажимах;
- г) специальные измерения параметров, не предусмотренных ТУ;
- д) проверка герметичности корпуса;
- е) вскрытие корпуса;
- ж) осмотр и фотографирование вскрытой ИМ;
- з) проверка монтажа;
- и) удаление защитного покрытия;
- к) микроскопическое исследование структуры;
- л) контроль электрических параметров структурных элементов;
- м) специальные виды исследований структуры, например, помощью методов неразрушающего контроля (НРК).

3.2. МЕХАНИЗМ ОТКАЗОВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Типы процессов деградации ИМ и методы обнаружения отказов приведены в табл. 3.1. Перечислим принципы отказов микросхем, обусловленные особенностями технологического процесса их изготовления. Это: механические повреждения (откалывание краев кристалла, трещины в пластине, растрескивание кристаллов); несовершенства присоединения контактов и монтажа (рабрызгивание металла, отделение кристалла от держателя, низкое качество присоединения выводов, обрыв проводов, слабое контактирование токопроводящих поверхностей, коррозия и др.); не-

статки герметизации (низкое качество спая металла со стеклом, появление инородных частиц); неточности фотолитографии (низкое качество регистрации маски, неправильная экспозиция, царапины, плохая промывка, изменение времени травления); диффузия (дефекты в основном кристалле, искажение удельного сопротивления); дефекты металлизации (некачественное совмещение маски, низкое качество омических контактов, дефекты сплавления, царапины, поры, изломы металлизации).

Постепенные отказы ИМ сопровождаются увеличением токов утечки, что вызвано появлением каналов с инверсной проводимостью, загрязнением поверхности полупроводникового кристалла.

Основными активными элементами микросхем являются диоды, биполярные транзисторы и полевые транзисторы с изолированным затвором. Отказы диодов и транзисторов в основном вызваны процессами внутри и на поверхности пассивирующего или подзатворного (в МДП-транзисторах) окисла, отказами металлизации и контактов, загрязнениями, повышенными токами утечки $p-n$ -переходов. В маломощных логических схемах, где разогрев кристалла незначителен и $T_{p-n} \approx T$, повышение температуры корпуса микросхемы от 293 до 398 К увеличивает интенсивность отказов транзисторов в 18 раз, а при $T=473$ К — в 50 раз.

Основными видами отказов активных элементов ИМ являются обрывы металлизации и выводов, короткие замыкания $p-n$ -переходов и выход за установленные нормы электрических параметров.

К постепенным отказам ИМ относятся превышение допустимых значений обратных токов и пробивного напряжения диодов; обратных токов, коэффициентов усиления по току, пробивных напряжений униполярных транзисторов; порогового напряжения, тока стока, крутизны МДП-транзисторов. Причиной таких отказов является чаще всего влияние ионизированной примеси внутри и на поверхности пассивирующего окисла и влаги в корпусе. При наличии в кристалле кремния повышенного содержания ионов быстро диффундирующих примесей Au, Si, Fe эти отказы вызываются также диффузией примесей в объеме активных элементов. Постепенные отказы появляются в результате изменения внутренних свойств материалов (старения), используемых в ИМ, что в принципе исключить невозможно.

Основными причинами полных отказов диодов и биполярных транзисторов ИМ являются пробой $p-n$ -переходов и проплавление металлизации через диффузионные слои кремния при высоких уровнях рассеиваемой мощности, электродиффузия атомов кремния в алюминий при высоких плотностях тока (порядка 10^{10} А/м²), миграция алюминия по поверхности кремния между алюминиевыми контактными площадками при наличии разности потенциалов и повышенных температурах ($T \geq 423$ К).

Анализ показывает, что кремниевые ИМ имеют более высокие рабочие температуры ($T \approx 393$ К) по сравнению с германиевыми ($T \approx 353$ К) и на два-три порядка меньше обратные

40 Таблица 3.1. Типы процессов деградации ИМ

Тип дефекта	Вид отказа	Наиболее вероятные причины отказов	Методы обнаружения
Скопление дислокаций и дефектов упаковки в кристалле	Возрастание обратных токов <i>p-n</i> -переходов при увеличении напряжения, короткое замыкание, дрейф коэффициента усиления h_{21a} в <i>p-n-p</i> -транзисторах	Диффузия примесей вдоль дефектов, приводящая к появлению в базе тонких участков; концентрация тока вблизи дефектов, локальные перегревы, ведущие к пробое <i>p-n</i> -переходов. Диффузия дефектов решетки из сильно легированного слоя <i>n</i> ⁺ -типа в базу	Травление и наблюдение в электронном или бинокулярном микроскопе, микрорадиометр для исследования теплового поля, электроизмерения
Загрязнения в кремнии	Короткое замыкание, дрейф пробивного напряжения	Исходный кремний низкого качества. Лавинный пробой <i>p-n</i> -переходов вследствие усиления электрического поля вблизи загрязнений. Проплавление металлизации через диффузионные слои	Бинокулярный, электронный или металлографический микроскоп, электронный микрозонд, дифракция рентгеновских лучей, масс-спектрометрия, газовая хроматография, течеискатели, электроизмерения
Загрязнения в окисле и на поверхности окисла (ионы Na ⁺ , K ⁺ , Li ⁺ , H ⁺ , O ⁻)	Дрейф обратных токов $J_{ЭБО}$, $J_{нбо}$ пробивных напряжений $U_{пр}$, $U_{КБО}$, $U_{КЭО}$ коэффициента усиления h_{21a} порогового напряжения $U_{пор}$, тока стока I_c и крутизны S в МДП-транзисторах	Некачественное защитное покрытие, остатки травителей, фоторезиста, промывочных растворов, испарения, остаточные газы, влага, разгерметизация. Рост положительного (ионного) заряда в окисле SiO ₂ . Скопление положительных зарядов (Na и др.) на границе Si-SiO ₂ . Образование инверсионных каналов (<i>n</i> -типа на <i>p</i> -областях), уменьшение ширины <i>p-n</i> -перехода у поверхности кристалла	Бинокулярный, электронный или металлографический микроскоп, электронный микрозонд, дифракция рентгеновских лучей, масс-спектрометрия, газовая хроматография, течеискатели, электроизмерения
Пустоты, полости у коллекторной контактной площадки биполярных <i>p-n-p</i> -транзисторов и стокового электрода <i>n</i> -канальных МДП-	Обрыв	Электродиффузия алюминия под действием большой плотности тока ($j=10^{10}$ А/м ²) при $T \approx 473$ К	Визуальный контроль, радиография, рентгеноскопия, электронный микроскоп, электронная микрофотография, электроизмерения
«Ямки травления» на границе Al-Si	Короткое замыкание	Электродиффузия кремния в алюминии в области положительного контакта, замыкание нижележащего <i>p-n</i> -перехода при длительном прохождении тока большой плотности ($j \approx 10^{10}$ А/м ²) и при $T \approx 473$ К	Химическое травление алюминия и наблюдение «ямок травления» в растровом электронном микроскопе, электроизмерения
Поры — точечные отверстия в окисле	Рост токов утечки, короткое замыкание, снижение пробивных напряжений	Загрязнения поверхности кремния, недостаточная адгезия фоторезиста, загрязнения поверхности окисла или самого фоторезиста. Загрязнения и повреждения фотошаблонов. Образование в окисле протравленных участков, паразитная диффузия через поры в окисле	Травление и микроскопическое исследование, электронный микрозонд, электроизмерения
Микротрещины в окисле	Рост токов утечки, короткое замыкание	Растрескивание окисла	Травление и микроскопическое исследование, электронный микрозонд, электроизмерения
Увеличение размеров окон в окисле	Рост токов утечки, короткое замыкание	Погрешности фотолитографического процесса. Паразитная диффузия акцепторных и донорных примесей сквозь увеличенные окна в окисле	Травление и микроскопическое исследование, электронный микроскоп
Трещины через активную область	Рост токов утечки, увеличение сопротивления базы и коллектора	Распространение трещин от линий скрайбирования, возникновение трещин из-за различия коэффициентов термического расширения, механических напряжений	Травление, микроскопическое исследование шлифов, электроизмерения
Алюминий под слоем окисла SiO ₂ или защитного стекла	Короткое замыкание	Механические напряжения, плохая адгезия алюминия к термическому окислу. Продольная миграция алюминия под слоем SiO ₂ или стекла. Образование металлических закороток	Металлографический микроскоп, электроизмерения
Посторонние металлические частицы внутри корпуса	Короткое замыкание	Отслаивание металлических частиц, миграция и оседание частиц металла на поверхности кристалла	Металлографический микроскоп, электроизмерения

Тип дефекта	Вид отказа	Наиболее вероятные причины отказов	Методы обнаружения
Пустоты в термокомпрессионных контактах, хрупкость контактов	Обрыв	Взаимная диффузия металлов при термокомпрессии (например, Al—Au, Mo—Au, Ti—Au), образование интерметаллических соединений, уменьшение механической прочности контактов, перегрев и плавление мостиков и перемычек между пустотами в контактах	Металлографический микроскоп, электронный микроскоп, электронный микронд, электроизмерения
Пустоты в алюминиевой металлизации	Обрыв	Электродиффузия алюминия в местах градиентов тока, концентрации, температуры и в областях структурной неомогенности, локализация пустот у отрицательных контактов	Визуальный контроль, радиография, рентгенокопия, электронный микроскоп, электронная микрофотография, электроизмерения
Утончение металлизации	Обрыв	Утонченная металлизация при переходе с окисла на кремний, неравномерность металлизации, разрывы пленки на ступеньках окисла. Электродиффузия металла и выгорание пленки	Бинокулярный или электронный микроскоп, интерферометр, электроизмерения
Отслоение, раковины, царапины металлизации	Обрыв	Малая адгезия алюминиевой металлизации и контактных площадок. Нарушение режима «жиза» алюминия в кремний, механические повреждения	Визуальный контроль, радиография, рентгенокопия, электронный микроскоп, электронная микрофотография, электроизмерения
Разрыв или отслоение от контактной площадки мягкого вывода	Обрыв	Сдвиговые усилия в местах контактов. Грубые технологические дефекты в контактах	Визуальный контроль, вибратор-датчики механических напряжений, рентгенокопия, электроизмерения
Сужение проволочного вывода в непосредственной близости к месту термокомпрессионного контакта	Обрыв	Пережим мягкого вывода вблизи контакта. Перегрев и расплавление сужения вывода при большом токе	Визуальный контроль, вибратор-датчики механических напряжений, рентгенокопия, электроизмерения

токи переходов из-за большей ширины запрещенной зоны у кремния.

Наиболее характерные причины отказов схематически (кружочками) показаны на рис. 3.1.

В ИМ преобладают внезапные отказы, обусловленные качеством изготовления (технологическими дефектами). При любом уровне совершенствования технологического процесса изготовления ИМ возрастание количества операций приводит к возрастанию числа порождаемых ими дефектов. Сравнение числа технологических операций при изготовлении ИМ на биполярных и МДП-транзисторах, приведенное в табл. 3.2, подтверждает более высокую надежность и процент выхода годных МДП ИМ по сравнению с биполярными.

Характерные отказы ИМ могут быть разделены на: обрывы и короткие замыкания (КЗ) металлизации выводов; короткое за-

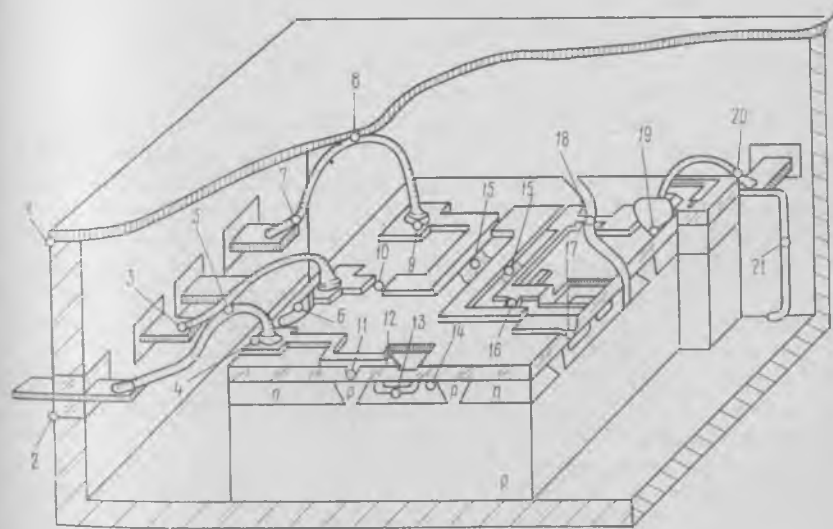


Рис. 3.1. Схематическое изображение характерных причин отказов ИМ:

1 — нарушение герметичности корпуса в области сварного шва; 2 — нарушение герметичности в электрической прочности в области металlostеклянного соединения; 3 — обрыв сварного соединения проволоки с внешним выводом; 4 — короткое замыкание контакта на кремний по краю кристалла; 5 — короткое замыкание проволочных выводов между собой; 6 — короткое замыкание выводов вследствие попадания металлических частиц внутрь корпуса; 7 — обрыв проволочного вывода; 8 — короткое замыкание проволочного вывода на металлизированный корпус; 9 — обрыв термокомпрессионного контакта; 10 — нарушение целостности металлизированной дорожки (механическое повреждение); 11 — короткое замыкание металлизированной дорожки на кремний через отверстие в окисной пленке; 12 — разрушение металлизированной дорожки в результате расплавления или коррозии на ступеньке окисла; 13 — короткое замыкание в объеме структуры в результате дефектов диффузии; 14 — увеличение токов утечки из-за образования инверсного слоя; 15 — короткое замыкание металлизированных дорожек между собой; 16 — короткое замыкание в результате неполного удаления окисла или образования непроводящей пленки на границе раздела кремний — алюминий; 17 — обрыв электрической цепи в результате нарушения металлизированной дорожки на трещине в кристалле; 18 — нарушение металлизированной дорожки на трещине в центре кристалла; 19 — короткое замыкание контакта на кремний в результате неправильной центровки термокомпрессионного соединения; 20 — короткое замыкание проволочного вывода на кремний на торце кристалла; 21 — короткое замыкание вывода на корпус вследствие попадания металлических частиц внутрь корпуса

Таблица 3.2.

Сравнение числа технологических операций при изготовлении биполярных и МДП ИМ

Характеристика технологической операции	На биполярных транзисторах	На МДП-транзисторах
Общее число операций	130	38
Основные технологические операции	32	22
Высокотемпературные операции (окисление, диффузия)	10	2

миграции алюминия по поверхности кремния между алюминиевыми контактными площадками при наличии разности потенциалов и повышенных температурах ($T \geq 423$ К).

Пробой $p-n$ -переходов вызваны в основном перегрузкой по току и напряжению. При пробоях выделяются большие мощности, приводящие к нагреву кристалла вплоть до расплавления металлизации и проникновения металла через диффузионные слои в эмиттере и базе. В результате происходит КЗ $p-n$ -переходов эмиттер — база и база — коллектор. Асимметричные вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов вырождаются при этом в прямые линии с наклонами, равными малому сопротивлению между замкнутыми электродами.

Для ИМ с МДП-транзисторами наиболее характерны следующие отказы: КЗ исток — затвор вследствие пробоя диэлектрика разрывы металлизации на контактных площадках истока и стока в результате механических деформаций, коррозия и пробой кремния между диффузионными областями истока и стока.

Распространены отказы ИМ, вызванные явлениями на поверхности кристалла — накоплением в приповерхностной области полупроводниковой структуры зарядов, вызывающих значительное изменение в состоянии электронно-дырочных переходов, которые обуславливают появление поверхностных каналов с инверсной проводимостью.

В планарной технологии $p-n$ -переходы образуются диффузией легирующих примесей в кремний под предварительно нанесенный слой двуокиси кремния через вытравленные в нем «окна». Окисный слой является маскирующим покрытием, представляющим собой «барьер» для используемых примесей (бор, фосфор и др.) что обеспечивает создание отдельных элементов микросхемы в соответствии с заданной топологией.

Технологический окисный слой обеспечивает защиту $p-n$ -переходов от воздействия окружающей среды, т. е. является пассивирующим и стабилизирующим покрытием. При эксплуатации ИМ в приповерхностной области полупроводниковой структуры происходит накопление электрических зарядов, вызывающих значительные изменения в состоянии $p-n$ -переходов и иногда обуславливающих появление инверсного слоя. Вследствие этого возрастают токи утечки, существенно ухудшаются характеристики $p-n$ -переходов, в результате чего микросхема становится неработоспособной.

уход электрических параметров установленных допуски.

Короткие замыкания $p-n$ -переходов в диодах и биполярных транзисторах возникают в результате:

проплавления металлизации через диффузионные слои в кремнии при высоких уровнях рассеиваемой мощности; электродиффузии кремния в алюминий при высоких плотностях тока ($j \approx 10^{10}$ А/м²) с одновременным проникновением алюминия в диффузионные слои;

Установлено, что при окислении поверхности кремния происходит заметное изменение энергетических уровней вблизи границы раздела кремний — двуокись кремния (рис. 3.2). При этом область кремния n -типа у поверхности раздела практически оказывается либо обедненной, либо инверсной. С увеличением удельного сопротивления полупроводникового материала тенденция к инверсии становится более заметной, поскольку уменьшение концентрации акцепторов вызывает перемещение уровня Ферми к центру запрещенной зоны и для достижения инверсии достаточно меньший изгиб энергетических уровней. Это позволяет сделать предположение о меньшей стабильности параметров ИМ, изготовленных на более высокоомном кремнии.

Изменение электрофизических свойств кремния вблизи поверхности раздела связано с перераспределением электрического заряда. Окисный слой представляет собой аморфную структуру, основу которой составляют кремний, фосфор и бор, связанные атомами кислорода. В окисле, кроме того, обычно присутствуют атомы таких щелочноземельных металлов, как натрий и калий. Источники этих зарядов следующие: ионы на внешней поверхности окисной пленки, количество которых зависит от способа обработки кристалла, влажности окружающей среды; ионы внутри окисной пленки. Величина перемещенного заряда, образованного ионами натрия за время t ,

$$\Delta Q N_a \sim t^2 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (3.1)$$

где $E_a = 0,7$ эВ — энергия активации ионов натрия.

Источником зарядов являются также избыточные атомы кремния вблизи границы с кристаллом, которые создают избыточный заряд, что вызывает изменение электрических параметров полупроводниковых приборов: увеличение обратного тока и уменьшение ширины перехода. Ионы этих металлов положительно и обладают высокой подвижностью, следовательно, могут под действием электрического поля легко перемещаться в окисном слое к границе раздела кремний — двуокись кремния. В результате этого в слое окисла непосредственно на границе раздела образуется объемный положительный заряд. Электрическое поле, созданное объемным зарядом положительных ионов, служит причиной возникновения локальных областей на поверхности кремния, обладающих электронной электропроводностью. Образование поверх-

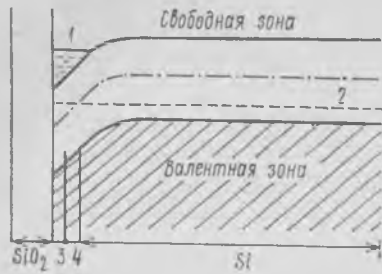


Рис. 3.2. Структура энергетических зон на окисленной поверхности полупроводника:

1 — объемный заряд у поверхности; 2 — уровень Ферми; 3 — кремний *n*-типа (инверсная область); 4 — слой кремния с собственной электропроводностью

ностных областей *n*-типа вызывает обеднение или инверсию электропроводности кремния *p*-типа и накопление избыточных носителей заряда в материале *n*-типа (рис. 3.3).

Тонкий окисный слой, приобретая заряд, изменяет состояние поверхности, что влияет, в свою очередь, на свойства полупроводниковых приборов, которые вызывают нежелательные эффекты:

- а) возрастание токов утечки и отсутствие насыщения вольт-амперной характеристики перехода коллектор — база;
- б) омическое шунтирование эмиттера с коллектором;
- в) снижение и нестабильность обратного пробивного напряжения на коллекторе;
- г) снижение коэффициента усиления по току;
- д) уменьшение эффективности эмиттера из-за омического шунтирования эмиттера с базой;
- е) увеличение шумов.

Эти эффекты могут меняться со временем как при хранении ИМ, так и в процессе их эксплуатации, что приводит не только к постепенным, но и к катастрофическим отказам.

Практика показывает, что причины, вызывающие постепенные отказы ИМ, выявляются при высокотемпературных испытаниях под электрической нагрузкой в течение 500 ... 1000 ч. Поэтому применяемая в настоящее время электротермотренировка ИМ является универсальным средством отбраковки потенциально ненадежных схем с дефектами, ведущими к внезапным или постепенным отказам.

3.3. ОТКАЗЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Отказы металлизации чаще всего возникают под влиянием токов повышенной плотности, высоких температур, а также в результате длительного воздействия температурных и электрических нагрузок. Основные виды отказов металлизации следующие:

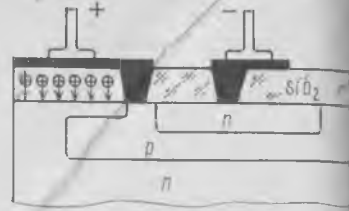


Рис. 3.3. Образование инверсной области в планарной структуре

обрывы металлизации в результате электродиффузии (электромиграции) металла и выгорания мест повышенной плотности тока, образующихся в местах утончения металлической пленки при переходах через ступеньки окисла, при изменении конфигурации токоведущих дорожек и др.;

обрывы и КЗ, вызванные электролитической и химической коррозией алюминия при некачественном защитном покрытии и загрязнении поверхности кристалла;

КЗ металлизации через отверстия в окисле или в результате образования «мостиков» между токоведущими дорожками в процессе электролитической коррозии. Причиной обрыва металлизации и выводов является перегорание, обусловленное пропусканием чрезмерно больших токов, вызванных коротким замыканием в схеме. Проволока из алюминия или золота диаметром $(2,5 \dots 3) \cdot 10^{-5}$ расплавляется при плотностях тока, больших 10^8 А/м^2 .

При плотностях тока 10^{10} А/м^2 проявляется процесс электродиффузии ионов металла под действием «электронного ветра» от конца металлической дорожки, находящегося под отрицательным потенциалом. При этом образуются пустоты, приводящие к обрыву металлизации, а у положительного конца — кристаллы, усы и холмики. В биполярных транзисторах, которые работают в активном режиме, обрыв, обусловленный электродиффузией, имеет место обычно у коллекторной контактной дорожки, так как из нее вытекает поток электронов. При плотностях тока 10^{11} А/м^2 электродиффузия ионов алюминия ускоряется и отрыв металлических дорожек от контактных площадок ИМ происходит за короткое время (несколько миллисекунд). Плотности тока 10^{11} А/м^2 возникают в момент пробоя *p-n*-переходов.

Причиной отрыва металлизированной разводки от контактных площадок активных элементов ИМ в пластмассовых корпусах является также электрохимическая коррозия.

Важнейшим механизмом отказов ИМ, связанным с электролитической коррозией, является волокнистое или дендритное наращивание материала, которое определяется электромиграцией материала проводников. Нарастивание материала приводит к коротким замыканиям между изолированными соседними металлическими полосками. Миграционные отложения происходят в присутствии воды, разности потенциалов между соседними проводниками и активации катодного электрода. Ионы металла переносятся по пленке, образующейся на поверхности изолятора из-за наличия загрязнений. В этом процессе активную роль играют ионы галогенидов.

В металлизации ИМ применяют два металла — золото и алюминий; коррозия золота из-за попадания загрязнений внутрь корпуса приводит к отказам. Механизм этих отказов состоит в нарастивании отложений золота в виде нитей на поверхности изолятора между соседними проводящими полосками. Возникающие токи короткого замыкания достигают порядка 10^3 А .

Поэтому при использовании золотых проводников между ними и подложкой, а также поверх проводников наносят слой металлизации (титан, вольфрам), который препятствует проникновению золота в глубь материала подложки и в промежутки между проводниками. Титан служит эффективным геттером для органических материалов, тормозящим развитие дендритов. Поверх металлизации слоями титана и вольфрама проводники покрывают защитным слоем из кварца. Следует учитывать, что пористость микротрещины в кварце способствуют попаданию загрязнений на поверхность золота и росту дендритов.

Дендриты золота нарастают там, где химические реакции управляются диффузией. Наиболее опасен направленный рост монокристалла, при котором возможно образование через межэлектродный зазор шириной 10^{-5} м мостика шириной 10^{-7} м. Его сопротивление может составлять сотни ом. В межэлектродном промежутке образуется гальванический элемент. Если проводимость мала, то реакция в элементе не протекает. Однако плотность тока мало меняется по длине дендрита, но очень сильно нарастает вблизи острия. Таким образом, на течение реакции переноса влияют не только химические условия в образующемся электролите но и концентрация электрического поля.

Для выявления некачественных областей ИМ используется физическая модель гальванического элемента, образуемого дендритами. Для этого формируется структура, представленная на рис. 3.4. При этом после выдержки при температуре 303 К при пропускании тока $4,0 \cdot 10^{-4}$ А в течение 100 ч образцы промываются, просушиваются и исследуются под электронным микроскопом.

С целью предупреждения отказов вследствие электролитической коррозии необходимо установить пороговую концентрацию воды в среде, окружающей микросхемы. При малом напряжении между проводниками (менее 0,2...0,4 В) и при очень тонкой пленке воды на поверхности кварца переноса ионов не происходит. С ростом влажности выше некоторого порога начинается процесс отложения металла, приводящий к отказам. Проводимость системы, содержащей золотые проводники и термоокись кремния в зависимости от влажности и температуры представлена на рис. 3.5. При температуре 296 К поверхностная проводимость изменяется на семь порядков при изменении влажности от 60 до 98%. Снижение отказов ИМ, обусловленных короткими замыканиями металлизации, достигается не только снятием влажности внутри корпуса микросхемы и загрязнением поверхности электродов и подложки, но и применением химических добавок, снижающих скорость протекания реакции в электролите, и обработкой поверхности устройств силиконовыми соединениями, которые делают поверхность гидрофобными.

Распространенным видом отказов ИМ являются короткие замыкания металлизированной разводки на их поверхности через отверстия в окисной пленке. Причины: дефекты окисла (про-

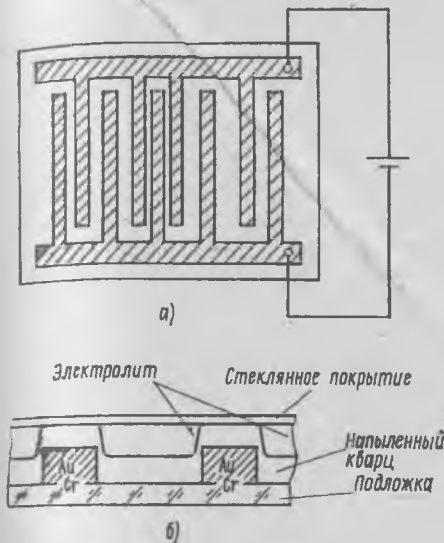


Рис. 3.4. Топология (а) и структура (б) гальванического элемента

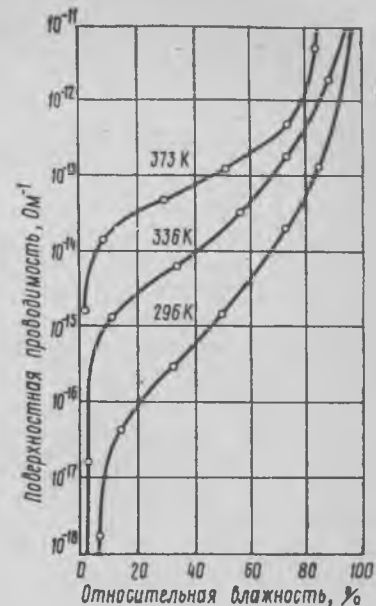


Рис. 3.5. Результаты измерения проводимости в системе, содержащей золотые проводники и термоокись кремния, в зависимости от влажности и температуры

лы, царапины, трещины), снижающие его диэлектрическую прочность, трудность выявления которых состоит в том, что они проявляются лишь в эксплуатации (рис. 3.6).

На надежность ИМ существенное влияние оказывает качество обработки поверхности структуры, и, в частности, тщательная промывка пластин. Неполное удаление травителя с поверхности кристалла в процессе изготовления ИМ может привести к разрывам металлизированной разводки при попадании влаги внутрь корпуса готовой ИМ.

Небрежность при резке и ломке пластин на кристаллы может вызвать появление коротких замыканий золотых проводников на исходный кремний на краю кристалла.

При работе ИМ в ее цепях может протекать импульсный ток. Возникновения кратковременных импульсов в ИМ могут приводить к разрыву проводников, т. е. к отказам.

Импульсы тока длительностью более 10^{-4} с способствуют плавлению металлизации

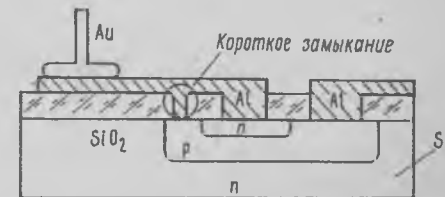


Рис. 3.6. Схема возникновения отказа ИМ вследствие дефектов окисной пленки

на коротких участках соединений. Длительность импульса, при которой произошло плавление,

$$t \sim L^2/k, \quad (3.2)$$

а расчетное значение максимального тока

$$I = \left[\frac{c \rho_V}{\rho_c} \cdot \frac{T_m}{l'} \right]^{1/2}, \quad (3.3)$$

где L — расстояние между зонами контакта и плавления; k — коэффициент теплопроводности; C — удельная теплоемкость металла; ρ_V — удельная плотность металла; ρ_c — удельное сопротивление; l' — оцениваемая длительность импульсов; T_m — температура плавления металла.

В пленках алюминия на окисленных пластинах кремния при комнатной температуре существуют напряжения растяжения порядка $(1 \dots 2) \cdot 10^8$ Н/м², так как температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) алюминия и кремния различаются почти на порядок ($\alpha \approx 3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹). Поэтому при термоциклировании при температуре от 213 до 378 К возникают разрывы металлизации на кристаллах.

Отказы в тонкопленочных ИМ. Наиболее характерны для элементов тонкопленочной (пассивной) части ИМ следующие отказы: разрывы соединений между контактной зоной на поверхности подложки ИМ и выводом корпуса;

разрывы металлизированных соединительных проводников, вызванные царапинами;

разрывы в местах пересечений металлизированных проводников с окисным слоем, возникающие под действием локального перегрева (расплавления) металла;

короткое замыкание металлизированных соединительных проводников, вследствие дефектов травления при изготовлении соединений и контактных площадок.

Основными пленочными элементами ИМ являются резисторы. Отказы пленочных резисторов в большинстве своем определяются технологическими дефектами: механическими повреждениями резистивного слоя и загрязнением резистивных пленок. Наблюдающийся иногда дрейф сопротивлений тонкопленочных резисторов определяется окислением резистивного слоя из-за некачественного защитного покрытия.

При изготовлении ИМ по совмещенной технологии резисторы получают методом напыления пленок из смеси двух или более металлических и керамических компонентов, например из смеси хрома с моноокисью кремния (Cr—SiO). Соединение резисторов с другими элементами осуществляют с помощью металлизированных дорожек (Al). Для предотвращения возможной химической реакции между элементами алюминий напыляют на слой химически нейтрального металла, предварительно нанесенного на поверхность резистора. При повреждении или слишком малой толщине разделительной пленки реакция между алюминием и материалом

напыленного резистора может приводить к образованию интерметаллического соединения, обладающего диэлектрическими свойствами, что обуславливает разрыв электрической цепи.

3.4. ОТКАЗЫ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Некачественные соединения являются одним из основных источников отказов ИМ и составляют более 50% всех отказов. Обрывы выводов наиболее часто происходят по двум причинам:

в результате сдвиговых усилий в местах контактов, возникающих при колебаниях температуры, вследствие различия ТКЛР выводов и защитного покрытия бескорпусных ИМ из эпоксидного компаунда, смолы или эмали;

в результате пережима мягкого вывода вблизи контакта в процессе термокомпрессии, ведущего к сужению поперечного сечения проводника, перегреву и расплавлению его при большом токе.

При соединении металлизированных площадок, обычно алюминиевых, на структуре с внешними выводами корпуса ИМ используют золотую проволоку, которую присоединяют к контактным площадкам термокомпрессионной либо ультразвуковой сваркой.

При термокомпрессионной сварке происходит взаимная диффузия золота и алюминия, приводящая к образованию на границе раздела золото — алюминий интерметаллических соединений типа Au₂Al (вблизи золотой проволоки) и AuAl₂ (вблизи алюминиевой контактной площадки на поверхности окисла кремния). При этом вследствие локального разогрева в контактной области температура повышается до минимальной температуры плавления системы золото — алюминий (температуры эвтектики AuAl), расплавление происходит лишь в малом объеме на границе раздела этих металлов.

Последующее выполнение термокомпрессионных контактов к той же кристаллической структуре осуществляется при температуре подложки около 573 К, что способствует быстрому образованию в зоне золото — алюминий интерметаллических соединений типа Au₄Al и Au₅Al₂ (рис. 3.7). Их состав зависит от условий его

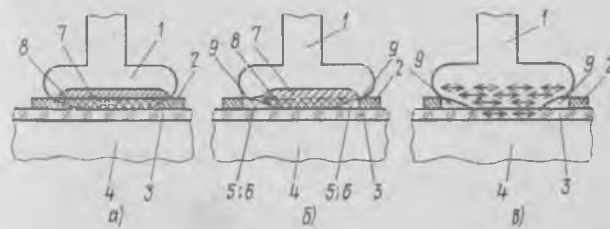


Рис. 3.7. Поперечные сечения термокомпрессионного контактного соединения золота — алюминий: а — после выдержки при температуре 573 К в течение 5...10 мин; б — после температурного старения при 473...573 К в течение до 1000 ч; в — распределение механических напряжений в контактном соединении, приводящих к обрыву контакта; 1 — Au; 2 — Al; 3 — SiO₂; 4 — Si; 5 — Au₂Al; 6 — AuAl₂; 7 — Au₄Al; 8 — Au₅Al₂; 9 — трещины

образования (концентрации золота и алюминия, наличия свободного кремния, температуры и давления в процессе термокомпрессии, температуры окружающей среды и времени эксплуатации готовой ИМ и других факторов).

Непосредственно после сварки контактные соединения обладают хорошими механическими и электрическими свойствами. Однако в процессе работы или при хранении ИМ в условиях повышенной температуры возникают необратимые явления, вызывающие увеличение сопротивления и обрыв термокомпрессионных контактов ИМ. Градиент концентраций металлов от чистого золота до чистого алюминия и различные коэффициенты диффузии отдельных элементов в этой системе вызывают эффект переноса массы в соответствии с уравнением

$$x = \sqrt{0,51 \exp\left(-\frac{23500}{RT}\right) t}, \quad (3.4)$$

где x — перемещение границы раздела между интерметаллическими соединениями относительно ее первоначального положения, см; $R_0 \approx 8,31$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура, К; t — время выдержки при данной температуре, с.

С возрастанием температуры окружающей среды от 293 до 523 К скорость перемещения границы раздела изменяется приблизительно на четыре порядка.

Скорость диффузии золота в контакте Au—Al намного превышает скорость диффузии алюминия, поэтому при эксплуатации ИМ наблюдается диффузия золота в алюминиевую дорожку. На периферийных участках термокомпрессионного контакта образуются интерметаллическое соединение типа $AuAl_2$ с пурпурным оттенком («пурпурная чума»), в зоне связи остаются пустоты и трещины, снижающие механическую прочность контактов (рис. 3.7,б).

Образование интерметаллических соединений и изменение состава в процессе эксплуатации приводит к возникновению значительных механических напряжений на поверхности раздела золота — алюминий вследствие изменения объема и несовпадения кристаллических решеток различных интерметаллических соединений. Механические напряжения по периферии термокомпрессионного контакта золота с алюминием, а также различие ТКЛР отдельных интерметаллических соединений (рис. 3.7,в) усиливают возникающие напряжения, что может привести к отрывам золотых проводников от алюминиевых контактных площадок. Неправильная центровка термокомпрессионного контакта относительно контактной площадки может приводить к высокому электрическому сопротивлению интерметаллического соединения и обрыву электрической цепи.

На практике встречается еще вид отказов, который также связан с образованием интерметаллических соединений. Обычно по

верхность кристалла защищена пленкой двуокиси кремния. Возможно также образование интерметаллического соединения типа $Al_2Au_2Si_2$ темно-красного или черного цвета в области термокомпрессионного соединения при наличии различных дефектов в окисной пленке (отверстия, проколы, недостаточная толщина слоя окисла и др.), через которые происходит взаимодействие кремния с алюминием и золотом.

При недостаточной температуре подложки или низком удельном давлении рабочего инструмента в зоне связи, или недопустимо малой продолжительности сварки может произойти понижение механической прочности контакта и, как следствие, обрыв. К снижению механической прочности термокомпрессионных соединений приводят механические повреждения и подтравливания контактных площадок в процессе фотолитографии, что уменьшает площадь контакта.

Оценка качества корпусов микросхем. Попадание влаги внутрь корпуса до герметизации прибора или при недостаточной герметичности корпуса в процессе испытаний приводит к отказам ИМ. Протекающая при этом химическая реакция приводит к образованию гидрата окиси алюминия. Это является причиной нарушения целостности электрической цепи вследствие высокоомной электрического сопротивления дефектных участков металлизированной разводки. Поэтому качество корпусов ИМ определяется их герметичностью, а также прочностью основания и подложек. Для обеспечения надежности корпусов ИМ следует решить важную проблему — исключение загрязнений корпусов. Причиной дефектов корпусов ИМ является вода, содержащаяся в соединительных материалах. Содержание воды в гибридных ИМ в несколько раз больше, чем в изготовленных по любой другой технологии. Эпоксидная смола, применяемая для соединения кристалла с подложкой, впитывает на содержание влаги внутри корпуса. В ИМ без эпоксидной смолы при 373 К водяные пары составляют 0,03 ... 0,6% газовой смеси. При герметизации в металлоглазанных корпусах типа ТО-5 с использованием эпоксидных смол эти значения находятся в пределах 0,9 ... 3,2%. Вакуумная сушка при температуре 523 К в течение 12 ч перед герметизацией снижает содержание влаги в таких корпусах до 0,05%.

Интенсивность отказов корпусов гибридных ИМ зависит от типа корпуса и применяемых материалов. Исходная интенсивность отказов λ' устанавливается, например, в раз-

Таблица 3.3

Корпус	Применяемые материалы	λ'
Плоский	Коваровый, сплошной	1,1
	Из другого металла, сплошной	1,5
	Ковар — стекло	1,5
	С окисью алюминия	1,3
С двумя рядами выводов ТО-5	Керамика — стекло	2,0
	Металл — стекло	1,5
	Простая подложка	1,0
	Многослойная подложка	1,2

мере $0,02/10^6$ ч, а результирующая находится путем умножения N' на поправочный коэффициент π' , учитывающий тип корпуса и материалы (табл. 3.3). На каждые дополнительные четыре вывода свыше 16 и каждые 0,025 м периметра свыше 0,1 м величина π' увеличивается на 0,15.

3.5. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

Расчет надежности ИМ в большинстве своем ограничивается расчетом интенсивности отказов. Расчет интенсивности отказов ИМ осуществляется на базе изучения физики и механизмов отказов ИМ, взаимосвязи физических явлений в ИМ с их надежностью либо на базе анализа отказов ИМ и использования традиционных методов статистической теории надежности к расчету интенсивности отказов ИМ.

Статистический метод оценки интенсивности отказов ИМ. В его основу положено предположение о том, что любая микросхема может рассматриваться как функциональный узел, состоящий из разнородных дискретных элементов. Это позволяет рассчитывать интенсивность отказов ИМ простым суммированием интенсивностей отказов, составляющих схему элементов, где справедлив экспоненциальный закон распределения интенсивностей отказов.

Метод основан на предположении, что имеют место только внезапные отказы; коэффициенты нагрузки элементов ИМ равны единице; коэффициенты режима работы ИМ являются функцией лишь положительной температуры окружающей среды t , при которой проводимость ИМ и мощность рассеяния на ней растут: $a=f(t)$. Для резисторов и конденсаторов, образованных обратносмещенными $p-n$ -переходами, интенсивность отказов берется такой же, что и для диодов.

Расчет интенсивности отказов корпусированных полупроводниковых ИМ ведется по формуле

$$\lambda_{им} = [N_T a_T \lambda_T + N_D a_D \lambda_D + (3N_T + 2N_D + N_B) \lambda_{соед}] K_{вб}, \quad (3.5)$$

где N_T — число условных транзисторных переходов; N_D — число условных диодных переходов (общее число диодов, резисторов, конденсаторов); a_T и a_D — коэффициенты режима работы соответственно транзисторных и диодных переходов; N_B — число внешних выводов; λ_T , λ_D , $\lambda_{соед}$ — интенсивность отказов соответственно транзисторного и диодного переходов и соединения для нормальных условий; $K_{вб}$ — коэффициент вибраций.

У некорпусированных ИМ соединения контактных площадок с выводами корпуса отсутствуют. Поэтому при расчете их интенсивности отказов принимают $N_B=0$. Для расчетов рекомендуются следующие средние статистические значения интенсивностей отказов: $\lambda_T=1,0 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹; $\lambda_D=0,6 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹; $\lambda_{соед}=0,1 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹. Значения коэффициентов режима работы, рекомендуемые для различной температуры окружающей среды, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Коэффициенты режима работы элементов полупроводниковых микросхем

Коэффициент режима работы	Температура, К						
	293	303	313	323	333	343	353
a_T	1,0	1,35	1,85	2,60	3,60	4,90	6,20
a_D	1,0	1,27	1,68	2,0	2,60	3,40	4,10

Расчет интенсивности отказов полупроводниковых ИМ при проектировании микросборок проводится с учетом их реального включения в электрическую схему микросборки и отсеивания цепей и внешних выводов ИМ, отказы которых не будут влиять на надежность работы данной микросборки.

Расчет интенсивности отказов БГИС и микросборок (МСБ). При расчете статистическим методом учитываются возможности использования в них некорпусированных транзисторов и конденсаторов, а также навесных микроминиатюрных компонентов. Расчет интенсивности отказов корпусированных микросборок ведется по формуле

$$\lambda_{МСБ} = \left\{ \sum_{i=1}^k \lambda_{им i} + N_T a_T \lambda_T + N_D a_D \lambda_D + N_R a_R \lambda_R + N_C a_C \lambda_C + \sum_{j=1}^{N_H} \lambda_{Hj} + \left[\sum_{i=1}^k N_{им i} + 3N_T + 2(N_D + N_R + N_C + N_H) \right] \lambda_{соед} \right\} K_{вб}, \quad (3.6)$$

где k — число бескорпусных ИМ; N_T , N_D , N_R , N_C , N_H — соответственно число некорпусированных транзисторов и диодов, пленочных резисторов и конденсаторов, навесных пассивных компонентов; $N_{им}$ — число выводов ИМ; a_R и a_C — коэффициенты режима работы пленочных резисторов и конденсаторов; $\lambda_{им i}$ — интенсивность отказов i -й полупроводниковой некорпусированной ИМ; λ_{Hj} — интенсивность отказов навесного пассивного j -го элемента; λ_R и λ_C — интенсивности отказов пленочных резисторов и конденсаторов.

Рекомендуемые значения коэффициентов режима работы пленочных резисторов и конденсаторов в зависимости от температуры окружающей среды даны в табл. 3.5. Средние статистические значения интенсивностей отказов пленочных резисторов, конденсаторов и соединений в микросборках, рекомендуемые для расчетов, следующие: $\lambda_R=0,1 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹; $\lambda_C=0,5 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹; $\lambda_{соед}=0,1 \cdot 10^{-8}$ ч⁻¹.

При расчете интенсивности отказов некорпусированных микросборок так же, как и при расчете интенсивности отказов некорпусированных полупроводниковых ИМ, полагают $N_B=0$.

Таблица 3.5. Коэффициенты режима работы пленочных элементов микросборок

Коэффициент режима работы	Температура, К						
	293	303	313	323	333	343	353
a_R	1,0	1,15	1,40	1,95	2,80	3,50	4,40
a_C	1,0	1,26	1,71	2,20	3,35	5,70	12,40

Надежность современных изделий электронной техники характеризуется кривой распределения по интенсивности отказов, приведенной на рис. 3.8. Из рисунка видно, что надежность ИМ достаточно высока и оценивается в настоящее время интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$. При экспоненциальном законе распределения надежности интенсивности отказов соответствует средняя наработка ИМ до отказа

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{(10^{-7} - 10^{-8}) (365 \text{ дней} \times 24 \text{ ч})} \approx 1000 - 10\,000 \text{ лет.}$$

При такой надежности ИМ статистические методы количественной оценки интенсивности отказов оказываются неэффективными, так как для получения достоверных статистических данных за приемлемое время необходимо проведение чрезвычайно трудоемкого эксперимента на огромном числе образцов. Реализация эксперимента сопряжена с большими затратами, не оправдывающими себя на практике.

Методика опирается на статистику фиксации отказов отдельных элементов ИМ без анализа механизмов и причин отказов. Поэтому получили развитие физико-статистические методы, позволяющие устанавливать причинно-следственные связи, определяющие надежность ИМ.

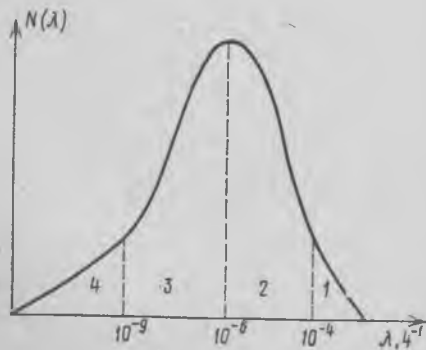


Рис. 3.8. Типовое распределение изделий электронной техники по интенсивности отказов:

1 — мощные и крупногабаритные приборы; 2 — приборы среднего уровня надежности; 3 — ИМ и маломощные приборы; 4 — простейшие приборы, элементы приборов ИМ

Причинный (физический) метод оценки. С целью изучения причин, физики и механизмов отказов ИМ и установления связей с базовой технологией ускоренного выявления потенциально дефектных ненадежных ИМ и совершенствования методов управления качеством ИМ разработан причинный метод. Оценка надежности причинным методом расчета наиболее полно отражает конструктивные и технологические особенности ИМ базируется на статистическом анализе физики и причин отказа

зов ИМ. При разработке данного метода учтены следующие особенности ИМ:

накопленные данные по результатам испытаний ИМ показывают, что их надежность слабо зависит от числа элементов, но в значительной степени определяется качеством технологического процесса (качеством технологического оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, числом технологических операций и объемом технологической обработки);

базовые технологические процессы изготовления ИМ (биполярная технология, технология МДП и другие) отличаются сравнительным постоянством благодаря стандартизации технологического оборудования и процессов.

Постоянство базовых технологических процессов изготовления ИМ указывает на целесообразность перехода от оценки надежности ИМ с одинаковой функциональной структурой к оценке надежности технологических однотипных ИМ.

В этом случае уменьшается объем статистических испытаний, а полученная информация о надежности ИМ достаточно устойчива и достоверна до смены технологического оборудования. Основными источниками отказов являются невыявленные нарушения технологического процесса изготовления ИМ, приводящие в основном к внезапным отказам. Для оценки интенсивности отказов ИМ необходимо систематизировать отказы и выделить в них компоненты ненадежности. Анализ и систематизация данных по отказам полупроводниковых ИМ показывают, что их надежность определяется четырьмя компонентами ненадежности:

внешними соединениями, включая выводы корпусов ИМ и соединения их с контактами печатной или пленочной платы;

внутренними контактными соединениями легированных областей полупроводника с металлизацией, сюда же относятся затворы МДП-структур;

корпусов ИМ;

кристалла. Модель интенсивности отказов ИМ при экспоненциальном законе представляется

$$\lambda_{\text{ИМ}} = \lambda_{\text{в.с}} + \lambda_{\text{к.с}} + \lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{п}}, \quad (3.7)$$

где $\lambda_{\text{в.с}}$ — интенсивность отказов внешних соединений; $\lambda_{\text{к.с}}$ — интенсивность отказов внутренних контактных соединений; $\lambda_{\text{к}}$ — интенсивность отказов корпусов ИМ; $\lambda_{\text{п}}$ — интенсивность отказов кристалла, определяемая его площадью. Эта модель положена в основу причинного метода расчета интенсивности отказов ИМ. Причинный метод объединяет, по существу, два метода. Рассмотрим каждый из них.

1. Прогнозирование надежности технологически однотипных ИМ с различной функциональной структурой по тестовой ИМ. Если ИМ различной функциональной сложности изготавливаются по одной и той же базовой технологии, то их надежность определяется лишь различным числом компонентов ненадежности. При

этом компонент ненадежности является общим для любой ИМ имеет постоянную надежность, определяемую качеством базового технологического процесса. Поэтому считают, что по результатам испытаний партии однотипных ИМ определяется интенсивность отказов ИМ.

Если испытываемая ИМ имеет $N_{в.с.о}$ внешних соединений; $N_{к.с.о}$ внутренних соединений (и затворов) в случае использования МДП ИМ; $N_{к.о}$ — усредненное число корпусов на один кристалл (при совместном использовании корпусированных и некорпусированных ИМ $N_{к.о} < 1$, при использовании корпусированных ИМ $N_{к.о} = 1$); $N_{п.о}$ — среднюю активную площадь, то математическая модель надежности испытываемой ИМ

$$\lambda_0 = \lambda_{в.с.1} N_{в.с.о} + \lambda_{к.с.1} N_{к.с.о} + \lambda_{к1} N_{к.о} + \lambda_{п1} N_{п.о}, \quad (3.8)$$

где $\lambda_{в.с.1}$ — интенсивность отказов, приведенная к одному внешнему соединению; $\lambda_{к.с.1}$ — интенсивность отказов одного внутреннего соединения; $\lambda_{к1}$ — интенсивность отказов, приведенных к одному корпусу ИМ; $\lambda_{п1}$ — интенсивность отказов, приведенная к единице активной поверхности кристалла (топологическая площадь за вычетом внешних контактных зон, зазоров на скрайбирование, тестовых структур и знаков совмещения и маркировки).

Количественное распределение отказов ИМ по компонентам ненадежности следующее:

$$\xi_{в.с} = \lambda_{в.с.1} N_{в.с.о} / \lambda_0; \quad (3.9)$$

$$\xi_{к.с} = \lambda_{к.с.1} N_{к.с.о} / \lambda_0; \quad (3.10)$$

$$\xi_{к} = \lambda_{к1} N_{к.о} / \lambda_0; \quad (3.11)$$

$$\xi_{п} = \lambda_{п1} N_{п.о} / \lambda_0. \quad (3.12)$$

Значения коэффициентов $\xi_{в.с}$, $\xi_{к.с}$, $\xi_{к}$ и $\xi_{п}$ для биполярных и МДП ИМ на основании статистических данных приведены в табл. 3.6. Очевидно, что

$$\xi_{в.с} + \xi_{к.с} + \xi_{к} + \xi_{п} = 1. \quad (3.13)$$

Коэффициенты, приведенные в табл. 3.6, сохраняются и в случае выпуска ИМ другой функциональной сложности при постоянстве базового технологического процесса. Пусть новая ИМ, характеризуемая показателями сложности $N_{в.с}$, $N_{к.с}$, $N_{к}$ и $N_{п}$, имеет интенсивность отказов $\lambda = \lambda_{в.с.1} N_{в.с} + \lambda_{к.с.1} N_{к.с} + \lambda_{к1} N_{к} + \lambda_{п1} N_{п}$. Подставив в это уравнение вместо интенсивности отказов $\lambda_{в.с.1}$, $\lambda_{к.с.1}$, $\lambda_{к1}$ и $\lambda_{п1}$ значения из равенств (3.9) — (3.12), получим

$$= \lambda_0 \left[\xi_{в.с} \frac{N_{в.с}}{N_{в.с.о}} + \xi_{к.с} \frac{N_{к.с}}{N_{к.с.о}} + \xi_{к} \frac{N_{к}}{N_{к.о}} + \xi_{п} \frac{N_{п}}{N_{п.о}} \right]. \quad (3.14)$$

Используя (3.14), можно по известной надежности однотипной ИМ прогнозировать надежность ИМ любой функциональной сложности, изготовленной по той же базовой технологии.

2. Расчет интенсивности отказов ИМ с учетом качества производства и эксплуатационных условий. Для этого расчета необходи-

Таблица 3.6. Распределение отказов полупроводниковых ИМ по компонентам ненадежности

Основные виды отказов	Распределение отказов	
	Биполярные ИМ	МДП ИМ
Отказы внешних соединений $\xi_{в.с}$	0,33	0,20
Отказы контактов затворов и внутренних контактных соединений $\xi_{к.с}$	0,26	0,32
Отказы, определяемые нарушениями герметичности корпусов $\xi_{к}$	0,16	0,20
Отказы, зависящие от площади активной поверхности кристалла ИМ $\xi_{п}$	0,25	0,28

мо рассмотреть факторы, влияющие на компоненты надежности ИМ, и их изменение как функций температуры, эксплуатационных воздействий, условий производства, качества контроля и т. д. Если закон распределения экспоненциальный, то модель для оценки надежности ИМ можно представить в виде

$$\lambda_{ИМ} = \lambda_{в.с} + \lambda_{к.с} + \lambda_{п}, \quad (3.15)$$

где $\lambda_{ИМ}$ — интенсивность отказов ИМ; $\lambda_{в.с}$ — интенсивность отказов внешних соединений; $\lambda_{к.с}$ — интенсивность отказов внутренних соединений; $\lambda_{п}$ — интенсивность отказов кристалла.

В модель интенсивность отказов корпуса не введена, так как нарушение герметизации влияет на надежность внутренних контактных соединений и кристалла, что учтено в модели ($\lambda_{в.с}$, $\lambda_{к.с}$).

Расчет интенсивности отказов внешних соединений. Он производится с учетом производственного контроля качества внешних контактных соединений и эксплуатационных условий.

Интенсивность отказов одного внешнего соединения

$$\lambda_{в.с.1} = \lambda_{в.с.10} a_{к1} a_{э}, \quad (3.16)$$

где $\lambda_{в.с.10}$ — интенсивность отказов одного внешнего соединения в лабораторных условиях. При ультразвуковой сварке алюминиевых проводников $\lambda_{в.с.10} = 0,7 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$; при термокомпрессионном соединении с золотыми проволочными проводниками $\lambda_{в.с.10} = 1,3 \times 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$; $a_{к1}$ — коэффициент, характеризующий систему производственного контроля (приведен в табл. 3.7); $a_{э}$ — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации (определяется по табл. 3.8).

Интенсивность отказов совокупности внешних соединений

$$\lambda_{в.с} = \lambda_{в.с.1} N_{в.с}, \quad (3.17)$$

где $N_{в.с}$ — число внешних соединений.

Расчет интенсивности отказов внутренних контактных соединений. Он проводится с учетом качества герметизации ИМ и температурного режима работы.

Таблица 3.7. Значения коэффициента $a_{к1}$, характеризующего систему производственного контроля качества

Характеристика систем контроля качества
Оптимальная система контроля качества (уровень А): 100%-ный многоступенчатый контроль ИМ в процессе производства; периодическая аттестация технологических процессов и условий производства; сквозная 100%-ная паспортизация ИМ в процессе производства и многоступенчатого контроля готовой продукции, включая контроль и электротермотренировки в крайних режимах и термоудары; текущая надежная обратная связь от испытаний к технологическим операциям
Система высшего класса (уровень В): выборочные периодические граничные испытания, определение основных механизмов отказов, 100%-ный контроль ИМ по этим механизмам отказов; 100%-ные испытания в крайних режимах электротермотренировки и термоударов; надежная связь по результатам граничных испытаний
Система среднего класса (уровень В): выборочный контроль электрических параметров и герметичности при комнатной температуре, 100%-ный контроль основных параметров;
Система получения годных ИМ (уровень Г): контроль, основанный на 100%-ной разбраковке по важнейшим параметрам ТУ при комнатной температуре

В полупроводниковых биполярных ИМ внутренние контактные соединения — это соединения между диффузионным слоем и металлизацией. Внутренние соединения выполняются через окна в слое окисла, защищающего подложку ИМ.

В интегральных МДП-структурах внутренние соединения образуются из тонких окисных зон (затворов) и межсоединений, выполняемых через окна в слое диэлектриков. Число тонких окисных зон соответствует числу МДП-элементов. Число внутренних соединений можно приблизительно определить по принципиальной схеме ИМ.

Таблица 3.8. Значения коэффициента a_n для различных эксплуатационных условий

Области и условия применения приборов микроэлектронной аппаратуры	a_n
Лабораторные условия	1,0
Орбитальные спутники	1,5
Стационарное наземное оборудование	2,0
Перевозимое наземное оборудование	5,0
Переносное или портативное наземное оборудование	7,0
Оборудование отсеков для экипажей самолетов	5,0
Приборные отсеки самолетов	7,0
Оборудование ступеней выведения спутников на орбиту	8,0
Ракеты	10,0

Зависимость интенсивности отказов $\lambda_{к.с}$ внутренних соединений от их числа и эксплуатационных условий

$$\lambda_{к.с} = \lambda_{к.с1} N_{к.с}, \quad (3.18)$$

где $N_{к.с}$ — число внутренних контактных соединений;

$$\lambda_{к.с1} = \lambda_{к.с10} a_{к1} a_{к2} a_1 a_3 \quad (3.19)$$

— интенсивность отказов одного внутреннего контактного соединения; $\lambda_{к.с10}$ — интенсивность отказов одного внутреннего контактного соединения для лабораторных условий; $a_{к1}$ и a_3 — те же коэффициенты, что и в формуле (3.16); $a_{к2}$ — коэффициент ненадежности корпусов ИМ; a_1 — коэффициент температурного ускорения.

Коэффициент ненадежности корпусов ИМ для остеклованных кристаллов в герметичной конструкции

$$a_{к2} = 1 + 0,05 Q, \quad (3.20)$$

для плоских корпусов с неостеклованными кристаллами

$$a_{к2} = 4 + 0,05 Q \quad (3.21)$$

и для пластмассовых корпусов с двумя рядами выводов

$$a_{к2} = 6 + 0,05 Q, \quad (3.22)$$

где Q — превышение выводов корпуса над десятью.

Зависимость интенсивности отказов одного внутреннего контактного устройства от температуры подложки $t_n = t_0 + \Delta t$ определяется функцией $a_1 = f(t_n)$ (рис. 3.9).

Превышение Δt температуры подложки ИМ над температурой окружающей среды t_0 определяется по графикам рис. 3.10 в зависимости от температуры окружающей среды и мощности P , рассеиваемой микросхемой при комнатной температуре (293 ± 5) К.

Расчет интенсивности отказов кристалла ИМ. При изготовлении ИМ в нее вносится определенное число дефек-

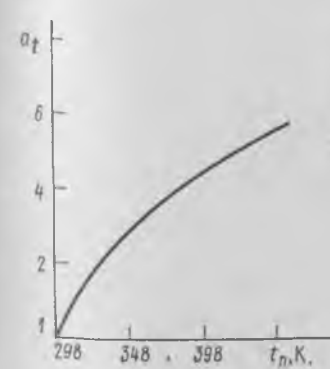


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента температурного ускорения от температуры подложки

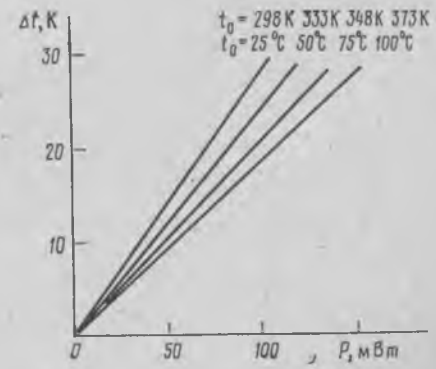


Рис. 3.10. Зависимость перегрева подложки от температуры окружающей среды и мощности, рассеиваемой ИМ

тов (участки с повышенной скоростью протекания физико-химических процессов старения). Их устранить полностью невозможно, так как уже при выращивании кристалла в нем возникают дефекты (по Френкелю или по Шотки), число которых

$$n = n_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (3.23)$$

где n_0 — число Авогадро; E — энергия образования дефекта, равная 2...4 эВ; k — постоянная Больцмана; T — температура, К.

Плотность распределения a дефектов ИМ в зависимости от их размера A представлена на рис. 3.11. С уменьшением размера дефектов плотность их возрастает. Ордината, соответствующая точке A_0 , характеризует уровень производственного контроля качества ИМ. Явные дефекты, превышающие размер A_0 , определяют процент выхода годных ИМ, а скрытые дефекты размером $A_1 < A_0$ определяют надежность ИМ. Здесь отказ ИМ рассматривается как результат образования дефекта из-за сочетания большого числа микродефектов, т. е. просматривается тесная связь между надежностью и технологическим процессом. Чем меньше размер микродефектов, тем более продолжительно время физико-химического старения для образования дефектов, ведущих к отказу ИМ, т. е. тем выше надежность ИМ. Но для этого, как видно из рис. 3.11, необходимо ужесточить контроль качества ИМ, что приведет к сдвигу границы A_0 в сторону меньших значений A_1 , скрытые дефекты станут явными, а процент выхода годных упадет.

Целесообразность повышения надежности за счет снижения процента выхода годных ИМ при данной производительности и качестве технологического процесса определяется тенденцией увеличения площади кристалла и уменьшения размеров структур, а также увеличением вероятности появления сочетаний дефектов, ведущих к отказу. Зависимость показателя сложности кристалла

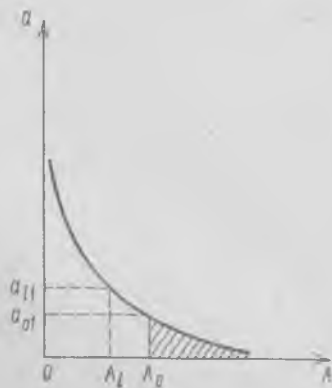


Рис. 3.11. Зависимость средней плотности дефектов ИМ от их размера

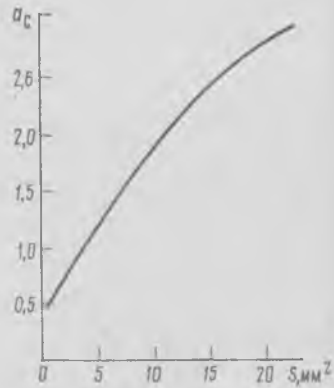


Рис. 3.12. Зависимость показателя сложности кристалла ИМ от площади его активной части

ИМ от площади его активной части приведена на рис. 3.12. На рисунке активная площадь кристалла S включает поверхность, на которой расположены все элементы топологии, кроме кромок с контактными площадками, тестовыми элементами и полем допуска на скрайбирование.

Интенсивность отказов кристалла, входящего в микросборку, в зависимости от его сложности и степени освоенности ИМ в производстве определяется по формулам:

$$\lambda_{\text{п}} = \lambda_{\text{п1}} S, \quad (3.24)$$

$$\lambda_{\text{п1}} = \lambda_{\text{п10}} a_{\text{к1}} a_{\text{к2}} a_1 a_2 a_{\text{п}} a_c, \quad (3.25)$$

где $\lambda_{\text{п1}}$ — интенсивность отказов единицы площади кристалла; S — активная площадь кристалла; $\lambda_{\text{п10}}$ — интенсивность отказов единицы площади кристалла в нормальных условиях; $a_{\text{к1}}$, $a_{\text{к2}}$, a_1 , a_2 — те же коэффициенты, что и в формуле (3.19); $a_{\text{п}}$ — показатель степени освоенности ИМ в производстве; a_c — показатель сложности кристалла.

При оценке надежности корпусированных или некорпусированных ИМ размеры кристалла обычно выбираются из ТУ на ИМ.

Для расчета надежности ИМ и микросборок по рассмотренной методике необходима информация об интенсивностях отказов $\lambda_{\text{в.с10}}$, $\lambda_{\text{к.с10}}$, $\lambda_{\text{к10}}$, $\lambda_{\text{п10}}$ компонентов ненадежности в нормальных условиях по каждому базовому технологическому процессу, т. е. отдельно для биполярных ИМ, МДП, ИМ, КМОП ИМ и т. д. Указанные интенсивности отказов называют базовыми.

Причинный подход к расчету надежности ИМ позволяет получить эту статистическую информацию без больших затрат, потому что эксперимент может быть осуществлен на дешевых ИМ с простой функциональной структурой. Причинный метод обеспечивает высокую точность расчетов надежности, так как получаемая статистическая информация отражает качество конкретного технологического процесса и возможности его технологического оборудования.

Глава 4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Качество и надежность ИМ определяется совершенством материалов конструкции, отработанностью и контролируемостью производственных процессов.

Для контроля качества материалов и технологических процессов изготовления ИМ необходимо использовать методы, обладающие высокой чувствительностью и точностью. Эти методы должны обеспечить: определение концентрации примеси в диапазоне 10^{20} ... 10^{27} атомов/м³ с точностью 1% и профилей распределения

легирующей примеси по глубине с разрешающей способностью около $0,5 \cdot 10^{-7}$ м на глубине до 10^{-6} м;

изучение структуры и состава поверхностных слоев с чувствительностью до 1% моноатомного слоя на глубине до $(1 \dots 2) \times 10^{-9}$ м;

определение поверхностных конфигураций с разрешающей способностью $5 \cdot 10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-8}$ м и точностью измерения расстояний порядка $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ м на площади до $0,1 \times 0,1$ м²;

визуализация динамики работы готовых ИМ и их элементов и др.

Необходимо отметить, что существенное влияние на важнейшие параметры ИМ оказывают процессы, происходящие на атомном и молекулярном уровнях, в микрослоях, микрообъемах и особенно на поверхности твердых тел. Увеличение степени интеграции приводит к резкому повышению влияния состояния поверхности твердого тела на воспроизводимость и работоспособность ИМ. Поэтому очень важно развитие методов исследования и контроля поверхности. Причем под термином «поверхность» понимается граница двух фаз или двух материалов, обладающих разными физико-химическими свойствами (твердое тело — вакуум, твердое тело — газ, металл — полупроводник, окисел — полупроводник и т. п.). Толщина поверхностного слоя определяется конкретными физико-химическими механизмами ее «возмущения» и может составлять от долей моноатомного слоя до десятков (и даже сотен) моноатомных слоев.

При производстве ИМ применяют разнообразные методы контроля. Предпочтение при этом отдается неразрушающим методам контроля, которые, не изменяя качества, параметров и характеристик ИМ, позволяют по косвенным, вторичным или непосредственным признакам обнаруживать дефекты, провести анализ качества изготавливаемых ИМ и их элементов.

Неразрушающий контроль по сравнению с другими видами контроля обладает целым рядом преимуществ: во-первых, позволяет исследовать изделия в процессах разработки, производства в эксплуатации; во-вторых, может вводиться в технологические процессы производства. Применение комплекса физико-химических средств неразрушающего контроля может на $1,5 \dots 2$ порядка уменьшить интенсивность отказов ИМ, исключить в ряде случаев долговременные, дорогостоящие и порой малоинформативные разрушающие методы контроля.

Комбинации методов технологического контроля дают, как правило, настолько обширный комплекс информации, что для его расшифровки и обработки требуется больше времени, чем для самих измерений. Поэтому совершенно необходимо широкое применение вычислительной техники всех уровней — от микропроцессоров до мощных электронных вычислительных систем с обширным кругом задач: обработки информации, распознавания, автоматизации функционального управления, связи с центральной ЭВМ и др.

Значительное влияние на развитие приборов для контроля ока-

зывает создание технологического оборудования нового поколения, в котором эти приборы используются в качестве встраиваемых датчиков контроля и управления технологическими процессами или модулей послеоперационного контроля, что позволяет создать гибкие производственные системы от автоматических линий до программно-ориентированных комплексов.

4.1. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Оптические методы контроля нашли широкое применение в производстве ИМ. Они позволяют контролировать состав и свойства материалов, проводить исследования, операционный контроль структур и анализ технологических процессов путем регистрации интенсивности, фазы, спектрального состава, поляризации и пространственного распределения оптического излучения, взаимодействующего с исследуемыми объектами или испускаемого ими. Оптические методы исследования основаны на таких явлениях, как отражение, поглощение, интерференция и дифракция света. При изготовлении ИМ применяются различные материалы (металлы, полупроводники, диэлектрики), которые по-разному взаимодействуют с оптическим излучением. Это взаимодействие определяется свойствами материалов, их геометрией, внешними условиями, а также спектральным составом, поляризацией и фазой применяемого излучения.

Оптические методы можно классифицировать на визуально-оптические (микроскопические), интерференционные, спектральные, поляризационные, нефелометрические, фотометрические и др.

Визуально-оптический метод. Этот метод контроля заключается в визуальном осмотре под микроскопом обследуемого изделия и сравнении его с эталонным образцом либо с его изображением. Качество целого ряда технологических операций при изготовлении ИМ контролируется визуально, с помощью различных микроскопов, работающих в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра.

С помощью этого метода контролируются: внешний вид основания и крышек корпуса ИМ, сварные и паяные швы, спай стекло — металл, контактные площадки, качество золотого покрытия дна оснований; внешний вид фотошаблонов и заготовок для них (наличие включений, пузырей, сколов, царапин, наплывов, пятен, жировых загрязнений, точек и т. д.); качество поверхности Au, Al-проволоки (посторонние включения, наличие пленок, трещин, раковин, расслоений, вмятин); внешний вид полупроводниковых пластин после механической и химической обработки (наличие бурых пятен, сколов, бугорков, ямок, следы загрязнений, локальная неравномерность блеска и т. д.); чистота поверхности эпитаксиальных структур (бугорки, трипирамиды, ямки, риски), а также определяют плотность следов кристаллитов, высоту дефектов роста; внешний вид пластин после окисления (следы загрязнений, неравномерность толщины, плотность светящихся точек, вкрапле-

ний и т. д.); внешний вид пластин при нанесении фоторезиста (включения, пузыри, царапины, наплывы, неравномерность толщины и т. д.); деформацию маскирующего рельефа при задубливании, качество процесса фотолитографии после проявления, травления и снятия фоторезиста (макродефектность, полнота стравливания окисла, резкость края протравленных окон, качество совмещения слоев, соответствие топологии, цвет контактных площадок, геометрические размеры окон, ширина клина проявления, неровность края и т. д.); качество поверхности пластин после металлизации и отжига (инородные включения, трещины, царапины, равномерность блеска и т. д.); качество анизотропного травления при изоляции элементов (форма края, плоскостность дна, площадь травления и т. д.); внешний вид кристалла после ломки (дефекты скрайбирования, дефекты фотолитографии), после присоединения кристалла (качество приплавления), правильность монтажа и т. д.

Визуально-оптический метод контроля широко используется для анализа отказов всех изделий. При этом методе применяют микроскопы различных типов: МБС-1, МБС-2, МБС-200, МССО и т. д.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности визуального контроля является использование проекционных устройств, позволяющих наблюдать на экране увеличенное изображение объекта. Проекционные устройства облегчают труд операторов, так как при этом устраняется необходимость аккомодации глаз и появляется возможность принять более удобную позу при наблюдении. На технологических операциях разбраковки и укладки кристаллов в кассеты, скрайбирования, сборки и другие применяются малогабаритные проекторы ППМ-20, ППМ-60, ПН-80.

На операциях совмещения используются двупольные проекторы, которые позволяют одновременно наблюдать контролируемый и эталонный объекты или два участка одного объекта.

Общим недостатком проекторов является небольшая яркость изображения и уменьшение разрешающей способности по сравнению с наблюдением изделий в бинокулярный микроскоп. Малая яркость изображений не позволяет получать увеличения больше 100 ... 200.

Более совершенными устройствами являются лазерные и телевизионные проекторы. В лазерных проекторах использование лазера в качестве усилителя яркости изображения дает возможность при незначительной освещенности контролируемого объекта получить на большом экране яркое, контрастное изображение. Оптическая схема лазерного проекционного микроскопа представлена на рис. 4.1. При определенном режиме работы лазера можно получить изображение в двух цветах, что особенно важно при контроле производства фотошаблонов для ИМ. В этом режиме хорошо обнаруживаются проколы, недотравы, сколы фотошаблонов и другие дефекты.

Рис. 4.1. Оптическая схема лазерного проекционного микроскопа:

1 — плоскость предмета; 2 — объектив; 3 — активная среда; 4 — линза; 1', 1'' — плоскости изображения



Другим направлением создания проекционных устройств с большим экраном и увеличением, необходимым для контроля элементов ИМ, является разработка специализированных телевизионных, в том числе цветных, проекционных устройств. Телевизионные проекционные устройства обладают следующими преимуществами: возможностью усиления яркости и контрастности изображаемого объекта, равномерным распределением яркости экранов электронно-лучевых трубок (ЭЛТ), большим полем зрения, высоким качеством изображения.

Наиболее распространенной схемой телевизионного проектора является схема с передающей телевизионной трубкой. Она включает источник света, объектив, передающую трубку, видеотракт с блоками усиления и обработки сигнала и видеоконтрольное устройство. В телевизионных проекторах применяют, как правило, стандартные осветительные и оптические системы и промышленные телевизионные установки (ПТУ). Качество изображения определяется в основном передающей трубкой. Наиболее широко используются телевизионный микроскоп ТМ-1, а также телевизионный проектор ОД-10Т.

Необходимо отметить, что работа с такими средствами, как микроскопы, проекторы, лазерные и телевизионные проекторы, предъявляет высокие требования к квалификации оператора. При этом большой объем информации, обрабатываемой в процессе контроля, делает работу утомительной.

Для выделения на изображении контролируемой структуры областей дефектов и аномалий топологии используют методы оптической пространственной фильтрации, которые дают возможность повысить производительность и достоверность оптических методов контроля за счет уменьшения на несколько порядков количества информации, перерабатываемой оператором. Сущность метода оптической пространственной фильтрации заключается в подавлении изображений топологии элементов ИМ оптическим вычитанием изображений контролируемой и образцовой структур или соответствующих им пространственно-частотных спектров. В зависимости от используемого источника, освещающего контролируемую структуру, устройства оптической фильтрации разделяются на когерентные и некогерентные. Некогерентные устройства основаны на принципах геометрической оптики и наиболее просты по конструкции и в обращении.

На рис. 4.2 приведена оптическая схема устройства некогерентной оптической фильтрации, предназначенного для контроля фотошаблонов. Свет от источника света 2 проходит через контролируемый фотошаблон 4, его изображение при помощи призм 6, 7 проецируется на экран 10. На этот же экран при помощи призм 8, 7 проецируется изображение негативного эталонного фотошаблона 5. Оператор совмещает эти изображения и по дефектам топологии на разностном изображении отбраковывает дефектные фотошаблоны. Аналогичную оптическую схему можно использовать в устройстве фильтрации, предназначенном для выделения дефектов методом цветного подавления изображений топологии. В этом случае дополнительно окрашенные монохроматические изображения исследуемого и контрольного фотошаблонов (например, красное и синее) оптически складываются. В местах, где изображения полностью идентичны, виден неокрашенный, сероватого оттенка рисунок, а там, где имеются дефекты, сложение нарушается и любое различие рисунков проявляется в виде ярко окрашенной красной или синей области в зависимости от вида дефекта и от того, на каком из фотошаблонов он находится. Дефекты видны как цветные пятна, отклонения в размерах — как цветная окантовка.

Одним из методов выделения дефектов регулярных структур, к которым относятся фотошаблоны и кристаллы ИМ, является метод когерентной пространственной фильтрации, позволяющей выделять дефекты за счет различия их пространственно-частотных спектров и спектров периодических структур.

На рис. 4.3 изображена одна из возможных схем реализации этого метода. Контролируемый фотошаблон помещают во входную плоскость и освещают когерентным светом лазера Л, расширенного коллиматором К. Линза Л1 производит фурье-преобразование изображения топологии и формирует в частотной плоскости P2 его пространственно-частотный спектр. В этой плоскости помещают амплитудный фильтр, расположенные заграждающих

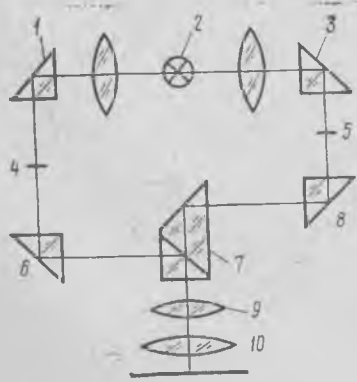


Рис. 4.2. Оптическая схема устройства некогерентной оптической фильтрации:

1, 3, 6, 7, 8 — призмы; 2 — источник света; 4 — контролируемый фотошаблон; 5 — негативный эталонный фотошаблон; 9 — система линз; 10 — экран

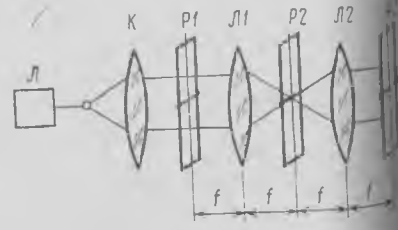


Рис. 4.3. Оптическая схема устройства когерентной оптической фильтрации:
Л — лазер; К — коллиматор; Л1, Л2 — линзы (объективы); P1, P2 — частотная и выходная плоскости; f — фокусное расстояние

ментов которого соответствует пространственно-частотному спектру «идеального» фотошаблона. Дефекты (загрязнения, нарушение геометрических размеров и т. д.) имеют широкополосные спектры, и основная часть пространственных частот дефектов проходит через фильтр. Линза Л2 производит обратное фурье-преобразование и формирует в выходной плоскости P3 изображение в виде светлых пятен, которые по форме и местоположению соответствуют дефектам контролируемой топологии. Качество отфильтрованного изображения зависит от точности изготовления и установки фильтра, а также от параметров и качества применяемой оптики.

В БИС и СБИС резко увеличивается сложность рисунка топологии вследствие увеличения плотности и уменьшения размеров элементов ИМ. Это снижает достоверность визуального контроля и требует разработки и внедрения автоматизированных систем оптических методов контроля. Автоматизация операций промежуточного контроля полупроводниковых пластин в производстве ИМ играет большую роль в повышении процента выхода годных. Автомат сортировки изделий по внешнему виду (рис. 4.4) работает следующим образом.

Изображение объекта (О) последовательно преобразуется в оптическом преобразователе (ОП), который в данном случае увеличивает масштаб изображения, и в устройстве считывания (УС), представляющем собой оптоэлектронное устройство с оптико-механической или электронно-оптической разверткой, где оптическое изображение преобразуется в фотоэлектрический сигнал. Фотоэлектрический сигнал формируется электронным преобразователем (ЭП) и генератором счетных импульсов (ГСИ) и подается на временной и амплитудный дискриминаторы (ДВ и ДА), с которых выдаются сигналы разбраковки на сортирующее устройство (СУ). Таких дискриминаторов в системе может быть несколько. Данный автомат определяет только наличие дефектов.

Обнаружение дефектов, измерение площади и линейных размеров отдельных дефектов, определение суммарной площади дефектов на рабочем поле, учет их местоположения, тональности и формы возможны с помощью системы, изображенной на рис. 4.5. По способу считывания и преобразования изображения и фотоэлектрического сигнала данное устройство аналогично предыдущему автомату. Отличие состоит в составе операций обработки информации и реализующих ее средствах, а также в средствах обратной связи с технологическими процессами, обеспечивающими активный характер контроля. Фотоэлектрический сигнал, преобразованный, как и в предыдущем случае, во временную последовательность электрических импульсов, поступает через устройство согласования с объектом (УСО) на вычислительную машину. Уп-

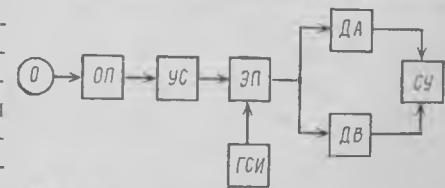


Рис. 4.4. Структурная схема автоматического сортировщика по внешнему виду

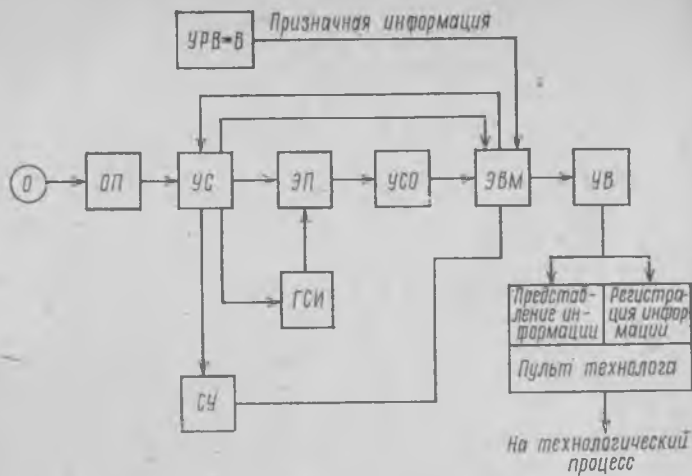


Рис. 4.5. Структурная схема автоматизированной системы контроля внешнего вида

равление ЭВМ осуществляется от устройства считывания, и обработка информации ведется в реальном масштабе времени. Результаты анализа внешнего вида изделий выдаются на сортирующее устройство по типам дефектов, а также через устройства вывода (УВ) на пульт технолога в виде представляемой и регистрируемой информации. Для обеспечения корректной связи технолога с технологическим процессом в машину через устройства ручного ввода-вывода (УРВ-В) вводится призрачная информация (номер партии, смены, табельный номер оператора и т. д.).

Общим недостатком электронных автоматизированных систем контроля является большая продолжительность контроля, что не позволяет за приемлемое для серийного производства время производить 100%-ный дефектоскопический контроль топологии ИМ. Особой эффективностью при автоматизации задач неразрушающего контроля и анализа качества полупроводниковых структур и фотошаблонов обладают комплексы, сочетающие преимущества электронных и оптических систем. За счет фильтрации дефектов с помощью оптических систем резко сокращается объем информации, обрабатываемой электронной системой, а также существенно возрастает производительность процесса контроля, так как сопоставление изображений производится параллельно и практически мгновенно.

Интерференционный метод. Сущность интерференционного метода состоит в получении информации об объекте по образованию в плоскости изображения соответствующего распределения интенсивности и фазы оптического излучения, прошедшего через объект или отраженного объектом. Интерференционный метод применяется для контроля:

класса чистоты обработки поверхности подложек;

глубины рисок и ступенек травления;
глубины и ширины разделительных канавок кремниевых структур с диэлектрической изоляцией, канавок ориентационного травления;

геометрических размеров элементов структур микросхем;
толщины окисных слоев;
толщины фоторезиста;

уровня двух поверхностей, предназначенных для присоединения;

толщины эпитаксиальных слоев и т. д.

Для этих целей используются микроинтерферометры МИИ-4, МИИ-9. В этих микроинтерферометрах используется амплитудное расщепление лучей по схеме Майкельсона. На рис. 4.6 приведена упрощенная схема интерферометра Майкельсона. Свет от источника $O1$ коллимируется объективом $O1$. Он расщепляется в точке A с помощью расщепителя луча S , который может представлять собой наполовину посеребренное зеркало, диэлектрическую пленку с 50%-ным отражением или расщепляющую призму. Два пучка, образующиеся в точке A , имеют одинаковые интенсивности. Вертикальный пучок отражается в точке B зеркала $M1$, затем возвращается обратно в A и через S достигает объектива $O2$. Второй пучок проходит через S , отражается в плоскости D на опорном зеркале сравнения $M2$, затем возвращается к A , где также отражается по направлению к $O2$. Два пучка складываются при соответствующих условиях и образуют интерференционные полосы, которые видны глазом E или фокусируются на фотографическую пластину C . В изображенной системе компенсирующая пластина C выполнена из того же стекла и той же толщины, что и S , так что в видимом свете пути двух пучков будут одинаковы. Зеркало $M2$ образует мнимое изображение в $M2'$. Поступательное положение одного из двух зеркал может быть точно зафиксировано. Кроме

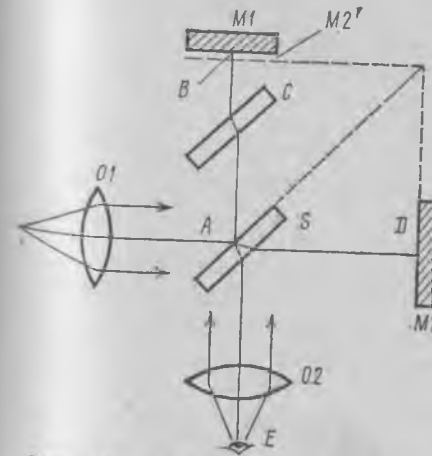


Рис. 4.6. Упрощенная схема интерферометра Майкельсона

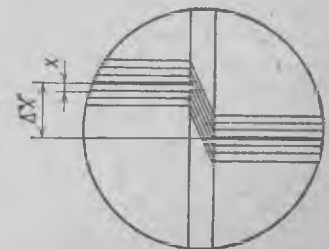


Рис. 4.7. Схема измерения толщины окисла по изгибу интерференционных полос на ступеньке в микроинтерферометре МИИ-4

того, каждое зеркало имеет три вращающихся винта, чтобы регулировать относительные расположения зеркала $M1$ и мнимого зеркала $M2'$ или зеркала $M2$. Таким образом, установкой двух зеркал могут быть получены полосы интерференции. В случае белого света $M1$ и $M2'$ должны пересекаться или находиться в пределах двух волн друг от друга. Если зеркало $M1$ заменить образцом, то образуется измерительный канал. Анализ интерференционной картины позволяет делать заключения о характере изменений в измерительном канале.

Рассмотрим метод определения толщины пленки SiO_2 при помощи микроинтерферометра МИИ-4. Сущность этого метода заключается в измерении высоты «ступеньки» после стравливания окисла с части пластины. При наблюдении ступеньки в поле зрения микроинтерферометра на фоне поверхности видны серии интерференционных полос, которые претерпевают излом на ступеньке (рис. 4.7). Толщина пленки d пропорциональна сдвигу интерференционных полос одного порядка:

$$d = \frac{\Delta x}{x} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (4.1)$$

где Δx — сдвиг центральной полосы (в относительных единицах); x — расстояние между соседними интерференционными полосами (в относительных единицах); λ — длина волны середины видимого спектра ($5,5 \cdot 10^2$ нм); $\lambda/2 = 2,7 \cdot 10^2$ нм соответствует сдвигу полос на ступеньке, высота которой соответствует расстоянию между соседними интерференционными полосами (в белом свете).

Данный метод позволяет измерять толщину пленок SiO_2 до $(2 \dots 3) \cdot 10^4$ нм. Погрешность измерения толщины составляет примерно ± 30 нм.

Толщина эпитаксиальных слоев может быть в ряде случаев измерена методом, основанным на использовании интерференции инфракрасных лучей. Для возникновения интерференции необходимо, чтобы падающее излучение отражалось не только от поверхности эпитаксиального слоя, но и от его границы с подложкой. Это означает, что эпитаксиальный слой должен быть прозрачным в используемом интервале длин волн и оптические постоянные эпитаксиального слоя в этом спектральном диапазоне должны отличаться от оптических постоянных подложки. Все эти условия хорошо выполняются, если эпитаксиальный слой имеет малую концентрацию свободных носителей ($\rho > 0,09 \cdot 10^{-2}$ Ом·м), а подложка сильно легирована ($\rho < 0,015 \cdot 10^{-2}$ Ом·м). Отраженные от поверхности эпитаксиального слоя и поверхности раздела пленка — подложка лучи будут интерферировать, и по образовавшейся интерференционной картине можно судить о толщине эпитаксиального слоя. Толщина эпитаксиального слоя определяется по формуле

$$h = \frac{\Delta N}{2n\Delta k}, \quad (4.2)$$

где ΔN — количество максимумов или минимумов в измеренном интервале; n — коэффициент преломления слоя; $\Delta k = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}$ — разность величин, обратных длинам волн наблюдаемых максимумов или минимумов.

Данный метод отличается быстротой измерения, не разрушает образцы, обеспечивает точность измерения $\pm 5\%$, но применим только для эпитаксиальных слоев толщиной от двух до нескольких десятков микронетров, выращенных на сильнолегированных подложках.

Для измерения волнистости и отклонения формы поверхности 11...14 класса шероховатости весьма перспективен лазерный интерференционный профилограф, в котором используются уникальные достоинства лазерных источников света — высокая монохроматичность излучения и малая угловая расходимость лазерного луча. Оптическая схема прибора показана на рис. 4.8. Она представляет собой интерферометр Майкельсона с лазером в качестве источника излучения. Зеркало опорного плеча интерферометра перемещается по линейно-периодическому закону. Измерительная система профилографа выполнена так, что в каждом периоде модуляции измеряется длительность временного интервала, передний фронт которого привязывается к началу периода модуляции, а задний — к первому нулю интерференционного сигнала. При этом на результат измерения не оказывают существенного влияния колебания амплитуды интерференционной картины, вызванные, например, изменением коэффициента отражения исследуемой поверхности. Получаемые профилограммы калибруются в длинах волн $10^n \lambda/2$ ($n=1, 2, 3$) при любом масштабе измеряемых величин. Минимальная величина контролируемой микронеровности составляет 5 нм при высоком диапазоне измерений профиля ($5 \dots 3 \cdot 10^5$ нм).

Поляризационный метод. Поляризационный метод основан на получении информации по изменению параметров поляризации оптического излучения в результате взаимодействия его с объектом в процессе отражения, преломления или поглощения.

Контроль состояния поверхности пластин, параметров тонких поверхностных слоев и границ раздела между ними — одно из главных условий получения качественных и надежных ИМ. Такой

Рис. 4.8. Оптическая схема лазерного интерференционного профилографа:

1 — лазер; 2 — оптическая развязка; 3 — фотоприемник; 4 — фокусирующая система; 5 — пьезокерамический элемент; 6 — система обработки информации; 7 — самонаписец; 8 — цифрпечатающее устройство

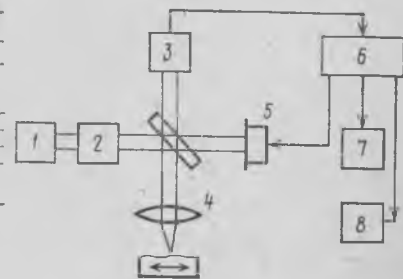
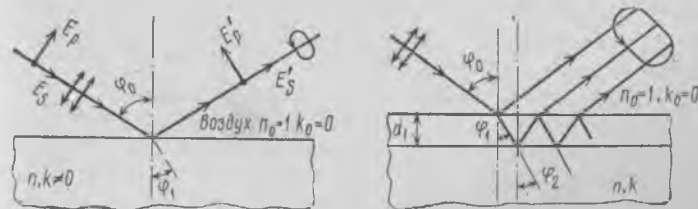


Рис. 4.9. Ход лучей при отражении линейно-поляризованного света от поверхности полупроводника без пленки (а) и с пленкой (в)



контроль необходим в первую очередь на стадии отработки технологического процесса, после чего следует проводить выборочный контроль. Одним из самых точных и чувствительных методов контроля является эллипсометрический метод (отражательная поляриметрия), основанный на анализе изменения поляризации пучка поляризованного монохроматического света при его отражении от исследуемого объекта. При этом используется высокая чувствительность состояния поляризации света к свойствам и параметрам поверхностных и приповерхностных областей исследуемой отражающей системы при наклонном падении пучка лучей. Так как обычно измеряются параметры эллиптически поляризованного света, метод назван эллипсометрическим или просто эллипсометрией.

Рассмотрим плоско поляризованный монохроматический луч света, падающий под углом φ_0 на поверхность полупроводника (рис. 4.9). Электрический вектор амплитуды падающего светового луча может быть представлен в виде двух компонентов: p -компоненты E_p , параллельной плоскости падения и s -компоненты E_s , перпендикулярной плоскости падения. Составляющие электрического вектора отраженного луча E'_p и E'_s в общем случае меняют свои амплитуду и фазу. Вследствие комплексного характера показателя преломления полупроводника между p - и s -компонентами вектора E' возникает разность фаз и луч становится поляризованным, т. е. конец вектора E' описывает эллипс в плоскости, нормальной к направлению распространения луча света. При наличии на поверхности полупроводника тонкой диэлектрической пленки в ней происходит дополнительный сдвиг фазы между лучом, отраженным от верхней границы диэлектрика, и лучом, отраженным от поверхности полупроводника. Оценка изменения состояния поляризации рабочего пучка света при его отражении от исследуемой структуры осуществляется эллипсометрическими параметрами Ψ и Δ . Первый эллипсометрический параметр Ψ определяется из соотношения

$$\Psi = \arctg \left| \frac{E'_p}{E'_s} \right| : \frac{|E_p|}{|E_s|} = \arctg \frac{R_p}{R_s}, \quad (4.3)$$

где R_p и R_s — соответствующие коэффициенты отражения.

Второй эллипсометрический параметр определяется следующим образом:

$$\Delta = \delta_p - \delta_s, \quad (4.4)$$

где δ_p и δ_s — изменение фаз составляющих электрического вектора световой волны, параллельной и перпендикулярной плоскости падения света соответственно. Величины Ψ и Δ измеряются в угловых единицах (градусах, минутах, секундах) и часто называются поляризационными углами.

Параметры поляризации отраженного света определяются как начальными характеристиками пучка лучей, так и оптическими свойствами отражающей системы и окружающей среды. Связь ве-

личин Ψ и Δ с этими свойствами описывается основным уравнением эллипсометрии:

$$\operatorname{tg} \Psi \exp(i\Delta) = \frac{\tilde{R}_p}{\tilde{R}_s} = \rho, \quad (4.5)$$

где i — мнимая единица; \tilde{R}_p и \tilde{R}_s — обобщенные коэффициенты отражения электромагнитной волны исследуемой отражающей системой.

Величина ρ для тонкой прозрачной диэлектрической пленки на поверхности полупроводника является функцией многих параметров, а именно $\rho = \rho(n_0, k_0, n_1, k_1, n, k, d, \lambda, \varphi_0)$ (рис. 4.9). В это выражение входят такие величины, как оптические константы подложки (показатель преломления n и коэффициент экстинкции k), оптические константы n_1, k_1 и толщина d_1 слоя диэлектрика, оптические константы внешней среды n_0, k_0 , а также угол падения φ_0 и длина волны λ монохроматического света. Коэффициент экстинкции связан с размерным коэффициентом поглощения материала α соотношением $\alpha = 4\pi k/\lambda$. При установлении количественной зависимости между поляризационными углами и физическими параметрами отражающей системы существуют две задачи: прямая — расчет совокупности углов Ψ и Δ по известным параметрам этой системы и обратная — вычисление конкретных значений физических величин реальной структуры по измеренным на ней экспериментальным значениям поляризационных углов. Например, для чистой поверхности полупроводника ($d_1 = 0$), измеряя эллипсометрические параметры Ψ и Δ , можно определить оптические константы n и k , учитывая, что величины φ_0, n_0 и λ обычно известны из условий измерения. Для полупроводника, покрытого диэлектрической пленкой, можно определить параметры пленки n_1 и d_1 , зная оптические константы полупроводника n и k при данной длине волны λ и угле падения φ_0 . Обычно для интерпретации эллипсометрических измерений предварительно с помощью ЭВМ решают прямую задачу: для конкретной отражающей системы рассчитывают теоретические значения углов Ψ и Δ для всех возможных численных наборов реальных значений искоемых физических величин. Результаты расчета представляют в виде таблицы или Ψ, Δ -номограмм (рис. 4.10). Каждой точке этой номограммы, построенной в координатах Ψ и Δ , соответствуют определенные значения коэффициента преломления и толщины пленки. Коэффициент преломления обозначен цифрами, стоящими у каждой кривой (подчеркнуты); толщина пленки определяется по приращению разности оптического хода, изменяющемуся вдоль кривой от 0 до 180 (направление увеличения толщины указано стрелками). Искомые физические величины определяются путем сравнения экспериментально измеренных значений Ψ и Δ с теоретическими зависимостями, например от n_1 и d_1 , т. е. с результатами прямой задачи. За одно измерение на эллипсометре определяются оба угла Ψ и Δ и,

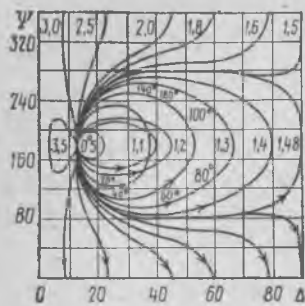


Рис. 4.10. ψ , Δ -нограмма для системы SiO_2 —Si

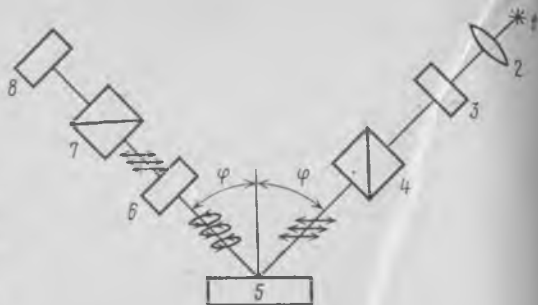


Рис. 4.11. Оптическая схема эллипсометра:

1 — источник света; 2 — коллиматор; 3 — монохроматизирующий фильтр; 4 — поляризатор; 5 — образец; 6 — компенсатор; 7 — анализатор; 8 — фотоприемник

следовательно, два любых независимых физических параметра исследуемой системы при известных остальных величинах.

Эллипсометрические измерения в видимом диапазоне длин волн связаны в основном с измерением толщины и показателя преломления тонких ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ м) и сверхтонких (от долей до нескольких десятков нанометров) диэлектрических пленок, а также для измерения оптических констант поверхности различных материалов (показателей преломления и коэффициентов поглощения). При эллипсометрических измерениях толщины полупроводниковых слоев используется инфракрасное излучение средневолнового и длинноволнового диапазонов. В этой области спектра чистые полупроводники прозрачны, а механизм поглощения света в легированных полупроводниках определяется в основном поглощением свободными носителями заряда. Специфика ИК-эллипсометрии заключается в том, что измеряемые эллипсометрические параметры можно функционально связать не только с оптическими константами, но и непосредственно с электрофизическими свойствами полупроводника: концентрацией свободных носителей заряда в подложке N , их подвижностью μ , удельным сопротивлением материала ρ , эффективной массой m^* и временем релаксации τ . При известных соотношениях между ρ и N , а также известной m^* и заданной λ в ИК-области показатель преломления и коэффициент экстинкции полупроводника определяются только концентрацией носителей заряда N . В этом случае решение основного уравнения эллипсометрии можно представить в виде функциональной зависимости ψ , $\Delta = f(d, N)$, где d — толщина эпитаксиального слоя, что позволяет провести численный расчет на ЭВМ ψ , Δ -нограмм для всех реально возможных комбинаций величин d и N .

Для экспериментального определения ψ и Δ используется эллипсометр, оптическая схема которого приведена на рис. 4.11. Эллипсометр состоит из двух плеч — поляризатора и анализатора, расположенных под углом 2φ . Поворотом поляризатора регулируется плоскость поляризации падающего луча относительно плос-

кости падения. В плече поляризатора находится источник света, коллиматор, монохроматор и поляризатор. Коллиматор предназначен для получения параллельного пучка света, а монохроматор — для выделения света определенной длины волны. Затем параллельный пучок света попадает на поляризатор, выходя из которого становится линейно поляризованным. Действие любого поляризатора заключается в том, что он разделяет первоначальный свет на две компоненты, ортогональные по форме поляризации, пропускает одну компоненту и поглощает или отклоняет другую. После отражения от исследуемой структуры луч света поляризуется эллиптически и попадает в плечо анализатора, в котором находятся два оптических элемента — компенсатор и анализатор. Четвертьволновая пластинка (компенсатор) превращает эллиптически поляризованный свет в линейно поляризованный. Состояние вторичной поляризации луча определяется анализатором (устройством, ничем не отличающимся от поляризатора) и фотоприемником. Если компенсатор установить таким образом, чтобы его оптическая ось находилась под углом 45° к плоскости падения луча на образец, то, определив положение поляризатора¹ и анализатора, соответствующие минимальному сигналу фотоприемника, можно рассчитать ψ и Δ .

Применение оптических квантовых генераторов (лазеров) позволило расширить возможности эллипсометрического метода и исследовать поверхности малых размеров, до 10^{-8} см², имеющие существенные неоднородности по толщине или показателю преломления расположенных на них пленок. Эллипсометрическое изображение малых участков поверхности рассматривается при большом увеличении. Различия толщин пленок и оптических констант преобразуются в различия яркости свечения исследуемых элементов. Абсолютные значения толщин или оптических констант поверхности могут быть определены путем гашения на эллипсометрической картине луча, отраженного от исследуемых участков поверхности. Такой метод называется эллипсометрической микроскопией. Оптическая схема лазерного эллипсометрического микроскопа ЛЭМ-ЗМ приведена на рис. 4.12. Прибор ЛЭМ-ЗМ может работать в двух режимах: в режиме обычной эллипсометрии и в режиме эллипсометрической микроскопии. При работе в первом режиме использование модулятора света 5 и электронного блока 10 обеспечивает точность измерения толщины в пределах нескольких десятков нанометров и чувствительность к измерению толщины до нескольких десятых нанометра. При работе в режиме эллипсометрической микроскопии с помощью объектива 7 изображение локального участка исследуемой поверхности проецируется на видеоскопический фотоаппарат или чувствительную площадку видикона и затем на экран телевизора. Методика измерения на эллипсомере ЛЭМ-ЗМ заключается в гашении отраженного от исследуемого образца луча на выходе эллипсометра посредством вращения вокруг оптической оси прибора двух из трех установленных на лимбах оптических элементов (поляризатора,

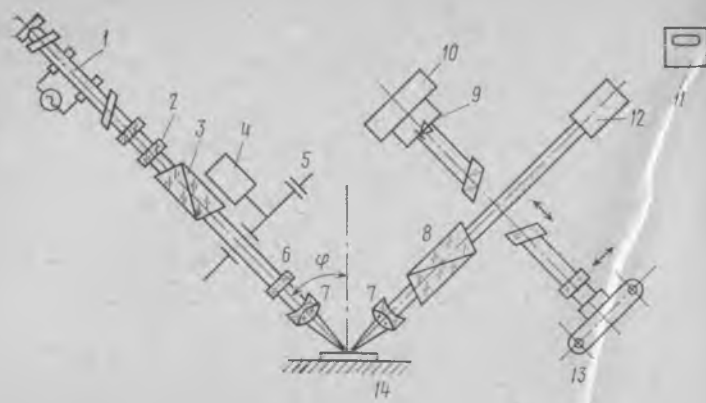


Рис. 4.12. Оптическая схема ЛЭМ-3М:

1 — гелий-неоновый лазер; 2 — пластина $\lambda/4$; 3 — поляризатор; 4 — электродвигатель; 5 — модулятор; 6 — компенсатор; 7 — объектив; 8 — анализатор; 9 — фотодиод; 10 — электронный блок; 11 — видеоконтрольное устройство; 12 — видикон; 13 — фотоаппарат; 14 — образец

анализатора и компенсатора) и расчете параметров Ψ и Δ по углам поворота (азимутам) этих элементов относительно плоскости падения в положении гашения. Необходимо отметить, что гасятся только составляющие пучка света, отраженные от участков исследуемого образца, имеющих одинаковые параметры. Соответствующие участки эллипсометрического изображения на экране выглядят темными, остальные — светлыми. Интенсивность светового потока, необходимая для получения достаточного яркого и контрастного изображения, обеспечивается гелий-неоновым лазером. В настоящее время, кроме рассмотренного эллипсометра ЛЭМ-3М, серийно выпускаются эллипсометры Э-2, Э-3 и эллипсометрические микроскопы ЛЭМ-2, ЛЭФ-3М, работающие в видимой области спектра, а также инфракрасные эллипсометры типа УИТ-ТЭС, ЭИ 09-ИТ-1,7-003.

Высокая чувствительность метода эллипсометрии к наличию очень тонких пленок на поверхности пластин, а также к изменению микрогеометрии, структуры и оптических свойств поверхности определяет области ее применения в микроэлектронике. Эллипсометрические методы контроля широко используются при: контроле подготовки поверхности пластин, фотолитографических и электрохимических процессов, электрофизических свойств полупроводниковых материалов; исследовании нарушенных и ионноимплантированных слоев полупроводников и диэлектриков; измерении толщин и показателей преломления диэлектрических пленок, параметров эпитаксиальных структур; анализе явлений, возникающих на поверхности пластин при диффузии и термообработке и т. д.

Нефелометрический метод. Нефелометрический метод позволяет получить информацию об объекте по изменению интенсивности и поляризации оптического излучения, проходящего через объект, в результате рассеяния на неоднородностях. Этот метод предназначен для измерения степени прозрачности оптических

элементов и материалов и имеет важное значение при установлении причин отказов оптоэлектронных приборов, элементов квантовой электроники, систем отображения информации.

Фотометрический метод. Этот метод основан на измерении интенсивности излучения, отраженного контролируемой структурой. Фотометрический метод используется для контроля процессов осаждения и травления пленок различного состава: диэлектрических, проводящих, полупроводниковых. В законе изменения интенсивности отраженного излучения заложена информация об изменении толщины пленки. Фотометрический метод обеспечивает контроль параметров процессов роста и травления тонких пленок в условиях, в которых невозможно разместить какой-либо датчик, не воздействуя на протекание самого процесса и не нарушив состав среды реакции. Примером реализации этого метода является контроль толщины и скорости осаждения резистивных и проводящих пленок при напылении их на ситалловую подложку. Интенсивность отраженного света изменяется вместе с изменением толщины пленки, поэтому для определения толщины пленок может быть применено точное измерение интенсивности.

На рис. 4.13 представлена схема фотометрического измерителя толщины и скорости осаждения пленок. Измеритель состоит из оптической и электронной части. Оптическая часть содержит следующие основные элементы: источник излучения, которым может быть лампа накаливания, люминесцентная или газоразрядная лампа с монохроматором, чаще всего лазер; оптическую схему, обеспечивающую направленное прохождение излучения от источника через технологическую среду к подложке и затем к фотоприемнику; схему модуляции светового потока, необходимую для выделения сигнала на фоне помех; фотоприемник, которым могут быть фотоэлемент, фотоумножитель, полупроводниковые фо-

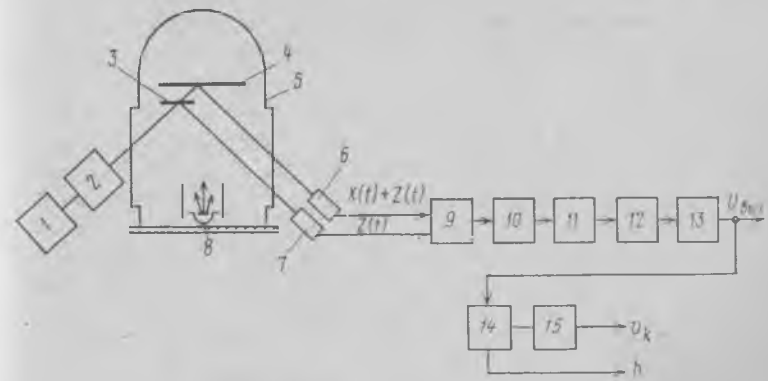


Рис. 4.13 Схема фотометрического измерителя толщины и скорости осаждения пленок:

1 — гелий-неоновый лазер; 2 — модулятор; 3 — полупрозрачная пластина; 4 — подложка; 5 — колпак вакуумной установки; 6, 7 — фотоприемники; 8 — испаритель; 9 — дифференциальный усилитель; 10 — полосовой фильтр; 11 — усилитель; 12 — детектор; 13 — фильтр ИЧ; 14 — измерительный прибор; 15 — дифференцирующий блок

топриемники (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, т. д.), а при использовании ИК-излучения болометры, термоэлементы, пироэлектрические приемники. В оптическую схему включена полупрозрачная пластина 3 для получения опорного сигнала. Таким образом, удается учесть нестабильность характеристик оптического тракта излучения, т. е. запыление и загрязнение стекла колпака, нестабильность излучения источника света. Электронная часть предназначена для извлечения информации и представления ее в виде, приемлемом для использования в системах управления технологическим процессом.

Модулированный опорный сигнал $z(t)$ от фотоприемника ФП2 и модулированный сигнал, несущий информацию $x(t) + z(t)$ от фотоприемника ФП1, поступают на вход дифференциального усилителя 9, где происходит их сравнение и выделение разностного сигнала. Далее сигнал поступает на активный полосовой фильтр 10 (со средней частотой модуляции луча f_0), обеспечивающий фильтрацию помех. Отфильтрованный сигнал поступает на усилитель 11, затем на двухполупериодный детектор 12 и фильтр низких частот 13. Напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально коэффициенту отражения, функционально связанному с толщиной напыляемой пленки. Сигнал $U_{\text{вых}}$ поступает на измерительный и записывающий прибор 14. Дифференцирование этого напряжения блоком 15 позволяет получить сигнал v_k , несущий информацию о скорости осаждения пленки. Данный измеритель применим не только для контроля толщины осаждаемой пленки, но и для контроля толщин при травлении пленок ионно-плазменным и плазмохимическим методами.

Спектральный метод. Спектральный метод основан на получении информации об исследуемом изделии по спектральному составу испускаемого оптического излучения, возбужденного внешним воздействием, и по изменению спектрального состава проходящего, отраженного или рассеянного излучения. Оптическая спектроскопия относится к числу наиболее важных используемых физических методов анализа химического состава материалов электронной техники. Необходимость такого анализа вызвана тем, что при производстве ИМ используются особо чистые материалы. Для определения элементного состава неорганических материалов широко применяется атомный спектральный анализ: эмиссионный (исследование спектров испускания возбужденных атомов) и абсорбционный (исследование спектров поглощения атомов при их возбуждении). Для получения информации об органических материалах наиболее перспективен метод ИК-спектроскопии. С помощью этого метода определяют наличие органических загрязнений на поверхности полупроводниковых пластин, используя инфракрасный спектрофотометр ИКС-14а.

Характерным примером использования этого же метода является исследование кинетики сушки фоторезиста на основе циклоакучака. По интенсивности полосы поглощения оценивается количество остаточного растворителя

(толуола). Данные, получаемые методом ИК-спектроскопии, позволяют выбрать оптимальный режим сушки фоторезистивных пленок. Измерение ИК-спектров проводится на спектрофотометрах ИКС-29 и UR-20. Метод оптической спектроскопии можно использовать для контроля процесса ионного травления. По интенсивности характеристического излучения атомов удаляемого материала, возбуждаемого в газоразрядной плазме около мишеней, оценивают скорость ионного травления, а по сумме интенсивности излучения за время процесса определяют общее количество удаленного материала, а следовательно, и глубину травления.

Метод лазерного сканирования. В основе этого метода лежит процесс оптической генерации свободных носителей в полупроводнике. При поглощении света с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны, в слое полупроводника толщиной порядка $1/\alpha$ (α — коэффициент поглощения) возникают свободные носители обоих типов. Если в пределах двух-трех диффузионных длин от области генерации находится потенциальный барьер любого происхождения (например, p — n -переход, барьер Шотки, граница поверхности), то избыточные электроны и дырки, дошедшие в результате диффузии до этого барьера, под действием внутреннего поля разделяются и движутся в противоположных направлениях. При этом во внешней цепи возникает фотоЭДС или фототок. С приближением светового зонда к области барьера фототок увеличивается пропорционально числу разделенных пар носителей и достигает максимума при освещении области объемного заряда. Если сканировать поверхность полупроводниковой структуры оптическим зондом и регистрировать в каждой точке фототок, то картина распределения фототока, так называемое фотоответное изображение структуры, будет отражать расположение p — n -переходов и других потенциальных барьеров. Метод лазерного сканирования используется в процессе производства ИМ для анализа причин брака, для проверки ИМ на функционирование. Необходимо отметить, что оперативному контролю дефектов с помощью лазерного сканирования в производстве ИМ должны предшествовать разработка методик измерения для каждой схемы (с указанием величины и полярности напряжения питания, схемы включения, длины волны и интенсивности излучения лазера и т. д.) и составление атласа эталонных фотоответных изображений.

Электрооптический метод (применение нематических жидких кристаллов). В основе изготовления ИМ лежат процессы, связанные с нанесением и использованием различных технологических слоев, выполняющих функции маскирования, изолирования, металлизации и пассивации структур. В связи с этим особую важность приобретают вопросы контроля качества слоев, выявления пор и неоднородностей пленок. Нематические жидкие кристаллы (НЖК) находят широкое применение в неразрушающих методах контроля ИМ. Метод НЖК является простым и дешевым, отличается экспрессностью и хорошей информативностью, позволяет выявлять поры размером до $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, имеет геометрическое разрешение

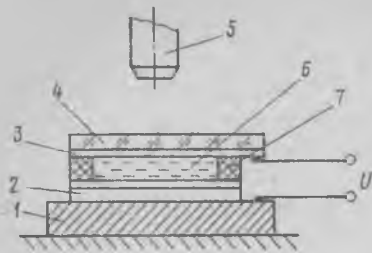


Рис. 4.14. Схема устройства для контроля пористости диэлектрических слоев методами НЖК

окси кремния или фоторезиста) над металлизацией; локализовать обрывы межсоединений на кристалле; оценить качество вскрытия контактных окон и контактных площадок; локализовать дефекты в диэлектрике и т. д. В основе применяемых методов лежат электрооптические эффекты.

Типовая конструкция устройства для исследования пористости диэлектрических слоев методами НЖК приведена на рис. 4.14. Исследуемая ИМ 2 устанавливается на металлическое основание 1 стороной, свободной от окисла. Поверх окисной пленки наносится слой жидкого кристалла 6, на который накладывается стеклянная пластина 4, на нижней стороне которой нанесен прозрачный слой окиси олова, служащий одним из электродов 3. Вторым электродом является обратная сторона кристалла (подложка). Толщина ячейки ($5 \cdot 10^{-6} \dots 6 \cdot 10^{-5}$ м) регулируется изолирующими прокладками 7. Такая ячейка представляет собой практический плоский конденсатор с нижним металлическим (полупроводниковым) и верхним прозрачным электродами. Ячейка устанавливается под обычный металлографический микроскоп 5 и рассматривается при боковой подсветке (метод темного поля).

Нематические жидкие кристаллы представляют собой органические электролиты с удельной электропроводностью $\sigma = 10^{-8} \dots 10^{-10}$ Ом $^{-1}$ м $^{-1}$, носящей в основном ионный характер. Один из наиболее распространенных НЖК — МББА (*n*-метоксибензилиден — *n*-Н-бутиланилин), имеющий температурный диапазон существования нематической фазы от 294 до 320 К. В нормальных условиях НЖК не вступают в химическое взаимодействие с материалами, используемыми при создании ИМ.

Если к электродам собранной ячейки приложить постоянное напряжение, то основное падение напряжения происходит на диэлектрической пленке, имеющей проводимость на 4...5 порядков ниже пленки НЖК. В местах пористости диэлектрика, где жидкий кристалл непосредственно контактирует с полупроводниковой пластиной, возникают условия для протекания электрического тока, так как все внешнее напряжение прикладывается к слою НЖК. Поведение НЖК в этом случае определяется величиной приложенного напряжения, электропроводностью, толщиной НЖК. Ионы токи, воз-

($1 \dots 5$) $\cdot 10^{-6}$ м. Применение НЖК для анализа ИМ актуально, так метод НЖК разрешает одну из задач функционального контроля — визуализацию дефектов как в отдельных слоях, так и в готовом приборе.

Электрооптический метод — это метод, использующий изменение оптических свойств нематических жидких кристаллов, помещенных в электрическое поле. С помощью жидкого кристалла можно оценить качество защитного покрытия (окси кремния или фоторезиста) над металлизацией; локализовать обрывы межсоединений на кристалле; оценить качество вскрытия контактных окон и контактных площадок; локализовать дефекты в диэлектрике и т. д. В основе применяемых методов лежат электрооптические эффекты.

никающие в жидком кристалле, вызывают движение отдельных частей вещества. При определенном напряжении в веществе образуются отдельные упорядоченные структуры (домены), которые разрушаются при повышении напряжения. При дальнейшем увеличении напряжения движение вещества выходит за область гидродинамической неустойчивости и в месте дефекта возникают области интенсивного турбулентного перемешивания НЖК. Макроскопически этот эффект проявляется в разбиении объема вещества на интенсивно перемешивающиеся локально ориентированные области размером около 10^{-6} м, обладающие двулучепреломлением, оптически — в наличии областей интенсивного рассеяния света и поэтому называется эффектом динамического рассеяния света (ДРС). Однако метод, в основе которого лежит явление ДРС, имеет ряд недостатков: токи, несмотря на их малую величину (около 10^{-2} А/м 2), вызывают электрохимические процессы в слое ЖК и на электродах, что приводит к разложению ЖК и исследуемой структуры; низкая контрастность изображения, ухудшающая линейное разрешение и чувствительность метода; относительно высокое напряжение (20...25 В), необходимое для появления ДРС.

Перечисленные недостатки практически полностью устраняются применением полевых эффектов в пленке НЖК, обязательным условием существования которых является предварительная ориентация всего объема ЖК. Различают три типа начальной ориентации молекул ЖК: параллельная плоскости электродов (планарная или гомогенная), перпендикулярная плоскости электродов (гомеотропная) и планарная ориентация с поворотом на 90° (твист-ячейка). Полевые эффекты основаны на явлении изменения начальной ориентации молекул вещества под действием внешнего электрического поля. Они проявляются в изменении оптических свойств ячейки, связанных с наличием двулучепреломления в пленке НЖК. В зависимости от исходной ориентации и знака анизотропии диэлектрических свойств выделяют несколько типов управляемого (индуцированного) двулучепреломления. Первый характерен для НЖК с положительной анизотропией диэлектрических свойств и исходной планарной ориентации. Он называется S-эффектом. Напряжение U , приложенное к ячейке, разворачивает молекулы НЖК в соответствии с направлением вектора электрического поля. S-эффект возникает при условии $U > U_{пор. S}$. Образец НЖК с планарной ориентацией при освещении белым светом в скрещенных поляроидах дает светлое, окрашенное поле обзора. При напряжениях $U > U_{пор. S}$ окраска образца меняется и при определенных значениях U исчезает совсем, а поле становится темным. В этом случае оптическая ось ЖК устанавливается перпендикулярно поверхности электродов и плоскость поляризации света поворачивается на 90° .

Второй тип индуцированного двулучепреломления характерен для НЖК с отрицательной анизотропией диэлектрических свойств и исходной гомеотропной ориентацией. Он называется V-эффект. Напряжение, приложенное к ячейке, при условии $U > U_{пор. V}$ ориентирует молекулы ЖК под углом меньше 90° к плоскости электродов. При дальнейшем увеличении U молекулы выстраиваются параллельно плоскости электродов, изменяя тем самым на 90° положение плоскости поляризации. Образец НЖК в скрещенных поляроидах при $U = 0$ дает темное поле обзора. Подключение ячейки к источнику ЭДС вызывает просветление поля обзора.

Третий тип индуцированного двулучепреломления наблюдается у НЖК с положительной анизотропией диэлектрических свойств и планарной ориентацией при повороте электродов на 90° . Он называется Т-эффект или твист-эффект. Оптическая ось вещества поворачивает плоскость поляризации света на 90° , и в скрещенных поляроидах видно светлое поле обзора. Под действием электрического поля оптическая ось молекул ЖК принимает положение перпендикулярное поверхности электродов, и поле обзора становится темным.

Все перечисленные эффекты могут применяться в дефектоскопии различных технологических слоев при изготовлении ИМ.

С помощью нанесенного на поверхность ИМ слоя НЖК можно регистрировать картину распределения потенциалов и логических уровней, визуально наблюдать квазистатический режим работы ИМ. Подавая на входы ИМ соответствующие сигналы, визуализируют распределение потенциалов, прослеживают прохождение сигнала и находят участки, в которых уровни сигналов отличаются от требуемых значений. Этот метод — статический. Используя НЖК для визуализации логических состояний во внутренних узлах БИС, во время ее работы в импульсном режиме определяют логические уровни, соответствующие этим состояниям.

4.2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ

Эти методы применяются для контроля тепловых режимов ИМ, распределения температуры по поверхности, обнаружения зон локального перегрева, контроля токораспределения, выявления областей повышенного (пониженного) сопротивления, определения следующих видов отказов: коротких замыканий, обрывов металлизации; пробоев окисла, больших токов утечек и т. п. Контроль тепловых режимов проводится на этапе разработки ИМ с целью решения вопросов рациональной компоновки элементов схем, создания оптимальных топологий. Тепловые методы контроля также используются в процессе производства ИМ для отбраковки потенциально ненадежных изделий с аномальным тепловым режимом и анализа отказавших схем.

Методы контроля температурного распределения основаны на регистрации тепловых полей в контролируемом изделии. Для определения температуры используют какую-либо физическую характеристику тел, от нее зависящую и поддающуюся измерению. К таким термометрическим характеристикам относятся: линейное расширение тел, изменение электрического сопротивления проводников, термоэлектрические явления, изменение цвета и яркости специальных покрытий, интенсивность инфракрасного излучения и ряд других. В зависимости от способа получения информации тепловые методы контроля делят на контактные и бесконтактные (собственного излучения).

Контактные методы. Эти методы основаны на контактной регистрации абсолютной температуры или ее распределения по поверхности изделия. При контактных методах контроля применяются контактные датчики температуры — термометры, термопары,

термосопротивления и т. д.; термоиндикаторы — термолуминофоры, термобумага, термокраски и другие; индикаторы на жидких кристаллах.

Контактные датчики температуры используются как самостоятельно для точных измерений температуры в определенных точках изделия, для регулирования технологических режимов, так и для вспомогательных целей в других методах: калибровка приборов неконтактного действия и эталонных излучателей, получение опорных замеров для расшифровки термограмм и т. п. Действие термометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления вещества в зависимости от температуры. Термометры сопротивления выпускают на основе платины (ТСП), меди (ТСМ) или полупроводников. Рабочий интервал температур ТСП — от 73 до 923 К, ТСМ — от 223 до 453 К. Полупроводниковые термометры по сравнению с ТПС и ТСМ более чувствительны.

Действие термоэлектрических термометров основано на термоэлектрическом эффекте, возникающем в термопаре — цепи из двух разнородных электрических проводников (термоэлектродов), концы которых обычно соединены сваркой либо пайкой. При наличии разности температур в местах соединения термоэлектродов в цепи генерируется термоЭДС, которая зависит только от температуры спаев и материалов термоэлектродов и не зависит от их диаметра и распределения температуры по их длине. Если температура одного из концов термопары постоянная (термостабилизирована), то термоЭДС зависит только от температуры ее рабочего конца. Для термоэлектродов используют платину, железо, молибден, вольфрам, медь, манганин, платинородий, хромель, копель, алюмель, константан. Преимущества термоэлектрических термометров — линейность в широком диапазоне температур, чувствительность и стабильность показаний, простота изготовления. Недостаток — сравнительно большая постоянная времени (1 ... 10 с).

Для регистрации температуры в технологии производства ИМ широко используются термоиндикаторы. Их действие основано на изменении состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. С их помощью можно быстро получить информацию о тепловых режимах ИМ на различных стадиях разработки и при испытаниях, фиксировать общие перегревы и обнаруживать локальные зоны перегрева. Однако термоиндикаторам присущи инерционность, сравнительно невысокая точность.

Термоиндикаторы плавления изменяют свой цвет в результате плавления одного или нескольких составляющих компонентов, имеющих строго определенную температуру плавления. Разработанные в настоящее время термоиндикаторы плавления позволяют измерять температуры в диапазоне 303 ... 523 К с погрешностью $\pm (1 \dots 2)$ К.

Термохимические индикаторы основываются на свойстве химических компонентов изменять цвет при определенной температуре. Диапазон измерения температуры термохимическими индикаторами 318 ... 1073 К, точность измерения составляет $\pm (5 \dots 10)$ К.

В люминесцентных термоиндикаторах используют свойство люминофоров при воздействии температуры изменять либо яркость, либо цвет или цветовой тон свечения. Термолюминофоры позволяют получать пространственную разрешающую способность около 10^{-5} м при пороге температурной чувствительности 0,5 К.

Жидкокристаллические термоиндикаторы представляют собой многокомпонентные композиции, составленные из холестерических жидких кристаллов и обладающие термической зависимостью области селективного рассеяния света. Тонкий слой такого вещества при освещении белым светом принимает различную окраску. Это объясняется тем, что под воздействием температуры изменяется структура жидких кристаллов. При этом цвет жидкокристаллического индикатора изменяется от красного до фиолетового в зависимости от температуры. Жидкокристаллические термоиндикаторы обеспечивают точность измерения температуры до десятых долей градуса при относительной погрешности 0,1%.

При использовании источников света применяют поглощающие ИК-фильтры, которые предотвращают чрезмерный нагрев испытуемой поверхности инфракрасными лучами. Регулированием положения источников света и угла падения выбирают оптимальную картину цветов. Для наблюдения цветовой окраски исследуемого объекта желательно иметь темный фон. Исследуемую поверхность предварительно покрывают слоем черной краски (например, спиртовым раствором черной туши), а затем наносят жидкокристаллический термоиндикатор. Краска не должна реагировать с термоиндикатором и должна иметь высокое электрическое сопротивление для предотвращения коротких замыканий в цепях или около контактных участков. Для получения разных температурных профилей с одним жидким кристаллом образец помещают на нагревательный столик с контролируемой температурой и снимают температурные профили при разной степени нагрева столика. При установлении плавной без резких переходов цветовой окраски объекта на выводы исследуемой ИМ подают испытательные напряжения и следят за изменением цветовой окраски. Таким образом, жидкие кристаллы дают возможность непосредственного наблюдения температурных полей поверхности ИМ.

Вопросы повышения качества ИМ неизменно связаны с анализом брака и отказов изделий. Как известно, дефекты в элементах ИМ вызывают искажение электрического режима работы ИМ, а также изменение характера распределения электрического потенциала и температуры активной поверхности ИМ. Поэтому для анализа отказов может быть использован метод жидких кристаллов. Анализируя картину цветов на поверхности ИМ, можно выделить на общем фоне (чаще всего красном) точечные области с другими цветами окраски, которые являются местами локального тепловыделения вследствие имеющегося дефекта.

Часто регистрацию дефектов осуществляют в нестационарном режиме. Так, если на поверхности проводящего слоя имеются неоднородности (трещины, царапины, сколы), то их легко обнару-

жить при нагреве поверхности в присутствии жидкокристаллического термоиндикатора по наблюдаемой скорости распространения фронта тепловой волны, которая в зоне дефекта в зависимости от его характера получает ускорение или замедление.

Для измерения температуры и теплового сопротивления применяют регистрацию электрических параметров изделия (падение напряжения на $p-n$ -переходе, сопротивления $p-n$ -перехода и т. д.), которые изменяются в зависимости от температуры. Например, для качественной оценки соединения кристалла с подложкой используют метод контроля по переходной тепловой характеристике. Этот метод основан на нагреве исследуемого изделия единственным электрическим импульсом, длительность которого превышает тепловую постоянную кристалла, но существенно меньше тепловой постоянной корпуса и сводится к измерению температурной зависимости прямого падения напряжения на $p-n$ -переходе.

Бесконтактные методы (собственного излучения). К бесконтактным относится один из наиболее распространенных методов, основанный на регистрации собственного инфракрасного излучения контролируемого изделия.

Микросхема при своей работе рассеивает электрическую мощность, вызывая разогрев элементов. Поэтому ее поверхность всегда имеет температуру по крайней мере на несколько градусов выше температуры окружающей среды. Таким образом, любая интегральная микросхема является источником ИК-излучения. Спектр, мощность и пространственные характеристики излучения зависят главным образом от температуры элементов ИМ и состояния их поверхности. С повышением температуры мощность излучения быстро растет, причем максимум спектральной интенсивности сдвигается в коротковолновую область. Согласно закона Вина:

$$\lambda_{\text{макс}} = 2898/T, \quad (4.6)$$

где λ — измеряется в микронах, а температура излучающего тела T — в кельвинах.

Мощность излучения во всем спектральном диапазоне связана с абсолютной температурой T уравнением Стефана — Больцмана:

$$P = \sigma \cdot T^4, \quad (4.7)$$

где $\sigma = 5,673 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ — постоянная Стефана — Больцмана.

Поскольку излучаемая мощность зависит от температуры, то приемником, регистрирующим ИК-излучение, можно измерить температуру поверхности ИМ. Для контроля тепловых режимов микросхем применяют ИК-радиометры. Схема ИК-радиометра представлена на рис. 4.15. На микросхему подают заданный режим питания, вследствие чего возникает ИК-излучение. С помощью оптической системы ИК-излучение фокусируется на чувствительной площадке фотоприемника. Для выделения полезного сигнала на фоне помех ИК-излучение модулируется. Модулятор представляет собой диск с определенным количеством отверстий. Диск вращается электродвигателем. В фотоприемнике происходит преобразо-

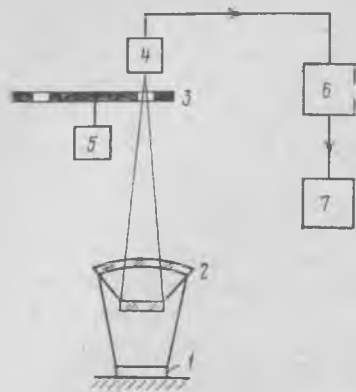


Рис. 4.15. Схема ИК-радиометра:

1 — микросхема; 2 — оптическая система; 3 — селективный усилитель; 4 — фотоприемник; 5 — электродвигатель; 6 — микроиндикатор; 7 — индикатор

вание теплового излучения ИМ в электрический сигнал, который затем усиливается селективным услителем и регистрируется индикаторным прибором. Данный ИК-радиометр регистрирует интегральное ИК-излучение микросхемы, т. е. измеряет усредненную температуру ИМ.

В тех случаях, когда необходимо получить картину теплового поля (или в точках исследуемой поверхности ИМ) применяют тепловизоры или ИК-микроскопы. Тепловизоры преобразуют тепловое изображение на фотоприемник фокусируется изображение лишь небольшой области поверхности ИМ. В тепловизорах используется поэлементная развертка изображения, которая может осуществляться различными способами: строчное и кадровое сканирование производится путем перемещения координатного столика с исследуемой ИМ-строчное сканирование — путем поворота зеркала, а кадровое — перемещением образца; строчное и кадровое — путем поворота зеркал. Перемещение луча на экране синхронизировано с разверткой изображения. Усиленный сигнал от фотоприемника модулирует яркость луча. На полученной тепловой картине, которую можно наблюдать на экране видеоконтрольного устройства, светлым участкам соответствуют поверхности ИМ с более высокими температурами. В основу методики местонахождения дефектов микросхем с использованием инфракрасного автоматизированного микро-радиометра ИКАР-1 положены следующие представления о тепловых проявлениях дефектов:

картина теплового поля поверхности бездефектной ИМ идентична для всех бездефектных схем данного типа;

наличие дефекта в микросхеме, вызывающего изменение или перераспределение потребляемой мощности, влечет за собой искажение эталонной картины теплового поля.

Определение местонахождения дефектов микросхем осуществляется сравнением получаемой картины распределения температуры на поверхности ИМ с эталонной. Обнаруженные области перегревов, вызванные дефектами ИМ, переносятся на фотографию топологии микросхемы. Затем производят анализ причин локальных перегревов и по данным исследований составляется атлас дефектов, обнаруживаемых с помощью ИКАР-1. Приведенная методика позволяет определить: места пробоев и утечек в кристаллах МДП БИС; места пробоев и утечек в тонко- и толстопленочных конденсаторах; места утечек в межслойной изоляции и пассивной

БИС; короткие замыкания, обрывы и другие дефекты в процессе изготовления или испытаний, связанные с перераспределением или изменением потребляемой мощности.

4.3. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Радиационные методы неразрушающего контроля основаны на использовании информации, получаемой в результате взаимодействия излучения с контролируемым изделием. К числу радиационных методов контроля относятся: рентгеновские методы, метод фотоакустической спектроскопии и др.

Рентгеновские методы. Рентгеновские методы контроля и анализа структуры материалов и изделий широко используются в современной микроэлектронике. Они позволяют получать информацию об ориентации и структурном совершенстве исходных монокристаллов, величине деформации и параметрах кристаллической решетки, фазовом составе объектов, а также контролировать плотность и распределение дефектов в кристаллах и эпитаксиальных пленках без разрушения объектов исследования, обнаруживать макровключения, геометрические отклонения правильности сборки ИМ и т. д. Для анализа отказов могут быть использованы следующие три свойства рентгеновского излучения: поглощение, отклонение в кристаллической решетке, собственное излучение. В зависимости от использования этих свойств и способа преобразования и регистрации информации рентгеновские методы подразделяются на рентгенодифракционные, рентгеноструктурные, рентгеноспектральные, рентгеновские теневые.

Сущность рентгеновских теневых методов заключается в возможности получения теневого изображения внутренней структуры оптически непрозрачных изделий, благодаря различиям коэффициентов поглощения рентгеновского излучения разными материалами, из которых состоит исследуемое изделие.

По способу регистрации информации рентгеновские теневые методы классифицируются следующим образом:

рентгенография — тневая картина фиксируется на фотопленке. Этот метод обладает высоким разрешением и чувствительностью, позволяет документировать результаты;

рентгеноскопия — интенсивность рентгеновского излучения, прошедшего сквозь контролируемое изделие, регистрируется на флюоресцирующем экране;

рентгеностроскопия — тневая картина фиксируется с помощью стробоскопического эффекта. Рентгеностроскопический метод позволяет обнаруживать и визуально оценивать резонансные характеристики элементов конструкции непрозрачных корпусов; выявлять узлы конструкций ИМ с недостаточными или излишне жесткими механическими связями; определять пределы прочности конструкций в условиях вибрации;

рентгенотелевизионная микроскопия — тневое изображение изделия регистрируется на экране видеоконтрольного устройства с использованием рентгеновского преобразователя и замкнутой телевизионной системы.

Возможность наблюдения непрозрачных изделий и материалов, точных пространственных и координатных перемещений и измерение деталей внутренней структуры изделий во время наблюдений, получение увеличенных изображений в широких пределах масштаба увеличения, контроля динамических процессов в изделиях, подвергаемых различного рода механическим воздействиям, обусловили широкое применение рентгенотелевизионной микроскопии в производстве ИМ. На рис. 4.16 представлена принципиальная схема рентгенотелевизионного микроскопа. Рентгеновское излучение, создаваемое рентгеновской трубкой, проходя через исследуемую ИМ, образует теневое изображение на входе преобразователя рентгеновского излучения в электрический сигнал. В качестве такого преобразователя могут быть применены рентгеновидикона, а также люминесцентные экраны с электронно-оптическими преобразователями или передающими телевизионными трубками различных типов (изоконы, ортиконы, суперортиконы). Электрический сигнал после усиления и формирования в замкнутой телевизионной системе используется для получения увеличенного телевизионного изображения. Серийно выпускаемые рентгенотелевизионные микроскопы МТР-3И, МТР-4, МТР-6, РТМ имеют разрешающую способность в пределах $1,5 \cdot 10^{-5} \dots 2,5 \cdot 10^{-6}$ м. Применение рентгенотелевизионной аппаратуры дает возможность оперативно корректировать технологический процесс и режим работы оборудования на основании анализа, характера и вида различных отклонений и нарушений во внутренней структуре ИМ, обнаруживаемых при выборочном контроле. Методы рентгенотелевизионной микроскопии позволяют выявить брак на основании имеющихся отклонений внутренней структуры изделия от заданных контуров (часто путем сравнения с эталонным изображением), а также обнаружить:

нарушения сплошности материала (поры, трещины, посторонние включения, пустоты или полости в эвтектике между кристаллом и корпусом), влияющие на электрическую и механическую прочность изделий и их сохраняемость;

разгерметизацию изделия по сквозным каналам и порам в паном соединении крышки с корпусом;

посторонние включения внутри корпуса;

обрывы, смещение и пережоги в соединительных проводниках; недостаточную жесткость механических связей и деталей ИМ или недостаточную прочность отдельных мест деталей. Дефекты такого рода проявляются главным образом при вибрации, ударных тепловых воздействиях;

дефекты, обусловленные неточностью сборки ИМ.

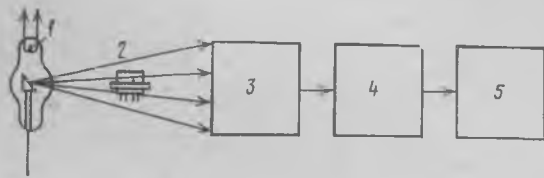


Рис. 4.16. Принципиальная схема рентгенотелевизионного микроскопа:
1 — рентгеновская трубка;
2 — микросхема; 3 — рентгеновский преобразователь;
4 — телевизионная система;
5 — видеоконтрольное устройство

Методы рентгеновского анализа основаны на контроле структуры изделия путем изучения рентгеновских дифракционных спектров. Физическая сущность этих методов состоит в том, что рентгеновские лучи, проходя через вещество, воздействуют на электроны его атомов. При этом электронам сообщается колебательное движение, частота которого совпадает с частотой первичных электромагнитных колебаний рентгеновского излучения. Лучи, рассеянные электронами атомов, интерферируют между собой. Если первичное излучение состоит из волн различной длины, то получается множество интерференционных максимумов от каждого семейства плоскостей с различными межплоскостными расстояниями. Измерение этого расстояния позволяет осуществлять рентгеноструктурный анализ. По способу регистрации дифракционной картины методы рентгеноструктурного анализа делятся на фотографические и ионизационные (с помощью счетчиков). С помощью методов рентгеноструктурного анализа определяется кристаллическая структура и физико-химическая природа фаз, образуемых в результате технологического процесса, старения, воздействия окружающей среды, а также нарушения кристаллических структур.

Совершенствование технологических процессов создания ИМ в значительной степени обусловлено наличием средств точного и экспрессного контроля элементного состава материалов и изделий, к каким относятся методы рентгеноспектрального анализа. Рентгеноспектральные методы основаны на анализе спектрального состава и интенсивности линий характеристического рентгеновского излучения, возникающего при возбуждении атомов материала анализируемых изделий рентгеновскими лучами (рентгенофлуоресцентный метод) или электронами (микрорентгеноспектральный метод). Интенсивность этих линий зависит от массы данного элемента в образце. Используя анализаторы спектра характеристического рентгеновского излучения с достаточным разрешением, можно различать практически все элементы таблицы Менделеева независимо от их физического и химического состояния. Микрорентгеноспектральный анализ дает возможность получать информацию об элементном составе с разрешением по поверхности и глубине излучаемых образцов $10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ м и высокой абсолютной чувствительностью (10^{-14} г). Основными узлами микроанализатора являются электронно-оптическая система, рентгеновский спектрометр, система представления данных и оптический микроскоп. С помощью электронно-оптической системы создается и фокусируется электронный пучок до диаметра $0,1 \cdot 10^{-6} \dots 3 \cdot 10^{-6}$ м (зонд); диаметр зонда определяет разрешающую способность метода. Электронно-оптическая система также обеспечивает сканирование электронного луча по поверхности. Сканирование синхронизируется разверткой электронно-лучевой трубки, на экране которой можно наблюдать распределение содержания различных элементов площади сканирования. В результате взаимодействия электронов с веществом при энергиях электронов, превосходящих энергию ионизации, возникает характеристическое рентгеновское излучение, ко-

торое и характеризует химический состав исследуемого материала.

Рентгеновский спектрометр используется для анализа возбужденного рентгеновского излучения по длинам волн и интенсивности. В его состав входят кристалл-анализатор, коллиматор, счетчик-детектор и поворотное устройство. Система представления данных включает электронные устройства обработки (мини-ЭВМ) и регистрацию данных интенсивности характеристического рентгеновского излучения.

С помощью микрорентгеноспектрального метода определяют точечные дефекты радиационного характера, микронеоднородности в исходных монокристаллах, фазовый состав включений, состав и химическое состояние атомов неорганических материалов. В ряде случаев на основе данных рентгеновского микроанализа удается оптимизировать технологический режим. В частности, микрорентгеновский анализ причин отказов ИМ, связанных с коррозионными явлениями и образованием интерметаллических соединений, позволяет объяснить причины и указать условия появления брака. Вместе с тем ряд задач, связанных с анализом химического состава синтезируемых веществ и контролем производственных процессов, не требует локальности микронзондовых методов, и здесь предпочтительны интегральные характеристики состава. Для этих целей успешно используется рентгеноспектральный флуоресцентный анализ, не уступающий по экспрессности и точности микрорентгеноспектральному анализу.

Основным требованием к монокристаллам, применяемым для изготовления ИМ, является их структурное совершенство и точная кристаллографическая ориентация. Наибольшее распространение для контроля совершенства и кристаллографической ориентации монокристаллов получили рентгенодифракционные методы. Эти методы основаны на контроле изменения интенсивности рентгеновских лучей, падающих на изделие и дифрагированных на структурных неоднородностях его поверхности и объема.

Для контроля ориентации монокристаллических пластин обычно применяют дифрактометрический метод. Этот метод основан на дифракции рентгеновских лучей в кристалле, рассматриваемом как отражение рентгеновского излучения плоскостями кристаллической решетки, и регистрации отраженных лучей с помощью счетчика дифрактометра. Отражение рентгеновских лучей от кристаллографической плоскости возникает в том случае, если угол между плоскостью и падающим пучком удовлетворяет уравнению Вульфа — Брегга

$$2d \sin \Theta = n\lambda, \quad (4.8)$$

где d — межплоскостное расстояние, нм; λ — длина волны, нм; n — порядок отражения; Θ — угол Вульфа — Брегга (брегговский угол), град.

Выявление дислокаций, дефектов упаковки, напряжений в кристаллах проводится преимущественно с помощью методов Бормана, Ланга.

Метод Бормана применяется для исследования и контроля довольно «толстых» образцов ($\mu d > 10$ нм, где μ — коэффициент поглощения рентгеновских лучей; d — толщина кристалла). Этот метод основан на явлении аномального пропускания рентгеновских лучей совершенными кристаллами. При падении под брегговским углом на систему плоскостей, идущих под большим углом к поверхности, проходящий луч расщепляется на две части. В результате дифракции возникает стоячая волна, пучности которой совпадают с атомными плоскостями. Такая волна распространяется вдоль атомных плоскостей без ослабления и на выходе из кристалла расщепляется на прямой и дифрагированный лучи. Часть луча, не испытавшего отражения, сильно поглощается в материале. Фотопленка помещается на некотором расстоянии за кристаллом, где отраженный и прошедший лучи уже полностью разделились. Дефектные участки кристалла проявляются на микрорентгенограммах как области пониженной интенсивности.

Метод Ланга применяется для исследования тонких кристаллов ($\mu d < 1$ нм). Получение изображения дефектов по методу Ланга основано на эффекте первичной экстинкции рентгеновских лучей. Этот эффект заключается в том, что в отражающем положении тонкие совершенные кристаллы имеют больший коэффициент поглощения, чем несовершенные. Возникающая при этом разница интенсивностей дифрагированных пучков, проходящих через совершенные и дефектные участки кристалла, вызывает появление контраста изображения дефектов в виде темных теней на более светлом фоне. Использование различных отражающих плоскостей дает возможность определять кристаллографические характеристики объектов.

Однако все эти методы не дают оперативной количественной информации, требуют большой затраты времени (в зависимости от метода исследования, параметров аппаратуры и характеристик образцов оно может составлять от единиц до десятков часов). Ясно, что использование столь длительных методов исследования в условиях промышленного производства ограничено. Повысить экспрессность метода можно путем визуализации изображения рентгеновской топографии. На рис. 4.17 представлена структурная схема рентгеновской телевизионной системы непосредственного наблюдения топограмм. Использование рентгенотелевизионной системы на базе рентгеновского видикона с мишенью из PbO при наблюдении рентгеновских топограмм по методам Ланга, Бормана дает возможность получить разрешение не ниже $25 \cdot 10^{-6}$ м, причем для синтеза телевизионного изображения топограммы, которое формируется на экране монитора, требуется не более 10 с. Установки с телевизионной регистрацией изображения позволяют вести непрерывный технологический контроль образцов монокристаллов в опытном и серийном производстве.

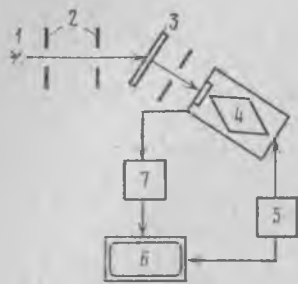


Рис. 4.17. Структурная схема рентгеновской телевизионной системы для непосредственного наблюдения топограмм:

1 — источник излучения; 2 — коллимационная система; 3 — образец; 4 — рентгеночувствительный видикон; 5 — система управления телевизионным каналом; 6 — монитор; 7 — устройство формирования топограммы

Фотоакустическая спектроскопия (ФАС). Среди преимуществ этого метода анализа химического состава материалов на первом месте стоят широта и универсальность применения и возможность получения информации не только о химическом составе, но и о физических параметрах материалов. Достоинство метода состоит также в том, что он не требует приготовления специальных образцов и применим для исследования кристаллических, аморфных и порошкообразных материалов. Метод основан на фотоакустическом эффекте, заключающемся в генерации акустических колебаний в газе, окружающем твердое тело, при воздействии на его поверхность импульсного электромагнитного излучения (УФ-, видимого или ИК-диапазонов). Акустические колебания, т. е. периодические колебания давления газа, возникают за счет периодического нагрева и охлаждения поверхности (или объема) твердого тела в результате частичного поглощения им излучения. Температурные изменения в газе сосредоточены главным образом в прилегающем к поверхности слое, толщина которого зависит от теплопроводности газа и частоты модуляции излучения. Акустические колебания регистрируются микрофоном. Измеряя интенсивность акустического сигнала от микрофона как функцию длины источника излучения, получают фотоакустический спектр. На основе анализа фотоакустического спектра или величины фотоакустического сигнала можно определить коэффициент оптического поглощения, теплопроводность и другие параметры исследуемых тел. Метод ФАС используется также для изучения адсорбции и хемосорбции.

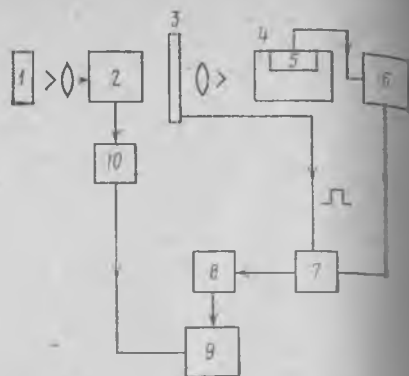


Рис. 4.18. Структурная схема фотоакустического спектрометра:

1 — источник излучения; 2 — монохроматор; 3 — модулятор; 4 — фотоакустическая ячейка; 5 — микрофон; 6 — предусилитель; 7 — синхронный детектор; 8 — усилитель; 9 — регистрирующий прибор; 10 — блок развертки

Фотоакустический спектрометр (рис. 4.18) состоит из источника излучения, экспериментальной камеры и системы регистрации. Излучение от источника 1, проходя через монохроматор 2, модулируется модулятором 3 и освещает поверхность образца, расположенного в фотоакустической ячейке 4, что приводит к возникновению фотоакустического эффекта. Фотоакустический эффект измеряется с помощью микрофона 5. Для измерения сигналов с малым отношением сигнал-шум применяется синхронное детектирование. Регистрирующим прибором 9 служит обычно самописец. Применение лазера в качестве источника излучения повышает чувствительность ФАС на несколько порядков (минимальный обнаруживаемый коэффициент поглощения равен 10^{-12} м^{-1}). Перестраиваемый лазер позволяет по фотоакустическим спектрам поглощения определять состав поверхностных соединений с высокой чувствительностью. В качестве перестраиваемого лазера используется лазер на основе CO_2 , длина волны излучения которого равна $(9,2 \dots 10,7) \cdot 10^3 \text{ нм}$. Излучение модулируется импульсами с частотой следования $20 \dots 40 \text{ Гц}$ и направляется на образец под углом 60° . Чувствительность регистрации составляет доли монослоя.

Информацию о тепловых и оптических свойствах вещества, а также визуализацию подповерхностной структуры твердых веществ, в частности дефектов типа трещины, инородных включений, можно получить с помощью фотоакустического микроскопа (ФАМ). Принцип действия ФАМ основан на явлении генерации и распространения в объекте температурных волн, возбуждаемых зондирующим лазерным излучением (электронным пучком), модулированным по интенсивности. Вследствие тепловой деформации нагретой поглощенным излучением области объекта в ней возбуждаются периодические акустические колебания той же частоты, что и температурный (фотоакустический эффект). Акустические колебания регистрируются пьезопреобразователем объемных волн, с которого снимается электрический сигнал, зависящий от физических свойств каждой выделенной области объекта. При растровом сканировании лазерного луча по исследуемой поверхности формируется фотоакустическое изображение, которое в общем случае отображает тепловые и оптические характеристики объекта. Разрешающая способность ФАМ зависит от размеров пятна лазерного луча (электронного пучка), длины распространения тепла. Уникальные свойства ФАМ состоят в том, что с его помощью можно визуализировать тепловые неоднородности (несплошности) объекта, лежащие за глубиной проникновения фотонов, а также проводить неразрушающий профильный анализ только путем изменения частоты модуляции излучения.

Структурная схема сканирующего фотоакустического микроскопа с выводом информации в виде квазитрехмерного изображения представлена на рис. 4.19. В качестве источника зондирующего излучения 2 используется гелий-неоновый лазер ЛГ 75-1. Лазерный луч модулируется по амплитуде электрооптическим модулятором 3 типа МЛ-3, к которому подключены генератор 1 типа ЗГ-12 и источник напряжения смещения 4. Длиннофокусной линзой 5 осуществляется корректировка расходимости лазерного луча, который сканируется по поверхности объекта исследования зеркалом 7, входящим

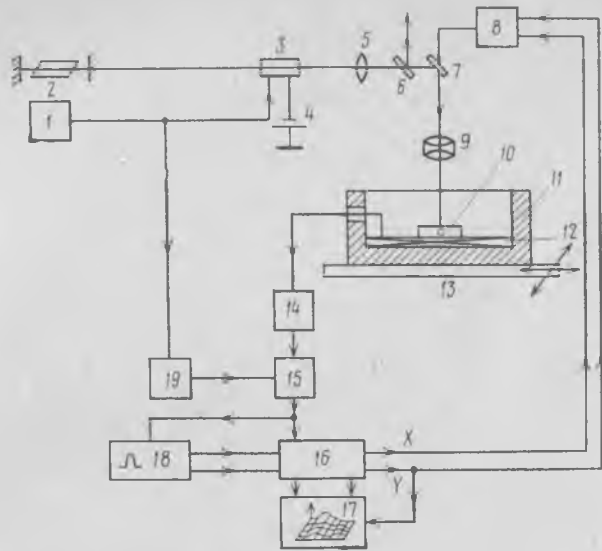


Рис. 4.19. Структурная схема фотоакустического микроскопа с квазитрехмерным изображением:

1 — генератор; 2 — гелий-неоновый лазер; 3 — модулятор; 4 — источник напряжения смещения; 5 — линза; 6 — делительная пластинка; 7 — зеркало; 8 — система координатного сканирования; 9 — объектив; 10 — исследуемый объект; 11 — фотоакустическая ячейка; 12 — пьезопреобразователь; 13 — двухкоординатный столик; 14 — микровольтметр; 15 — синхронный детектор; 16 — блок управления и формирования; 17 — самописец; 18 — осциллограф; 19 — делитель напряжения

в состав системы координатного сканирования 8. Эта система позволяет изменять поле сканирования от $(0,5 \times 0,5) \cdot 10^{-3}$ до $(1 \times 1) \cdot 10^{-2}$ м. Далее лазерный луч фокусируется объективом от микроскопа 9 на поверхности исследуемого объекта 10 в пятно размером порядка 10^{-5} м. Визуальный контроль качества фокусировки луча осуществляется наблюдением поверхности объекта в отраженных лучах через делительную пластинку 6. Объект приклеивается к пьезопреобразователю продольных объемных волн из пьезокерамики 12. Преобразователь закрепляется в фотоакустической ячейке 11, которая фиксируется на двухкоординатном столике 13, служащем для перемещения объекта в поле зрения микроскопа. Сигнал с пьезопреобразователя обрабатывается в тракте, состоящем из микровольтметра В6-4 (14), делителя напряжения 19 и синхронного детектора В9-2 (15). Для контроля строки выход синхронного детектора соединен со входом y запоминающего осциллографа С8-12 (18), сигналы развертки которого используются для синхронизированного запуска системы координатного сканирования. Управление этой системой, а также формирование квазитрехмерного изображения самописцем 17 осуществляется блоком управления и формирования 16. Квазитрехмерное изображение состоит из 100 строк, время развертки строки составляет 5 с, а полное время формирования изображения — порядка $6 \cdot 10^2$ с.

Переход к созданию интегральных микросхем с высокой и сверхвысокой степенью интеграции и связанное с этим уменьшение размеров элементов, постоянно растущие требования к надежности и стабильности ИМ сопровождаются резким возрастанием требований к чистоте, однородности и структурному совершенству используемых материалов, необходимостью создания оптимальных и устойчивых технологических процессов. Решение перечисленных проблем требует применения чувствительных, точных, локальных, с высокой разрешающей способностью методов исследования и контроля на всех этапах создания ИМ, начиная от принципиальных возможностей использования новых физических идей и кончая непосредственным контролем технологических процессов. К числу таких методов относится электронная микроскопия. Физическую основу методов электронной микроскопии составляют явления взаимодействия пучка электронов с веществом (просвечивающая и растровая микроскопия, электронография) или явления испускания электронов под воздействием тепла, света, ионного или электронного потока (эмиссионные и оже-спектроскопические методы).

Просвечивающая электронная микроскопия. Принцип работы электронного микроскопа состоит в следующем. Электроны, излучаемые катодом, фокусируются оптической системой, ускоряются анодом и попадают на образец. Все процессы происходят в вакууме. Электроны, направленные на образец, рассеиваются как упруго (т. е. без потерь энергии), так и с заметными потерями энергии, а также когерентно дифрагируют. Электроны, прошедшие через образец, сортируются в соответствии с потерями энергии, а также когерентно дифрагируют. Электроны, прошедшие через образец, сортируются в соответствии с потерями энергии с помощью кольцевой диафрагмы, установленной за образцом. Эта апертурная диафрагма поглощает все электроны, рассеянные на углы, превышающие заданный, и сама служит коллектором рассеянных электронов, сигнал от которых формирует «темнопольное» изображение. Такой темнопольный сигнал обусловлен, главным образом, упругорассеянными электронами. Электроны, прошедшие через кольцевую диафрагму, попадают на центральный коллектор, и после преобразования и усиления соответствующих сигналов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) появляется «светлопольное» изображение.

Метод просвечивающей электронной микроскопии обеспечивает наибольшую разрешающую способность среди прямых методов анализа структуры. Электронные микроскопы с разрешением около 0,1 нм позволяют наблюдать атомы, составляющие кристаллическую решетку и единичные точечные дефекты. С помощью высоковольтных микроскопов, имеющих ускоряющее напряжение выше 10^4 В, можно исследовать на просвет объекты толщиной несколько десятков микрон. Серийно выпускаемые просвечивающие электронные микроскопы (например, УМВ-100Л) имеют ускоряющее напряжение $(1 \dots 2) \cdot 10^5$ В, что позволяет исследовать пленки

толщиной не более $0,5 \cdot 10^{-6}$ м. Утоньшение образцов, применяемых для исследования в электронном микроскопе, достигается химической или электрохимической полировкой, а также ионным травлением. Просвечивающая электронная микроскопия позволяет выявить зарождение, развитие и распределение дефектов дислокационного типа, проанализировать структуру границ зерен, гетерограниц в многослойных структурах, исследовать процессы распада пересыщенных твердых растворов и т. д.

Электроннография. Электроны, проходя через вещество, проявляют волновые свойства. Взаимодействуя с атомами вещества, они претерпевают упругое рассеяние, в результате чего образуются отдельные дифракционные пучки, являющиеся следствием интерференции рассеянных волн. Интенсивности и распределения дифракционных лучков в пространстве соответствуют атомной структуре вещества, размерам и ориентации отдельных кристаллов и другим структурным параметрам. Часть взаимодействующих с веществом электронов рассеивается неупруго и вносит диффузионный вклад в интенсивность фона дифракционной картины. Метод исследования строения вещества, основанный на дифракции электронов, называется электроннографией. Для исследования поверхности интенсивно развиваются два метода электроннографии: метод дифракции быстрых электронов (ускоряющее напряжение от $30 \cdot 10^3$ до 10^5 В) и метод дифракции медленных электронов (ускоряющее напряжение от нескольких до сотен вольт). Физический смысл дифракционной картины заключается в следующем.

Электроннограмма — это плоское сечение пространства, в котором строго однозначно со структурой образца распределяются электроны после прохождения через него. В связи с малостью длины волны и сильным взаимодействием электронов с веществом интенсивность дифракционных максимумов на электроннограмме значительно выше их интенсивности на рентгенограмме. Характер получаемых электроннограмм зависит от свойств и структуры исследуемых объектов. Так, электроннограмма пленок, состоящих из кристаллов с достаточно точной взаимной ориентацией, или тонких монокристаллических пластинок представляет собой точки либо пятна (рефлексы) с правильным взаимным расположением. При частичной ориентации кристаллов в пленках по определенному закону или при наличии текстуры электроннограммы получают вид точечных дуг. Электроннограммы образцов, состоящих из беспорядочно расположенных кристаллов (поликристаллы), представляют собой равномерно зачерненные окружности.

В основе определения параметров элементарной ячейки кристалла методом дифракции быстрых электронов лежит измерение расположения рефлексов на электроннограмме. Межплоскостное расстояние d в кристалле определяется соотношением

$$d = l\lambda/r, \quad (4.9)$$

где l — расстояние от образца до фотопластины; r — радиус измеряемого интерференционного кольца, т. е. расстояние от рефлек-

са до центрального пятна, создаваемого первичными электронами.

В электроннографии применяют два метода исследования: метод, основанный на рассеянии электронов при прохождении пучка электронов через тонкий образец (метод на просвет), и метод, основанный на рассеянии электронов при скольжении пучка электронов по поверхности образца под углом несколько минут (метод на отражение). Физические картины рассеяния электронов этими методами не различаются между собой. Любой электронный микроскоп может быть использован как электроннограф. В современных микроскопах переход от наблюдения микроскопических картин к дифракционным осуществляется изменением режима проекционной системы прибора. Чаще всего электроннографический анализ, как и рентгеноструктурный, предназначен для определения ориентации и структуры монокристаллов и эпитаксиальных слоев, атомной структуры и фазового состава многокомпонентных материалов, топографии поверхности и т. п.

Растровая электронная микроскопия. В основе растровой электронной микроскопии лежат физические явления, наблюдающиеся при бомбардировке поверхности твердого тела пучком электронов с энергией до нескольких десятков килоэлектрон-вольт. К таким явлениям, в частности, относятся (рис. 4.20): вторичная электронная эмиссия; рентгеновское излучение; оптическое излучение, обусловленное эффектом катодoluminesценции; отраженные электроны; наведенный в образце ток; поглощение образцом электронов; прохождение образца электронами; образование объемного заряда.

Измерение сигналов, вызванных вторичными эффектами, позволяет получить разнообразную информацию о наблюдаемом объекте (топографическое изображение поверхности, данные о качественном и количественном составе, о распределении потенциалов и др.). Глубина проникновения электронов в твердое тело увеличивается с ростом энергии первичного пучка. Одновременно расширяется пучок электронов вследствие упругого рассеяния. Максимальный диаметр зоны рассеяния близок по величине к глубине проникновения электронов. Часть первичных электронов рассеива-

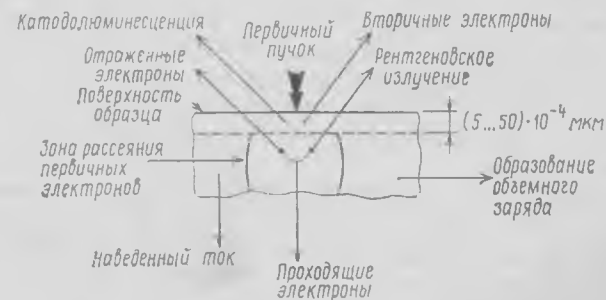


Рис. 4.20. Вторичные эффекты при взаимодействии первичного электронного пучка (зонда) с образцом

ется в обратном направлении, при этом коэффициент отражения мало зависит от энергии первичного пучка в диапазоне $10^4 \dots 10^5$ эВ, но возрастает с увеличением атомного номера материала мишени. Глубина выхода обратнорассеянных (отраженных) электронов примерно равна половине глубины проникновения первичного пучка. Вторичные электроны возникают в результате ионизации внешних электронных оболочек атомов, межзонных переходов (например, образование пары электрон — дырка) и выбивания электронов из внутренних оболочек атомов. Процессы рекомбинации сопровождаются оптическим и характеристическим рентгеновским излучением. Диаметр и глубина зоны генерации первичного рентгеновского излучения почти совпадают с диаметром и глубиной зоны рассеяния первичных электронов. Вторичные электроны генерируются по всей глубине проникновения первичных электронов в твердое тело. Однако средняя длина свободного пробега вторичных электронов мала (около 1 нм в металлах и около 5 нм в диэлектриках). Поэтому вторичная электронная эмиссия возникает в приповерхностном слое глубиной порядка 0,5 ... 5 нм.

Растровые электронные микроскопы (РЭМ) могут работать в различных режимах. Наиболее распространен режим вторичной электронной эмиссии. В РЭМ изображение поверхности во вторичных частицах создается благодаря развертке сфокусированного пучка электронов (зонда) по поверхности исследуемого образца. Пучок требуемого диаметра перемещается по образцу, разворачиваясь в растр, представляющий собой совокупность близко расположенных параллельных линий, вдоль которых пучок обегает за период развертки выбранный участок поверхности образца. В результате взаимодействия с пучком электронов в каждой точке поверхности в соответствии с вторичными явлениями возникают вторичные частицы различной природы. Они регистрируются коллекторами, и возникающие сигналы после усиления используются для модулирования локальной яркости экрана ЭЛТ, развертка луча которой синхронна со сканированием пучка первичных электронов по поверхности образца. Таким образом, каждому элементу сканируемого участка поверхности соответствует своя яркость на экране ЭЛТ. При локальном измерении исследуемой характеристики (например, состава или топографии) пропорционально изменяется интенсивность сигнала, поступающего на ЭЛТ, и на ее экране возникает определенный контраст. Увеличение изображения при этом равно соотношению размеров кадра на экране ЭЛТ и соответствующих размеров сканируемого участка поверхности образца.

Растровый электронный микроскоп включает в себя несколько основных узлов: электронно-оптическую систему; высоковакуумную автоматизированную систему; видеоконтрольное устройство регистрации, формирования и отображения информации; устройства точной механики (шлюзы, столики образцов и т. д.); специальный анализатор или устройство связи с ЭВМ для автоматического анализа изображения либо обработки другой ин-

формации, поступающей по одному или нескольким каналам связи из РЭМ. На рис. 4.21 представлена принципиальная схема РЭМ.

Электронно-оптическая система РЭМ включает в себя электронную пушку, электромагнитные линзы и катушки отклоняющей системы. Пушка представляет собой трехэлектродную электростатическую линзу, состоящую из анода 3, фокусирующего электрода 2 и термоэмиссионного катода 1. Катод, выполненный обычно в виде тонкой V-образной вольфрамовой нити, является эмиттером электронов. Анод заземлен, а катод и фокусирующий электрод, имеющий отрицательный потенциал относительно катода, соединены с источником высокого (обычно несколько десятков киловольт) отрицательного напряжения. Эмиттированные катодом электроны ускоряются и формируются в пучок, проходящий через отверстие в центре анода и через конденсорную 4 (может быть две) и объективную 15 линзы, которые фокусируют его на поверхности образца. Диаметр сфокусированного пучка лежит в интервале $5 \cdot 10^4 \dots 3$ нм. Внутри объективной линзы расположены две пары отклоняющих катушек 16, соединенных с генератором пилообразных сигналов, обеспечивающим синхронную развертку в квадратный растр пучка электронов и луча ЭЛТ.

Развертка осуществляется одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, так же как и в телевизионных системах, но с меньшими скоростями. Для обеспечения высококачественного изображения число строк в кадре должно составлять 500 ... 1000, время сканирования — от секунд (визуальное наблю-

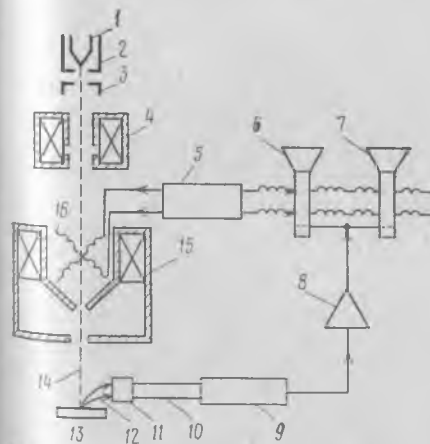


Рис. 4.21. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа
1 — термоэмиссионный катод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод; 4 — конденсорная линза; 5 — регулятор усиления; 6 — ЭЛТ для наблюдения; 7 — ЭЛТ для фотографирования; 8 — усилитель; 9 — ФЭУ; 10 — светопровод; 11 — сцинтиллятор; 12 — сигнал; 13 — образец; 14 — электронный пучок; 15 — объективная линза; 16 — отклоняющие катушки

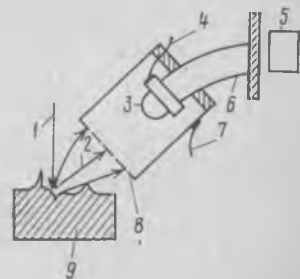


Рис. 4.22. Схема коллектора электронов растрового электронного микроскопа:

1 — электронный пучок; 2 — эмиттированные поверхность электроны; 3 — сцинтиллятор; 4 — ввод высокого ускоряющего напряжения; 5 — ФЭУ; 6 — светопровод; 7 — ввод регулируемого напряжения (+500 ... -50 В); 8 — сетка; 9 — образец

дение) до минут (фотографирование). ЭЛТ для визуального наблюдения изображения обладают длительным послесвечением, для фотографирования предусмотрена дополнительная ЭЛТ с кратковременным послесвечением, снабженная фотокамерой. Увеличение прибора, определяемое как отношение амплитуд развертки луча по экрану ЭЛТ и пучка электронов по образцу, можно плавно менять от 20 до 100 000. С помощью вольфрамовых V-образных катодов в РЭМ можно получить разрешение 10 нм, применив две или три электромагнитные линзы. Разрешающая способность повышается (до 5 нм) при использовании катода из гексаборида лантана (LaB_6). Наилучшее разрешение (3 нм) достигается в РЭМ с автотемнионными катодами.

Ток вторичных электронов чрезвычайно мал ($10^{-12} \dots 10^{-13}$ А), поэтому для эффективного сбора электронов с достаточно низким уровнем помех используется коллектор (рис. 4.22), представляющий собой сцинтиллятор 3, размещенный внутри электростатического экрана, закрытого спереди сеткой 2. Потенциал сетки относительно образца можно менять (от -30 до $+250$ В) и тем самым регулировать отношение отраженных и вторичных электронов в сигнале. Благодаря положительному относительно образца 9 потенциалу экрана (несколько сотен вольт), основное количество вторичных электронов захватывается экраном и, ускоряясь фокусирующим напряжением, собирается в фокусе сцинтиллятора. Фокусирующее напряжение величиной $10 \dots 12$ кВ подается на покрытие тонким слоем алюминия полусферическое окончание сцинтиллятора. Бомбардируемый быстрыми электронами сцинтиллятор эмитирует кванты, которые, пройдя по светопроводу 6 на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 5, преобразуются в электрический сигнал. При положительном относительно образца потенциале экрана вклад отраженных электронов в сигнал составляет несколько процентов, поэтому последний практически полностью обусловлен вторичными электронами. Понижая потенциал экрана, можно препятствовать поступлению вторичных электронов на коллектор и таким образом в широких пределах изменять в сигнале соотношение вторичных и отраженных электронов, а вместе с тем контраст и другие характеристики изображения. Энергия вторичных электронов невысока, и поэтому электростатическое поле между образцом и сеткой коллектора сильно отклоняет траектории от первоначальных (после выхода с поверхности образца) в сторону коллектора. Обладающие гораздо большей энергией отраженные электроны мало меняют свою траекторию под действием того же электростатического поля, поэтому вторичные электроны могут давать изображение участков образца, находящихся вне прямого движения электронов к коллектору.

Использование как отраженных, так и вторичных электронов (рис. 4.23,а) позволяет более точно выявить рельефность поверхности, чем использование только отраженных электронов. Изменение условий сбора электронов с поверхности образца, а следовательно, и обеспечение работы РЭМ в том или ином режиме



рис. 4.23. Схема движения электронов к коллектору: а — вторичных и отраженных электронов; б — вторичных электронов; в — отраженных электронов; 1 — образец; 2 — сетка; 3 — сцинтиллятор

стигаются изменением не только режима работы коллектора, но и положения образца относительно коллектора. Так, для сбора только вторичных электронов коллектор размещается вне прямого движения электронов к нему (рис. 4.23,б), а для сбора только отраженных — в направлении прямого движения при одновременном понижении потенциала на сетке до нуля, чтобы вторичные электроны не достигали коллектора (рис. 4.23,в). В отраженных электронах наблюдается характерное теневое изображение рельефа, вызванное тем, что эти электроны, двигаясь к коллектору по прямолинейным траекториям, не попадают на него с участков, закрытых каким-либо препятствием, например выступом на поверхности. Поэтому для получения топографии поверхности эффективнее использовать вторичные электроны.

Широкое применение для контроля p -областей БИС и определения дефектов мест утечек и коротких замыканий элементов ИМ, а также мест обрывов токопроводящих шин находит метод наведенного тока. Явление наведения тока заключается в образовании высокоэнергетичными электронами зонда РЭМ электронно-дырочных пар в полупроводнике и разделением их полем $p-n$ -перехода. При включении облучаемого $p-n$ -перехода во внешнюю цепь возникает электрический ток, который и называют наведенным током. Сигнал, снимаемый с сопротивления внешней цепи и пропорциональный этому току, может использоваться в РЭМ для создания специфического изображения исследуемого объекта в режиме наведенного тока.

Для правильной интерпретации изображения надо учитывать ряд факторов. Глубина проникновения электронов зонда в объеме образца зависит от их энергии и определяется как расстояние, на котором теряется 90% энергии падающего пучка. Глубину проникновения R , м, электронов можно рассчитать по следующей формуле:

$$R = 3 \cdot 10^{-13} E_0^{5/3}, \quad (4.10)$$

где E_0 — энергия падающего пучка, эВ.

Если величина R больше глубины залегания $p-n$ -перехода, то на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ) РЭМ вся p -область (в p -канальных МДП БИС) или n -область (в n -канальных МДП БИС) будет отличаться по контрасту от других участков

кристалла, на которых нет областей с различной проводимостью. Если R меньше глубины залегания $p-n$ -перехода, то будут видны только границы p - и n -областей в местах их выхода на поверхность. При одной и той же энергии бомбардирующих образец электронов зонда на участках, где $p-n$ -переход сверху «прикрыт» слоем металлизации или межслойной изоляции, сигнал наведенного тока слабее. Для его усиления необходимо в таком случае увеличивать энергию электронов зонда или их число (ток зонда). Наличие центров рекомбинации в области, где возникает наведенный ток, приводит к уменьшению свободных носителей в образце и ослаблению сигнала наведенного тока. Для локализации мест утечек к $p-n$ -переходам прикладывается обратное смещение. При этом сравниваются изображения БИС в наведенном токе с подачей потенциала и без него. В случае наличия утечки наблюдается на экране ВКУ РЭМ усиленное свечение в области дефекта.

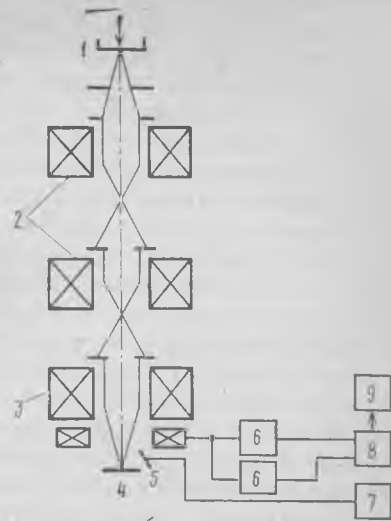
Анализ и контроль ИМ с помощью РЭМ можно осуществлять в режиме потенциального контраста. Этот режим позволяет обнаруживать места обрывов металлизации, утечек, пробоев окисла при подаче на ИМ рабочих напряжений в статическом режиме. Видеосигнал формируется обычным для РЭМ способом. Возникновение контраста потенциалов объясняется взаимодействием вторичных электронов с электрическим полем поверхности образца, при этом области с низким потенциалом на экране выглядят светлыми, а с высоким — темными. Рассматривая в потенциальном контрасте различные области исследуемой ИМ, регулируя увеличение и сравнивая изображение с картой потенциалов или изображением эталонного (годного) образца, определяют место и вид дефекта.

В большинстве случаев анализ и контроль изделий на РЭМ может считаться неразрушающим, однако длительное сканирование электронным лучом диэлектрических слоев может приводить к накоплению зарядов, изменению пороговых напряжений или даже пробую МДП-структур. Это необходимо учитывать при анализе и контроле МДП ИМ.

Для автоматизации обработки информации, получаемой в процессе исследований, используют встроенные или внешние ЭВМ. С помощью ЭВМ можно решать разнообразные задачи по обработке информации, получаемой в РЭМ. Так, применение малых ЭВМ цифровой развертки в РЭМ дает возможность обнаружить и определить плотности фаз на заданном поле любой конфигурации, сравнить и определить степени расхождения рельефа исследуемой поверхности с рельефом, заложенным в память ЭВМ; прецизионно измерить размеры микроэлементов (ширины, длины, площади, периметра, расстояние между элементами) по заданной программе с выбором объекта измерения и т. д. ЭВМ позволяет повысить скорость обработки данных и точность результатов, проводить количественный анализ микроструктур, поверхностных потенциалов. Кроме того, ЭВМ может взять на себя управление РЭМ при проведении необходимых операций над изображением или его частью.

рис. 4.24. Структурная схема РЭМ с применением ЭВМ:

1 — электронная пушка; 2 — электронно-оптическая система; 3 — длиннофокусная линза; 4 — образец; 5 — коллектор; 6 — цифро-аналоговые преобразователи; 7 — аналоговый дискриминатор; 8 — малая ЭВМ; 9 — ВКУ



В РЭМ (рис. 4.24) для точного отображения морфологии реальной структуры используется цифровая развертка пучка электронов («точечный растр»). Положение пучка в любой точке образца 4 при этом определяется узлами прямоугольной сетки с шагом, равным шагу перемещения пучка. При перемещении его от точки к точке в цепи коллектора 5 за счет вторичных электронов возникает сигнал, который регистрируется аналоговым дискриминатором 7, если уровень сигнала превышает заданную величину. В память малой ЭВМ 8 заносятся координаты этой точки (x, y). Таким образом, при измерении, например ширины дефектов или микрофаз, в память ЭВМ заносятся координаты только двух точек. Накопленная информация может быть в дальнейшем использована для отображения на экране ВКУ 9 или использована для необходимых расчетов. Программа в ЭВМ вводится с пульта управления или с помощью перфоленты, а информация с ЭВМ выводится на перфоленту или телетайп. Управление шаговым перемещением пучка электронов и столом позволяет проводить измерения в выбранной заранее зоне на образце и тем самым сократить время исследования.

Электронная оже-спектроскопия. Методы электронной оже-спектроскопии позволяют проводить контроль и анализ микрообъектов с высокой абсолютной чувствительностью (от долей монокристаллического слоя до нескольких монокристаллических слоев) и получать информацию об элементном (химическом) составе, кристаллической структуре поверхности и ее особенностях, электронной энергетической структуре, однородности и сплошности тонких пленок. Возможность качественного и количественного анализа химического состава поверхности (глубина анализа 6... 10 нм), состояние которой определяет такие свойства пленок, как адгезия, коррозия, пассивация и т. д., делает метод оже-спектроскопии одним из основных средств неразрушающего контроля. С помощью этого метода исследуют причины отказов и брака ИМ на основных операциях планарной технологии, таких, как подготовка и очистка пластин, плазменно-плазменное и плазмохимическое травление, жидко- и паровая фазная эпитаксия, фотолитография, напыление металлических и диэлектрических пленок, диффузионное легирование и ионная имплантация.

Сущность метода электронной оже-спектроскопии заключается в возможности получения информации об элементном составе поверхностных слоев твердого тела путем анализа энергетического распределения вторичных электронов, возникающих при облучении твердого тела пучком сфокусированных электронов, выделения оже-электронов, определения их энергии и интенсивности и идентификации по этим характеристикам соответствующих элементов периодической системы. При возбуждении атома электронами с достаточно высокой первичной энергией на его внутренней электронной оболочке может образоваться вакансия за счет выхода вторичного электрона. Возбужденный атом неустойчив и для перехода в устойчивое состояние освобождается вакансия, заполняется электроном с более высокого энергетического уровня. Возникающая избыточная энергия в результате перехода может выделяться в виде кванта, и тогда возникает характеристическое рентгеновское излучение (излучательный переход). Если эта энергия передается другому электрону, то в результате такого процесса из атома эмитируется электрон (безызлучательный переход) с квантованной энергией, определяемой межорбитальным переходом, характеризующий атомный номер элемента. Такой электрон называется оже-электроном. Регистрируя значения энергий оже-электронов, эмитируемых атомами при их возбуждении, и сравнивая эти значения с табулированными, определяют порядковый номер z атомов, т. е. химическую природу атомов.

Оже-переходы обозначают следующим образом. Первым записывается первоначально ионизированная оболочка, затем оболочка, с которой произошел переход, соответствующий заполнению вакансии, и далее оболочка, с которой происходит эмиссия электрона в вакуум. Например, оже-переход KL_1L_2 осуществляется при переходе электрона с оболочкой L_1 на первоначальную вакансию на оболочке K и эмиссии электрона с оболочки L_2 . Кинетическую энергию оже-электронов можно вычислить по следующей эмпирической формуле:

$$E_{wy} = E_w(z) - 0,5[E_x(z) + E_x(z+1)] - 0,5[E_y(z) + E_y(z+1)] - \varphi, \quad (4.11)$$

где E_w , E_x , E_y — энергия связи электрона на соответствующей оболочке; w , x , y — условные обозначения оболочек, на которых образуются первичные (w) и вторичные (x , y) вакансии; φ — работа выхода материала спектрометра.

Используя значения энергий, приводимых в таблицах атомных энергетических оболочек, можно по положению оже-пика на энергетической шкале однозначно определить, какому химическому элементу соответствует та или иная группа пиков. Спектры оже-электронов зарегистрированы для всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева, за исключением двух — водорода и гелия, которые не образуют оже-электронов.

Высокая чувствительность электронной оже-спектроскопии к состоянию поверхности обусловлена малой средней длиной сво-

бодного пробега оже-электронов. Оже-электроны, образованные на глубине большей длины свободного пробега $(5 \dots 50) \cdot 10^{-1}$ нм, выйдут из твердого тела с меньшей энергией и дадут вклад только в общий фон спектра. Количественная оже-спектроскопия основана на том, что число эмитированных оже-электронов пропорционально числу приповерхностных атомов. В простейших случаях эта зависимость линейна, но зачастую достаточно сложна, что объясняется влиянием многих физических и аппаратурных факторов на ток оже-электронов.

Для точечного анализа химического состава поверхности твердого тела применяют электронные оже-спектрометры: 09ИОС-2 и 09ИОС-3, встраиваемые в технологическое оборудование. Применение растровой развертки электронного пучка позволяет исследовать распределение химических элементов по поверхности объекта. Сочетание электронной оже-спектроскопии с ионным травлением дает возможность проводить послойный анализ материалов, областей раздела, исследовать квантово-размерные пленки, т. е. получать трехмерную информацию. Для растрового анализа химического состава поверхности твердого тела применяется электронный оже-спектрометр 09ИОС-10-004, для послойного анализа — 09ИОС-10-005.

На рис. 4.25 представлена упрощенная структурная схема оже-спектрометра. Оже-спектрометр состоит из сверхвысоковакуумной камеры, в которой расположены электронная пушка 2, образец 1, энергоанализатор 3, вторично-электронный умножитель 4 и система регистрации. Поскольку выход оже-электронов чувствителен к состоянию поверхности, в рабочей камере оже-спектрометра должен быть создан вакуум не ниже $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па. Современные спектрометры оснащаются: манипуляторами передачи и установки образца относительно фокуса анализатора; системами для ионного травления и термической очистки поверхности образца; устройствами шлюзования; питающей, регистрирующей и управляющей аппаратурой, удовлетворяющей требованиям минимального искажения получаемых результатов; системами очистки и напуска рабочих газов и др. Принцип действия оже-спектрометра определяется типом применяемого энергоанализатора. Наиболее широко используются цилиндрические энергетические анали-

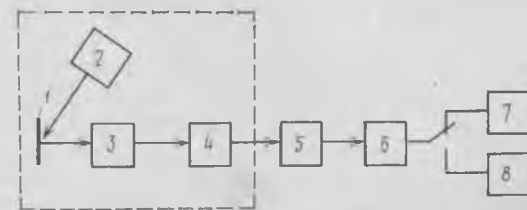


Рис. 4.25. Упрощенная структурная схема оже-спектрометра: 1 — образец; 2 — электронная пушка; 3 — энергоанализатор; 4 — вторично-электронный умножитель; 5 — предусилитель; 6 — синхронный детектор; 7 — осциллограф; 8 — самписец

заторы. Работа такого анализатора основана на применении узкополосного энергетического фильтра. Цилиндрический энергетический анализатор (рис. 4.26) состоит из двух коаксиальных цилиндров 2, 3 и входной диафрагмы 7, за которой расположен коллектор 8. Две кольцевые щели (входная 4 и выходная 6) во внутреннем цилиндре 2 затянута мелкой металлической сеткой. Потенциалы исследуемого образца 1 и внутреннего цилиндра равны нулю; на внешний цилиндр подается отрицательное напряжение.

Пучок электронов, создаваемый пушкой 5, фокусируется в точку на поверхности образца, которая является одним из фокусов энергоанализатора. Возникающие вторичные электроны движутся в радиальных направлениях и проходят через кольцевую входную щель 4. Отрицательный потенциал, прикладываемый к внешнему цилиндру, направляет электроны с определенной энергией в выходную щель, а затем в выходную диафрагму. При этом анализируются вторичные электроны, входящие в анализатор под средним углом $42^{\circ}20'$ к оси симметрии. Входная щель внутреннего цилиндра пропускает в анализирующее пространство электроны, заключенные в телесном угле (7°). Ток коллектора 8 пропорционален энергораспределению (рис. 4.27)

$$i_k = N(E) \int_0^{\infty} T(E) dE = S \cdot N(E), \quad (4.12)$$

где $T(E)$ — функция пропускания цилиндрического энергетического анализатора, которая определяет количество электронов достигших коллектора; S — площадь (на рис. 4.27 S — заштрихована) под кривой $T(E)$; δ — полоса пропускания.

Энергия анализируемых электронов E_a пропорциональна потенциалу внешнего цилиндра. Изменяя его, т. е. изменяя E_a , можно получить информацию об энергораспределении.

Возможности оже-спектрометров значительно расширяются при использовании ЭВМ: облегчается труд оператора, повышает-

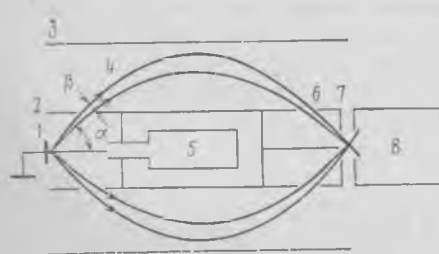


Рис. 4.26. Схема цилиндрического энергетического анализатора:
1 — образец; 2 — внутренний цилиндр; 3 — внешний цилиндр; 4 — входная щель; 5 — электронная пушка; 6 — выходная щель; 7 — выходная диафрагма; 8 — коллектор

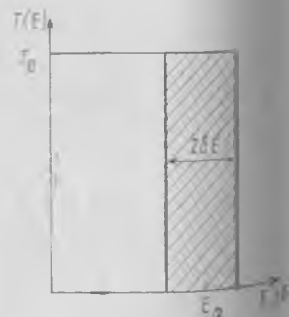


Рис. 4.27. Энергетическая диаграмма узкополосного фильтра

ся эффективность использования оборудования, появляются дополнительные виды информации, получение которых без применения вычислительной техники невозможно.

С помощью системы автоматизации контролируют электрические параметры, диаметр и положение пучка первичных электронов; преобразовывают экспериментальные данные (дифференцируют, интегрируют, вычитают фон, усредняют, нормируют амплитуды оже-пиков); регистрируют группы выбранных оже-пиков, устанавливая интервалы для выбора энергии оже-электронов и уровня чувствительности в каждом интервале; осуществляют многократное сканирование по поверхности образца с накоплением информации в память ЭВМ и последующим усреднением с целью уменьшения флуктуации параметров пучка первичных электронов; проводят локальный анализ образца или анализ вдоль линии, пересекающей поверхность; идентифицируют линии в оже-спектре (качественный анализ); осуществляют количественный анализ; выводят данные на дисплей или самописец.

Автоматическую регистрацию и последующую обработку данных проводят с помощью систем, содержащих синхронный детектор, при этом выходной сигнал преобразуется в цифровую форму посредством аналого-цифрового преобразователя, записывается на магнитный диск или ленту и затем обрабатывается. Другим способом автоматической регистрации является метод прямого счета, в котором электроны регистрируются с помощью канального электронного умножителя в счетном режиме. При этом определяется число импульсов за фиксированные интервалы времени и тем самым воссоздается кривая энергораспределения, для дальнейшей обработки которой используют различные математические приемы.

Системы автоматизации оже-спекроскопии строят либо с применением специализированных ЭВМ, работающих в сопряжении с центральной ЭВМ, либо на базе микропроцессоров, которые решают задачи цифровой регистрации и предварительной обработки спектров (усреднение, сглаживание, сжатие данных, выделение и измерение амплитуд оже-пиков и соответствующих им энергий оже-электронов, математическая обработка, не требующая специального математического обеспечения). С помощью микропроцессоров можно отображать информацию на ВКУ, управлять электронной оптикой.

Типичная система автоматизации оже-спектрометра содержит блок сопряжения, память, микропроцессор и интерфейсы. Более высокой степенью автоматизации является сочетание автоматизации обработки данных с автоматизацией управления процессом контроля. В этом случае управление функциональными устройствами, входящими в состав оже-спектрометра, происходит с помощью ЭВМ, причем одни устройства могут управляться непосредственно от центральной ЭВМ, а другие — через микропроцессоры. Автоматизированный оже-спектрометр (рис. 4.28) содержит центральную обрабатывающую микроЭВМ и микропроцессоры 6, 8,



Рис. 4.28. Упрощенная структурная схема автоматизированного оже-спектрометра:

1 — микроЭВМ; 2 — видеотерминальное устройство; 3 — графопостроитель; 4 — устройство ввода-вывода; 5 — блок сканирования пучка электронов; 6, 8 — микропроцессоры; 7 — блок управления пучком электронов; 9 — блок цифровой развертки; 10 — блок регистрации

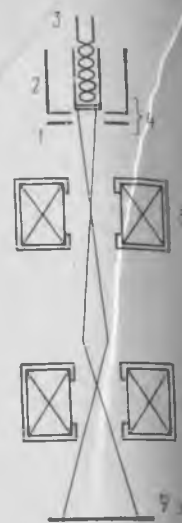


Рис. 4.29. Схема эмиссионного электронного микроскопа:

1 — анод; 2 — образец; 3 — нагреватель; 4 — катодная линза (1, 2); 5 — объективная линза; 6 — проекционная линза; 7 — люминесцентный экран

на базе которых выполнены такие функциональные блоки, как блок цифровой развертки 9, блоки сканирования и управления пучком электронов 5, 7. Информационная связь ЭВМ, микропроцессоров и других блоков осуществляется по системному каналу. Программа контроля задается оператором с клавиатуры видеотерминального устройства 2 на языке директив. В эту программу входят обработка данных и установка режимов работы аппаратуры.

Эмиссионная электронная микроскопия (ЭЭМ). В тех случаях, когда требуется определить реакцию анализируемого материала (элемента ИМ) на внешнее воздействие (тепловое, радиационное, механическое), изменяющее структуру или состав во время воздействия, целесообразно использовать эмиссионную электронную микроскопию. Такой анализ необходим, например, при установлении причин сбоев, перемещающихся отказов в процессе эксплуатации в условиях экстремальных кратковременных тепловых или радиальных нагрузок.

Эмиссионный электронный микроскоп (рис. 4.29) состоит из следующих основных частей: нагревателя 3 для получения температур, обеспечивающих термоэмиссию электронов с образца 2; электронно-оптической системы 4, 5, 6 для ускорения коллимирования и фокусировки эмитированных электронов; люминесцентного экрана 7; вакуумной системы. Объективная линза 5 формирует первое увеличенное изображение, которое окончательно увеличивается с помощью проекционной линзы 6. В различных конструкциях микроскопов применяют как электромагнитные, так и электростатические линзы. Требуемую температуру образцов получают путем косвенного нагрева, непосредственным пропусканием тока либо электронной или ионной бомбардировкой. Для ко-

личественной интерпретации эмиссионных изображений в современных эмиссионных микроскопах непосредственно измеряются локальные и интегральные токи в плоскости изображения.

Таким образом, основным принципиальным отличием электронного эмиссионного микроскопа от РЭМ является то, что исследуемый образец одновременно является электродом катодной линзы, т. е. составной частью электронно-оптической системы. Оптическое разрешение ЭЭМ порядка 50... 100 нм, что соответствует максимальному увеличению изображения участка поверхности до нескольких тысяч. Улучшение оптической системы приближает разрешение к теоретически достижимому (10... 15 нм).

На распределение тока в плоскости изображения влияют физические свойства материалов (атомный номер, работа выхода) и топография поверхности образца (различие в ориентациях монокристаллов в поликристаллическом веществе, тип кристаллической решетки), а также виды и способы воздействия внешних факторов и наличие электрических и магнитных полей в микрообластях поверхности образца. Поскольку электрические и магнитные микрополя на поверхности объекта влияют на перераспределение плотности тока в луче, формирующем изображение, ЭЭМ можно использовать для визуального наблюдения таких полей.

4.5. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Масс-спектрометрические методы нашли широкое применение, начиная от прецизионных исследований химического состава до управления технологическими процессами обработки полупроводниковых пластин посредством контроля состава технологических сред. Масс-спектрометрия включает в себя следующие операции: превращение исследуемых материалов в положительные ионы с зарядом g (ионообразование) и массой m ; создание ионного пучка посредством ускорения ионов продольным статическим или переменным электрическим полем; пространственное или временное разложение ионного пучка на компоненты по значениям m/g с помощью электрических и магнитных полей; регистрация и измерение интенсивности каждой компоненты ионного пучка. Масс-спектрометрические методы классифицируют, исходя из процесса ионизации. Наибольшее применение в производстве ИМ нашли следующие методы масс-спектрометрии: искровая, электронно-зондовая, лазерная и масс-спектрометрия вторичных ионов.

Искровая масс-спектрометрия. В основе этого метода лежит явление распыления и ионизации вещества в вакууме в результате воздействия электрического разряда. Если к двум электродам, изготовленным из анализируемого материала и находящимся в вакууме, приложить высокое напряжение (25... 100 кВ), то на микронеровностях катода возникнут локальные поля большой напряженности. Например, при напряжении $5 \cdot 10^4$ В в зазоре между двумя электродами шириной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м напряженность поля может достигнуть $5 \cdot 10^7$ В м⁻¹. В зависимости от чистоты и качества поверхности катода локальное поле на нем может увеличиваться на два порядка. В результате из центра сильных локаль-

ных полей возникает автоэлектронная эмиссия с плотностью тока, близкой 10^{13} А·м⁻². Сильный электронный ток приводит к разогреву отдельных участков катода до температуры испарения материала электродов, и к выделению адсорбированных и растворенных в них газов. Прежде чем температура распределится по объему, в локальных участках произойдет гидродинамический выброс превращенного в пар вещества. За счет интенсивной ионизации молекул пара и газа образуется плазма и возникает дуговой разряд. Образующиеся ионы ускоряются, фокусируются и направляются в масс-анализатор.

Искровая масс-спектрометрия дает возможность получать уникальные аналитические характеристики: абсолютная чувствительность определения элементов может достигать 10^{-11} ... 10^{-12} г; относительная чувствительность 10^{-7} ... $10^{-8}\%$; на проведение одного анализа расходуется несколько миллиграммов вещества; одновременно на фотопластинку может быть зарегистрировано до 70 элементов. Поэтому искровая масс-спектрометрия в первую очередь применяется для определения следов элементов. Кроме того, с ее помощью определяется распределение примесей по толщине в тонких пленках и в поверхностных слоях массивных образцов (послойный анализ).

Электронно-зондовая масс-спектрометрия. При взаимодействии сфокусированного пучка электронов (зонда) достаточной мощности с поверхностью твердого вещества происходит локальный разогрев последнего и выделение паров веществ и растворенных в нем газов. Направляя эти пары в ионный источник с электронной бомбардировкой и ионизируя испаряющееся вещество, можно с помощью масс-спектрометра провести химический анализ вещества с локальностью, определяемой диаметром пучка электронов. Этот метод применяется главным образом для локального анализа примесей внедрения в металлах и сплавах и для экспрессного общего элементного анализа металлов, диэлектриков.

Лазерная масс-спектрометрия. В лазерной масс-спектрометрии поверхность образца зондируется сфокусированным излучением лазера. При достаточной энергии излучения в результате локального разогрева вещества происходит его испарение и образование плазмы, являющейся источником ионов. Масс-спектрометрическое определение состава, количества и заряда ионов этой плазмы позволяет определить локальный состав вещества. Характер взаимодействия излучения с веществом зависит от плотности потока излучения D и длительности импульса излучения, которые определяются режимом работы лазера. В лазерной масс-спектрометрии используются в основном два режима работы лазера: свободной генерации и модулированной добротности (гигантского импульса). Импульсы излучения лазера, работающего в режиме свободной генерации, длительностью порядка 10^{-4} с ($D = 10^{10}$... 10^{12} Вт·м⁻²) состоят из последовательных порций излучения длительностью до 10^{-6} с. Излучение лазера, не отраженное

от поверхности металла, практически полностью поглощается в слое толщиной 10^{-8} ... 10^{-7} м. Локальный разогрев металла до температур в несколько тысяч кельвин приводит к его расплавлению и испарению. Доля ионизованного компонента не превышает 1% от общего количества испаренного вещества. Лунка от испарения имеет форму конического кратера размером от нескольких десятков до сотен микрон. В масс-спектре ионов регистрируются пики, соответствующие кластерам, т. е. полиатомным однозарядным ионам, которые образуются благодаря наличию в паре жидких капель и нерасплавленных микрочастиц. Масс-спектрометрию с лазером, работающим в режиме свободной генерации, используют для локального анализа газовых примесей в материалах. При дополнительной ионизации испаренного вещества нижний предел определяемых атомов составляет $1 \cdot 10^{-3}$... $1 \cdot 10^{-4}\%$.

Энергия излучения лазера, работающего в режиме модулированной добротности, примерно такая же, как и в режиме свободной генерации, однако длительность импульсов порядка 10^{-8} с, в результате чего мощность излучения увеличивается на несколько порядков. Вследствие малой скорости отвода тепла в глубь металла (в течение импульса) поглощенная энергия расходуется главным образом на сублимацию и образование плазмы. Кластеров и капель при этом режиме работы не образуется. Глубина проникновения излучения не превышает несколько микрон. Образование ионов в плазме характеризуется практически 100%-ной ионизацией, однако значение окончательной степени ионизации обусловлено процессами рекомбинации при разлете ионов. Масс-спектрометрия с лазером, работающим в режиме модулированной добротности, позволяет совместить операции отбора и ионизации вещества. Этот метод применяется для определения элементного состава полупроводниковых монокристаллов, эпитаксиальных структур, ионоимплантированных слоев, для обнаружения атомов примеси во всех твердых веществах. Предел обнаружения атомного содержания $1 \cdot 10^{-9}\%$.

Основными достоинствами лазерной масс-спектрометрии являются: возможность анализа любых твердых веществ (металлов, полупроводников, диэлектриков); абсолютный чистый отбор пробы; локальность; одновременная информация о содержании в пробе практически всех элементов периодической системы.

Масс-спектрометрия вторичных ионов. Методы анализа, основанные на масс-спектрометрии вторичных ионов, успешно применяются при изучении состава и характера распределения примесей в тонких многокомпонентных пленках, исследовании переходных областей в зоне контакта металл — керамика, металл — полупроводник, концентрационных профилей легирования полупроводниковых материалов, в том числе методом ионной имплантации. Относительная чувствительность метода — более $10^{-7}\%$, минимальный объем образца, необходимого для анализа, — 10^{-20} м³, глубина анализируемого слоя — 10^{-8} м.

Масс-спектрометрия вторичных ионов основана на измерении характеристик вторичных ионов соответствующих атомов, входящих в состав материала образца, бомбардируемого пучком первичных ионов с энергией $(0,1 \dots 2) \cdot 10^4$ эВ. Бомбардирующий положительный либо отрицательный ион при взаимодействии с атомами поверхности может испытать упругое или неупругое рассеяние, изменить заряд. В зависимости от условий бомбардировки первичный ион может не только рассеяться, но и проникнуть в глубь мишени или адсорбироваться на ее поверхности. Внедрившийся ион в результате многократных столкновений теряет энергию, нейтрализуется и оказывается имплантированным в решетку мишени. В результате проникновения первичных ионов и передачи импульса атомам мишени последние могут расплытаться в виде нейтральных атомов, положительных и отрицательных ионов. Наконец, при бомбардировке наблюдаются электромагнитное излучение и эмиссия вторичных электронов. Наибольший интерес для аналитических целей представляет эмиссия вторичных ионов, поскольку применение масс-спектрометрии для измерения их количества обеспечивает очень высокую чувствительность анализа, недостижимую при других методах. Ионная бомбардировка разрушает исследуемую поверхность, обнажая все более глубокие слои, что дает возможность осуществлять послойный анализ, т. е. изучение распределения по толщине приповерхностного слоя или в тонких пленках химических элементов и соединений, вводимых в материал, с помощью, например, диффузии, напыления, эпитаксии или ионного легирования. Первичный ионный пучок может быть сфокусирован в зонд малых размеров для осуществления локального анализа. В свою очередь, фокусировкой вторичных ионов может быть получено ионное изображение бомбардируемой поверхности. Масс-спектрометрическая фильтрация такого изображения дает картину распределения ионов выбранного сорта в поверхностном слое.

Любая установка для масс-спектрометрии содержит три основных узла: источник ионов, в котором происходит процесс отбора и ионизации вещества, а также формирование ионного пучка; масс-анализатор, в котором происходит разделение ионов по массам; регистрирующее устройство, служащее для измерения интенсивности каждой компоненты. В качестве масс-анализаторов применяют масс-спектрометры различных типов: магнитные, с двойной фокусировкой, динамические. В магнитных анализаторах разделение ионов по массам m основано на взаимодействии движущегося под действием разности потенциалов U иона с зарядом g с магнитным полем H , в результате которого траектория движения иона будет окружностью радиусом

$$r = \sqrt{\frac{2mU}{gH^2}} \quad (4.13)$$

Таким образом, пучок ионов, проходя через магнитное поле H , разбивается на несколько пучков с разными m/g .

В масс-анализаторе с двойной фокусировкой пучок ионов последовательно проходит радиальное электростатическое и магнитное поля. Электростатическое поле является селектором ионов по энергиям, а в магнитном происходит их разделение по соотношениям m/g . Эти анализаторы применяются в случае, если источник дает поток ионов с широким диапазоном энергий или требуется повысить разрешающую способность.

В динамических масс-анализаторах для разделения ионов по массам используется зависимость скорости, резонансной частоты колебаний или ускорения ионов от отношения их массы к заряду. К динамическим относятся времяпролетный, квадрупольный, монополярный, радиочастотный, омегатронный и другие масс-анализаторы. В них для разделения ионов разных масс дополнительно используется различие во времени движения ионов на определенных участках их пути в приборе. Наиболее широко используются квадрупольные масс-спектрометры, поскольку их аналитические возможности достаточны для выполнения практически всех задач отрасли, решаемых масс-спектрометрическими методами, а конструктивные особенности позволяют встраивать их в любые установки.

Наиболее часто используются фотографическая и электрическая системы регистрации. При фотографическом способе фотопластинку помещают в камеру масс-анализатора и непосредственно фиксируют ионы. При электрической регистрации измеряются токи, создаваемые ионными пучками с помощью электрометрических усилителей или усилителей с динамическим конденсатором.

Важным направлением использования масс-спектрометрии является контроль технологических процессов. Молекулярная масс-спектрометрия дает возможность прямым путем получить информацию о кинетике химических реакций, протекающих при относительно высоких температурах (673...1473 К). Целесообразность использования масс-спектральной аппаратуры обусловлена также ее высокой чувствительностью и информативностью, широким динамическим диапазоном, экспрессностью определения концентрации газовых компонентов, возможностью автоматизации измерений. Молекулярная масс-спектрометрия особенно важна для отработки и оптимизации технологических процессов, таких, как эпитаксия (путем изучения массопереноса), осаждение Si_3N_4 , высокочастотное напыление и т. д.

4.6. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Для проверки качества ИМ в процессе производства применяют различные методы контроля и анализа. Находят применение и электрохимические методы, главное достоинство которых — визуализация дефектов или контролируемых элементов. Высокая наглядность, простота исполнения и несложное оборудование делают эти методы (особенно неразрушающие) пригодными для

контроля ИМ на разных этапах изготовления. Электрохимические методы помогают установить местоположение дефектов или дефектных участков для дальнейшего анализа с помощью РЭМ и других методов. Управляя приложенным напряжением, измеряя протекающий ток, наблюдая изменение в картине распределения выявляемых дефектов или регистрируя потенциалы в ИМ, с помощью этих методов проводят с достаточной степенью точности необходимые количественные измерения.

Методы анодного декорирования. При использовании методов анодного декорирования происходит либо окисление исследуемой поверхности образца, либо осаждение аморфного кремния и других продуктов реакции.

Для контроля сплошности металлических шин на ступенях рельефа ИМ применяют метод анодного окисления. Этот метод используется перед нанесением защитного покрытия. Для его осуществления к обратной стороне пластины прикладывают потенциал так, чтобы происходило анодирование соединенных с пластиной участков алюминиевых шин, т. е. образец служит анодом. Катод изготавливают из пластины. В качестве электролитов для анодного окисления используют водные растворы щавелевой и винной кислот. Если металлизация нарушена на ступеньке окисла, то с одной стороны ступеньки она должна анодироваться, а с другой — нет. Оборванные участки межсоединений при осмотре в оптический микроскоп обнаруживают по резкому изменению цвета. Этот способ удобен тем, что при минимальных затратах на оборудование (по сравнению с РЭМ) и времени (по сравнению с электрическим зондированием) он дает возможность массового контроля кристаллов на пластине. Если учесть, что алюминиевые межсоединения специально анодно окисляют для предотвращения электромиграции, образования бугорков при отжиге и т. д., то способ можно считать неразрушающим.

Анодное окисление применяется также для выявления электрически дефектных транзисторных структур ИМ на ранних стадиях изготовления, когда еще не проведена металлизация. Такой контроль позволяет изъять из технологического процесса пластины с большим количеством электрически дефектных кристаллов, а также оценить вклад в дефектность структур операций, непосредственно формирующих эти элементы.

При наличии в кремниевой пластине диодных или транзисторных структур скорость электрохимического окисления поверхности пластины в разных местах неодинакова: поверхность базовых областей транзисторов окисляется значительно медленнее коллекторных, так как они отделены от последних коллекторным $p-n$ -переходом. В результате приложенного постоянного напряжения коллекторный $p-n$ -переход смещается в обратном направлении и становится добавочным сопротивлением в микроцепи электрического тока окисления. Но если коллекторный $p-n$ -переход будет иметь повышенный ток утечки, то его сопротивление току электролиза резко уменьшится и поверхность базовой обла-

сти начнет интенсивно окисляться. В этом случае электрохимическому окислению подвергается и поверхность эмиттера, поскольку смещенный в прямом направлении эмиттерный $p-n$ -переход не добавляет в цепь электролиза существенного сопротивления. Образуемая на поверхности базовой области и эмиттера окисная пленка за счет интерференционного эффекта окрашивает их, выявляя таким образом электрические дефектные транзисторы из числа транзисторов с нормальными вольт-амперными характеристиками.

Анодное окисление для определенного класса ИМ можно считать неразрушающим методом контроля электрической дефектности элементов ИМ. Визуализация электрически дефектных элементов при анодном окислении осуществляется при появлении на них пленки окисла толщиной 50 ... 60 нм.

Тот же самый принцип, что и при анодном окислении, положен в основу обнаружения электрически дефектных структур с помощью анодного травления. В случае анодного травления внешним признаком, выделяющим электрически дефектный элемент из числа годных, служит углубление (с утолщением по контуру), соответствующее области транзисторной структуры. В качестве электролита используют водный раствор глицерина с плавиковой кислотой, который полностью исключает химическое травление кремния. На поверхности электрически дефектных элементов при прохождении тока определенной плотности происходит электрохимическая реакция взаимодействия кремния с плавиковой кислотой, в результате чего образуется рыхлый осадок, представляющий собой смесь фтористого и аморфного кремния. На нормальных элементах, где плотность тока мала, реакция не развивается. Так как при анодном травлении на поверхности образца выделяются пористые продукты, не препятствующие прохождению тока, то, задавая величину напряжения, можно отбраковывать не соответствующие этому напряжению элементы.

При сравнении метода анодного окисления с методом анодного травления можно было бы отдать предпочтение последнему. Он более оперативен (время проведения процесса на порядок меньше, чем при анодном окислении), более универсален, обладает большей чувствительностью (может достигать $0,01 \cdot 10^{-6}$ А). Это обусловлено тем, что при анодном травлении на поверхности электрически дефектного элемента не растет анодная пленка двуокиси кремния, резко увеличивающая электрическое сопротивление микроцепи электролиза. Однако при всех перечисленных достоинствах метод анодного травления обладает большим недостатком — травление разрушает пластину.

Электролитическое декорирование металлами. Для количественного определения сквозных дефектов в непроводящих покрытиях пользуются осаждением металла в катодном процессе. В данном процессе исследуемая пластина с диэлектрическим покрытием служит катодом. В основу метода электролитического

дения металла положено осаждение меди или никеля из цианистого или сернокислого электролита. Анод изготавливается из медной проволоки. При подключении напряжения к электрохимической ячейке медь осаждается в порах диэлектрика и выходит на его внешнюю поверхность, образуя локальные вкрапления размером от $5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-5} м. Метод осаждения меди применим для анализа и контроля дефектов в пленках позитивных фоторезистов.

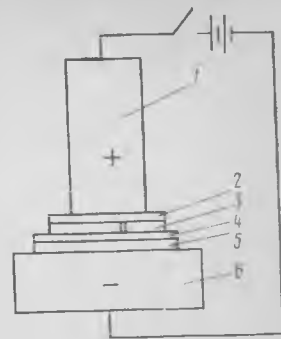
Осаждение металлов применяется не только для выявления дефектов в непроводящих пленках, но и для обнаружения дефектных обратносмещенных $p-n$ -переходов. В этом случае индикация электрически дефектных элементов ИМ происходит за счет осадка, образующегося в результате восстановительной реакции, идущей на катоде. В качестве электролита используется 1,5%-ный водный раствор хлористого никеля, либо аналогичный раствор с добавкой HF. Кроме того, могут быть использованы водные растворы солей олова, свинца, кобальта и других металлов, нормальные электродные потенциалы которых близки к нормальному водородному потенциалу. Если электродный потенциал металла выше водородного, осаждение металлических осадков на поверхность кремния будет происходить в результате химического замещения, если ниже водородного — на катоде будет выделяться водород, что затруднит выявление электрически дефектных элементов ИМ.

Электрофоретическое декодирование. Электрический перенос частиц к аноду или катоду в коллоидном растворе носит название электрофореза. Положительно заряженными оказываются частицы гидроокисей металлов, органических красителей, отрицательно заряжены частицы металлов, сульфидов и другие. Явление электрофореза применяется для определения сквозных дефектов в диэлектрических пленках. При электролизе происходит выделение пузырьков водорода в области сквозных пор в диэлектрической пленке и декорирование поверхности вокруг дефектов положительно заряженными коллоидными частицами соли меди. Эти частицы мигрируют через электролит, в качестве которого применяется ацетон или метиловый спирт, от медного анода под влиянием напряжения от 10 до 100 В. При декорировании область вокруг дефекта остается чистой, а медь осаждается кольцом на некотором расстоянии, что объясняется выделением водорода непосредственно в месте дефекта. Метод разрушающий, так как выделяющийся водород создает достаточное для разрыва окисла давление и в месте сквозной поры обнажается участок кремниевой поверхности.

Методы электрохимической автографии (электрографии). Методы электрохимической автографии, использующие контактную печать, основаны на явлении изменения окраски электролита заключенного в пористом слое материала или «засветки» фотослоя при локальном прохождении электрического тока через дефектные места. В связи с этим различают методы цветных реакций и электрографические с регистрацией на фотобумагу.

Рис. 4.30. Вид устройства для электрографии:

1 — анод (нержавеющая сталь); 2 — исследуемая пластина; 3 — слой диэлектрика; 4 — белый мембранный фильтр, пропитанный электролитом; 5 — тканевая прокладка, пропитанная электролитом; 6 — катод (нержавеющая сталь)



Примером метода цветных реакций является метод, в котором в качестве электролита используется раствор солянокислого бензидина. Этот метод применяется для обнаружения пор в диэлектрических пленках. Полупроводниковая пластина накладывается диэлектрическим покрытием на белый мембранный фильтр, пропитанный раствором электролита. При приложении напряжения к ячейке (рис. 4.30) бензидин на проводящих участках (поры в диэлектрике) превращается в продукт темно-синего цвета. После проведения процесса электрохимической автографии на фильтровальной бумаге получается зеркальное изображение сквозных дефектов в виде темных пятен, форма и размер которых точно соответствует дефектам в диэлектрической пленке.

Отличие методов электрографии с регистрацией на фотобумаге от вышеприведенного метода заключается в том, что можно применять фотобумагу без токсичных электролитов и затем стандартным химическим способом проявлять изображение дефектов.

4.7. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕСТ-СТРУКТУРЫ

Качество и надежность полупроводниковых ИМ определяется совершенством конструкции, обработанностью и контролируемостью производственных процессов. В отличие от дискретных приборов элементы ИМ не могут быть испытаны индивидуально. ИМ испытывается как функциональная система. При этом источники ненадежности или отказов остаются скрытыми в конструкции и обычно проявляются позже в процессе эксплуатации. Поэтому для управления качеством производственных процессов необходимы новые методы. Один из них состоит в том, что в процессе производства вводятся тестовые структуры, близкие по конструктивным параметрам к элементам ИМ. К основным задачам, которые можно решать с помощью тестовых структур при серийном производстве ИМ, относятся:

- контроль качества элементов ИМ и пластины в целом;
- контроль стабильности технологического процесса по воспроизводимости электрофизических параметров и по проценту выхода годных изделий;
- исследование дефектов структуры и различных механизмов отказа и корректировка технологического процесса;

прогнозирование надежности путем испытания тестовых структур на безотказность и длительную наработку.

В тестовые структуры могут быть введены элементы, использующиеся как для промежуточного контроля технологических процессов, так и для последующего выявления связи между причинами отказов и технологическим процессом.

Тестовые структуры — это конструктивные элементы, расположенные в одном или нескольких слоях, не входящих в состав микросхем, выполненные с использованием шаблонов и позволяющие определять их электрические, физические или геометрические параметры. Элемент микросхемы с дополнительными контактами площадками для измерения его электрических параметров называют вспомогательной тестовой структурой. Кристалл, содержащий только тестовые структуры, называют тестовым кристаллом; полупроводниковую пластину с такими кристаллами — тестовой пластиной; полупроводниковую пластину с нанесенными на ее поверхность слоями (легированными, эпитаксиальными, диэлектрическими, поликремниевыми, металлическими и т. д.) без сформированных на ней тестовых структур — контрольной пластиной. На контрольной пластине обычно определяют параметры нанесенного слоя до проведения фотолитографической операции, в то время как на тестовой определяют параметры слоя после проведения фотолитографических операций.

На кристалле микросхемы помещается небольшое число тестовых структур (транзистор, резистор, контактное соединение и т. д.). На тестовом кристалле можно разместить большое число элементов схемы и большемерные тестовые структуры для оценки причин дефектности, отказов элементов. При проектировании тестового кристалла для экономии площади кристаллов тестовые структуры размещают с максимально допустимой плотностью. При этом размеры и расстояния между контактными площадками определяются используемыми зондовыми устройствами. Тестовые кристаллы на пластине размещаются в виде строки или столбца. На этапе разработки технологических процессов изготовления ИМ целесообразно применять тестовые пластины. По мере отработки технологических операций их контроль может проводиться по тестовым кристаллам. При достижении стабильного уровня технологии число тестовых кристаллов может быть уменьшено.

Тестовые структуры используются при межоперационном контроле и при проверке производственного процесса. Межоперационный контроль пластин по тестовым структурам сводится к оценке качества пластин после основных технологических операций для своевременного обнаружения брака, исключения пластин из технологического процесса или корректировки режимов последующих технологических операций для исправления брака; а также к получению информации о результатах основных технологических процессов для контроля их стабильности и воспроизводимости параметров ИМ и установления причин брака пластин.

Этот контроль используется для исследования параметров элементов на различных операциях, определения основных операций, «ответственных» за брак, для разработки математических моделей технологических процессов, для исследования степени однородности распределения параметров элементов на пластине, различных пластин партии. Для решения этих задач необходимо измерять на промежуточных операциях множество параметров, описывающих физическую структуру отдельных областей ИМ, например; толщину диэлектрических слоев, плотность зарядов в них, поверхностные концентрации примесей в различных областях полупроводниковой подложки, удельные сопротивления разводок различных уровней, контактные сопротивления, плотность дефектов в диэлектрических слоях и т. д.

Контроль качества изготовления партии одновременно изготавливаемых пластин осуществляется также с помощью контрольных пластин (пластин-спутников), на которых измеряются поверхностные сопротивления, толщины диффузионных слоев и различных пленок и т. д.

Необходимо отметить, что большинство дефектов не может быть обнаружено при визуальном контроле и существующими методами непосредственного измерения электрофизических параметров, поэтому возникает необходимость применения форсированных режимов, ускоренных испытаний с целью стимуляции развития в более короткие сроки различных механизмов отказа, имеющих в дефектных ИМ. Основная роль тестовых структур — уменьшение спектра дефектов, ослабление действия различных механизмов отказов и, таким образом, повышение запаса прочности ИМ при различных нагрузках.

Методику выявления дефектов с помощью тест-структур рассмотрим на примере МДП ИМ. Электрофизические характеристики МДП ИМ во многом зависят от качества слоя SiO_2 и поверхностных состояний слоя SiO_2 на границе с кремнием. Для оценки свойств слоя окисла используется тестовая структура, содержащая МДП-конденсаторы. Надежность МДП ИМ с тонким подзатворным окислом в значительной степени обусловлена пористостью окисла, образуемой в результате некачественного процесса фотолитографии, инородных частиц, царапин, а также качеством слоя окисла. Наличие проводящих дорожек в диэлектрике приводит к возникновению электрических утечек, шумов или к короткому замыканию. Загрязнения в виде подвижных ионов в подзатворном окисле могут вызвать нестабильность порогового напряжения, выявляемого после температурного воздействия. Наиболее распространенным методом контроля качества подзатворного окисла является метод измерения на тестовых структурах вольт-фарадной характеристики. По виду вольт-фарадной характеристики определяют возможные источники дефектности технологических процессов. Для оценки других параметров активного контроля технологических процессов, качества и надежности, применяется более сложная тестовая структура, содержа-

шая МДП-транзистор. Данная тестовая структура позволяет измерить такие параметры, как пороговое напряжение периферийного окисла, стабильность порогового напряжения, ток насыщения стока, токи утечки и контактное сопротивление, пробивные напряжения слоев окисла и диффузионных переходов.

4.8. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

К электрофизическим методам контроля относятся: электропараметрические, рекомбинационного излучения, шумовой экзотронной эмиссии и др. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Электропараметрические методы. Эти методы основаны на измерении параметров или характеристик элементов ИМ, что позволяет получить большой объем информации о дефектах структур и эффективно контролировать технологический процесс. К числу этих методов относится измерение вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, удельного и поверхностного сопротивления, пробивных напряжений и т. п. Характерной особенностью этих методов контроля является использование тест-структур.

Свойства границы раздела диэлектрик-полупроводник (концентрация носителей заряда на поверхности полупроводника, поверхностный потенциал, величина и стабильность заряда в диэлектрике, плотность поверхностных состояний, времена релаксации поверхностных состояний) определяют ряд важных параметров элементов ИМ: коэффициент усиления биполярных транзисторов, пробивные напряжения и токи утечки пассивированных окислом $p-n$ -переходов, пороговое напряжение и крутизну характеристик МДП-транзисторов, стабильность, надежность и срок службы.

Контроль свойств границы раздела диэлектрик — полупроводник осуществляется путем измерения вольт-фарадных характеристик. Такая характеристика МДП-структуры, изготовленной на основе полупроводника n -типа, показана на рис. 4.31. Структуру МДП можно представить себе как две емкости, включенные последовательно: одна — емкость диэлектрика, другая — емкость полупроводника, образующаяся за счет области пространственного заряда. Емкость диэлектрика не зависит от напряжения, а ем-

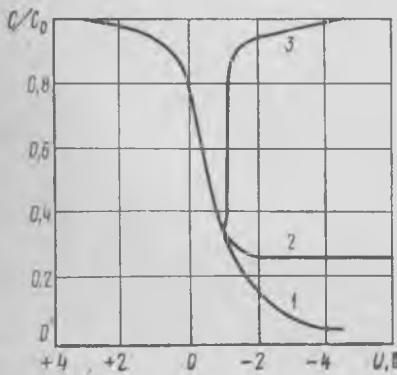


Рис. 4.31. Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры:

1 — характеристика снята на высокой частоте измерения при быстром увеличении напряжения смещения; 2 — характеристика снята на высокой частоте измерения при медленном увеличении напряжения смещения; 3 — характеристика снята при низкой частоте измерения при медленном увеличении напряжения смещения

кость полупроводника зависит от величины и полярности напряжения.

При подаче на металлический электрод (затвор) большого положительного напряжения смещения под действием электрического поля в приповерхностном слое полупроводника индуцируется отрицательный заряд, т. е. происходит накопление электронов. В результате этого объемный подвижный заряд, а значит, и изменение приложенного напряжения, т. е. емкость полупроводника, становится большим, и поэтому емкость системы определяется емкостью диэлектрика. При уменьшении положительного напряжения смещения концентрация электронов у поверхности уменьшается. Одновременно уменьшается емкость полупроводника, начиная с некоторой величины напряжения (для идеальной структуры 1... 1,5 В) она становится сравнимой с емкостью диэлектрика; ее уменьшение ведет к уменьшению емкости всей системы. Емкость системы продолжает уменьшаться при достижении нуля и при росте отрицательного напряжения смещения. В этом случае электроны под действием электрического поля уходят из приповерхностного слоя полупроводника. Возникает слой объемного заряда, созданный положительно заряженными неподвижными ионами доноров. Кроме того, в приповерхностном слое происходит накопление неосновных носителей заряда — дырок. Однако концентрация дырок при малом отрицательном напряжении смещения незначительна по сравнению с концентрацией доноров и объемный заряд создается в основном неподвижными ионами доноров.

При последующем увеличении отрицательного напряжения смещения вид вольт-фарадной характеристики зависит от частоты, на которой измеряется емкость, и от скорости подачи напряжения смещения на структуру. Это объясняется различной способностью основных и неосновных носителей заряда реагировать на изменение переменного измерительного сигнала и скорости изменения напряжения смещения. Кривая 3 вольт-фарадной характеристики снята при низкой частоте измерения при медленном увеличении напряжения смещения. Вид этой кривой можно объяснить следующим образом. При увеличении отрицательного напряжения смещения идет накопление дырок и емкость полупроводника также быстро возрастает. Результирующая емкость системы при больших отрицательных напряжениях смещения ограничивается последовательно включенной емкостью диэлектрика.

Кривая 2 снята на высокой частоте измерения при медленном увеличении напряжения смещения. При измерениях емкости на высоких частотах неосновные носители (дырки) не успевают следовать за изменением приложенного высокочастотного сигнала. Это связано с тем, что процесс перераспределения неосновных носителей заряда может происходить с частотой, обратной времени генерации и рекомбинации неосновных носителей заряда. Такая предельная частота в зависимости от времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике может меняться от 10 до 10^5 Гц. Если же период высокочастотного измерительного сигнала

меньше времени жизни неосновных носителей заряда, то дырки перестают реагировать на измерительный сигнал и их заряд не влияет на величину емкости полупроводника. Величина емкости в этом случае будет определяться только емкостью, обусловленной изменением заряда обедненного слоя. Однако дырки под действием медленно изменяющегося напряжения смещения по-прежнему накапливаются в приповерхностной области полупроводника. Образуется инверсный слой, вследствие этого расширение области объемного заряда ионизированных доноров прекращается. Следовательно, емкость полупроводника, а значит и всей системы, остается постоянной с изменением напряжения смещения. При этом минимальная емкость однозначно зависит от концентрации доноров на глубине, равной ширине обедненного слоя, и может служить для определения этой концентрации и ее распределения по глубине.

Кривая I вольт-фарадной характеристики снята на высокой частоте измерения при быстром увеличении напряжения смещения. Так как смещение на структуре изменяется очень быстро, то объемный заряд неосновных носителей не успевает образоваться и емкость полупроводника создается только обедненным слоем. С увеличением напряжения смещения область объемного заряда непрерывно расширяется, а емкость системы уменьшается.

Для исследования и контроля МДП-структур используют вольт-фарадную характеристику, снятую при медленном изменении напряжения смещения и высокой частоте измерительного сигнала.

Вольт-фарадные характеристики реальных МДП-структур могут существенно отличаться от теоретической характеристики идеальной структуры. Это объясняется следующими факторами:

- а) несовпадением работ выхода материала и полупроводника;
- б) наличием на границе раздела диэлектрик — полупроводник поверхностных состояний;
- в) наличием в слое диэлектрика неподвижного объемного заряда.

Наличие контактной разности потенциалов между полупроводником и металлом вызывает сдвиг вольт-фарадной характеристики вдоль оси напряжения без изменения ее формы. Если контактная разность потенциалов положительна, то характеристика смещается параллельно самой себе в сторону положительных напряжений, если отрицательна, то в сторону отрицательных напряжений. Такое же влияние оказывает заряд, возникающий в диэлектрике в процессе его получения.

Поверхностные состояния, заполнение которых зависит от напряжения смещения, вызывают сдвиг и искажение (изменение наклона) вольт-фарадной характеристики. Сопоставляя реальную и идеальную характеристики МДП-структуры, можно определить ряд параметров, характеризующих свойства раздела диэлектрик — полупроводник.

Метод измерения m -характеристик основан на выявлении потенциально ненадежных элементов ИМ по виду входной вольт-ампер-

ной характеристики при малых уровнях инжекции. Ток, протекающий через $p-n$ -переход, может быть разделен в общем случае на четыре составляющие: диффузионный ток; рекомбинационно-генерационный ток в объеме перехода; ток рекомбинации на поверхности перехода; поверхностный канальный ток. Эти составляющие чувствительны к различным параметрам элементов ИМ и преобладают на различных участках. При прямом смещении перехода превалирует ток рекомбинации. Если при малых напряжениях (малых уровнях инжекции) рекомбинационный ток может составлять значительную часть суммарного прямого тока $p-n$ -перехода, то с ростом напряжения он неизбежно уступает эту роль диффузионному току. Таким образом, для реального $p-n$ -перехода ток определяется следующим выражением:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{gU}{mkT}} - 1 \right), \quad (4.14)$$

где I_0 — обратный ток $p-n$ -перехода; g — заряд; k — постоянная Больцмана; T — температура, K ; m — коэффициент, с помощью которого учитывается влияние рекомбинационно-генерационных составляющих тока $p-n$ -перехода в объеме и на поверхности $p-n$ -перехода при малых уровнях инжекции (переходы, имеющие относительно большие значения m , обладают большими балластными токами и менее стабильны. Коэффициент m характеризует качество поверхности $p-n$ -перехода, так как поверхность полупроводника имеет больше рекомбинационных центров, чем его объем.)

Глава 5. ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

Условия проведения испытаний и перечень контролируемых параметров ИМ оговариваются в стандартах и общих технических условиях на изделие.

По характеру воздействующей на ИМ нагрузки испытания подразделяются на *механические, климатические, электрические и радиационные*.

Все испытания могут быть разделены на *исследовательские и контрольные*.

Исследовательские испытания проводят для изучения определенных свойств изделий. Существуют исследовательские испытания:

граничные, определяющие зависимость между предельно допустимыми значениями параметров изделий и эксплуатационными. При граничных испытаниях ИМ оцениваются предельные на-

грузки на изделия, на основании которых определяются безопасные величины нагрузок при эксплуатации (не вызывающие ухудшения качества и надежности применяемых изделий), виды нагрузок и режимы испытаний для выявления потенциально ненадежных изделий, виды и механизмы наиболее характерных отказов;

сравнительные, проводимые для сравнения характеристик качества двух или более типов изделий в идентичных условиях;

ускоренные, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации в более короткий срок, чем в предусмотренных условиях и режимах эксплуатации.

Контрольные испытания проводятся для контроля качества изделий. К ним относятся:

приемосдаточные, проводимые при приемочном контроле качества каждой предъявляемой партии. При этом проверяются либо все изделия, входящие в партию, либо их часть в зависимости от того, являются ли испытания разрушающими или нет; последовательность приемосдаточных испытаний, принятая в стандартах ТУ, предусматривает первоочередное выявление наиболее грубых дефектов, таких, как ошибки маркировки, повреждение выводов, наличие коротких замыканий и обрывов;

периодические, проводимые с целью периодического контроля качества изделий и проверки стабильности технологического процесса их производства; их периодичность — обычно каждый месяц или квартал, а также в начале выпуска изделий на заводе-изготовителе и при возобновлении производства после временного прекращения; результаты периодических испытаний распространяются на все партии, выпущенные в течение определенного времени. Периодические испытания включают в себя такие виды испытаний, при которых вырабатывается часть ресурса (длительная вибрация, многократные удары, термоциклы), и сравнительно дорогостоящие испытания (такие, как испытания на работу при повышенной температуре и контроль электрических параметров ИМ), поэтому они всегда являются выборочными;

типовые проводятся после внесения изменений в конструкцию или технологию изготовления изделий для оценки эффективности и целесообразности внесенных изменений. Эти испытания являются выборочными, так как относятся к разрушающим, предназначены для оценки стойкости конструкции при различных видах механических и климатических воздействий, эти испытания проводятся сравнительно редко — перед началом серийного производства и в случае изменения конструкции изделий или применяемых материалов;

испытания на надежность, проводимые для определения или для оценки значений показателей надежности продукции в заданных условиях;

ресурсные испытания, включающие испытания на долговечность, сохраняемость, и периодические. Они проводятся для опре-

деления или оценки технического ресурса продукции на этапе опытно-конструкторской разработки (ОКР) и при модернизации конструкции или технологии ИМ. На основании ресурсных испытаний принимается решение по улучшению качества и повышению надежности ИМ.

При выборе видов и величины нагрузок в каждой категории испытаний следует учитывать многообразие условий возможного использования изделия, механизмы его отказов и желательность проверки изделия в условиях, приближающихся к наиболее тяжелым, встречающимся при эксплуатации ИМ в аппаратуре.

Для контроля соответствия ИМ требованиям нормативно-технической документации (НТД) в стандартах установлено обязательное проведение нескольких категорий испытаний.

Квалификационные испытания проводят для оценки готовности производства к выпуску вновь разработанного изделия и соответствия его НТД. В состав этих испытаний включают все виды испытаний, предусмотренных в НТД, за исключением проверки сохраняемости.

Готовые изделия, предъявляемые к приемным испытаниям, должны быть предварительно подвергнуты цехом-изготовителем сплошному контролю по характеристикам, отнесенным в НТД к категории приемно-сдаточных испытаний. При необходимости также предусматривается сплошной или выборочный контроль по отдельным другим характеристикам из числа установленных НТД. Проверенные цехом-изготовителем изделия предъявляются на приемку, как правило, партиями. Каждая партия должна иметь соответствующую сопроводительную документацию. Испытания проводятся по специально разработанной программе испытаний (ПИ), в которой в общем случае должны быть предусмотрены: порядок подготовки к испытаниям (выдержка в нормальных условиях и т. п.);

способ установки и крепления изделий при испытаниях;

условия проведения испытаний (температура, влажность, ускорения, продолжительность испытаний);

электрический режим испытаний (напряжение, ток, частота и т. п.);

меры предосторожности при пайке или сварке выводов;

порядок включения наибольших напряжений.

Помимо испытаний, проводимых изготовителем, ИМ могут подвергаться проверке при входном контроле у потребителя. При входном контроле не должны проводиться термоудары, термоциклы, длительная вибрация, механические удары, многократные проверки изделий испытательным напряжением и ресурсные испытания других видов. Недопустимы проверки изделий в режимах, отличающихся от указанных в ЧТУ. Используемая при входном контроле измерительная, испытательная аппаратура и стенды должны соответствовать требованиям на аналогичную аппаратуру и стенды поставщика.

5.2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Влияние окружающей среды на ИМ. ИМ в процессе хранения и эксплуатации подвергаются воздействию окружающей среды. Климатические условия представляют собой совокупность естественных и искусственно создаваемых воздействий, являющихся следствием функционирования РЭА и расположенных рядом технических объектов.

В табл. 5.1 приведена обобщенная характеристика естественных климатических условий эксплуатации изделий в зависимости от климатической зоны эксплуатации РЭА, способа размещения РЭА на объекте и способа установки изделий в РЭА (категории размещения изделий).

Под влиянием климатических факторов в материалах ИМ протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их свойства и способствующие отказам. Данные о характере влияния климатических воздействий на ИМ обобщены в табл. 5.2. Опыт эксплуатации РЭА показывает, что для ИМ наиболее опасны воздействия высокой и низкой температур, повышенной влажности в сочетании с повышенной температурой, а также воздействие резких колебаний температуры.

Повышенная температура окружающей среды является одним из основных климатических воздействий, обуславливающих нестабильность и деградацию параметров ИМ и их отказы.

Существенное влияние повышенной температуры на стабильность параметров ИМ обусловлено сильной температурной зависимостью основных электрофизических параметров материалов. С повышением температуры изменяется удельная электропроводность металлов, полупроводников и диэлектриков, изменяются диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков. Эти изменения обычно учитываются соответствующими температурными коэффициентами сопротивления резисторов, емкости конденсаторов, температурной зависимостью обратных токов $p-n$ -переходов, коэффициента передачи тока транзисторов.

Стандартизация климатических требований при испытании изделий электронной техники. Интегральные микросхемы эксплуатируются в аппаратуре при разнообразных воздействиях внешних факторов. Многообразие условий эксплуатации аппаратуры определило целесообразность их моделирования в виде стандартного ряда объективных требований, норм и методов испытаний. Соответствие ИМ этим требованиям обеспечивает высокую надежность ИМ в тех классах аппаратуры, для которых они создавались. В ряде случаев для повышения надежности принимают меры по индивидуальной или общей защите ИМ в РЭА от внешних воздействий в аппаратуре: амортизацией, термостатированием, герметизацией и т. п.

Таблица 5.1. Обобщенная характеристика естественных климатических условий эксплуатации изделий

Виды климатических воздействий	Зона эксплуатации и категории размещения изделий											
	Умеренный климат				Холодный климат				Тропический климат			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Температура воздуха, К: верхнее значение нижнее значение	313	313	313	308	313	313	313	308	318	318	318	318
	233	233	233	274	213	213	213	274	263	263	263	274
Сочетание относительной влажности воздуха, % и температуры, К: верхнее значение	100	100	98	80	100	100	98	80	100	100	98	98
	298	298	298	298	298	298	298	298	308	308	308	308
Интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт/м ² : верхнее значение	1125	—	—	—	1125	—	—	—	1125	—	—	—

Продолжение табл. 5.1

Виды климатических воздействий	Зона эксплуатации и категории размещения изделий							
	Климат на суше				Климат на суше и на море			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Температура воздуха, К: верхнее значение нижнее значение	318	318	318	318	318	318	318	318
	213	213	213	274	213	213	213	203
Сочетание относительной влажности воздуха, % и температуры, К: верхнее значение	100	100	98	98	100	100	98	98
	308	308	308	308	308	308	308	308
Интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт/м ² : верхнее значение	1125	—	—	—	1125	—	—	—
Максимально возможная температура нагрева черной матовой поверхности, К	363	—	—	—	363	—	—	—
Колебания температуры воздуха за 8 ч, К	313	303	293	—	313	303	293	—

Продолжение табл. 5.1.

Виды климатических воздействий	Зона эксплуатации и категории размещения изделий											
	Умеренный климат				Холодный климат				Тропический климат			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Максимально возможная температура нагрева черной матовой поверхности, К	353	—	—	—	252	—	—	—	363	—	—	—
Колебания температуры воздуха за 8 ч, К	313	303	293	—	313	303	293	—	313	303	293	—
Интенсивность дождя, мм/мин: верхнее значение	3	—	—	—	3	—	—	—	5	—	—	—
Динамическое воздействие пыли и песка	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—
Выпадение инея	+	+	×	—	+	+	×	—	+	+	+	+
Плесневые грибы	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Наличие морской соли в воздухе, мг/м ² -сут: верхнее значение	2	2	—	—	2	2	—	—	2	2	—	—

Окончание табл. 5.1.

Виды климатических воздействий	Зона эксплуатации и категории размещения изделий							
	Климат на суше				Климат на суше и на море			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Интенсивность дождя, мм/мин: верхнее значение	5	—	—	—	5	—	—	—
Динамическое воздействие пыли и песка	+	—	—	—	+	—	—	—
Выпадение инея	+	+	×	—	+	+	×	—
Плесневые грибы	+	+	+	+	+	+	+	+
Наличие морской соли в воздухе, мг/м ² -сут: верхнее значение	2	2	—	—	2000	2000	—	—

Обозначения: 1 — изделия наружного монтажа РЭА, размещаемой на открытом воздухе; 2 — изделия наружного монтажа РЭА, размещаемой под навесом, изделия внутреннего монтажа РЭА, размещаемой на открытом воздухе; 3 — изделия РЭА, размещаемой в помещениях без искусственного регулирования климатических условий; 4 — изделия РЭА, размещаемой в помещениях с искусственным регулированием климатических условий; «+» — наличие фактора; «—» — отсутствие фактора; «×» — фактор может иметь место.

Стандартизация двух основных групп воздействующих факторов — механических и климатических — осуществлена в 1959 г. в виде межведомственной нормы ГО.005.015 «Изделия электронной техники и электротехники». В 1971 г. утвержден ГОСТ 16962—71 «Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний», в который с уточнениями вошли требования и методы испытаний, установленные в межведомственной норме ГО.005.015.

В стандарте воздействующие факторы подразделены на две группы — механические и климатические, соответственно установлены и методы испытаний.

Требования к электронным приборам в отношении воздействия внешних факторов и соответствующих методов испытаний, установленных ГОСТ 16962—71, применяются:

при составлении технических заданий на разработку и модернизацию изделий;

при разработке программ испытаний;

в разработках общих технических условий и стандартов на классы (группы) изделий, регламентирующих требования и методы испытаний, в частности, механических и климатических воздействий;

в разработках технических условий в случае отсутствия указанных выше документов на классы (группы) изделий.

К климатическим воздействиям, в обобщенной форме отражающим условия эксплуатации, относятся воздействия повышенной и пониженной температур, повышенной влажности, пониженного атмосферного давления, повышенного давления воздуха или другого газа, воздействия пыли, инея, росы, солнечной радиации, плесневых грибов, соляного тумана и других факторов в соответствии с особенностями эксплуатации изделия.

Рассмотрим значения параметров, установленные в ГОСТ 16962—71, на климатические факторы.

Температура воздуха или другого газа при эксплуатации. Для стандартизированных верхних (плюсовых) и нижних (минусовых, кроме I степени жесткости) значений температуры воздуха или другого газа при эксплуатации установлены 15 и 9 степеней жесткости в интервале температур от 313 до 773 К и от 274 до 188 К соответственно. Их значения приведены в табл. 5.3.

Температура воздуха или другого газа при транспортировании и хранении. Для стандартизированных верхних и нижних значений температуры окружающей среды при транспортировании и хранении установлены II и III степени жесткости соответственно (табл. 5.3) в интервале от 333 до 188 К.

Влажность. Стандартизированные значения относительной влажности при различных температурах приведены в табл. 5.4.

Для электронных приборов, предназначенных для внутреннего монтажа в аппаратуре, конструктивное оформление которой исключает возможность конденсации влаги на этих элементах, вмес-

Вид климатического воздействия	Основные процессы в материалах, обусловленные воздействием	Возможные результаты воздействия
Повышенная температура	Изменение электрофизических свойств материалов (электропроводности, диэлектрических свойств и т. д.). Массоперенос (взаимная диффузия материалов, электродиффузия). Ионизация примесей, миграция примесей по поверхности и в объеме материалов. Изменение физико-механических свойств материалов (расширение, размягчение, обезгаживание, деформация и т. п.). Химические реакции в материалах. Химическая коррозия металлов. Поверхностное разрушение металла вследствие химического взаимодействия с газовой средой	Нестабильность и деградация электрических параметров. Возникновение тепловой неустойчивости и теплового пробоя диэлектриков конденсаторов и <i>p-n</i> -переходов полупроводниковых ИМ. Потеря герметичности корпуса. Изменение механических характеристик
Повышенная влажность воздуха	Поглощение паров воды из атмосферы поверхностью материала (адсорбция). Поглощение паров воды материалом (сорбция): неактивированная сорбция (характерна для неорганических пористых материалов) — адсорбция на стенках открытых пор и капиллярная конденсация (заполнение водой мелких капилляров и пор на поверхности материала вследствие понижения давления паров воды над мениском в капилляре); активированная сорбция (характерна для органических материалов) — диффузия и растворение паров воды в материале. Проникновение паров воды сквозь органический материал, разделяющий атмосферы с различными концентрациями паров воды; активированная сорбция паров воды материалом из атмосферы, имеющей более высокую концентрацию паров воды; удаление паров воды с поверхности материала в атмосферу с более низкой концентрацией паров воды (десорбция)	Нестабильность и деградация электрических параметров. Обрывы и короткие замыкания металлизации ИМ. Нарушение проводимости тонкопленочных резисторов. Пробой диэлектриков в тонкопленочных конденсаторах
Повышенная влажность воздуха	Изменение электрофизических свойств материалов (увеличение удельной объемной электропроводности, тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков, увеличение токов утечки по поверхности, ионизация примесей, миграция ионов примесей, инверсия заряда). Изменение физико-механических свойств материалов (набухание, уменьшение механической прочности стекол за счет поверхностно-активного действия паров воды, уменьшение адгезии — прочности взаимного	Изменение механических характеристик, нарушение механической целостности конструкции, потеря герметичности. Коррозия выводов, корпуса, металлизации и внутренних проволочных соединений. Повреждение лакокрасочных покрытий
Пониженная температура	Изменение электрофизических свойств материалов. Изменение физико-механических свойств материалов (сжатие, растрескивание кристаллов ИМ, деформация, охрупчивание материалов). Электрохимическая коррозия металлов в результате конденсации влаги (образование росы, инея)	Деградация электрических параметров, обрывы и короткие замыкания. Изменение механических характеристик. Нарушение механической целостности, потеря герметичности. Коррозия внутренних проволочных соединений и металлизации ИМ, имеющих вакуум-плотную герметизацию
Резкие колебания температуры	Изменение электрофизических параметров материалов. Появление механических напряжений в местах сопряжения неоднородных материалов (кремний, окись кремния — металлизация, металл — полимер и т. д.). Изменение размеров, деформации, растрескивание.	Нестабильность и деградация электрических параметров. Обрывы и короткие замыкания. Перебегающие отказы. Потеря герметичности, изменение механических характеристик
Низкое атмосферное давление	Изменение электрофизических свойств воздуха (уменьшение плотности, уменьшение электрической прочности воздуха). Возникновение механических напряжений вследствие разности давлений внутри и снаружи корпуса ИМ	Ухудшение условий теплообмена, перегрев, возникновение тепловой неустойчивости и теплового пробоя. Появление дуги, ползучего разряда, пробоя по поверхности изоляционных промежутков. Физическое разрушение заливочных составов
Плесневые грибы	Изменение электрофизических параметров материалов. Нарушение адгезии материалов	Коррозия корпуса, выводов, потеря герметичности, отслаивание лакокрасочных покрытий
Морские соли в атмосфере	Электрохимическая, контактная коррозия металлов	Нестабильность и деградация электрических параметров. Коррозия корпуса, выводов

коррозия металлов — процесс растворения металла в присутствии ионных загрязнений в адсорбированной пленке паров воды (электролита) вследствие образования гальванических микроэлементов на поверхности металла (неоднородность структуры металла, локальные механические напряжения в металле). Электролитическая коррозия металлов — процесс разрушения металлов в присутствии электролита под действием внешнего электрического поля. Контактная коррозия металлов — процесс разрушения металлов в присутствии электролита вследствие образования гальванической пары при контакте металлов с различными электрохимическими потенциалами

Таблица 5.3. Стандартизированные значения температуры воздуха или другого газа при эксплуатации

Воздействующие факторы	Верхнее значение	Степень жесткости	Нижнее значение	Степень жесткости
Температура воздуха или другого газа при эксплуатации, К	313	I	274	I
	318	II	268	II
	323	III	263	III
	328	IV	248	IV
	333	V	243	V
	243	VI	233	VI
	358	VII	228	VII
	373	VIII	213	VIII
	398	IX	188	IX
	428	X	—	—
	473	XI	—	—
	523	XII	—	—
	588	XIII	—	—
	673	XIV	—	—
	773	XV	—	—
Температура воздуха или другого газа при транспортировании и хранении, К	323	I	223	I
	333	II	213	II
	—	—	188	III

то указанных в табл. 5.4 верхних значений относительной влажности 100% с конденсацией влаги указывают верхнее значение 98% без конденсации влаги.

Среднемесячное значение влажности рекомендуется использовать при оценке возможных в течение срока службы и хранения

Таблица 5.4. Стандартизированные значения относительной влажности при различных температурах

Верхнее значение * относительной влажности	Среднемесячное значение в наиболее теплый и влажный период и продолжительность его воздействия в течение года		
	Значение	Продолжительность, мес.	Степень жесткости
80% при 298 К без конденсации влаги	65% при 293 К	12	I
98% при 298 К без конденсации влаги	80% при 293 К	2	II
100% при 298 К с конденсацией влаги	80% при 293 К	6	III
100% при 298 К с конденсацией влаги	80% при 293 К	6	IV
98% при 308 К без конденсации влаги	90% при 293 К	12	V
100% при 308 К с конденсацией влаги	80% при 300 К	3	VI
100% при 308 К с конденсацией влаги	90% при 300 К	12	VII
		12	VIII

* При более низких температурах относительная влажность ниже.

Таблица 5.5

Степень жесткости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Давление, Па	$7 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^9$	660	130	0,13	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$

Изменений параметров изделий, связанных со сравнительно длительными процессами — диффузией водяных паров, коррозией, электролизом, гидролизом и др.

Повышенное и пониженное давление. Одним из климатических воздействующих факторов является пониженное атмосферное давление, способствующее возникновению электрического разряда между электродами. К числу климатических факторов отнесено также воздействие повышенного давления воздуха или другого газа.

Для пониженного атмосферного давления установлены 10 степеней жесткости (табл. 5.5).

Указанные давления по ГОСТ 4401—81 на стандартную атмосферу соответствуют высотам над уровнем моря до 300 км (табл. 5.6).

Для повышенного давления воздуха или другого газа стандартизованы две степени жесткости:

I степень — давление $14,715 \cdot 10^4$ Па

II степень — давление $29,43 \cdot 10^4$ Па.

Если к изделию не предъявляются требования по повышенному или пониженному давлению, то оно должно работать при давлении $(9 \dots 11) \cdot 10^4$ Па.

Смена температур, пыль, солнечная радиация, плесневые грибы, соляной туман. Количественные нормы на параметры указанных факторов в ГОСТ 16962—71 стандартизованы лишь для воздействия пыли и солнечной радиации. В отношении остальных климатических факторов установлено, что приборы должны быть

Таблица 5.6

Геометрическая высота над уровнем моря, м	Барометрическое давление (округленное значение), Па	Геометрическая высота над уровнем моря, м	Барометрическое давление (округленное значение), Па
3000	$7 \cdot 10^4$	46 000	$1,3 \cdot 10^2$
5100	$5,3 \cdot 10^4$	64 000	13
10 000	$2,6 \cdot 10^4$	90 000	$1,8 \cdot 10^{-1}$
15 000	$1,2 \cdot 10^4$	120 000	$2,6 \cdot 10^{-3}$
26 400	$2 \cdot 10^3$	200 000	$1,4 \cdot 10^{-3}$
34 000	$6,6 \cdot 10^2$	300 000	$1,6 \cdot 10^{-4}$

работоспособными при или после их воздействия в зависимости от условий эксплуатации, транспортирования и хранения.

Воздействия пыли подразделены на статическое и динамическое. Для динамического воздействия пыли нормированы два параметра — размеры частиц (кварцевого песка) не более $2 \cdot 10^{-4}$ м, их скорость 15 м/с (верхнее значение).

Солнечная радиация характеризуется верхними значениями интегральной плотности теплового потока 1125 Вт/м^2 ($0,027 \text{ кал/(см}^2 \cdot \text{с)}$), в том числе плотности потока ультрафиолетовой части спектра (длина волн $280 \dots 400 \text{ нм}$) 42 Вт/м^2 ($0,0010 \text{ кал/(см}^2 \cdot \text{с)}$).

5.3. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Общая методология климатических испытаний. Климатические испытания принято представлять последовательностью следующих операций (этапов):

предварительная выдержка (стабилизация свойств изделия), первоначальные измерения параметров и внешний осмотр изделий;

установка изделий в камере, выдержка их в условиях испытательного режима и извлечение изделий из камеры, восстановление (конечная стабилизация свойств);

заключительные измерения параметров и внешний осмотр изделий.

Предварительная выдержка проводится, как правило, в нормальных климатических условиях: при температуре воздуха $(298 \pm 10) \text{ К}$, относительной влажности $45 \dots 75\%$, атмосферном давлении $(0,86 \dots 1,06) \cdot 10^5 \text{ Па}$ с целью устранения или частичной нейтрализации воздействия на изделия предыдущих условий.

Предварительная выдержка осуществляется в условиях, обеспечивающих воспроизводимую толщину пленки влаги, адсорбированной на поверхности изделия посредством поддержания температуры (допускаемое отклонение $\pm 1 \text{ К}$) при относительной влажности $73 \dots 77\%$.

Продолжительность предварительной выдержки определяется временем, достаточным для установления теплового равновесия изделий с окружающей средой. Обычно для ИМ это время не превышает 2 ч. По окончании предварительной выдержки изделия подвергают внешнему осмотру. К контролирующему персоналу обычно предъявляют требования остроты зрения не менее 0,8, нормального цветоощущения, освещение рабочего места должно быть $50 \dots 100 \text{ лк}$.

Рекомендуется выполнять первоначальные и заключительные измерения параметров изделий при одних и тех же значениях температуры и влажности окружающей среды.

При установке изделий в камере обеспечивают свободную циркуляцию воздуха между изделиями, а также между изделиями

и стенками камеры. Если при эксплуатации возможно несколько вариантов положений изделий, то следует выбрать вариант, обеспечивающий наибольшую жесткость испытания. При испытании ИМ без электрической нагрузки их располагают на сетках из капроновых нитей, натянутых на опоры. При испытаниях с электрической нагрузкой ИМ устанавливаются на специальных платах либо используются кассеты, держатели, контактирующие устройства. Металлические части приспособлений обязательно должны иметь антикоррозионные покрытия.

При испытаниях на влагостойчивость допуски на температуру и относительную влажность в камере устанавливаются равными соответственно $\pm 2 \text{ К}$ и $\pm 3\%$. Указанный допуск по температуре включает неравномерность распределения ее по объему камеры, погрешность измерения температуры приборами, а также медленные изменения температуры во времени. Кратковременные изменения температуры на $\pm 2 \text{ К}$ при режиме испытаний 313 К и 90% относительной влажности воздуха явились бы причиной изменения относительной влажности на $\pm 9\%$. В области высоких относительных влажностей уже незначительные изменения температуры могут приводить к выпадению росы (неконтролируемый процесс), что может существенно снизить воспроизводимость результатов испытания. Приведенный пример показывает, насколько важно понимать структуру допусков и четко излагать в методике испытаний требования к точности параметров испытательного режима.

Климатические испытания ИМ проводятся на стадии их разработки (ОКР) и при освоении изделий в серийном производстве, а также в самом серийном производстве для отбраковки потенциально ненадежных изделий (технологические испытания) и контроля стабильности производства (периодические испытания).

Климатические испытания в серийном производстве изделий обычно проводятся периодически (через $1 \dots 3$ мес). Объем климатических испытаний ИМ составляет до 50% всего объема производимых в производстве испытаний.

Режимы и условия испытаний ИМ устанавливаются в зависимости от степени жесткости, которая определяется, в свою очередь, условиями их дальнейшей эксплуатации в РЭА.

Виды климатических испытаний. Виды основных климатических испытаний ИМ и данные о составе климатических испытаний, проводимых на стадии разработки серийного производства, приведены в табл. 5.7. В практике также применяют сложные виды испытаний: комбинированные, когда изделие подвергается одновременному воздействию нескольких факторов, и составные, когда они подвергаются воздействию различных климатических факторов в определенной последовательности. Последовательность климатических испытаний обуславливается целью данных испытаний.

Таблица 5.7. Виды и состав основных климатических испытаний изделий

Вид испытания	Состав испытаний		
	Этап разработки (ОКР) и освоение изделий в серийном производстве	Серийное производство	
		Отбраковочные испытания	Контроль стабильности производства (периодические испытания)
Теплоустойчивость	+	+	+
Холодоустойчивость	+	+	+
Воздействие смены температур	+	+	+
Влагоустойчивость длительная	+	—	н
Влагоустойчивость кратковременная	+	—	+
Воздействие пониженного атмосферного давления	+	—	н
Воздействие повышенного атмосферного давления	+	—	н
Воздействие солнечной радиации	+	—	—
Воздействие соляного тумана	+	—	—
Воздействие пыли и песка	+	—	—
Грибоустойчивость	+	—	—
Воздействие инея и росы	+	—	—
Проверка герметичности	+	+	+
Термоудар		+	

Примечание. Обозначения «+» — испытания проводят; «—» — испытания не проводят; «н» — испытания могут быть проведены, если это предусмотрено НТД на изделия.

В отечественной практике широко применяются два вида сложного испытания: комбинированное испытание на воздействие повышенной температуры и пониженного атмосферного давления, а также составное испытание, называемое *нормализованной климатической последовательностью*, включающее последовательно испытание при повышенной температуре, кратковременное испытание на влагоустойчивость в циклическом режиме (первый цикл), испытания на воздействие пониженной температуры, пониженного атмосферного давления, влагоустойчивость в циклическом режиме (остальные циклы). При этом между любыми из этих испытаний допускается перерыв не более трех суток, за исключением интервала между испытаниями на влагоустойчивость и воздействием пониженной температуры, который не должен превышать 2 ч. Измерения параметров изделий обычно проводятся лишь в начале и конце последовательности.

При проведении научно-исследовательских работ по изучению возможностей изделий и механизмов отказов целесообразно получить как можно больше информации об изделиях до того, как они откажут. В этом случае наиболее сильные климатические воздействия осуществляют в конце испытаний.

Наибольшую информативность и эффективность испытаний при освоении и производстве изделий получают при климатических испытаниях в последовательности, когда следующее испы-

тание усиливает эффект предыдущего (который мог бы остаться незамеченным).

Простые климатические испытания обычно проводятся как на отдельных выборках изделий, так и последовательно на одной выборке. Длительные испытания на влагоустойчивость, воздействие солнечной радиации, соляного тумана, грибоустойчивость обычно проводят на отдельных выборках изделий.

Испытания на теплоустойчивость. Испытания на теплоустойчивость проводят с целью определения способности ИМ сохранять свои параметры и внешний вид в пределах норм технических условий в процессе и после воздействия верхнего значения температуры. Различают испытание под термической нагрузкой для нетеплорассеивающих ИМ, температура которых в процессе эксплуатации зависит только от температуры окружающей среды. Испытание под совмещенной термической и электрической нагрузками проводят для теплорассеивающих ИМ, которые в рабочем состоянии нагреваются за счет выделяемой мощности под действием электрической нагрузки.

При испытании под совмещенной нагрузкой изделия помещают в камеру и испытывают под нормальной или максимально допустимой для данных изделий электрической нагрузкой, соответствующей верхнему значению температуры внешней среды, устанавливаемой в зависимости от степени жесткости испытаний (табл. 5.8).

Время испытания на теплоустойчивость определяется временем, необходимым для достижения испытываемым изделием теплового равновесия либо временем выдержки при этой температуре. Достижение заданного температурного режима изделий можно определить контролем температуры воздуха в камере, которая устанавливается равной верхнему значению температуры окружающей среды при эксплуатации (указанной в ТУ), либо контролем температуры участка (узла), изделия, который имеет наибольшую температуру или является наиболее критичным для работоспособности изделия.

Для испытания ИМ на теплоустойчивость используются серийно выпускаемые отечественной промышленностью камеры тепла типа КТ с полезным объемом от 0,05 до 1 м³ и диапазоном температур от 293 до 573 К. Для таких испытаний могут быть применены также комбинированные камеры: термобарокамеры, термовлагокамеры, камеры тепла и холода.

Таблица 5.8. Степени жесткости испытаний на теплоустойчивость

Степень жесткости	I	IV	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Температура, К	313	323	343	358	373	398	428	473	523	588

Испытание на холодоустойчивость. Для проверки параметров изделий в условиях воздействия низкой температуры внешней среды, а также после пребывания их в этих условиях проводят испытание на холодоустойчивость. Изделия помещают в камеру холода, после чего устанавливают нижнее значение температуры по ТУ. Для крепления ИМ используют материалы, обладающие высокой теплопроводностью.

Время выдержки при заданной температуре выбирают в зависимости от установленной жесткости испытаний.

Работоспособность изделия проверяют выдержкой изделий под электрической нагрузкой при заданной температуре.

Температура стенок камеры после достижения температурной стабильности не должна отличаться от температуры испытания более чем на 8%.

Испытание на циклическое воздействие смены температур предназначено для определения способности изделий противостоять быстрой смене верхнего и нижнего значения температуры. Общее количество циклов для испытания ИМ устанавливается равным трем, если другое количество циклов специально не оговорено.

Каждый цикл состоит из двух этапов. Сначала изделия помещают в камеру холода, а затем в камеру тепла, температуры в которых устанавливаются в зависимости от степени жесткости испытания. Изделия в камере выдерживаются в течение времени, необходимого для достижения теплового равновесия.

Перенос изделий из камеры тепла в камеру холода или обратно осуществляют за время не более пяти минут. При этом время достижения заданного температурного режима в камерах после загрузки изделия также не должно превышать этого предела.

Во время испытания электрическая нагрузка на изделия не подается, а электрические параметры измеряют до и после испытания, предварительно выдержав изделия в нормальных климатических условиях.

Термоциклирование является одним из самых жестких видов климатических испытаний и позволяет выявлять скрытые конструктивные дефекты и дефекты в технологии, допущенные при изготовлении изделий.

Испытание на влагуустойчивость. Для определения способности изделий сохранять свои параметры в условиях и после длительного воздействия влажности проводят длительные испытания. До оперативного выявления грубых технологических дефектов в серийном производстве и дефектов, которые могли возникнуть в предшествующих испытаниях, осуществляют кратковременные испытания.

Испытания на влагуустойчивость могут проводиться в циклическом (с конденсацией влаги) или непрерывном (без конденсации влаги) режимах.

Таблица 5.9. Степени жесткости испытаний на влагуустойчивость в зависимости от условий эксплуатации изделий

Степень жесткости	Относительная влажность		
	Верхние значения	Среднемесячные значения в наиболее теплый и влажный период и продолжительность их воздействия в течение года при эксплуатации изделий	
		Значения	Продолжительность, мес.
I	80% при 298 К* и более низких температурах без конденсации влаги	65% при 293 К	12
II	98% при 298 К* и более низких температурах без конденсации влаги	80% при 293 К	2
III			6
IV	100% при 298 К* и более низких без конденсации влаги	80% при 293 К	6
V	100% при 298 К* и более низких температурах с конденсацией влаги	90% при 293 К	12
VI	98% при 308 К* и более низких температурах без конденсации влаги	80% при 300 К	3
VII			12
VIII	100% при 308 К* и более низких температурах с конденсацией влаги	90% при 300 К	12

* При более высоких температурах относительная влажность ниже.

Степень жесткости испытания устанавливается в зависимости от назначения и условий эксплуатации (табл. 5.9).

Циклический режим испытания характеризуется воздействием повышенной влажности при циклическом изменении температуры воздуха в камере. В результате создаются условия для выпадения росы на наружных поверхностях изделий (при быстром снижении температуры) и последующего ее испарения (в период повышения температуры), что способствует интенсивному развитию процессов коррозии. При снижении температуры в камере влага может проникать внутрь изделий через различные микроканалы в сварных, паяных швах, местах сопряжения материалов различными ТКЛР. Физический механизм этого явления заключается в следующем.

При снижении температуры в камере охлаждается воздух во внутренней полости испытуемого изделия и давление там уменьшается. За счет возникшего перепада давлений в окружающем объеме и внутри полости влага диффундирует по капиллярам внутрь этой полости (корпуса). Учитывая эти особенности, испытание на влагуустойчивость в циклическом режиме следует рекомендовать в первую очередь для изделий, имеющих свободные внутренние полости, например для изделий в пласт-

массовых корпусах со свободным внутренним объемом, ИМ в металлостеклянных и металлокерамических корпусах со свободным объемом и т. п.

В случае длительного испытания на влагоустойчивость при циклическом режиме общая продолжительность испытания в зависимости от степени жесткости выбирается из табл. 5.10.

В условиях кратковременных испытаний на влагоустойчивость при циклическом режиме изделия подвергаются воздействию двух или шести циклов, продолжительность каждого из которых составляет 24 ч. Количество циклов устанавливается по ТУ в зависимости от конструкции и назначения изделия. Каждый цикл состоит из этапов, указанных на рис. 5.1. Повышение температуры и влажности при проведении каждого цикла должно быть достаточно быстрым, чтобы обеспечить конденсацию влаги (выпадение росы) на изделиях.

Если имеющиеся на предприятии камеры не обеспечивают быстрого изменения температуры, то тот же самый эффект можно достигнуть за счет быстрого переноса изделий из камеры, где проводились испытания изделий при верхнем значении температуры, в другую — с пониженной температурой.

В процессе непрерывных испытаний не предусматривается конденсации влаги на изделиях, поэтому непрерывные испытания проводят при постоянном значении температуры и влажности в камере. Изделия помещают в камеру влажности и выдерживают при температуре, указанной в табл. 5.11. Время выдержки изделий при заданной температуре определяется необходимостью достижения изделием теплового равновесия. Затем относительную влажность воздуха в камере повышают до $(95 \pm 3\%)$ и далее поддерживают ее и температуру постоянными в течение всего времени испытания.

Аналогично построена методика проведения кратковременных испытаний изделий при непрерывном режиме. Продолжительность испытаний составляет 2; 4; 6 или 10 сут и устанавливается в ТУ. Время выдержки изделий в нормальных условиях после окончания кратковременных испытаний составляет обычно 1...2 ч, то время как по окончании длительных испытаний это время должно быть не менее 24 ч.

Испытания изделий на влагоустойчивость под электрической нагрузкой предусматривают, если они предназначены для работы

Таблица 5.10. Продолжительность испытаний на влагоустойчивость, ч, при циклическом режиме в зависимости от степени жесткости

Температура воздуха, К	Длительное испытание			Ускоренное испытание	
	III, IV, VI	V, VII	VIII	V, VII	VIII
313±2	4	9	21	—	—
328±2	—	—	—	4	9

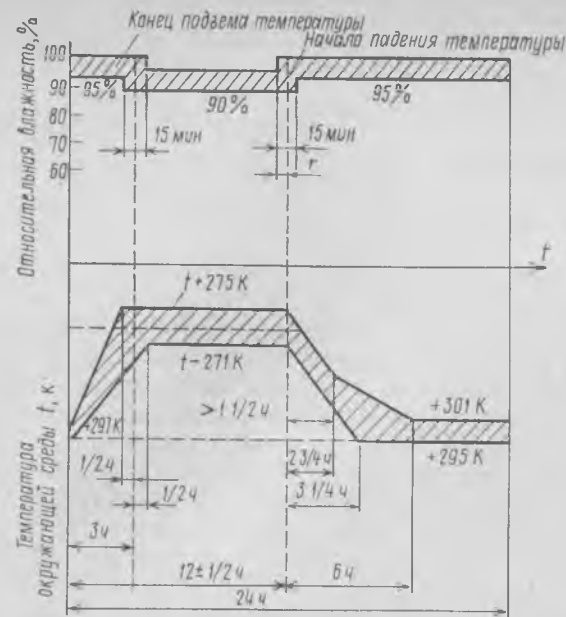


Рис. 5.1. Этапы изменения относительной влажности и температуры при циклическом режиме кратковременного испытания изделий: t — время, в течение которого на изделиях не должна конденсироваться влага; $T=313, 328, 343$ или 353 К

во влажном климате, где возможно появление разрушающих действий электролиза или электрохимической коррозии. В виде нагрузки используется напряжение, обеспечивающее минимальное выделение тепла в испытуемых изделиях. В большинстве случаев испытания на влагоустойчивость проводят без электрической нагрузки.

Измерение параметров и другие проверки изделий проводят, как правило, в конце испытания (при циклическом режиме — в последнем цикле, в конце последнего часа выдержки при верхнем значении температуры) без извлечения изделий из камеры влажности.

Таблица 5.11. Продолжительность испытаний на влагоустойчивость (ч) при непрерывном режиме в зависимости от степени жесткости

Температура воздуха, К	Длительное испытание				Ускоренное испытание		
	II	III, IV, VI	V, VII	VIII	III, IV	V, VIII	VIII
298±2	2	—	—	—	—	—	—
313±2	—	10	21	56	—	—	—
328±2	—	—	—	—	4	7	14

Испытание на воздействие пониженного атмосферного давления определяет способность изделий выполнять свои функции в условиях ухудшения теплоотдачи и возможности перегрева.

Зависимость давления от температуры окружающей среды имеет следующий вид:

$$P = P_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right), \quad (5.1)$$

где P_0 — давление газа Па, при температуре 273 К; t — температура окружающей среды, К.

Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления проводят либо при нормальной температуре испытаний (для изделий, нагреваемых при эксплуатации или не подверженных влиянию пониженного атмосферного давления), либо при верхнем значении температуры (для изделий, для которых нагрев при нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, является критичным, записанным в стандартах). Вид и характер электрической нагрузки оговариваются в ТУ.

Продолжительность испытания, как правило, не превышает 30 мин. В отдельных случаях может устанавливаться длительное, более 2...3 ч, воздействие пониженного атмосферного давления.

Испытание на воздействие повышенного давления воздуха или другого газа проводят в барокамерах с целью проверки устойчивости параметров и сохранения внешнего вида изделий в условиях повышенного атмосферного давления. Испытания проводят, как правило, без электрической нагрузки.

Испытание на грибоустойчивость проводят с целью определения способности материалов и покрытий, применяемых при изготовлении ИМ, противостоять грибковой плесени в среде, зараженной плесневыми грибами.

Перед испытанием поверхность изделия тщательно промывают или протирают спиртом. Изделия помещают в камеру грибообразования. Вместе с изделиями в камеру ставятся контрольные чашки Петри (обычно две) с питательной средой. Состав и порядок приготовления питательной среды дается в специальной инструкции. Изделия, а также контрольные чашки с питательной средой опрыскиваются из пульверизатора водной суспензией спор грибов из расчета 50 мл суспензии на 1 м³ полезного объема камеры. Вся поверхность изделий должна быть опрыскана равномерно. Подвергать испытаниям рекомендуется образцы, не прошедшие других испытаний.

Испытания проводятся в следующем порядке. В камере устанавливается температура (302 ± 2) К и относительная влажность (95 ± 3) % при отсутствии циркуляции воздуха. Испытуемые изделия должны быть затемнены от искусственного и естественного света. Изделия в этом режиме выдерживаются 48 ч, после чего производят осмотр контрольных чашек Петри. Если на чашках не наблюдается роста грибов из числа видов, использованных

для заражения, то следует провести вторичное опрыскивание изделий жизнеспособной суспензией спор грибов. Срок испытания в этом случае следует считать со времени вторичного опрыскивания.

Испытания продолжаются в течение 30 сут. После испытания изделия извлекаются из камеры и подвергаются визуальному осмотру под микроскопом при 56-кратном увеличении. Оценка качества изделий производится по пятибалльной системе:

	Балл
Нет роста грибов	0
Очень слабый рост грибов (наблюдаются единичные просшие споры)	1
Слабый рост грибов (наблюдается единичное спороношение)	2
Умеренный рост грибов (видны очаги плесени)	3
Обильный рост грибов (сплошное поражение грибами поверхности образца)	4

Изделия считают выдержавшими испытание на грибоустойчивость, если степень биологического обрастания оценивается баллами 0 и 1. По окончании испытания образцы должны быть продезинфицированы или уничтожены, чтобы предотвратить заражение окружающих предметов и продуктов.

Испытание на воздействие соляного тумана проводят с целью определения коррозионной стойкости изделий в атмосфере, содержащей водные растворы солей. В процессе испытаний соляной туман создается распылением раствора соли, который приготавливают путем растворения в дистиллированной воде хлористого натрия $(33 \pm 3) \cdot 10^{-3}$ кг/л. Температура в камере устанавливается (300 ± 2) К. Туман, полученный в камере, должен обладать дисперсностью 1...10 мкм (95% капель) и концентрацией воды $(2...3) \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Изделия помещают в камеру и располагают так, чтобы в процессе испытания брызги раствора соли из пульверизатора или аэрозольного аппарата, а также капли с потолка, стен и системы подвесов не попадали на изделия.

Распыление раствора производят с помощью пульверизатора или центрифуги аэрозольного аппарата в течение 15 мин каждого часа испытания. Этот режим обеспечивается автоматическим введением раствора соли в объем камеры. Общее время испытания оговаривается в ТУ в зависимости от степени жесткости. Время испытания изделий отсчитывают с момента выхода камеры на испытательный режим. По окончании испытания изделия промывают в дистиллированной воде, после чего просушивают.

5.4. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ, ИХ СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Основными механическими нагрузками, которым могут подвергаться ИМ в эксплуатационных условиях, являются ударные, вибрационные и линейные.

Наиболее опасна вибрация, которая вызывает механические напряжения и деформации изделий. Упругая деформация может привести к нестабильности параметров изделия за счет появления дополнительного спектра частот возбуждения. После прекращения воздействия вибрации, вызывающей упругие деформации изделий, их функционирование восстанавливается. Однако вибрация может вызывать и необратимые изменения. Особо опасны явления резонанса, когда собственная частота какой-либо части конструкции ИМ находится в пределах спектра частот действующей вибрации, в результате чего нагрузки возрастают во много раз. Это может привести к обрыву выводов, нарушению герметизации, возникновению короткого замыкания и т. д.

Ускорения, возникающие при резком изменении скорости или направлении движения объекта, в котором применены ИМ, вызывают механическое воздействие на них в виде удара, деформирующего и разрушающего. Удар, как правило, сопровождается неустановившейся вибрацией на частотах собственных колебаний элементов изделий. Вибрацию под воздействием серии ударов в виде импульсов, следующих один за другим, называют тряской.

В процессе эксплуатации ИМ могут подвергаться также воздействию линейных нагрузок (постоянное ускорение).

Способность ИМ выполнять свои функции в условиях механического воздействия называется механической устойчивостью, а после воздействия — механической прочностью изделий. Для определения работоспособности изделий в условиях и (или) после воздействия механических нагрузок проводятся механические испытания, во время которых определяют механическую прочность и устойчивость, отсутствие резонансных частот в пределах спектра частот действующей вибрации, проверяют, не образуются ли кратковременных или постоянных коротких замыканий и обрывов в изделии, а также других явлений, которые могут привести к его выходу из строя.

Стандартизация механических воздействий. В ГОСТ 16962—71 установлены следующие виды механических факторов, в обобщенной форме отражающих условия эксплуатации: вибрационные нагрузки, многократные ударные нагрузки, одиночные ударные нагрузки с большим ускорением, линейные (центробежные) нагрузки, воздействия акустического шума и механические воз-

действия на выводы, которые имеют место при монтаже изделий у потребителя.

К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости к этим нагрузкам. К изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования только по прочности.

Таблица 5.12. Механические воздействия и их характеристики

Виды воздействующих факторы	Значения характеристик и степени жесткости					
	Диапазон частот, Гц	Максимальное ускорение	Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Максимальное ускорение	Степень жесткости
Вибрационные нагрузки	1 ... 35	0,5	I	1 ... 2000	5	XI
	1 ... 60	1	II	1 ... 2000	10	XII
	1 ... 60	1	II	1 ... 2000	15	XIII
	1 ... 660	2	III	1 ... 2000	20	XIV
	1 ... 80	5	IV	1 ... 2000	20	XV
	1 ... 100	1	V	1 ... 3000	20	XVI
	1 ... 200	5	VI	1 ... 5000	10	XVII
	1 ... 200	10	VII	1 ... 5000	20	XVIII
	1 ... 200	10	VII	1 ... 5000	30	XIX
	1 ... 600	5	VIII	1 ... 5000	40	XX
	1 ... 600	10	IX	1 ... 5000	40	
	1 ... 1000	10	X	100 ... 5000	40	
Ударные нагрузки	Длительность удара, мс	Максимальное ускорение	Степень жесткости	Длительность удара, мс	Максимальное ускорение	Степень жесткости
	2 ... 15	15	I	2 ... 6	75	III
Многократные	2 ... 10	40	II	1 ... 3	150	IV
	Одиночные	40 ... 60	4	I	1 ... 2	500
20 ... 50		20	II	0,2 ... 1	1000	VI
2 ... 6		75	III	0,2 ... 0,5	1500	VII
1 ... 3		150	IV	0,2 ... 0,5	3000	VIII
Линейные центробежные нагрузки	—	Максимальное ускорение	Степень жесткости	—	Максимальное ускорение	Степень жесткости
	—	10	I	—	150	V
	—	25	II	—	200	VI
	—	50	III	—	500	VII
	—	100	IV	—	—	—

Виды механических воздействий и их характеристики (степени жесткости) приведены в табл. 5.12. Различают механические испытания ИМ: на виброустойчивость и вибропрочность; на ударную прочность и устойчивость; на воздействие линейных нагрузок и акустических шумов; на прочность внешних выводов и их креплений.

Испытание на ударную устойчивость обычно совмещают с испытанием на ударную прочность, а испытание на виброустойчивость — с испытанием на вибропрочность.

При проведении испытаний на воздействие акустических шумов следует учитывать, что этот вид механических испытаний дополняет испытание на воздействие вибрации, выявляя те дефекты изделий, которые не удается обнаружить из-за влияния амортизирующих свойств конструкции изделия и его крепления.

Механические испытания проводят при воздействии ускорения в трех взаимно перпендикулярных направлениях для вибрационных нагрузок и в шести направлениях относительно трех осей для ударных и линейных нагрузок. Механические испытания проводят при нормальных климатических условиях.

После проведения механических испытаний контролируют внешний вид изделий и их основные электрические параметры.

5.5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Испытание на виброустойчивость и вибропрочность. Надежная работа ИМ обеспечивается наличием конструктивных запасов (по вибропрочности, виброустойчивости, резонансной частоте и т. д.). Конструктивный запас ИМ по резонансной частоте оценивается коэффициентом конструктивного запаса K_3

$$K_3 = f_0 / f_2, \quad (5.2)$$

где f_2 — верхняя частота рабочего диапазона, заданная в нормативно-технической документации; f_0 — наименьшая резонансная частота исследуемого изделия.

Чем выше резонансная частота изделия, тем больше величина K_3 , а следовательно, выше вибропрочность изделия при прочих равных условиях. Поэтому механическое напряжение, вызванное вибрационным воздействием, обратно пропорционально резонансной частоте изделия.

Испытание изделий на виброустойчивость и вибропрочность осуществляется одним из следующих методов:

- качающейся частоты;
- фиксированных частот;
- случайной вибрации.

Для выбора рационального метода испытания необходимо знание резонансных частот изделия, которые определяются на стадии разработки изделия аналитически или устанавливаются путем

сравнения конструкции испытуемого изделия с аналогичными, резонансные частоты которых известны.

Основным методом испытаний на виброустойчивость и вибропрочность является метод качающейся частоты, при котором изменение частоты колебаний происходит в заданном диапазоне от минимальной до максимальной и обратно с тем, чтобы последовательно возбуждать резонансы изделия, которые приходятся на область частот испытания. В этом случае учитывается проявление резонансов, которые зависят от направления изменения частоты вибрации.

Скорость изменения частоты при испытании ИМ на виброустойчивость должна быть такой, чтобы время изменения частоты в резонансной полосе частот испытуемых изделий было не меньше времени нарастания амплитуды вибрации изделия при резонансе до установившегося значения и времени окончательного установления подвижной части измерительного или регистрирующего прибора t_y .

Время нарастания амплитуды вибрации ($t_{нар}$) изделия при резонансе до установившегося значения может быть приближенно подсчитано по формуле

$$t_{нар} \approx k_1 Q / f_0, \quad (5.3)$$

где f_0 — резонансная частота; Гц; Q — добротность изделия; k_1 — коэффициент, учитывающий увеличение времени нарастания амплитуды колебаний изделия до установившегося значения в результате отклонения изменений амплитуды от линейного закона.

Величину k_1 принимают равной 2...3, а значение f_0 и Q либо определяют прямыми измерениями, либо по данным их конструктивных аналогов. Требуемую скорость изменения частоты при испытании определяют по выражению

$$U_k = \frac{200 \lg \left(\frac{2Q + 1}{2Q - 1} \right)}{t_{\Delta f}}, \quad (5.4)$$

где $t_{\Delta f}$ — выбирают в соответствии с условиями $t_{\Delta f} \geq t_{нар}$; $t_{\Delta f} \geq t_y$. Обычно скорость качания частоты при испытании ИМ на виброустойчивость

$$U_k \leq 2 \text{ октав/мин.} \quad (5.5)$$

Испытание на вибропрочность проводят при нескольких циклах качания. Их количество в зависимости от жесткости испытания приведено в табл. 5.13. Для ИМ по вибрационным нагрузкам устанавливают степень жесткости XVI—XX. Если до испытания имеются сведения о резонансных частотах испытуемого изделия, то целесообразно использовать методы ускоренных испытаний:

метод качающейся частоты при повышенных значениях ускорения;

Таблица 5.13.

Количество циклов качания частоты при испытании ИМ на вибропрочность	
Степень жесткости	Количество циклов качания
XVI	30
XVII	30
XVIII	30
XIX	30
XX	2

превышает верхнюю частоту диапазона, соответствующего заданной степени жесткости.

Сокращение длительности испытаний по методу качающейся частоты при повышенных значениях ускорения основано на влиянии вибрационных нагрузок на долговечность изделия по закону:

$$\left(\frac{j_y}{j_0}\right)^\Lambda = \frac{\tau_0}{\tau_y}, \quad (5.6)$$

где j_y и j_0 — амплитуда вибрационного ускорения при ускоренном и обычном испытаниях соответственно; τ_0 и τ_y — продолжительность обычного и ускоренного испытаний соответственно; Λ — показатель степени, зависящий от особенностей конструкции и материала изделия ($\Lambda=2 \dots 10$). Наиболее жесткому испытанию соответствует $\Lambda=2$, поскольку при таком показателе степени продолжительность испытания будет максимальной.

Виды ударных нагрузок. Во время удара (скачкообразный процесс, продолжительность которого «бесконечно мала») в точке соприкосновения соударяющихся тел возникают большие, но мгновенно действующие силы, приводящие к конечному изменению количества движения. При соударении двух движущихся тел происходит процесс их деформации вблизи точки соприкосновения и распространение волны сжатия внутри этих тел. Упругие характеристики материала соударяющихся тел, их формы и размеры, относительная скорость сближения и так далее определяют продолжительность удара.

Изменение ускорения во времени называют импульсом ударного ускорения или просто ударным импульсом, а закон изменения ускорения во времени — формой ударного импульса.

Испытания на ударную прочность проводят с целью оценки прочности и устойчивости изделий. Испытания на воздействие ударной нагрузки осуществляют путем многократного воздействия ударов или воздействием одиночных ударов с большими ускорениями. Эти испытания осуществляются без электрической нагрузки.

Испытуемое изделие подвергают многократному воздействию ударов поочередно и поровну в каждом из направлений испы-

метод качающейся частоты при повышенных значениях ускорения;

метод качающейся частоты для изделий, у которых резонансные частоты выше 200 Гц;

метод качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, у которых резонансы лежат в полосе частот, соответствующей заданной степени жесткости;

метод качающейся частоты в области резонансных частот для изделий, у которых резонансная частота

Таблица 5.14. Характеристики режимов испытания ИМ при многократном воздействии ударов

Степень жесткости	Ускорение, м/с ² (g)	Длительность, 10 ⁻³ , с	Общее количество ударов
I	150(15)	2 ... 15	10 000
II	400(40)	2 ... 10	10 000
III	750(75)	2 ... 6	4 000
IV	1500(150)	1 ... 3	4 000

таний. Направления воздействия определяются конкретными свойствами испытуемых изделий. Если свойства изделия не известны, то испытания проводятся в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Частота следования ударов обычно выбирается в пределах от 40 до 120 ударов/мин. Ускорение, длительность удара и общее их количество определяются степенью жесткости испытаний из табл. 5.14.

Характеристики режимов испытаний ИМ на воздействие многократных нагрузок приведены в табл. 5.15. Обычно испытание проводят при одном определенном значении длительности. В случае воздействия одиночных ударов ускорения и длительности удара выбираются в зависимости от степени жесткости по табл. 5.16.

Форма ударного импульса является одной из важнейших характеристик, обеспечивающих единство испытаний, и поэтому должна регламентироваться в ЧТУ. Наиболее опасной для изделия является трапецеидальная форма. Используют полусинусоидальную форму ударного импульса. Получение полусинусоидальной формы импульсов наиболее просто и требует наименьших затрат энергии. Пилообразный импульс позволяет получить наилучшую воспроизводимость испытаний, так как в силу несимметричности этого импульса его остаточный спектр лишен периодичности.

Испытания на ударную устойчивость рекомендуется проводить после испытаний на ударную прочность. Чаще их совмещают.

Таблица 5.15. Взаимосвязь критичных длительностей удара с резонансными частотами изделий

Ускорение, м/с ² (g)	Резонансные частоты изделий, Гц				
	25...60	50...100	100...200	200...400	400
Длительность удара, ·10 ⁻³ с					
150 (15)	12...15	10...12	4...6	2,5...3,5	1...2
400 (40)	—	10...12	4...6	2,5...3,5	1...2
750 (75)	—	10...12	4...6	2,5...3,5	1...2
1500 (150)	—	—	4...6	2,5...3,5	1...2

Таблица 5.16. Параметры режимов испытания ИМ при воздействии одиночного удара

Степень жесткости	Ускорение g	Длительность, $\cdot 10^{-3}$ с	Степень жесткости	Ускорение g	Длительность, $\cdot 10^{-3}$ с
I	4	40...60	V	500	1...2
II	20	20...40	VI	1000	0,2...1
III	75	2...6	VII	1500	0,2...0,4
IV	100	1...3	VIII	3000	0,2...0,5

Испытание на ударную устойчивость проводят под электрической нагрузкой, характер и параметры которой устанавливаются в ЧТУ. При этом проверка параметров ИМ осуществляется в процессе удара. Испытание на удароустойчивость проводится либо при воздействии одиночного удара, либо при многократном воздействии ударов. Частота следования ударов должна быть такой, чтобы обеспечивалась возможность контроля проверяемых параметров изделия.

Испытание на воздействие линейных нагрузок проводят с целью проверки способности изделий выполнять свои функции в процессе воздействия линейных нагрузок и (или) противостоять разрушающему действию этих нагрузок.

Испытания проводят без электрической нагрузки при воздействии центробежного ускорения поочередно в каждом из направлений испытаний. Значение ускорения относительно геометрического центра тяжести изделий выбирают в соответствии с табл. 5.12. Длительность испытания определяется временем, необходимым для контроля параметров изделий в процессе испытания, но не меньше 3 мин в каждом положении.

Испытания на воздействие линейных ускорений производятся на центрифугах, создающих в горизонтальной плоскости радиально-направленные ускорения. Частоту вращения платформы центрифуги V , об/мин, подсчитывают по формуле

$$V = 3000 \sqrt{j/R}, \quad (5.7)$$

где j — ускорение, g ; R — расстояние от центра вращения платформы до геометрического центра изделия или его центра тяжести, м.

Испытания прочности выводов и их крепления определяют возможности выводов ИМ и мест их соединений в РЭА выдерживать механические воздействия, отражающие условия, возникающие при их монтаже. Прочность гибких выводов ИМ проверяется испытанием на: растяжение, сжатие, изгиб и окручивание.

Испытание на воздействие растягивающей силы проводится для всех видов выводов. Если количество выводов в ИМ не превышает трех, то все выводы подвергают испытанию. Если изделие имеет более трех выводов, количество испытываемых выводов на

каждый образец указывается в ТУ. Во время испытания вывод должен находиться в нормальном положении, а испытываемое изделие закреплено за корпус. В направлении оси проволочного вывода (круглого сечения, плоского) или штыря прикладывают силу в соответствии с табл. 5.17.

Статическую силу прикладывают путем подвешивания к выводу груза одним из следующих способов:

с помощью гибкого промежуточного звена, припаянного к выводу на 1/3 его длины и заканчивающегося изогнутым в виде крючка стержнем;

с помощью зажимных устройств (патрон, цанга, струбцина и др.).

Груз подвешивают к выводу с помощью петли, изготовленной из проволоки или нитки. При испытании микросхему удерживают вручную или другим способом, оговоренным в стандартах на изделие, за корпус и плавно поднимают до тех пор, пока груз не зафиксируется в подвешенном состоянии. После выдержки в течение 10 с растягивающее усилие плавно снимают опусканием изделия с грузом в исходное положение. При поднятии и опускании груза необходимо следить, чтобы ось вывода изделия совпадала с направлением силы тяжести груза.

Для изделий с двумя осевыми противоположно направленными выводами силу прикладывают к одному выводу при закрепленном другом.

Испытанию на воздействие сжимающей силы подвергаются изделия с жесткими выводами. Во время испытания сжимающая нагрузка прикладывается к выводу и как можно ближе к корпусу изделия. Однако между ближайшей точкой устройства, с помощью которого прикладывается сила, и корпусом изделия должно быть расстояние не менее $2 \cdot 10^{-3}$ м. При испытаниях прикладываемую силу увеличивают плавно и поддерживают постоянной в течение 10 с.

При испытании гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб к каждому выводу изделия в направлении оси поочередно подвешивают груз, в 2 раза меньший, чем при испытании на

Таблица 5.17. Характер и значение нагрузок, прикладываемых к выводам при испытаниях

Площадь поперечного сечения вывода, $\cdot 10^{-6}$ м ²	Соответствующий диаметр проволочного вывода круглого сечения, $\cdot 10^{-3}$ м	Растягивающая сила, Н	Сжимающая сила, Н	Соответствующий диаметр проволочного вывода круглого сечения, $\cdot 10^{-3}$ м		Растягивающая сила, Н	Сжимающая сила, Н
				Площадь поперечного сечения вывода, $\cdot 10^{-6}$ м ²	Соответствующий диаметр проволочного вывода круглого сечения, $\cdot 10^{-3}$ м		
0,25	0,25	1,0	0,25	0,5	0,8	10	2
0,07	0,3	2,5	0,5	1,2	1,25	20	4
0,2	0,5	5	1	1,2	2	40	8

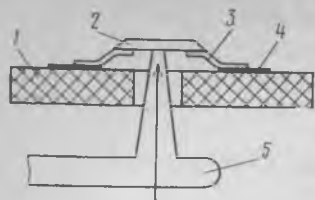


Рис. 5.2. Схема испытаний соединения подложка—прибор с балочными выводами на прочность:

1 — подложка; 2 — кристалл; 3 — балочные выводы; 4 — контактная площадка; 5 — устройство на основе трапеции

воздействие растягивающей силы. Затем корпус изделия медленно отклоняют на угол 90° , а затем плавно возвращают в прежнее положение. Рекомендуемое время изгиба в каждом направлении 3 с. Сгибание вывода и разгибание считают одним изгибом. Изгибы производят в одной вертикальной плоскости. Всего производят обычно 3 изгиба. Плоские выводы испытывают в направлении плоскости, имеющей наименьшую жесткость.

При испытании гибких проволочных выводов на скручивание каждый проволочный вывод изгибают на 90° на расстоянии $(6 \dots 6,5) \cdot 10^{-3}$ м от места присоединения к изделию при радиусе кривизны $(0,7 \dots 0,8) \cdot 10^{-3}$ м. Свободный конец вывода закрепляют (захватывают) на расстоянии $(1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ м от места изгиба и поворачивают вокруг оси изделия на 180° или 360° . Угол поворота определяется степенью жесткости испытаний. Для первой степени жесткости делают три поворота на 360° , а для второй — два поворота на 180° . Каждый поворот производят в направлении, противоположном предыдущему. Продолжительность одного поворота около 5 с. Испытание можно проводить также путем поворота корпуса изделия вокруг оси вывода.

После проведения испытаний визуально осматривается ИМ и проверяются механические и электрические параметры.

Для испытания прочности сцепления объемного вывода с подложкой ИМ используют метод отрыва (разрушающий) с помощью устройства, обеспечивающего механическое воздействие на объемный вывод (шарик, балку) на пластине (рис. 5.2).

5.6. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПО УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

В стандарте установлены классификация изделий по условиям эксплуатации при механических и климатических воздействиях, требования по механическим факторам для классификационной группы изделий и связь между условиями эксплуатации изделий и степенями жесткости воздействующих факторов по ГОСТ 16962—71.

Стандарт на классификатор применяют с учетом требований ГОСТ 16962—71 при составлении технических заданий на раз-

работку и модернизацию изделий, при разработке и пересмотре общих технических условий на классы (группы) изделий, при разработке и пересмотре технических условий на конкретные изделия в случае отсутствия общих технических условий. По условиям эксплуатации, по механическим воздействиям устанавливается следующая классификация изделий — группы исполнения М1...М6 (в скобках указаны степени жесткости по ГОСТ 16962—71 по вибрационным и по ударным нагрузкам):

М1 (I, I) — в стационарной аппаратуре и приборах, устанавливаемых на неподвижных объектах, а также в аппаратуре и приборах, не имеющих приспособлений для переноски и требующих специальных мер защиты при перевозке;

М2 (II, I) — в полустационарной аппаратуре и приборах, работающих на ходу, предназначенных для кратковременной переноски людьми и перевозки;

М3 (III, I) — в аппаратуре и приборах, работающих на ходу на промышленных передвижных машинах, на неподвижном технологическом оборудовании;

М4 (IV, I) — в носимой аппаратуре, работающей на ходу, в аппаратуре, устанавливаемой на пассажирском автомобильном транспорте, на железнодорожном и водном транспорте с частотой вращения гребного вала не более 20 об/с;

М5 (VI, II) — в аппаратуре, работающей на ходу, устанавливаемой на гусеничных машинах и на скоростных судах с частотой вращения гребного винта более 20 об/с;

М6 (IX, II) — в аппаратуре, устанавливаемой на объектах, имеющих мощные источники вибрации и для общего применения в промышленности при условии, что существует ощутимая вибрация на частотах свыше 200 Гц.

Классификация изделий по условиям эксплуатации и климатическим воздействиям (степени жесткости) приведена в табл. 5.18.

Исполнение изделий для климатических районов: У — с умеренным климатом; ХЛ — с холодным климатом; В — с любым климатом на суше и море; Т — с тропическим сухим и влажным климатом.

Категории изделий устанавливаются в зависимости от размещения при эксплуатации:

1 — для работы на открытом воздухе; 1.1 — для работы в условиях, соответствующих категории 4, и для кратковременной работы в других условиях, в том числе на открытом воздухе; хранение в процессе эксплуатации в помещениях категории 4;

2 — для работы в открытых помещениях (палатки, кузова), в аппаратуре с кожухами, работающей на открытом воздухе или под навесом;

3 — для работы в закрытых помещениях без искусственной регулировки климатических условий (каменные, бетонные, деревянные помещения);

Таблица 5.18

Классификация изделий по ГОСТ 15150—69 (СТ СЭВ 458—77, СТ СЭВ 460—77)		Степени жесткости по ГОСТ 16962—71		
		Температура воздуха или другого газа при эксплуатации		Относительная влажность
Исполнение изделий	Категория изделий	Верхнее значение	Нижнее значение	
У, ХЛ	1	IV	III	IV
	2		IV	
	3		VII	
	1.1		VIII	
В, Т	4; 4.2	VI	I	VIII
	1		III	
	2		IV	
	3		VII	
В	1.1	IV	VIII	VII
	4		I	
У, ХЛ; Т; В	4.2			VI
	4.1			

4 — для работы в помещениях с искусственно регулируемым климатом; 4.1 — в помещениях с кондиционированием или частичным кондиционированием воздуха; 4.2 — в помещениях лабораторий, капитальных жилых и других подобного типа.

Испытания, установленные в ГОСТ 16962—71, проводят с целью проверки соответствия изделий требованиям, изложенным в стандарте. Эти испытания не устанавливают проверку изделий на надежность.

Виды испытаний. Состав и рекомендуемое распределение испытаний на различных этапах разработки и производства изделий приведены в стандарте. Перечень видов испытаний и количество испытываемых изделий устанавливаются в стандартах на группы изделий или в стандартах на изделия и программах испытаний.

Периодичность испытаний. Для изделий серийного производства периодичность выбирают или через определенный срок из ряда 1, 3, 6, 12 мес., а в технически и экономически обоснованных случаях через 18 и 24 мес., или после выпуска определенного количества изделий.

Периодичность испытаний может быть различной для одной и той же группы изделий в зависимости от стабильности производства и конструктивно-технологических особенностей изделий и должна устанавливаться в стандартах на изделия. Испытания проводятся также при изменениях конструкции или технологического процесса, марки или качества основных материалов, способных повлиять на механическую прочность изделий или их стойкость к воздействию климатических факторов.

Нумерация видов и методов испытаний. В ГОСТ 16962—71 принята нумерация видов и методов испытаний, что дает возможность машинной обработки статистических данных результатов испытаний. Виды механических испытаний обозначаются номерами со 101 до 199, климатических — с 202 до 299. В редакции ГОСТ 16992—71, утвержденной в 1971 г., установлено 13 видов механических и 20 видов климатических испытаний. При включении в стандарт новых видов испытаний они будут обозначаться в порядке их включения в пределах указанных выше номеров.

Для одного и того же вида испытаний может использоваться несколько методов. В этом случае метод испытаний обозначается номером соответствующего вида испытаний с добавлением через дефис порядкового номера — метода испытаний.

Последовательность испытаний. В ГОСТ 16962—71 рекомендуется указанные ниже испытания проводить на одних и тех же образцах в следующей последовательности:

- механические 101 ... 108;
- смена температур 205;
- теплоустойчивость;
- влагоустойчивость — кратковременное испытание 208;
- холодоустойчивость.

Если кратковременное испытание на влагоустойчивость проводят в циклическом режиме с конденсацией влаги, то рекомендуется такая последовательность испытаний:

- механические 101 ... 108;
- смена температур 205;
- влагоустойчивость (первый цикл) 208;
- холодоустойчивость;
- пониженное атмосферное давление 209;
- влагоустойчивость (остальные циклы) 208.

С целью сокращения общей продолжительности испытаний допускается параллельное проведение испытаний на разных образцах или совмещение ряда испытаний. Так, испытания выводов 109—113, испытание на воздействие акустических шумов и на длительную влагоустойчивость допускается проводить на разных изделиях.

Испытание на воздействие солнечной радиации, на грибоустойчивость и воздействие соляного тумана рекомендуется проводить на образцах, которые не подвергаются другим видам испытаний.

Допускается или рекомендуется совмещать следующие виды испытаний:

- на виброустойчивость 102 с испытаниями на вибропрочность 103;
- на ударную устойчивость 105 с испытаниями на ударную прочность 104;
- на теплоустойчивость при эксплуатации 201 с испытаниями на воздействие пониженного атмосферного давления при верхнем

значении температуры 209 или с испытанием на воздействие смены температур 205;

на тепло- и холодоустойчивость при хранении 202 и 204 с аналогичными испытаниями при эксплуатации 201 и 203 или с испытанием на воздействие смены температур 205;

на холодоустойчивость при эксплуатации 203 с испытаниями на воздействие смены температур 205;

на воздействие инея 206 с испытаниями на холодоустойчивость при эксплуатации 203 или с испытанием на воздействие смены температур 205.

В некоторых случаях допускается не проводить отдельные испытания. Более подробно они будут рассмотрены ниже.

Последовательность испытаний для конкретных типов или групп изделий должна устанавливаться в стандартах и программах испытаний на них с учетом изложенных в стандарте рекомендаций и разрешений на совмещение отдельных видов испытаний.

Нормальные климатические условия и время испытаний. Некоторые испытания или их этапы должны проводиться в нормальных климатических условиях, которые характеризуются следующими значениями климатических факторов:

температурой воздуха (298 ± 10) К;

относительной влажностью воздуха 45 ... 80%; при температуре воздуха выше 303 К относительная влажность не должна быть выше 70%;

атмосферным давлением $8,4 \cdot 10^4$... $10,6 \cdot 10^4$ Па.

Время испытаний изделий при заданном режиме отсчитывают с момента достижения параметров испытательного режима, если в соответствующей стандартной методике испытаний нет иных указаний.

Глава 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Система управления качеством рассматривает вопросы обеспечения качества изделий с момента составления технического задания (ТЗ) до рассмотрения претензий заказчика по готовой продукции.

Качество, являясь свойством изделия, закладывается в него в процессе разработки и изготовления, а задача системы управления качеством состоит в контроле этого качества. Качество ИМ характеризуется на этапе разработки и изготовления большим количеством показателей качества.

Эксплуатационные показатели качества включают: назначение и область применения изделия; условия эксплуатации; входные и выходные параметры; удобства применения и обслуживания (габаритные размеры, масса, компактность).

Показатели надежности включают:

наработку до отказа;
вероятность безотказной работы;
интенсивность отказов.

Экономические показатели включают:

производственные (трудоемкость, себестоимость, срок окупаемости капиталовложений);
потребительские (стоимость монтажа, стоимость обслуживания);
сравнительные данные с аналогичными отечественными или зарубежными изделиями.

Показатели стандартизации включают:

уровень стандартизации и унификации;
коэффициент повторяемости;
коэффициент применяемости;
возможность использования типовых технологических процессов и оборудования;

показатели патентной чистоты.

Конструктивно-технологические показатели включают:

применение прогрессивных материалов;
применение прогрессивных техпроцессов;
ремонтная технологичность;
материалоемкость;
удобство компоновки;
отработанность (опытное производство или серийное).

Показатели технической эстетики включают:

эргономические (гигиенические, эстетические и пр.);
показатели безопасности работы с изделием;
художественно-эстетические показатели (внешнее оформление);
согласованность изделия со средой.

Если все это большое число показателей качества систематизировано и осуществляется системный подход к обеспечению и оценке качества на каждом этапе проектирования и изготовления изделия, то говорят о наличии системы управления качеством изделия.

Если при этом используется ЭВМ на всех этапах, начиная от поступления материалов и кончая рассмотрением претензий заказчика на готовую продукцию, то эту систему называют автоматизированной системой управления качеством (АСУК).

Для уменьшения количества показателей качества при оценке изделий применяется теория «относительного качества», согласно которой оценка качества на том или ином этапе дается в зависимости от назначения этого этапа. Например, при разработке

изделий — это соответствие ТЗ, а при сдаче его заказчику — это соответствие техническим условиям.

Для выделения превалирующих показателей качества часто прибегают к присвоению единичному показателю качества коэффициента весомости. Тогда, обозначив единичный показатель качества через b_i , а его коэффициент весомости через Z_i , получим выражение для общего показателя качества изделия на том или ином этапе его разработки и изготовления:

$$Z = \frac{b_1}{b} Z_1 + \frac{b_2}{b} Z_2 + \dots + \frac{b_i}{b} Z_i, \quad (6.1)$$

где $b = b_1 + b_2 + \dots + b_i$.

6.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Любой процесс создания ИМ с учетом качества может быть разбит на три взаимосвязанных процесса:

- обеспечение требуемого качества;
- контроль качества;
- управление качеством.

Для простых и отработанных технологических процессов возможна модель системы управления качеством, структура которой приведена на рис. 6.1.

Управление — административный аппарат, который обеспечивает функционирование входа X и самого процесса Y с целью получения заданного выхода Z .

Процесс Y — технологический процесс изготовления. Выход Z — готовое изделие, удовлетворяющее заданным требованиям. Технологическое и контрольно-измерительное оборудование, люди, материалы, техническая документация — вход X .

Модель для управления сложным технологическим процессом предусматривает функционирование X, Y, Z по информации, полученной от каждой операции (рис. 6.2). Эта модель позволяет наблюдать за «входом», «процессом» и «выходом», запоминать различные сочетания их отклонений и по накопленным статисти-

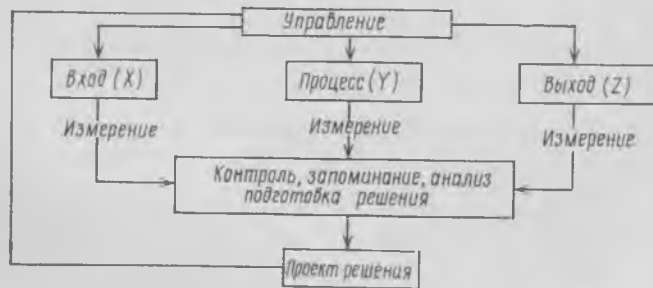


Рис. 6.1. Модель управления отработанным технологическим процессом

стическим данным (или по специально спланированным экспериментам) устанавливать «меру» влияния входа и процесса на результат.

По полученным данным на выходе выдается информация управлению (начальнику участка, цеха, главному инженеру) о том, что и где надо изменить. По этой модели легко оценить и эффект выданной рекомендации после ее выполнения и получения результатов. Модель (см. рис. 6.2) управления эффективно используется для задач управления качеством на этапах разработки и производства ИМ, так как разработка и производство ведется в определенной и повторяющейся последовательности этапов от составления ТЗ до рассмотрения претензий потребителей, и качество выполнения каждого этапа можно описать списком требований, предъявляемых к его входу X_i , процессу Y_i и выходу Z_i , а также установлены критерии качества, на основании которых принимается решение о необходимости коррекции хода процесса производства. Эти условия выполняются частично: сравнительно полно выполняется первое условие, более или менее — второе и реже — третье.

Для формализации системы управления качеством преобразуем модель, приведенную на рис. 6.2, к виду, изображенному на рис. 6.3. На рис. 6.3 вся система управления качеством представлена в виде трех основных подсистем. Основой системы является подсистема обеспечения качества, включающая в себя вход X , процесс Y и выход Z . Обозначим ее через $V(X, Y, Z)$. Именно эта подсистема производит работу Y , она потребляет все необходимое для производственного процесса X и выдает продукцию Z .

Второй и третьей подсистемами являются соответственно контролирующая и управляющая. Обозначим контролирующую подсистему через $W(X, Y, Z)$, а управляющую — через $U(X, Y, Z)$.

Они производят извлечение, обработку, хранение и передачу информации о X, Y, Z с целью стабилизации и поддержания устойчивого состояния всей системы. Все три подсистемы автономны

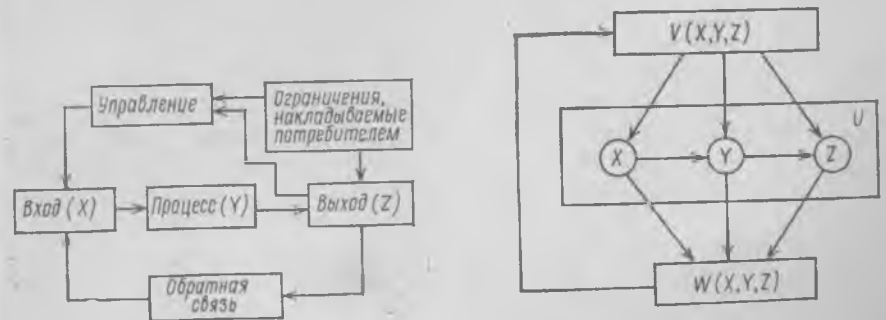


Рис. 6.2. Модель управления сложным технологическим процессом

Рис. 6.3. Формализованная модель системы управления качеством

и разработка всей системы начинается с разработки этих подсистем. Связи в системе могут быть как односторонними

$$U(X, Y, Z) \rightarrow W(X, Y, Z) \rightarrow V(X, Y, Z) \rightarrow U(X, Y, Z),$$

так и двусторонними

$$U(X, Y, Z) \rightleftharpoons W(X, Y, Z) \rightleftharpoons V(X, Y, Z) \rightleftharpoons U(X, Y, Z).$$

Такая взаимосвязь подсистем U , W и V наблюдается на всех уровнях организации, начиная от низшей (на уровне операции) и кончая высшей. Следовательно, все процессы в системе можно рассматривать или с точки зрения нижестоящего уровня, или с позиции вышестоящей системы.

Низший уровень, как правило, разбивается на ряд мелких технологических операций, устанавливается их последовательность. Чаще всего эту операционную последовательность технологического процесса изображают с помощью вероятностной схемы (рис. 6.4). Таким образом, контроль и управление могут производиться лишь в том случае, если задано требуемое значение выходного параметра каждой операции $X_{i_{тр}}$, имеется его замеренное фактическое значение $X_{i_{факт}}$, а также известны управляемые параметры каждой операции S_i . Такое представление сложного процесса, состоящего в формировании $X_{i_{факт}}$ до уровня $X_{i_{тр}}$ за требуемый промежуток времени, дает возможность формализации его и облегчает анализ.

Наблюдая за реальным процессом и фиксируя вероятности перехода от этапа к этапу $P_{(n-1)n}$ по результатам поэтапного контроля, можно получить статистические данные, необходимые для прогнозирования и обоснованного планирования основных показателей качества процесса. Например, фиксируя случаи возврата на доработку от этапа к этапу (как показано на рис. 6.4), можно установить наиболее критичные операции процесса и тем самым заострить внимание на причинах дефектов и способах их устранения.

Число контролируемых параметров должно ограничиваться, так как их возрастание может привести к невозможности организовать управление даже с использованием ЭВМ. Для ограничения на этапе создания изделия (начиная с подготовки технических требований и кончая выпуском технической документации) контролируемые параметры и требования к ним устанавливаются с учетом информации о предыдущих аналогичных разработках

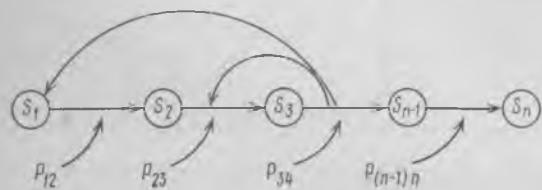


Рис. 6.4. Вероятностная схема технологического процесса

путем исключения не критичных параметров и тех, для которых имеется большой технологический запас. Для контроля оставляются только те параметры, разброс значений которых соизмерим с установленными допусками ($\pm \epsilon$). Если по результатам контроля выявлено несоответствие фактических значений параметров установленным нормам, то принимается решение или о доработке процесса до требуемых норм, или об изменении требований.

Обобщенная формализованная структурно-функциональная модель системы управления качеством, представленная на рис. 6.3, отображает функции основных подсистем $U(X, Y, Z)$, $W(X, Y, Z)$, $V(X, Y, Z)$ и их взаимосвязь.

Подсистема $U(X, Y, Z)$ выполняет основную функцию в системе управления качеством, преобразуя вход X в выход Z в соответствии с командами, поступающими из подсистемы $V(X, Y, Z)$.

Подсистема $U(X, Y, Z)$ является в основном технико-информационной, преобразующей один вид технической информации в другой с использованием технических средств и эталонной информации. Подсистема $V(X, Y, Z)$ является в основном организационной, так как она на основании информации от подсистемы $W(X, Y, Z)$ и от управляющей подсистемы более высокого ранга формирует команды по воздействию на X , Y и Z . Наконец информационно-техническая подсистема $W(X, Y, Z)$, пользуясь эталонной информацией, сравнивает фактические значения параметров $X_{факт}$, $Y_{факт}$, $Z_{факт}$ с заданными значениями $X_{тр}$, $Y_{тр}$, $Z_{тр}$.

Таким образом, в функции основных подсистем системы управления качеством входят вопросы, связанные или с переработкой информации, или с решением технических вопросов организации и экономики, или с решением всевозможных комбинаций и сочетаний этих четырех вопросов на всех этапах формирования качества продукции.

Техническая база определяет наличие и технические показатели входа X_{i_0} , процесса Y_{i_0} и выхода Z_{i_0} (материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия, технологическое, контрольно-измерительное и испытательное оборудование, технологические процессы операции, режимы, промежуточные и выходные продукты).

Информационная база определяет наличие и качество входной информации X_{ij} (конструкторской, технологической, нормализационной, плановой документации), оперативной информации Y_{ij} о процессе (результаты входного, межоперационного и выходного контроля, испытаний, анализа отказов), выходной информации Z_{ij} (выпускаемые документы, отчеты, сводки, прогнозы).

Экономическая база определяет финансовое обеспечение работ по контролю качества продукции и управлению качеством продукции X_{i_2} , затраты на контроль и управление Y_{i_2} , экономическую эффективность Z_{i_2} выполненных работ по повышению качества.

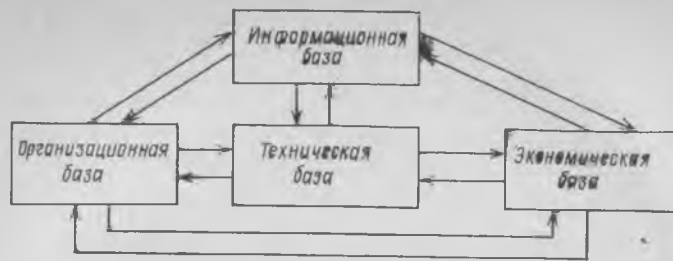


Рис. 6.5. Схема взаимосвязи технической, информационной, организационной и экономической базы системы управления качеством

Организационная база определяет обеспеченность и качество трудовых и производственных ресурсов X_i , формы и методы контроля и управления Y_i , моральные и административные стимулы повышения качества Z_i .

Центральное место отводится технической базе системы в связи с тем, что основное назначение предприятия и системы управления качеством — выпуск технической продукции на базе имеющихся технических средств, технологического процесса, сырья и материалов. Взаимосвязь технической, информационной, организационной и экономической базы системы управления качеством условно изображена на рис. 6.5.

6.3. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Создание и внедрение системы управления качеством включает:

- разработку научных основ системы S_A ;
- разработку принципов, методов и средств системы S_B применительно к конкретным условиям предприятия;
- внедрение системы S_C в основные сферы деятельности предприятия;
- эксплуатацию и совершенствование системы S_D .

Каждый из этапов включает разработку и совершенствование системы обеспечения качества продукции $U(X, Y, Z)$, системы контроля $W(X, Y, Z)$ и системы управления качеством продукции $V(\bar{X}, Y, Z)$, которые, в свою очередь, включают технические Θ , информационные I , экономические ϵ и организационные S основные системы управления качеством.

Рассмотрим создание системы управления качеством именно с создания технической, информационной и организационной базы.

Техническая база системы управления качеством. Созданию и внедрению системы управления качеством должна предшествовать разработка и организация необходимой технической базы. Первым этапом является разработка технической базы для этапа

S_A , который, так же как и этапы S_B , S_C и S_D , включает в себя подсистемы U , W и Y .

Разработка подсистемы U включает в себя вопросы формирования и изменения качества продукции, анализа факторов, влияющих на качество продукции, методы воздействия на качество продукции и вопросы автоматизации процессов формирования качества продукции.

Для контроля качества и надежности продукции (подсистема W) необходимо разработать технические основы контроля качества продукции, включающие в себя разработку метрологического обеспечения, автоматизацию процессов контроля, сбора, обработки, хранения и отображения информации о качестве, разработку неразрушающих методов и средств контроля.

Для управления качеством продукции (подсистема V) необходимо разработать принципы управления качеством, включающие в себя сам механизм управления качеством продукции, технические средства связи с объектами управления, выбор процессов, подлежащих автоматизации.

Для разработки программы обеспечения надежности и качества ИМ (подсистема W) проводят анализ существующей системы технического обеспечения. Для этой цели проводят пооперационный анализ процессов создания ИМ для выявления типичных дефектов и разрабатывают методы и средства их устранения в порядке проектирования и производства, а также разрабатывают методы и средства отбраковки потенциально ненадежных ИМ.

Для разработки системы управления качеством интегральных узлов (подсистема V) необходимо выбрать систему технических решений по управлению качеством интегральных узлов, для чего:

- установить порядок утверждения технических решений по нормированию показателей качества;
- установить критерии управления качеством;
- принять решение о совершенствовании методов и средств обеспечения и контроля интегральных узлов.

Следующим этапом является внедрение системы управления качеством создания интегральных узлов. Внедрение программы обеспечения надежности и качества ИМ (подсистема U) включает в себя технические мероприятия по:

- обеспечению единства и правильности измерений, а также регламентации проверок, упорядоченных во времени;
- внедрению технологических испытаний и тренировок;
- внедрению методов анализа брака, потерь и отказов интегральных устройств в производстве;
- внедрению автоматизированных средств контроля и информационной системы.

Внедрение системы контроля качества ИМ (подсистема W) предусматривает:

- введение контроля материалов, оборудования, технологических процессов и рабочих мест;

проведение испытаний, анализа отказов и исследований качества и надежности интегральных устройств;

внедрение автоматизированных средств контроля и анализа качества.

Внедрение системы управления качеством ИМ (подсистема W) предусматривает внедрение технических средств управления:

планирование совершенствования методов и средств контроля и анализа качества продукции;

внедрение средств наглядного отображения показателей качества.

Информационная база системы управления качеством. Информация является средством взаимосвязи объекта и субъекта. Субъект устанавливает вид и количество информации, организует ее хранение, преобразование и передачу.

Информация о качестве продукции эффективна в том случае, если она повышает вероятность определения показателей качества изделий, адекватных реальным. Информация должна быть достоверной, своевременной, необходимой и удобной. Достоверность информации означает такое ее качество, когда она независимо от источников и каналов передачи достаточно точно отражает состояние управляемого объекта. Своевременной считается информация, поступившая в течение заданного интервала времени достаточного для подготовки, принятия и реализации решения по управлению. Необходимой считается минимальная информация, обеспечивающая выработку и принятие решений по управлению. Удобной считается информация, обеспечивающая управленческий персонал наилучшим способом о характере, размере и значимости отклонений от необходимого хода работ.

Информационная система предприятия включает оперативный сбор, обработку, анализ и распределение информации о действии внешних и внутренних факторов, а также о состоянии системы.

Наиболее существенными потоками информации в системе управления качеством являются:

входная информация с различных контрольных постов, отражающая качество разработок, производства и применения изделий;

промежуточная информация, представляемая в виде графиков, таблиц, обобщенных данных и тому подобного за некоторый промежуток времени. Эта информация отражает состояние, а также выявляет тенденции и основные причины изменения качества продукции;

выходная информация в виде решений, планов, мероприятий и других распорядительных документов по воздействию на качество производственного процесса.

Сведения о качестве чаще всего представляют в виде графиков или сопоставимых данных, отражающих тенденцию изменения общего уровня или отдельных показателей качества продукции.

Организационная база системы управления качеством. Организационная система управления качеством базируется на объединенной службе — секторе контроля качества, который подчиняется руководителю предприятия. Основная задача системы управления качеством состоит в оперативном сборе, отработке и рассылке информации о «помехах» для принятия соответствующих мер с использованием математических методов, автоматизированных средств контроля и ЭВМ.

Все подразделения сектора контроля качества взаимонезависимы, подчиняются одному руководителю, который, в свою очередь, подчиняется непосредственно директору предприятия. Объем производства и его тип определяет структуру службы качества, ее численность и конкретные задачи.

Возглавляет контроль качества главный контролер качества, наделенный правами заместителя руководителя предприятия по качеству. Он решает внешние и внутренние вопросы, связанные с обеспечением, контролем и управлением качеством изделий на этапах разработки, производства и применения, а именно: анализ претензий и рекомендаций потребителей, заказчиков, вышестоящих инстанций, головных организаций по качеству и надежности;

выявление тенденции спроса на качество, формирование перспективных и оперативных планов по качеству выпускаемой и разрабатываемой продукции, согласование планов с руководством предприятия;

организация работ по анализу качества изделий на этапах применения, производства и разработки;

согласование с руководством и ответственными исполнителями мероприятий по устранению выявленных недостатков;

организация контроля выполнения принятых решений по качеству;

организация технически и экономически обоснованного контроля документации, оборудования, материалов и выпускаемой продукции;

совершенствование организации обеспечения, контроля и управления качеством выпускаемой продукции.

В системе управления качеством отдел надежности является координирующей службой сектора контроля качеством. Отдел испытаний обеспечивает испытания ИМ в условиях, имитирующих сферу применения и эксплуатации, и является одним из основных объективных источников внутренней информации о фактическом качестве ИМ.

Отдел испытаний обеспечивает получение достоверной информации о соответствии изделий техническим условиям или техническим заданиям, на основании которой принимаются окончательные решения о приемке изделий, доработках, сроках разработок, освоения продукции и т. д. Отдел технического контроля в системе управления качеством выполняет функцию контроля X, Y, Z на уровне исполнителей; функции контролера — на уровне участка и

цеха; поставщика объективной, своевременной и полной информации о качестве — на уровне предприятия и объединения.

В системе управления качеством функцией ОТК является обобщение емкой и разнородной информации о качестве X , Y и Z . Главной целью ОТК является предотвращение дефектов X , Y и Z и отклонения ΔX , ΔY , ΔZ от установленных норм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 573 с.
2. Быстров Ю. А., Колгин Е. А., Котлецов Б. Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. — М.: Радио и связь, 1988. — 168 с.
3. Глудкин О. П., Черняев В. Н. Технология испытания микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем. — М.: Энергия, 1980. — 360 с.
4. Чекмарев А. А. Стандартизация электронных приборов. — М.: Энергия, 1977. — 176 с.
5. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. — М.: Сов. радио, 1975. — 300 с.
6. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. — М.: Радио и связь, 1981. — 352 с.
7. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. — М.: Высшая школа, 1977. — 416 с.
8. Глудкин О. П. Контроль качества и прогнозирование надежности интегральных узлов. — М.: Машиностроение, 1977.
9. Готра З. Ю. Контроль технологии гибридных интегральных схем. — Львов: Каменяр, 1981. — 176 с.
10. Чернышев А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. СТАНДАРТИЗАЦИЯ И КАЧЕСТВО	4
1.1. Категории и виды стандартов, применяемых в электронной промышленности	4
1.2. Стандартизация и управление качеством продукции	10
Глава 2. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	12
2.1. Основные понятия теории вероятностей	13
2.2. Статистический ряд и его характеристики	14
2.3. Основные законы распределения случайной величины	16
2.4. Критерий согласованности экспериментального и теоретического законов распределения	22
2.5. Показатели надежности интегральных микросхем	24
2.6. Организация контроля качества в производстве интегральных микросхем	27
Глава 3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ, ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	35
3.1. Виды отказов, повреждений и их анализ	35
3.2. Механизм отказов активных элементов	38
3.3. Отказы металлизации	46
3.4. Отказы контактных соединений	51
3.5. Методы оценки надежности	54
Глава 4. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	63
4.1. Оптические методы контроля	65
4.2. Методы контроля распределения температурных полей	84
4.3. Радиационные методы контроля	89
4.4. Методы электронной микроскопии	97
4.5. Масс-спектрометрические методы	111
4.6. Электрохимические методы контроля	115
4.7. Контроль качества проведения технологических процессов с использованием тест-структуры	119
Глава 5. ИСПЫТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ	125
5.1. Классификация испытаний	125
5.2. Стандартизация климатических требований при испытании изделий электронной техники	128
5.3. Климатические испытания интегральных микросхем	136
5.4. Влияние механических воздействий на интегральные микросхемы, их стандартизация и виды механических испытаний интегральных микросхем	146
5.5. Механические испытания интегральных микросхем	148
5.6. Классификация изделий электронной техники по условиям эксплуатации и стандартизации методов испытаний	154
Глава 6. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ	158
6.1. Общие сведения о системе управления качеством	158
6.2. Моделирование системы управления качеством	160
6.3. Этапы создания и внедрения системы управления качеством	164
Список литературы	168