МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. Е. Ломоносов, Н. В. Шевченко

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие
по дисциплине
«Надежность и контроль качества электронных средств»
для обучающихся по направлению
11.03.03 - Конструирование и технология электронных средств

В двух частях

Часть 2

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73
Л753

Р е ц е н з е н т:
Д.В. Начаров – доцент кафедры «Электронная техника», канд. техн. наук

Ответственный за выпуск:
Ю.П. Михайлюк – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электронная техника»

Ломоносов, Сергей Евгеньевич

Л753 Электронная техника: учебно-методическое пособие по дисциплине «Надежность и контроль качества электронных средств» для обучающихся по направлению 11.03.03 - Конструирование и технология электронных средств. В 2-х частях. Часть 2 / С. Е. Ломоносов, Н. В. Шевченко, Севастопольский государственный университет. – Севастополь : СевГУ, 2022. – 44 с. – Текст : электронный.

Приведены основные понятия теории надежности и необходимые сведения из теории вероятности и математической статистики. Рассмотрены основные виды дестабилизирующих внешних факторов и испытаний изделий электронной техники на воздействие этих факторов, физические причины и механизмы отказов различных изделий при испытаниях и эксплуатации. Описаны неразрушающие методы контроля качества и методы локальной диагностики; обсуждаются проблемы обеспечения надежности изделий электронной техники на различных этапах жизненного цикла, пути повышения их надежности, а также влияние ионизирующих излучений на надежность изделий.

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Электронная техника», протокол № 7 от 16 марта 2022 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА 4
1.1 Классификация и значение методов неразрушающих испытаний 4
1.2. Применение методов интегральной диагностики к оценке и прогнозированию работоспособности ИЭТ 7
1.2.1. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов и качества контактов резисторов по уровню собственных шумов 7
1.2.2. Оценка качества и надежности ПП по параметрам ВАХ 10
1.2.3. Использование переходных тепловых характеристик для прогнозирования надежности ПП и резисторов 12
2. МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЭТ 14
2.1. Методы ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) 14
2.2. Радиационные методы 15
2.3. Методы визуализации тепловых полей 16
3. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЭТ 17
3.1. Обеспечение надежности ИЭТ на разных этапах жизненного цикла 17
3.1.1. Разработка технических требований на прибор. 17
3.1.2. Разработка прибора. 17
3.1.3. Производство приборов. 18
3.1.4. Проектирование аппаратуры. 18
3.1.5. Производство аппаратуры. 18
3.1.6. Эксплуатация аппаратуры. 18
3.2. Резервы повышении надежности ИЭТ и возможности их реализации 19
3.3. Микроминиатюризация и интеграция РЭА 22
3.4. Выбор типов элементов и их эксплуатационных режимов 23
3.5. Роль стандартизации в повышении надежности ИЭТ 24
3.6. Экономические вопросы надежности 25
4. РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИЭТ 26
4.1. Источники ионизирующих излучений 27
4.1.1. ИИ космического пространства 27
4.1.2. Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) 27
4.1.3. Ядерный взрыв 27
4.2. Радиационные эффекты в материалах электронной техники 28
4.2.1. Радиационные дефекты в твердых телах 29
4.2.2. Радиационные эффекты в металлах и сплавах 30
4.2.3. Радиационные эффекты в диэлектриках 30
4.2.4. Радиационные эффекты в полупроводниках 31
4.2.5. Влияние ИИ на оптические свойства материалов 32
4.3. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах 33
4.4. Радиационные эффекты в пассивных компонентах РЭА 34
5. ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ 35
5.1. Деградация полупроводниковых лазеров 35
5.2. Деградация светодиодов и оптронов 39
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 41
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 43

1. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА

1.1. Классификация и значение методов неразрушающих испытаний

Под неразрушающими методами испытаний (НРИ) подразумевают такие виды контроля (испытаний и измерений), которые, не изменяя качества, параметров и характеристик изделий, позволяют по косвенным «вторичным» признакам обнаруживать скрытые дефекты либо такие особенности, которые влекут за собой потенциальную ненадежность изделий.

Методы НРИ, используемые для контроля качества к прогнозирования надежности РЭА, целесообразно условно подразделить на две группы: *общие* методы НРИ, широко используемые в различных областях современной техники, и *специальные* методы, связанные со специфическими особенностями и характеристиками аппаратуры и ее элементов. Разделение это в достаточной степени условно и провести резкую границу между этими методами чаще всего нельзя.

К группе общих методов НРИ можно отнести методы ультразвуковой дефектоскопии, магнитной дефектоскопии, методы вихревых токов, методы проникающих красящих или люминесцирующих жидкостей и другие «общетехнические» методы.

К группе специальных методов можно отнести специфические методы рентгенотелевизионной микроскопии, приспособленные для исследования элементов РЭА, методы оценки качества и надежности аппаратуры по стабильности или величине характерных электрических параметров аппаратуры и ее элементов (например, вида вольтамперной характеристики, уровня шумов, токов, напряжений, сопротивлений и др.) и специфические методики визуализации тепловых полей. Последние находят широкое применение и в других областях научных и технических исследований, например в строительстве, теплотехнике, медицине.

Всю совокупность методов НРИ аппаратуры и ее элементов целесообразно разделить по степени локализации дефекта (глубине диагноза) на методы интегральной и локальной диагностики.

Методы *интегральной диагностики* позволяют обнаруживать потенциально ненадежные изделия, например изделия со скрытыми дефектами, нестабильными характеристиками и др. Но эти методы не позволяют (без использования специальных приемов расшифровки) однозначно устанавливать причину дефекта или локализовать его местоположение в изделии. В основе использования методов интегральной диагностики лежит измерение специфических параметров или их совокупности, которое можно осуществлять в статическом или динамическом режиме.

При измерении в статическом режиме диагностирование осуществляется по отклонению формы статической характеристики от заданной. Таковы, например, метод нелинейностей или третьей гармоники при контроле резисторов, конденсаторов и т.п., метод m-фактора при контроле

полупроводниковых приборов, контроль электровакуумных приборов по электронной температуре катода и др.

Измерение в динамическом режиме позволяет оценить влияние изменения внешних условий или характеристик внутренних процессов в изделиях на их состояние, диагностировать дефекты и деградационные процессы, не выявляемые при измерениях в статическом режиме.

Динамика изменения параметра контролируемою изделия может обуславливаться динамикой внешних воздействий (например, при вибрационных испытаниях) и динамикой внутренних процессов. При обработке результатов измерения параметры, отражающие динамику внешних воздействий, можно выделить, например, с помощью фильтров, стробоскопии или корреляционного анализа. Измерение параметров, отражающих динамику внутренних процессов в изделиях, позволяет получать в ряде случаев ценную информацию для оценки их качества. Например, измеряя методом одиночных импульсов предельный ток эмиссии, можно обнаруживать в готовых сложных приборах (электронно-лучевых трубках, приборах СВЧ и др.) дефекты, связанные со свойствами оксидного катода, подогревателя и модуляционной части, а также прогнозировать работоспособность при эксплуатации и хранении.

Анализируя характеристики и параметры шумовых процессов, можно обнаруживать дефекты исходных материалов и дефекты, образовавшиеся при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Методы локальной диагностики позволяют устанавливать локальную зону возникновения дефекта или деградационного процесса, а также выделять одну из многих возможных причин их возникновения (локализовать причину). Эти методы условно можно разделить на три группы:

Методы локального измерения специально выбранных характеристик электромагнитных, тепловых и других полей. Например, при контроле микросхем с помощью микрозондов можно контролировать распределение напряженности электрического и магнитного полей, позволяющее определить наличие неоднородностей магнитной и диэлектрической проницаемости, образование объемных зарядов, проводящих перемычек, изоляционных прокладок и т. п.

Методы дефектоскопии (рентгеновские, тепловые, ультразвуковые и др.). основанные, как правило, на оценке результатов взаимодействия различных видов излучений с материалами контролируемых изделий и используемые для обнаружения скрытых дефектов или установления причин отказов без нарушения целостности оболочек.

Методы физического эксперимента (рентгеновская топография, растровая электронная микроскопия, радиоспектральные методы и др.).

В последние годы наблюдается заметное расширение работ в области развития специальных методов НРИ, предназначенных для прогнозирования надежности и оценки качества изготовления РЭА и ее элементов, методов интегральной и локальной диагностики. Здесь невозможно дать подробный

обзор всех направлений, по которым - ведутся разработки методов и средств НРИ. В данном пособии рассмотрены только наиболее общие и перспективные методы, по которым получены относительно стабильные результаты.

Широкое использование НРИ для контроля качества и обеспечения надежности современной РЭА дает возможность организовать контроль многих параметров и характеристик каждого образца аппаратуры и почти каждого технологического процесса производства. Это особенно важно в процессе разработки, когда по результатам испытаний небольшого количества образцов следует дать заключение о свойствах и характеристиках конструкции, о правильности выбора технологических процессов производства, об эффективности мероприятий, направленных на обеспечение надежности разрабатываемых изделий, получить данные для коррекции схем, конструкций, технологического процесса.

Положительную роль могут сыграть неразрушающие испытания и при контроле качества серийных изделий, особенно, аппаратуры ответственного назначения, а также исходных материалов.

Среди разрушающих диагностических испытаний, проводимых в период конструкторской отработки, в последнее время все большее значение приобретают *провоцирующие* испытания, при которых создаются условия, благоприятствующие возникновению определенных деградационных процессов или отказов из-за дефектов разработки или производства. Эти испытания обеспечивают сокращение сроков разработки и получения необходимых данных для обеспечения высокого качества и надежности аппаратуры и ее элементов.

Одним из направлений повышения диагностической эффективности провоцирующих испытаний является использование преднамеренной (направленной) выборки, осуществляемой по наличию у изделия какого-либо скрытого дефекта, не влияющего на параметры, непосредственно определяющие его работоспособность и поэтому не оговоренные в нормативно-технических документах.

Примером таких дефектов могут служить обнаруживаемые при рентгеновском контроле нарушения внутренней геометрии выводов электронных приборов, не влияющие на их электрические параметры. Направленная выборка может осуществляться на основании результатов, полученных при проведении НРИ.

Наконец, НРИ являются очень важным средством первичного анализа причин отказов во время испытаний и опытной эксплуатации, дают возможность объективного исследования отказавших элементов и деталей.

Планировать использование методов и средств НРИ необходимо на ранних этапах разработки объектов испытаний, когда еще возможно удовлетворить определенные требования контролепригодности, сделав будущие изделия удобными, приспособленными к операции контроля выбранными методами. Применение НРИ становится неотъемлемой частью реализации программ контроля качества и обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры.

1.2. Применение методов интегральной диагностики к оценке и прогнозированию работоспособности ИЭТ

Рассмотрим возможность оценки и прогнозирования работоспособности ИЭТ по стабильности и величине характерных *электрических* параметров. Описываемые методы основаны на принципах интегральной диагностики. Создание и применение этих методов проходит ряд этапов:

− разделение изделия на отдельные элементы, отличающиеся общностью технологических процессов и процессов деградации или разрушения;

− установление для каждого элемента типичных видов и механизмов отказов;

− нахождение математического описания этих механизмов;

− определение минимальной совокупности информативных параметров и выбор методов их измерения;

− отыскание рациональных способов сравнения параметров изделия и модели для принятия достоверного решения о годности или причинах потери работоспособности.

1.2.1. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов и качества контактов резисторов по уровню собственных шумов

В последнее время показано, что собственные шумы полупроводников (ПП), так же, как и некоторых ЭВТ, а также резисторов, штепсельных разъемов, контактов реле и других элементов РЭА несут существенную информацию об их надежности. Шумы можно рассматривать как флуктуации проводимости (активной, реактивной или комплексной) при подаче на испытуемый элемент постоянного, синусоидального или импульсного напряжения. В общем спектре шумов наиболее важную информацию о качестве элементов несут две составляющие:

− контактный или «фликкер-шум;

− лавинный шум.

Спектральная плотность мощности контактного шума обратно пропорциональна частоте, в связи с чем эту составляющую частот шума называют шумом типа 1/f.

Наличие контактного шума определяется рядом факторов, имеющих различную физическую природу. Он вызывается структурной неоднородностью областей, по которым протекает ток, нестабильностью *и* зернистостью структуры этого объема. При протекании тока по таким областям происходит локальная перестройка отдельных участков структуры, скачкообразные повышения проводимости в одних и понижения проводимости в других зонах объема. Это вызывает флуктуации общей проводимости.

Фликкер-шум, зависящий от состояния поверхности кристалла полупроводниковых приборов, вызывается флуктуациями концентрации зарядов на локальных аномалиях поверхности, флуктуациями скорости поверхностной рекомбинации в области эмиттерного перехода и смежной с ним

области базы, флуктуациями поверхностных утечек по периметру коллекторного перехода. Его интенсивность поэтому зависит от состояния газовой среды, соприкасающейся с поверхностью кристалла в полупроводниковых приборах.

Это замечено также и для непроволочных резисторов (в особенности высокоомных), изолированных контактов и др. Существенное влияние на поверхностные явления оказывает влага, содержащаяся в объеме газа внутри корпуса приборов. Эксперименты показывают, что шум полупроводниковых приборов, имеющих аномалии на поверхности кристалла, при помещении кристалла во влажную атмосферу значительно увеличивается по сравнению с приборами, кристаллы которых не имеют поверхностных аномалий и находятся в сухой атмосфере.

У кремниевых пленарных транзисторов и интегральных микросхем шум типа 1/f вызывается в основном дефектами *контактов* металл-полупроводник, трещинами, посторонними включениями и другими аномалиями объема кристалла. Эго объясняется тем, что поверхность этих транзисторов во многих конструкциях защищена слоем окисла и поверхностные явления здесь завуалированы.

Дефекты в контактах и объеме кристалла нередко приводят к катастрофическим отказам в эксплуатации особенно при колебаниях температуры и механических нагрузках.

Уровень шума типа 1/f, как правило, существенно увеличивается при отрицательных температурах. Для увеличения интенсивности шума в большинстве случаев следует увеличить рабочий ток транзистора.

Лавинный шум обычно бывает связан с тем, что в области протекания тока при нестабильном контакте создаются локальные повышения градиентов напряжения и возникают микроплазменные области, в которых реализуется режим электрического пробоя. Случайные изменения объема, «включения» и «выключения» этих областей в пути протекания тока вызывают изменения интенсивности лавинного шума. Они могут быть обусловлены флуктуациями контактного давления, мгновенными перегревами и другими нестационарными тепловыми процессами в микрообъемах, изменениями концентрации носителей тока в емкостных и резистивных неоднородностях структуры. Для полупроводниковых переходов повышение уровня лавинного шума наблюдается обычно при работе в предпробойном режиме. Лавинный шум проявляется в виде всплесков спектральной плотности мощности на относительно высоких частотах.

Анализ причин возникновения 1/f и лавинного шумов показывает, что наблюдения за их интенсивностью в некоторых ситуациях могут быть использованы для прогнозирования надежности РЭА и ее элементов, т.е. служить методами НРИ. Это подтверждается и экспериментами на кремниевых планарно-эпитаксиальных транзисторах и при других экспериментах. Практика показывает, что метод оценки работоспособности ПП по уровню низкочастотных шумов эффективен не для всех типов ПП, к тому же он

эффективен для выявления только некоторых потенциальных дефектов этих приборов. Поэтому решение о практическом использовании этого метода можно принимать только после подтверждения пригодности его для выявления дефектов конкретных типов приборов.

Значительная часть дефектов в аппаратуре обусловлена плохими, ненадежными электрическими *контактами.* К этой группе дефектов можно отнести ненадежные «холодные» пайки, дефекты контактной системы всевозможных реле, постоянные или перемежающиеся обрывы в точечных диодах, дефекты термокомпрессионных соединений в полупроводниковых приборах и ИС, многие типы дефектов в резисторах и пр.

Контакты, осуществляемые через оксидную пленку или пленку интерметаллических соединений, контакты при малом контактном давлении, эффективная площадь которых непостоянна, как правило, имеют существенно нелинейную вольтамперную характеристику (ВАХ), т. е. величина проводимости их зависит от тока, протекающего через контакт. На этом базируется методика оценки работоспособности некоторых элементов и электрических цепей в приборах *по уровню третьей гармоники тока.*

Нередко наряду с функциональной зависимостью проводимости от тока таких элементах наблюдается и повышенный уровень *лавинных шумов.* Несинусоидальность тока при подаче на участок цепи строго синусоидального напряжения свидетельствует о том, что в цепи имеется нелинейное, зависящее от тока сопротивление, ненадежный контакт. Степень искажения синусоиды можно оценить по доле третьей гармоники тока.

Трудности реализации этих методик связаны с тем, что большая часть элементов современной аппаратуры автоматики имеет нелинейные ВАХ или существенно нелинейные участки ВАХ. Выделить непостоянство сопротивления контакта на фоне непостоянства сопротивления остальных элементов цепи оказывается очень трудным. Это, в частности, является причиной того, что подобные методики оказались мало эффективными для оценки качества термокомпрессионных: соединений в ПП после их герметизации. Последовательно с термокомпрессионными соединениями, как правило, включены сопротивления р-п переходов с нелинейной ВАХ, и выделить сопротивление термокомпрессионного соединения из этой цепи в запаянном приборе технически трудно.

Методы оценки качества контакта по степени искажения кривой тока при подаче на цепь строго синусоидального напряжения нашли наиболее широкое применение при контроле качества и прогнозировании надежности некоторых типов *резисторов.*

В резисторах наиболее часто встречающиеся дефекты имеют характер дефекта контакта. При подаче на резистор идеально синусоидального напряжения кривая тока, протекающего по резисторам с дефектами контактного типа, искажается. Степень этого искажения можно оценить по относительной доле составляющей третьей гармоники в токе, протекающем через резистор, определяемой по отношению к току основной гармоники.

Опыт показывает, что уровень шумов, измеренный на резисторах, хорошо коррелирует с результатами измерений уровня третьей гармоники на этих же резисторах.

Отбраковка резисторов по уровню третьей гармоники целесообразна для отбора резисторов, предназначенных к использованию в длительно работающей аппаратуре ответственного назначения. Для таких применений коэффициент корреляции между результатами испытаний по уровню третьей гармоники и потенциальной надежностью резисторов оказывается высоким.

1.2.2. Оценка качества и надежности ПП по параметрам ВАХ

Метод третьей гармоники, характеризующий отклонение ВАХ элементов от строго прямолинейной, пригоден только для ограниченного количества элементов, имеющих в принципе линейную характеристику. Вообще же стабильное или нестабильное во времени изменение формы и параметров ВАХ во многих случаях может быть использовано для обнаружения методами НРИ отклонений в технологическом процессе изготовления элементов, ведущих к снижению их надежности и отклонений в качестве исходных материалов.

Для обеспечения надежности РЭА наиболее важны отличия, обнаруживаемые *до того,* как приборы будут установлены в аппаратуру (т.е. «предвестники отказов»), по этим отличиям можно отбирать для аппаратуры наиболее надежные элементы. Эти отличия должны дать возможность обнаружить не только те элементы, которые имеют явные дефекты в момент испытаний, но и те, которые будут иметь недопустимый темп деградации.

На основании исследования возможных причин ненадежности полупроводниковых диодов были отмечены пять групп отличий ВАХ от идеальных, связанные с наличием каналов утечки, наличием каналов, паразитных р-п переходов и др.

Неоднородности, посторонние включения в поверхностном слое перехода могут быть причиной локальных повышений градиента напряжения в отдельных зонах перехода. Эти дефекты не изменяют хода прямой ветви ВАХ, но увеличивают крутизну падения *обратной* ветви и уменьшают пробивное напряжение *р-п* перехода. Они также вызывают ускоренную деградацию характеристик диода и могут рассматриваться как сигнал о пониженной надежности его.

Загрязнение поверхности перехода, особенно если оно осложнено наличием частиц конденсата влаги на поверхности, может привести к искажению формы обратной ветви ВАХ диода. Дефекты, допущенные при создании *р-п* переходов, связанные с повышением концентрации примесей в области перехода, а также перегрев диодов в процессе испытаний могут быть причиной появления «мягкой» формы обратной ветви ВАХ.

Появление интерметаллических включений в омическом контакте диода или наличие неустойчивого контакта по другим причинам вызывает искажение прямого падения напряжения и аномальное изменение *прямой* ветви ВАХ.

Паразитный *р-п* переход возникает из-за неоднородности распределения примеси в базовой области структуры диода, а также из-за некачественной структуры омических контактов, приводящей к эффекту выпрямления тока.

Все перечисленные аномалии ВАХ диодов могут быть основанием для сомнений в надежности дефектных приборов. Выводы, сделанные на основании теоретических соображений, были неоднократно подтверждены экспериментально для различных типов диодов при специально подобранных режимах испытаний. В частности, весьма наглядные результаты были получены при исследованиях возможности отбраковки потенциально ненадежных диодов по величине падения напряжения прямой ветви ВАХ: чем больше прямое падение, тем меньше надежность.

При наличии дефектов в *тиристоре* ВАХ его во многих случаях также искажается. Появляются разрывы в отдельных участках характеристики, на некоторых участках она становится петлеобразной. У некоторых тиристоров искажается форма участка ВАХ, соответствующая запертому состоянию тиристора. Иногда характеристика нестабильна во времени, наблюдается «перескакивание» характеристики от одной формы к другой через нерегулярные промежутки времени либо после прогрева прибора и т. д.

Отклонения ВАХ, как правило, связаны с наличием дефектов в полупроводниковой структуре тиристора, приводящих со временем к отказу тиристора или к резкому ухудшению его характеристик.

Диагностика по виду ВАХ является также эффективным средством диагностики потенциальной надежности *транзисторов* по отношению к некоторым видам отказов.

Надежность аппаратуры в ряде конкретных случаев обеспечивается стабильностью во времени коэффициента усиления по постоянному току. Известно, что стабильность коэффициента усиления во времени и при изменении температуры зависит для большой группы типов транзисторов от состояния поверхности кристалла и от концентрации дефектов вблизи коллекторного перехода.

Состояние поверхности кристалла статистически может оцениваться по результатам измерений коэффициентов усиления транзисторов в микромощном режиме на малых уровнях инжекции, характеризующем прямую ветвь ВАХ. Концентрация дефектов вблизи коллекторного «перехода так же, как и для диодов, может быть оценена по виду обратных ветвей ВАХ коллекторного перехода для некоторых типов транзисторов и по величине пробивного напряжения. Вид обратной ветви ВАХ коллекторного перехода транзистора может быть использован в качестве средства интегральной диагностики для суждения о наличии микродефектов в структуре коллекторного перехода и загрязнений поверхности кристалла или повышенной влажности внутри транзистора.

Важную информацию о качестве и надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем дают исследования изменений ВАХ р-п переходов *во времени,* показывающие особенности процесса установления

стационарного режима работы перехода при подаче на него обратного смещения и особенности процессов, протекающих в обратносмещенных переходах после установления стационарного режима работы. Показано, что, подавая на переход импульсы напряжения или пропуская через него импульсы тока, можно получить следующие группы временных характеристик:

– характеристики коммутационной нестабильности обратных токов переходов, свидетельствующие (при замедленном спаде тока через переход в течение прямоугольного импульса напряжения длительностью порядка 1 мс) о наличии в полупроводниковом переходе скрытых дефектов;

– характеристики падения напряжения на переходе при пропускании в обратном направлении прямоугольных импульсов тока, в течение которых переход смещен в пробойный режим; пониженные значения амплитуд импульсов тока, при которых в течение импульса резко меняется величина падения напряжения, коррелируют с малой надежностью приборов;

– импульсные ВАХ переходов, снимаемые при пропускании треугольных импульсов тока различной длительности; существенные изменения вида характеристик при изменении длительности импульсов свидетельствуют о наличии локальных его перегревов при пропускании импульсов повышенной длительности.

При оценках качества и надежности МОП-структур часто применяются вольт-фарадные характеристики.

1.2.3. Использование переходных тепловых характеристик для прогнозирования надежности ПП и резисторов

Данные о виде и стабильности переходных тепловых характеристик элементов и приборов при изменении температуры окружающей среды или при импульсной нагрузке нередко содержат весьма важную информацию об их потенциальной надежности, о возможных деградационных изменениях характеристик, о слабых местах схем, конструкций, о недостатках технологии производства.

Косвенно переходные тепловые характеристики приборов оцениваются изменениями ВАХ во времени, о которых шла речь выше. В ряде случаев весьма эффективными являются прямые оценки. Рассмотрим несколько примеров таких оценок.

Время, необходимое для установления стабильного температурного режима в полупроводниковых приборах различного типа: в транзисторах, диодах, тиристорах, линейных интегральных схемах и др., и особенно в таких полупроводниковых приборах, в которых на единицу объёма кристалла рассеивается значительная мощность, например в мощных транзисторах, диодах или тиристорах, в некоторых типах интегральных схем, в значительной степени зависит от величины *теплового сопротивления* между кристаллом и термокомпенсирующей прокладкой или корпусом полупроводникового прибора. Чем выше это сопротивление, тем более высокой при прочих равных условиях будет температура полупроводникового перехода, тем большим будет

время, необходимое для стабилизации температурного режима после включения прибора. В связи с этим при увеличении теплового сопротивления увеличивается время, необходимое для стабилизации коэффициента усиления транзистора, тока холостого хода дифференциальных интегральных усилителей, смещения нулевой точки усилителей и т. д.

Помимо увеличения длительности периода стабилизации температурного режима, что само по себе в ряде случаев ведет к ухудшению технических характеристик аппаратуры и снижению ее надежности, наличие повышенного теплового сопротивления и связанное с ним увеличение температуры перехода ведет к ускоренному старению и деградации характеристик некоторых полупроводниковых приборов, к снижению их надежности. Поэтому длительность стабилизации температурного режима полупроводниковых приборов, характеризующая величину теплового сопротивления между кристаллом и корпусом, может рассматриваться как характеристика, позволяющая в известной степени прогнозировать надежность, может служить в качестве одного из критериев при отборе некоторых типов полупроводниковых приборов, например мощных силовых транзисторов для аппаратуры ответственного назначения.

Основная причина увеличения теплового сопротивления между кристаллом и корпусом заключается в некачественной напайке или приклейке кристаллов. При некачественной напайке кристалла, помимо повышения средней температуры кристалла, наблюдается также и местный разогрев кристалла в областях с повышенным тепловым сопротивлением. Температура отдельных точек на кристалле при некачественной напайке его на корпус или термокомпенсационную пластину может быть на 20…30 °С больше средней температуры кристалла.

Аналогичные результаты были получены экспериментально при измерении температуры перегрева мощных транзисторов. Транзисторы, имеющие большое тепловое сопротивление переход - корпус и соответственно повышенные температуры кристалла, имели значительно меньший срок службы, чем остальные транзисторы. Испытания показали также, что у транзисторов, тепловое сопротивление которых ниже определенного уровня, относительный срок службы практически не зависит от теплового сопротивления. Надежность этих транзисторов определяется другими факторами. В тех же случаях, когда тепловое сопротивление очень велико, оно является доминирующим фактором, определяющим надежность транзисторов.

В результате исследований, проводившихся на *резисторах* типа МЛТ мощностью 0,5 Вт, было установлено, что для резисторов, не имеющих дефектов, температурная зависимость сопротивления имеет линейный характер. Резисторы с нелинейной характеристикой при испытаниях в форсированном режиме отказывали почти в 50 раз чаще, чем резисторы с линейной характеристикой.

Переходные тепловые характеристики можно использовать для суждения о надежности многих других типов элементов РЭА. Интересны результаты

оценки надежности резисторов по переходным тепловым характеристикам. Были проведены работы по использованию зависимости изменения сопротивления во времени при нагрузке для обнаружения дефектов у постоянных металлодиэлектрических резисторов. Дефекты в резистивном элементе, контактах арматуры с резистивной пленкой, в керамическом основании резистора предлагается определять по характеру изменения сопротивления при импульсной нагрузке резистора, вызывающей быстрое увеличение температуры резистивного слоя.

2. МЕТОДЫ ЛОКАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИЭТ

Методы локальной диагностики позволяют определить местонахождение «слабых мест» в сложных ИЭТ, а в ряде случаев визуализировать дефекты: обрывы выводов, внутренние полости, посторонние включения и т.п. Наиболее распространенными из них являются методы ультразвуковой дефектоскопии, радиационные методы и методы визуализации тепловых полей.

2.1. Методы ультразвуковой дефектоскопии (УЗД)

Методы УЗД основаны на том, что измерение интенсивности пропускаемого испытуемым образцом или отраженного им УЗ-сигнала, оценка степени ослабления этого сигнала, наблюдение за скоростью распространение УЗ в исследуемом образце, за изменением формы или фазы сигнала позволяют обнаружить аномалии в распространении и отражении сигналов. Вызываемые наличием неоднородностей, дефектов структуры, формы образца и т.д. Эти методы используются для обнаружения трещин, раковин и других нарушений сплошности, выявления неоднородностей структуры, плотности и т.д. внутри или на поверхности металлических, пластмассовых и других деталей. Исследования проводятся в режиме непрерывного или импульсного УЗ-сигнала. С помощью метода УЗД хорошо выявляются дефекты в керамических изоляторах, кварцевых трубках, слоистых материалах (например, фольгированном диэлектрике) для печатных плат. Он успешно применяется для контроля качества сварных и паяных соединений, контроля толщины и качества сцепления с основным материалом изолирующих и экранирующих покрытий.

Методы УЗД оказываются весьма эффективными для приближенных оценок качества сравнительно *простых* по конструкции изделий при относительно однородных типах дефектов при серийном производстве. Средством возбуждения и приема УЗ-волн, как правило, являются *пьезопреобразователи.* Пучок УЗ-волн сканирует по поверхности изделия синхронно с разверткой электронного осциллографа, на вход которого поступает сигнал от пьезоприемника. Таким образом на экране осциллографа формируется

изображение, пропорциональное по яркости интенсивности УЗ-сигнала. Наилучшие результаты УЗ-методы дают при обнаружении больших, резко очерченных изменений плотности или структуры в исследуемом образце. Возможности УЗД можно расширить, используя методы *фазовой* регистрации - голографической или акустооптической и эхо-импульсных методов с компьютерной обработкой сигналов.

2.2. Радиационные методы

Эта группа методов базируется на «просвечивании» объектов рентгеновским или гамма-излучением, потоками нейтронов, протонов или электронов с непосредственной или последующей регистрацией *теневого* изображения на фотопленке либо на специальном флуоресцирующем или телевизионном экране с увеличением его в необходимых случаях. Диагностические возможности методов определяются минимальным размером деталей, различимых на изображении (разрешающей способностью), четкостью (контрастом) изображений и глубиной проникновения излучения, которая резко падает с увеличением плотности и атомного номера вещества и возрастает с ростом энергии излучения.

Дефекты, связанные с выводами, естественно, можно обнаружить и в любых пассивных элементах РЭЛ (резисторах, конденсаторах и др.). В многослойных печатных платах можно также определить КЗ между дорожками, изменение ширины дорожек и их разрывы, отсутствие или неравномерность покрытия (серебрения), расслоение диэлектрика, отслоение дорожек, смещение отверстий на контактных площадках.

Одним из наиболее эффективных и широко распространенных радиационных методов является рентгеновский, в частности его рентгенотелевизионный вариант. В качестве источников рентгеновского излучения могут использоваться промышленные рентгеновские аппараты серии РУГ1, имеющие энергию 45-300 кэВ. Для контроля нестационарных процессов используют импульсные рентгеновские аппараты

Рентгенотелевизионный микроскоп (РТМ) представляет собой рентгеновский аппарат, сопряженный с телевизионной (ТВ) системой посредством *преобразователя* рентгеновского излучения в электрический сигнал. В качестве такого преобразователя могут использоваться рентгеновидиконы, а также люминесцентные экраны с электронно-оптическими преобразователями или передающими ТВ-трубками различных типов. Сигнал с преобразователя после усиления и формирования в замкнутой ТВ-системе используется для получения увеличенного ТВ-изображения на экране кинескопа.

С помощью РТМ в полупроводниковых и гибридных ИС с золотыми выводами можно определить следующие дефекты: обрывы, пережог или КЗ внутренних выводов, а также негерметичность корпуса в местах пайки крышки и корпуса. В диодах и транзисторах, помимо вышеуказанных дефектов. Можно

обнаружить нарушение формы и расположения кристалла и наличие посторонних частиц.

2.3. Методы визуализации тепловых полей

Интенсивность теплового поля для диагностирования ИС оценивают путем измерения *температуры.* Измеряют температуру, используя контактные и неконтактные методы. К первой группе методов относятся:

– метод *температурно-чувствительных красок* - простой и удобный, но его недостаток состоит в необратимости процессов и дискретности индикации значений температуры;

– метод с использованием *жидкокристаллической* (ЖК) индикации, основанный на свойстве ЖК-соединений приобретать окраску в зависимости от окружающей температуры. Применяя дифракционные и интерференционные методы регистрации изменений окраски, можно получать разрешающую способность по температуре до 0,1 °С, а по координате до 0,02 мм. Температурный диапазон ЖК- метода составляет 0...100 °С;

– метод измерения температуры с помощью *термопар* - достаточно простой, хорошо отработанный, но имеющий недостаток температура измеряется в локальных точечных участках схемы.

Неконтактные методы измерений характеристик теплового поля основаны на регистрации теплового ИК-излучения нагретого тела, интегральная плотность энергии которого, согласно закону Стефана-Больцмана, пропорциональна T^4.

Неконтактные методы можно разделить на две группы: интегральные (регистрирующие излучение со всей поверхности объекта) и дифференциальные (сканирующего типа).

Из приборов первой группы наиболее простым и известным является метод *ИК-фотографии.* Однако область его применения ограничена спектральной чувствительностью фотоматериала и невозможностью регистрации излучения слабо нагретых тел.

Из приборов второго тина наиболее распространенными и универсальными являются сканирующие ИК-радиометры, называемые *тепловизорами.* Структурная схема тепловизоров содержит:

– оптическую систему;
– сканирующее устройство;
– приемник ИК излучения;
– блок индикации.

Оптико-механическое сканирование производится с помощью вращающихся призм из кремния или германия для последовательного «осмотра» поверхности объекта при перемещении «поля зрения» по полю обзора. Электрические сигналы, снимаемого с детектора (обычно полупроводникового) ИК излучения, в определенной последовательности, задаваемой системой сканирования, подаются на электронно-лучевую трубку

(ЭЛТ) просмотрового устройства. Яркость изображения на экране ЭЛТ пропорциональна сигналу с фотоприемника, т.е. интенсивности теплового излучения. Одновременно на экране высвечивается и температурная шкала, образованная линейно изменяющимся напряжением. При использовании германиевой оптики и охлаждаемого фотоприемника из *InSb* рабочий диапазон длин волн тепловизора от 2,0 до 5,7 мкм.

Тепловизор позволяет также получать изотермы – линии, ограничивающие поверхности с одинаковой интенсивностью ИК излучения. На экране ЭЛТ монитора можно получить до десяти цветных изотермических линий, а также позитивное или негативное изображение. Последнее удобно в том случае, когда приходится исследовать «холодные» участки на фоне «горячих».

На базе тепловизоров созданы ИК *микроскопы,* позволяющие исследовать тепловые поля в изделиях микроэлектроники. Поиск аномалий в тепловом режиме элементов ИС осуществляется путем сравнения теплового поля исследуемой ИС с тепловым полем образцового объекта. Сравнение теплограмм одной и той же схемы в различном конструктивном или технологическом исполнении дает возможность выбрать оптимальный вариант конструкции на стадии проектирования и отработки прибора, выбрать оптимальные материалы конструкции и способы отвода тепла. Существует также несколько способов количественного анализа теплового поля с помощью тепловизоров. Эталонные тепловые поля могут быть получены как экспериментальным путем, так и с помощью математического моделирования. Но из-за больших погрешностей (50 – 100 %) аналитических методов основными являются экспериментальные методы.

3. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЭТ

3.1. Обеспечение надежности ИЭТ на разных этапах жизненного цикла

Рассмотрим минимальный перечень регламентирующих условий, с помощью которых осуществляется воздействие на надежностные характеристики приборов на всех этапах жизненного цикла.

3.1.1. Разработка технических требований на прибор

Для ее осуществления необходимо иметь:

− общие технические требования и общие технические условия на приборы, отражающие особенности будущей эксплуатации в аппаратуре;

− параметрические ряды, регламентирующие технические требования на параметры и конструкцию прибора.

3.1.2. Разработка прибора

Дополнительно к условиям первого этапа необходимо иметь:

− данные об особенностях применения в аппаратуре;

− перспективную потребность в приборах;

– стандартизованные терминологию, параметры, методы измерений и испытаний, конструктивное оформление;

– данные по надежности аналогов.

3.1.3. Производство приборов

Регулирующие воздействия на этом этапе осуществляются посредством:

– технических условий на приборы;

– системы контроля качества и испытаний;

– методов анализа отказов приборов и рекламаций по качеству приборов.

3.1.4. Проектирование аппаратуры

Данный этап регламентируют:

– справочные данные по приборам и их надежности;

– ограничительные перечни приборов;

– руководства по применению;

– данные по надежности аналогичной аппаратуры.

3.1.5. Производство аппаратуры

Обязательными условиями для данного этапа являются:

– методики входного контроля приборов;

– методики защиты приборов от воздействия технологических факторов при изготовлении аппаратуры;

– методики защиты приборов от воздействия внешних факторов;

– методики экспертизы аппаратуры.

3.1.6. Эксплуатация аппаратуры

Данный этап обслуживается:

– инструкциями по эксплуатации; методами регламентных проверок;

– методами контроля правильности применения приборов в аппаратуре;

– системой сбора данных по надежности приборов.

Все перечисленные условия, влияющие на надежность, реализуются в соответствующей нормативно-технической документации в виде государственных и отраслевых стандартов, руководств, методик, технологических карт и других руководящих документов, имеющих отраслевое, межотраслевое и общегосударственное значения.

Функционирование *системы* обеспечения надежности ИЭТ осуществляется соответствующими подразделениями, организуемыми в сферах разработки и производства приборов и в сфере эксплуатации аппаратуры.

Система имеет несколько источников информации. На этапе разработки – это промежуточные испытания и квалификационные испытания при приемке нового прибора государственной комиссией.

На этапе производства приборов это межоперационный контроль полуфабрикатов, активных структур и сборочных единиц, а также выходной контроль готовой продукции.

Основным содержанием информации на этапах разработки и производства приборов являются дефекты, возникающие в полуфабрикатах при выполнении технологических операций, технологический брак готовых приборов и отказы при испытаниях на выходном контроле готовой продукции.

Источниками информации в сфере эксплуатации являются входной контроль приборов перед монтажом в аппаратуре, сборка, регулировка и испытание аппаратуры. Главным содержанием информации из этих источников также являются отказы и несоответствие параметров приборов нормативно-технической документации.

Основным источником количественных показателей надежности приборов является *эксплуатация* аппаратуры у потребителя.

Нормативно-технической документацией установлены формы и сроки представления информации о надежности приборов из всех источников системы.

3.2. Резервы повышении надежности ИЭТ и возможности их реализации

Эксплуатационные показатели надежности могут определяться только из статистики работы элементов данного типа в конкретной электрической схеме при конкретных условиях эксплуатации.

При проектировании элементы рассчитываются на определенный срок службы по наработке, который должен обеспечиваться при заданных уровнях эксплуатационных нагрузок. По значению срока службы выбираются запасы прочности структуры элементов по всем видам нагрузок, устанавливаются требования к характеристикам применяемых материалов и разрабатывается конструкция элементов.

Имеющуюся потенциальную возможность изготовления всех элементов со сроком службы не ниже заданного на практике реализовать трудно ввиду невозможности учета при проектировании всех факторов, обусловливающих отказы элементов; ошибок и отклонений от норм при проектировании и конструировании; применения материалов с параметрами, отличающимися от расчетных; отклонения от норм в технологическом процессе изготовления элементов; высокого уровня затрат на разработку и реализацию мероприятий, обеспечивающих рассмотренные выше характеристики безотказности

Поэтому промышленность выпускает элементы, среди которых имеются экземпляры со сроками службы, существенно меньшими расчетного. В этом случае надежность РЭА существенно зависит от количества комплектующих элементов, и основным путем ее повышения является уменьшение числа комплектующих элементов посредством перевода РЭА на интегральные микросхемы.

Существуют следующие основные *резервы* повышения производственных показателей надежности элементов:

– ослабление интенсивности протекания в материалах физико-химических процессов, приводящих к изменению параметров элементов;

– увеличение запасов прочности структуры элемента по всем видам нагрузок и создание равнопрочной конструкции во всех звеньях структуры;

– применение новых конструктивных решений и новых принципов создания элементов с большими потенциальными возможностями в отношении повышения надежности;

– отбраковка элементов со скрытыми производственными дефектами. Реализация в сфере производства уровня надежности, 'заложенного при

– проектировании и конструировании, определяется степенью технологичности элементов, которая должна учитываться при их разработке, и качеством технологического процесса их производства.

Для организации качественного технологического процесса необходимо осуществлять оперативный количественный *контроль* надежности производимых элементов. Количественную оценку надежности позволяют получить статистические методы, применяемые при проведении испытаний выборочной партии изготовленных элементов. Однако с повышением надежности элементов эти методы требуют для получения достоверных результатов увеличения объема выборки (количества испытываемых элементов в партии) или увеличения времени испытаний при относительно малых объемах выборки. Уже при современном уровне надежности элементов получение результатов статистического контроля за приемлемое время приводит к существенному увеличению количества элементов в испытываемой партии, что делает экономически невыгодным этот метод контроля. Уменьшение же количества элементов в партии значительно увеличивает время испытаний, что не позволяет оперативно вносить коррективы в технологический процесс и делает такой контроль также экономически нецелесообразным.

Для уменьшения времени получения информации о надежности иногда прибегают к ускоренным методам испытаний, при которых элементы работают в форсированном режиме. Однако в этом случае необходимо знать коэффициент ускорения относительно обычных испытаний. Если коэффициент ускорения неизвестен, то метод ускоренных испытаний дает только качественную оценку надежности. Если такая оценка не выходит за определенные границы, то считают, что технологический процесс идет стабильно.

С увеличением уровня надежности элементов наиболее перспективными методами оперативного контроля становятся методы неразрушающего контроля, позволяющие быстро определять скрытые производственные дефекты изделий и вносить соответствующие коррективы в технологический процесс. Статистические методы позволяют только установить факт

уменьшения надежности изделий, а для выяснения причины требуется специальный анализ.

Повышение надежности элементов может быть достигнуто также приработкой их под нагрузкой, приемо-сдаточными испытаниями при жестких критериях отказов и отбраковкой элементов со скрытыми производственными дефектами. Приработка элементов под нагрузкой на заводах позволяет отбраковать отказавшие элементы со скрытыми производственными дефектами и стабилизировать параметры оставшихся элементов. Интенсивность отказов снижается до стабильного уровня, соответствующего периоду нормальной эксплуатации.

Приемочный контроль производят на основании результатов контрольных (приемо-сдаточных) испытаний. Испытания элементов на надежность проводят при типовых электрических и внешних нагрузках, при заданных контролируемых параметрах и критериях годности. Схему, в которой испытывают элементы, выбирают таким образом, чтобы свести к минимуму возможное ее влияние на надежность элементов. В качестве контролируемых параметров выбирают основные параметры, имеющие тенденцию к дрейфу.

Приемо-сдаточные испытания при жестких критериях отказов заключаются в том, что режимы электрических и внешних нагрузок выбирают предельными или близкими к предельным, а критерии годности - значительно более жесткими, чем при работе элементов в схеме. Производство, поставляющее элементы, которые удовлетворяют жестким приемо-сдаточным испытаниям. обеспечивает и более высокий уровень производственной надежности по сравнению с испытаниями при типовых нагрузках.

Однако надежность может быть повышена и дальше *отбраковкой* потенциально ненадежных элементов со скрытыми производственными дефектами, не проявившими еще себя в период приработки и испытаний. Такая отбраковка осуществляется методами неразрушающего контроля каждого элемента выпускаемой партии. Эффективность такой программы отбраковки должна оцениваться с учетом экономической целесообразности.

Уровень эксплуатационных показателей надежности элементов закладывают при проектировании и производстве РЭА и поддерживают, соблюдая правила и режимы эксплуатации. В РЭА элементы входят в состав конкретных электрических схем. Небольшие изменения какого-либо параметра элемента могут привести к сдвигу рабочей точки электрического режима схемы и существенному изменению этого же или другого параметра. Схема по-разному может реагировать на изменение параметров: либо стабилизировать дрейф, либо усиливать его вплоть до лавинного убыстрения этого процесса. Поэтому вопросы стабилизации внутренних процессов в элементах и их электрических режимов приобретают важное значение для получения высокой надежности элементов и РЭА в целом. Таким образом, существенное значение имеет устойчивость схемы к изменению внешних условий эксплуатации и дрейфу параметров элементов.

Поскольку эксплуатационные показатели надежности элементов определяются устройством, в котором они работают, то их в общем случае необходимо относить к конкретному типу устройства с конкретным типом элементов. Более того, конструкция РЭА влияет на надежность элементов, так как она определяет степень защиты их от внешних воздействий, характера теплообмена и т.д. Практика показывает, что для одного и того же типа элемента в зависимости от типа схемы и нагрузочного режима эксплуатационные показатели надежности могут существенно отличаться. Отсюда следует вывод, что эксплуатационные показатели надежности не могут являться объективной и однозначной характеристикой элементов, если они в значительной степени зависят от свойств и характеристик электрической схемы и конструкции устройства.

Связать производственные и эксплуатационные показатели надежности трудно ввиду большого числа устройств, где могут работать элементы данного типа. Можно сделать это только для конкретного устройства. Однако высокие производственные показатели надежности являются необходимой базой достижения высоких эксплуатационных показателей надежности элементов, а также РЭА в целом.

Если для данного типа элементов характерны внезапные отказы, то разница между производственными и эксплуатационными показателями надежности может быть не очень значительной. Если же преобладают постепенные отказы, то эта разница может быть существенной (например, для транзисторов). В этом случае производственные показатели надежности необходимо использовать для расчета надежности схем и устройств с учетом взаимного влияния режимов элементов и схемы.

Поскольку при разработке и производстве элементов невозможно предусмотреть все ситуации, в которых они будут эксплуатироваться, то существенное значение имеют сбор, обработка и своевременное доведение до разработчиков и изготовителей информации о их надежности в реальных условиях эксплуатации. Эта информация позволяет вносить коррективы в конструкцию элементов и облегчает решение задачи повышения надежности при разработке новых элементов.

Таким образом, повышение надежности элементов РЭА является *комплексной* проблемой, которая требует разработки и внедрения мероприятий по повышению надежности в каждом звене замкнутой цепи разработка – производство эксплуатация – разработка. Все эти мероприятия должны быть увязаны между собой и достаточно эффективны.

3.3. Микроминиатюризация и интеграция РЭА

Большую перспективу повышения надежности РЭА открывают интегральные микросхемы (ИМС). Микроминиатюризация элементов (предельное уменьшение их габаритов и масс) и интеграция (объединение их вместе со схемой соединений в одном твердом теле) позволяют в настоящее

время создавать большие интегральные микросхемы с высокой степенью интеграции.

Повышение безотказности РЭА возможно путем повышения безотказности элементов и соединений. Методы повышения надежности, рассмотренные выше, позволяют увеличивать безотказность элементов, но это достигается ценой существенных усилий и затрат в области их разработки и производства. Поэтому снижение интенсивности отказов элементов на порядок происходит только в среднем через каждые 10 лет. Однако развивающийся процесс усложнения РЭА всегда приводил к такому увеличению числа элементов, для которого имеющаяся надежность элементов была недостаточной. Поэтому необходимая безотказность обеспечивалась применением различных видов резервирования, что увеличивало объем, массу и стоимость РЭА. Наиболее кардинальным решением проблемы надежности РЭА является ее микроминиатюризация и интеграция на основе использования ИМС.

В ИМС элементы работают при малых уровнях токов, напряжений и мощности. Требования к допускам на параметры элементов ИМС определяются не условными допусками, а работоспособностью самой схемы. Межсоединения в ИМС более надежны, чем соединения элементов в обычной схеме. В результате рассмотренного безотказность современных интегральных микросхем существенно не ухудшается по сравнению с безотказностью одного транзистора, изготовленного по той же технологии. Следует отметить также, что надежность ИМС в основном определяется надежностью соединений кристалла с внешними выводами, которая значительно ниже надежности монокристалла с элементами и межсоединениями.

Для расширения перспективы повышения надежности элементов, ИМС и РЭА необходимо по крайней мере решить две основные проблемы.

1) Разработать такие физические принципы построения элементов, методы проектирования и технологию их изготовления, которые позволят увеличивать срок службы элементов и получать характеристики надежности с плотностью вероятностей отказов, сосредоточенной около расчетного срока службы.

2) Разработать эффективные методы неразрушающего контроля, позволяющие распознавать и отбраковывать элементы с пониженной надежностью.

Эффективное решение этих проблем позволит производить ИМС, для которых наработка до первого отказа не зависит от числа элементов, а будет определяться долговечностью одного элемента.

Существуют и другие пути повышения надежности комплектующих элементов РЭА, например переход к функциональным приборам, в которых реализуется принцип функциональной интеграции.

3.4. Выбор типов элементов и их эксплуатационных режимов

Высокие эксплуатационные показатели надежности РЭА достигаются, прежде всего, правильным выбором типов элементов с учетом особенностей их

работы в электрических схемах и условий эксплуатации. Элементы, выбираемые для проектируемой аппаратуры, должны удовлетворять следующим требованиям:

– технические параметры элементов должны обеспечивать заданные выходные характеристики РЭА;

– число типов применяемых элементов должно быть минимальным, а по своим параметрам и характеристикам элементы должны соответствовать требованиям, предъявляемым к РЭА по климатическим, механическим и электрическим уровням нагрузок;

– элементы должны быть освоены в серийном производстве, их надежность должна обеспечивать требуемую долговечность и безотказность работы РЭА в течение заданного времени;

– стоимость элементов должна быть минимальной;

– элементы должны применяться по своему прямому назначению в соответствии с требованиями технических условий на них.

Выбору конкретного типа элемента должен предшествовать детальный анализ функций и условий его работы в конкретной электрической схеме и аппаратуре. На основании этого анализа составляют требования к функциональному назначению и основным параметрам элементов и по ним выбирают тип элементов.

3.5. Роль стандартизации в повышении надежности ИЭТ

Организация массового производства РЭА основывается, прежде всего, на обеспечении взаимозаменяемости ее комплектующих элементов. Такая взаимозаменяемость достигается одинаковостью параметров и характеристик элементов. Последнее определяется идентичностью свойств исходных материалов, сырья, условий технологического процесса и т. д. Для достижения одинаковости параметров элементов на всех этапах их проектирования и производства необходимо установить уровень норм и требований к физическим и размерным величинам сырья, материалов и готовой продукции на основе общих мер, единообразия понятия качественной однородности и взаимозаменяемости.

Но установить эти нормы еще недостаточно. Необходимо обеспечить *обязательность выполнения* их всеми организациями, участвующими в производстве данного вида продукции, т. е. придать им силу закона. Это делается для исключения отклонений от установленных норм и правил, поскольку если такие отклонения появятся хотя бы в одном звене производства, то они нарушат все налаженное взаимодействие его частей.

Установление уровня норм и требований к физическим и размерным величинам, ко всем элементам продукции и технологии для обеспечения возможности ее массового выпуска производится на основе стандартизации. Установленные при стандартизации нормы и требования оформляются в виде документов, обязательных к исполнению и называемых *стандартами.* Наличие

стандартов на материалы, технологию изготовления, сборку и испытания, а также на параметры элементов обеспечивает их взаимозаменяемость, позволяет быстрее и эффективнее организовать массовое производство и снизить их себестоимость.

Государство, вводя в действие новые стандарты, фиксирует достигнутый в данной отрасли *высший технический уровень* и подготавливает этим условия для дальнейшего технического прогресса. Поэтому в условиях социализма стандартизация становится одной из важнейших научных основ государственного планирования качества продукции вообще и элементов РЭА в частности.

Повышение надежности элементов не может быть достигнуто какими-либо отдельными мерами совершенствования методов и средств- производства. Для достижения этого необходима *комплексная* стандартизация, предусматривающая разработку нормативно-технической документации, устанавливающей стабильность качества исходных материалов, методы оценки показателей качества материалов и готовых изделий, единство измерений, основанное на единстве применяемых мер, требований к испытанию элементов и т.д. Высокий уровень надежности элементов может быть достигнут лишь тогда, когда сырье, материалы и полуфабрикаты будут соответствовать требованиям стандартов. Принцип комплексной стандартизации открывает возможность повышения надежности элементов, так как позволяет управлять уровнем надежности с первых этапов производства. Стандартизация может считаться комплексной, если ею охвачены орудия производства, методы измерения параметров и испытаний элементов, способы транспортировки и хранения, конструктивные и технологические элементы и правила эксплуатации.

Таким образом, стандартизация представляет собой средство использования достижений научно-технического прогресса для организации массового производства элементов высокого качества, в результате чего достигается повышение эффективности общественного производства.

3.6. Экономические вопросы надежности

Проблема повышения надежности элементов РЭА имеет не только технические, но и экономические аспекты, так как для повышения надежности элементов и РЭА требуются дополнительные *затраты* на их проектирование и производство. РЭА на более надежных элементах дешевле в эксплуатации, поскольку требует меньших расходов на ремонт и имеет меньшие сроки простоев. Ущерб от простоев РЭА нередко существенно превышает стоимость ее ремонта, особенно когда РЭА сопряжена с промышленными или другими объектами и выполняет ответственные функции. Стоимость эксплуатации РЭА может быть в 10 - 100 раз выше, чем стоимость ее разработки и производства. Поэтому, несмотря на дополнительные затраты, связанные е повышением

надежности элементов, удешевление эксплуатации может существенно поднять эффективность ее применения.

При разработке мероприятий по повышению надежности проводят экономический анализ. Сущность этого анализа состоит в оценке достигаемого *экономического эффекта* и в определении срока окупаемости затрат на повышение надежности. Сопоставляя дополнительные затраты на повышение надежности с экономическим эффектом, делают вывод об экономической целесообразности планируемых или проведенных мероприятий. Поскольку эти затраты в процессе проектирования и производства элементов приводят к снижению стоимости эксплуатации РЭА, то естественно возникает задача поиска того оптимального уровня надежности элементов, при котором общая стоимость проектирования, производства и эксплуатации минимальна.

4. РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИЭТ

Целенаправленное, систематическое исследование воздействия ионизирующих излучений (ИИ) на РЭА, ее элементы и исходные материалы было начало практически сразу же после создания первых ядерных реакторов (в США – в 1942 г., в СССР – в 1945 г.).

С 1945 по 1980 гг. в атмосфере Земли было произведено 450 атомных и термоядерных взрывов, общая мощность которых составила 545 МВт В результате в стратосферу было инжектировано огромное количество радиоактивных веществ, а в околоземном космическом пространстве образовался *искусственный* радиационный пояс Земли (РПЗ), состоящий из заряженных частиц (главным образом, электронов с энергией несколько МэВ), захваченных, как в ловушку, магнитным полем Земли.

В 1958 г. Ван Алленом (США) и акад. С.Н. Верновым (СССР) были открыты *естественные* РПЗ, состоящие из электронов, протонов и более тяжелых заряженных частиц высокой энергии и расположенные на высотах 1 - 30 тыс. км.

В космосе на РЭА может воздействовать весь комплекс ИИ: заряженные частицы радиационных поясов плюс гамма-нейтронное, жесткое рентгеновское и электромагнитное излучения ядерного взрыва (ЯВ). Сюда добавляется еще вакуум и резкая смена температур на солнечной и теневой сторонах космического аппарата. Эти факторы усугубляют разрушающее действие ИИ на РЭА. Для моделирования комплексного воздействия указанных факторов в лабораторных, земных условиях в СССР, США, Англии и Франции было создано несколько крупнейших испытательных центров.

Потепление международного “климата” в 80 - 90 гг. сняло остроту проблемы ПРО, но Чернобыльский взрыв продемонстрировал новую, отнюдь не меньшую опасность – последствия разрушения АЭС в результате возможного военного нападения или террористического акта. Это свидетельствует о неубывающей актуальности исследований радиационной стойкости (РС) всей серийно выпускаемой и вновь разрабатываемой РЭА,

применяемой не только в военной и космической технике, но и аппаратуры автоматики, обеспечивающей безопасность функционирования АЭС.

4.1. Источники ионизирующих излучений

4.1.1. ИИ космического пространства

Включают в себя космическое излучение (солнечное и галактическое) и излучение естественных и искусственных РПЗ. Космическое излучение реальной опасности для аппаратуры ИСЗ не представляет, поскольку суммарная годовая доза, обусловленная ими, ничтожно мала по сравнению с излучением РПЗ.

РПЗ образуются в результате захвата и длительного удержания магнитным полем Земли космических заряженных частиц: протонов, электронов, а - частиц, ионов и ядер тяжелых элементов. Эти частицы попадают в магнитные ловушки и под действием магнитной силы Лоренца движутся по спиралеобразным траекториям вдоль силовых линий магнитного поля Земли от северного полушария к южному и обратно. Различают внешний и внутренний РПЗ, причем во внутреннем поясе энергия частиц выше, так как магнитное поле здесь сильнее.

Искусственные РПЗ возникли в результате ЯВ и состоят, главным образом, из электронов, которые могут сохранять неизменную плотность потока в течение нескольких лет после взрыва. Общая доза ИИ от воздействия обоих РПЗ может составить 10^{10} - 10^{13} рад/год и представляет серьезную опасность для РЭА космических аппаратов с длительным сроком службы (например, ИСЗ связи).

4.1.2. Ядерные энергетические установки (ЯЭУ)

Изотопные источники и ЯР — используются в космических аппаратах для получения электроэнергии и обогрева приборных отсеков («Луноход-1»).

Достоинствами радиоизотопных ЯЭУ являются независимость их действия от окружающих условий, относительная простота, малый вес и габариты, длительная и надежная работа. Недостатки: высокая стоимость, неуправляемость, радиационная опасность при обслуживании. В качестве термоэлектрических преобразователей (ТП) используются полупроводниковые, гермоэмиссионные, магнитогидродинамические (МГД).

4.1.3. Ядерный взрыв

Происходит в результате быстрого выделения энергии в ограниченном пространстве при ядерных реакциях деления или синтеза. При типичном ЯВ 35 % всей энергии взрыва выделяется в виде светового (теплового) излучения, 50 % - в виде ударной волны и 15 % - в виде ИИ.

Свободные электроны, образованные в результате ионизации молекул воздуха гамма-излучением, взаимодействуя с магнитным полем Земли, генерируют мощные импульсы электромагнитного излучения (ЭМИ),

способные привести к повреждению РЭА и электротехнического оборудования на больших расстояниях от центра ЯВ.

При типичном ЯВ образуются следующие виды ИИ:

– нейтроны со средней энергией 1,3 МэВ (в результате ядерной реакции); гамма-излучение со средней энергией 1,1 МэВ (его порождают реакции деления и синтеза, захват и неупругое рассеяние нейтронов, радиоактивный распад осколков деления);

– рентгеновское излучение с энергией (10 - 100) кэВ;

– α-частицы (ядра гелия) и β-частицы (электроны и позитроны), образующиеся при распаде ядер - осколков деления урана;

– радиоактивные осколки ядер вещества боеприпаса;

– видимый свет (огненный шар).

Гамма-излучение распространяется в пространстве со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с). Средняя дайна пробега гамма-квантов в воздухе при атмосферном давлении порядка 300 м. Длительность импульса «мгновенного» гамма-излучения составляет 10 нс, после чего следует длинный (во времени) «хвост» захватного и осколочного гамма-излучения.

Нейтроны распространяются со скоростью, пропорциональной $E^{0,5}$, а длительность нейтронного импульса пропорциональна расстоянию от центра ЯВ. Максимальный флюенс нейтронов ЯВ и ЯЭУ, предусмотренный требованиями современной нормативно-технической документации, составляет 10^{15} н/см^2; мощность дозы импульсного гамма-излучения - до 10^{13} Р/с при общей дозе до 10^7 Р.

В лабораторных условиях действие ИИ моделируется с помощью ядерных реакторов ЯР (стационарных и импульсных), изотопных источников гамма-излучения и ускорителей электронов и протонов. Многолетние исследования позволили получить справочные данные по РС всех основных классов ИЭТ и определить пути повышения РС наименее стойких к воздействию ИИ элементов. Таковыми оказались ПП и ИС, на которые в дальнейшем изложении будет обращено особое внимание.

4.2. Радиационные эффекты в материалах электронной техники

Взаимодействие ИИ с веществом приводит к обратимым (во времени) и необратимым радиационным эффектам. Первые обусловлены ионизацией атомов и молекул вещества, вторые — смещением атомов из узлов кристаллической решетки и деструкцией сложных молекул органических полимеров.

Нейтроны, не обладая электрическим зарядом, сами по себе не вызывают ионизации вещества и взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов. Наиболее типичными процессами взаимодействия нейтронов с ядрами являются:

– упругое и неупругое рассеяние;

– радиационный захват.

При рассеянии нейтронов образуются ядра отдачи с высокой кинетической энергией, способные ионизировать атомы вещества, а также вызывать смещения других атомов, точнее — целые цепочки смещений и создавать области разупорядочения (ОР) кристаллической решетки макроскопических размеров (десятки микрометров).

При радиационном захвате происходит образование радиоактивных ядер-изотопов с излучением гамма-квантов («захватное» излучение), которые, в свою очередь, ионизируют вещество. Именно радиационный захват обусловливает «наведенную» радиоактивность облученных ИЭТ, которая постепенно спадает с течением времени по мере распада образовавшихся радионуклидов.

Гамма-излучение ЯВ и ЯЭУ ионизирует вещество в результате фотоэффекта и комптон-эффекта, а также (при энергии порядка 10 МэВ) эффекта образования электронно-позитронных пар. Образовавшиеся в результате ионизации электроны вызывают вторичную ионизацию атомов вещества, а при энергии выше 200 кэВ электроны сами могут вызвать смещения атомов кремния. После гамма-облучения (без сопутствующих нейтронов) изделия не становятся радиоактивными и безопасны в обращении. Поэтому гамма- облучение широко используется для обработки пищевых продуктов с целью увеличения срока их сохраняемости.

4.2.1. Радиационные дефекты в твердых телах

Радиационными дефектами (РД) называют более или менее устойчивые нарушения структуры твердого тела, возникающие под действием ИИ высокой энергии.

Простейшим типам точечных дефектов (ТД), всегда присутствующим в твердых телах, относятся вакансии (пустые узлы решетки) и междоузельные атомы. Смещение атома из узла в междоузлие всегда сопровождается образованием пары: вакансия (V) — междоузельный атом (I), называемой парой Френкеля. При воздействии ИИ пары Френкеля являются первичными РД. Компоненты пар Френкеля, мигрируя по кристаллу, вступают во взаимодействие с примесями или другими ТД и образуют более или менее стабильные вторичные, комплексные РД.

В кремнии пары Френкеля подвижны даже при $50\text{K} < \text{T} < 273\text{K}$ (особенно вакансии). Часть пар аннигилирует или захватываетсямакроскопическими дефектами:

− границами зерен и слоев, дислокациями и др.;

− другая часть образует устойчивые комплексы с примесями или между собой.

РД в полупроводниках являются центрами рекомбинации, захвата и рассеяния НЗ, что приводит к уменьшению времени жизни НЗ, их концентрации и подвижности соответственно. В свою очередь, изменения основных электрофизических параметров материала приводит к деградации параметров ПП и ИС.

4.2.2. Радиационные эффекты в металлах и сплавах

Под действием ИИ металлы могут изменять электрические и магнитные свойства, коррозионную стойкость, теплопроводность, механическую прочность и другие параметры; многие металлы приобретают хрупкость, снижается их пластичность, электрическое сопротивление возрастает. Но эти изменения становятся заметными лишь при флюенсах нейтронов более 10^{18} н/см^2, а эффект ионизации быстро исчезает после прекращения облучения вследствие высокой концентрации свободных электронов.

Однако полностью пренебрегать радиационными эффектами в металлах не следует. Например, в полях гамма-излучения наступает деградация омических контактов в ПП и ИС в результате окисления алюминия, а также окисления кремния под контактными площадками. В результате происходит постепенное отслаивание контактных площадок от периферии к центру.

Специальные эксперименты показали также, что гамма-облучение ускоряет процессы электромиграции в тонкопленочных алюминиевых дорожках тестовых структур ИС, что приводит к их разрушению и обрыву.

4.2.3. Радиационные эффекты в диэлектриках

В РЭА применяются диэлектрики в различных агрегатных состояниях − твердом, жидком и газообразном. Одновременно с электрической изоляцией некоторые газообразные диэлектрики часто играют роль хладоагентов или теплоносителей в системе тепловой защиты аппаратуры (водород, фреон и др.). Для заполнения ГРП применяют инертные газы (аргон, неон, гелий).

Ионизация межэлектродных промежутков в полях ИИ приводит к электрическим пробоям, газовым разрядам. Образование озона O_3 при облучении воздуха вызывает разрушение некоторых органических материалов, например, резины − особенно в напряженном состоянии.

Из *жидких* диэлектриков (ЖД) в РЭА находят применение нефтяные и растительные масла, а также синтетические жидкости. Воздействие ИИ накладывает ограничения на применение и срок службы ЖД при их контакте с металлическими частями, твердыми диэлектриками и окружающими газами. Обычно свойства ЖД изменяются при флюенсах нейтронов не меньше 10^{15} н/см^2. В процессе облучения увеличивается электропроводность и диэлектрические потери ЖД, а усиливающееся газовыделение из них способствует протеканию разрушительных электрохимических процессов. В связи с тем, что основную часть газообразных продуктов составляет водород появляется опасность взрыва или пожара при возникновении электрической дуги или короны, чему способствуют электрические поля внутри приборов. Давление выделяющихся газов может разрушить оболочки или корпуса изделий. Выделяющиеся агрессивные продукты (HC1, HF и др.) могут вызвать коррозию металлических элементов конструкции и более быстрое разрушение органических материалов. Выход газов из ЖД больше при нейтронном, чем при гамма-облучении, а большей склонностью к газообразованию при облучении обладают масла высокой очистки.

Образующиеся в ЖД при облучении продукты реакций радиолиза изменяют состав, увеличивают вязкость и ухудшают диэлектрические свойства материалов (особенно в присутствии кислорода).

Среди *твердых* диэлектриков наиболее серьезные последствия воздействия ИИ наблюдаются в твердых органических веществах с ковалентной связью. К ним относятся высокомолекулярные соединения-полимерные материалы (ПМ). Наиболее важными радиационными эффектами в ИМ являются ионизация и разрыв связей в сложных молекулах, приводящий к их разрушению. Химически активные «обломки», например, свободные радикалы CH_2, могут реагировать друг с другом или с нейтральными молекулами, образуя новые молекулы или структуры. Таким образом, возникает цепь химических реакций, образующих на одну пару ионов значительное число модифицированных молекул. Восстановления исходных свойств ПМ после облучения практически не происходит.

Основные радиационно-химические процессы в ПМ:

− окисление и другие химические реакции, инициируемые ИИ;

− укрупнение макромолекул с образованием пространственных сеток в результате возникновения поперечных химических связей («сшивание»);

− деструкция и распад макромолекул с образованием летучих продуктов и молекул меньшей длины вплоть до превращения ПМ в вязкие жидкости.

Особо вредную роль играют процессы газовыделения в результате реакций радиолиза в некоторых твердых органических диэлектриках: фторполимерах, хлорвинилах, резинах, прессматериалах. При их облучении выделяются галоиды, сера, аммиак, галоидоводородные кислоты, начиная с малых доз (10^4 рад). Взаимодействуя с водой, эти газы образуют *агрессивные продукты,* вызывающие коррозию металлов, снижение адгезии защитных покрытий, нарушение герметичности, электрической и механической прочности изделий. Наблюдаются и побочные эффекты: вспучивание и отрыв металлических слоев и фолы; деформацию герметизирующих компаундов; разрушение лакокрасочных покрытий.

Воздействие заряженных частиц с длиной пробега меньше толщины диэлектрического покрытия вызывает накопление заряда и электрический пробой без приложения напряжения. Растрескивание материалов при облучении, превращение их в порошок и пыль могут вызвать засорение РЭА, замыкание и повреждение контактов реле, переключателей и потенциометров, увеличение трения в подшипниках и т.д.

4.2.4. Радиационные эффекты в полупроводниках

Возникающие под действием ИИ дефекты оказывают многообразное влияние на свойства полупроводниковых материалов. Наиболее чувствительным свойством является время жизни неосновных носителей заряда (НЗ), менее чувствительны − концентрация и подвижность НЗ. Но и те, и другие существенно изменяются при флюенсах и дозах ИИ намного меньших

тех, которые вызывают изменение свойств диэлектриков, а тем более - металлов.

Кремний является наиболее изученным объектом радиационной физики полупроводников. Это объясняется его широким применением в электронной промышленности, высоким качеством получаемых монокристаллов, хорошо известной зависимостью его свойств от дефектов структуры, вносимых при различных технологических операциях.

Введение РД в кремний способствует уменьшению концентрации НЗ, которая по мере увеличения дозы ИИ стремится к собственной концентрации. Рассеяние НЗ на РД уменьшает их подвижность. Оба эти фактора приводят к экспоненциальному росту удельного сопротивления (так как оно обратно пропорционально произведению концентрации и подвижности НЗ) в функции флюенса нейтронов:

$$\rho = \rho_0 \exp(К_\rho Ф),$$

где $К_р = 1 / kn^{0.77}$, k = const,

n - концентрация НЗ,

Ф - флюенс нейтронов (число частиц, пропадающих на единицу площади).

Для других видов ИИ вид зависимости $\rho(Ф)$ сохраняется, меняются лишь константы.

Время жизни τ неосновных НЗ - важнейший параметр, определяющий работоспособность инжекционных ПП. Оно зависит от концентрации ловушек-локальных центров, способных захватывать неравновесные НЗ, где они рекомбинируют с НЗ противоположного знака.

В качественном характере изменений времени жизни при всех видах облучения также наблюдается *аналогия*, что обусловлено введением однотипных РД. Изменение времени жизни при облучении флюенсом *Ф* частиц ИИ можно представить в виде эмпирического выражения:

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + К_\tau Ф,$$

где $К_\tau$ - константа повреждения времени жизни, зависящая от вида ИИ и их энергии, температуры, типа полупроводника и других факторов.

Качественно аналогичные закономерности получены и для других полупроводниковых материалов.

4.2.5. Влияние ИИ на оптические свойства материалов

Воздействие ИИ вызывает существенные изменения оптических свойств полупроводников и диэлектриков, применяемых в оптоэлектронике. При поглощенных дозах 10^5 - 10^6 рад в стеклах возникают центры окрашивания, вызывающих появление селективных полос в спектрах поглощения и общее возрастание коэффициента поглощения света. Это окрашивание неустойчиво и частично исчезает при термическом отжиге. Аналогичный эффект приводит к увеличению оптических потерь в волоконных световодах из кварцевого стекла.

В GaAs и твердых растворах соединений А3-В5 воздействие ИИ вызывает следующие оптические эффекты:

− сдвиг края собственного поглощения в длинноволновую область и появление полос поглощения в ближней ИК-области;

− уменьшение интенсивности люминесценции в результате возрастания скорости безызлучательной рекомбинации на РД.

Твердые растворы (тройные и четверные соединения А3-В5) проявляют более высокую РС по сравнению с GaAs благодаря присущему им разупорядочению кристаллической решетки.

4.3. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах

Воздействие ИИ, приводящее к уменьшению времени жизни неосновных НЗ, вызывает *увеличение прямого напряжения* вследствие нарушения модуляции проводимости базовой области и роста удельного сопротивления. Эти изменения наступают тем быстрее, чем больше толщина базовой области диода и ее удельное сопротивление.

В обратной ветви ВАХ наблюдается возрастание обратного тока вследствие увеличения токов поверхностной утечки и скорости рекомбинации на РД в области объемного заряда *p-n* перехода.

Возрастание удельного сопротивления материала базы приводит к увеличению дифференциального сопротивления диода в прямом направлении и пробивного напряжения − в обратной ветви ВАХ. Последнее непосредственно сказывается на работе *стабилитронов.* В виде того, что проводимость любого полупроводника при больших дозах ИИ стремится к собственной, различия между р- и п-областями исчезают и ВАХ в пределе вырождается в прямую.

Вследствие уменьшения потенциального барьера емкость *p-n* перехода при облучении уменьшается (в пределе *p-n* переход исчезает), что приводит к выходу из строя варикапов. Однако изменения параметров стабилитронов и варикапов происходят при флюенсах и дозах на 1-2 порядка больших по сравнению с теми, которые приводят к полной деградации выпрямительных диодов. Импульсные диоды, благодаря исходно малому времени жизни, высокому легированию и тонкой базе, проявляют наиболее высокую среди диодов РС. Еще более стойкими оказываются диоды СВЧ.

Деградация биполярных *транзисторов* при облучении, в основном, обусловлена уменьшением времени жизни НЗ. В планарных транзисторах большое влияние на скорость радиационной деградации оказывают поверхностные эффекты на границе $Si\text{-}SiO_2$, приводящие к образованию каналов. Причиной их является захват неравновесных НЗ, генерированных ИИ в слое окисла, на примесные ловушки, возникновение в защитном окисле объемного заряда, а следовательно - обедненного или обогащенного слоя вблизи поверхности полупроводника (в зависимости от типа проводимости слоя). Изменение коэффициента передачи тока эмиттера при воздействии ИИ с большой точностью описывается формулой

$$\Delta\,(1/\beta) = \text{К}\,\Ф\,,$$

где К - константа, пропорциональная $К_т$.

Упомянутое выше явление встраивания объемного заряда в слой окисла при облучении, естественно, вызывает изменение параметров приборов, принцип действия которых основан на полевом эффекте, − полевых транзисторов. Примесные ловушки в подзатворном окисле, в основном, захватывают неравновесные дырки, генерированные при воздействии ИИ. Неравновесные электроны при этом уходят вглубь полупроводника или в омический контакт затвора. Процесс встраивания положительного объемного заряда в окисле является необратимым, и заряд *сохраняется после облучения.* Этот заряд индуцирует отрицательный заряд в приповерхностном слое полупроводника, который уменьшает пороговое напряжение образования канала в полупроводнике р-типа и, наоборот, увеличивает пороговое напряжение в *n*-полупроводнике. Изменение удельного сопротивления полупроводника приводит к изменению крутизны стоко-затворной характеристики.

Таким образом, радиационная деградация полевых транзисторов не связана с изменением времени жизни НЗ, а объясняется поверхностными эффектами ионизации. Следовательно, можно ожидать более высокой стойкости МОП- транзисторов к нейтронному облучению (по сравнению с БТ) и равной (или даже меньшей) стойкости к гамма-облучению. Результаты испытаний полностью подтвердили этот вывод. Повышения РС полевых транзисторов добиваются применением комбинированных слоев из SiO_2 и SiN_4, в которых генерируются объемные заряды противоположных знаков.

Основными элементами оптоэлектронных приборов (ОЭП) являются излучающие полупроводниковые приборы (светодиоды и инжекционные лазеры) и фотоприемники. Их радиационная деградация основана на уменьшении времени жизни НЗ вследствие возрастания скорости безызлучательной рекомбинации на РД. Более того, излучающие ПП являются *наименее стойкими* к воздействию ИИ элементами РЭА.

В фотодиодах при облучении наблюдается снижение фото-чувствительности вследствие возрастания темновых обратных токов. В фототранзисторах дополнительно падает коэффициент усиления. Оптроны деградируют при еще меньших дозах вследствие деградации как излучателя, так и фотоприемника, а также потемнения иммерсионной среды между ними.

4.4. Радиационные эффекты в пассивных компонентах РЭА

Изменение сопротивления *резисторов* под действием различных ИИ носит специфический характер. Нейтронное облучение вызывает появление РД в резистивном слое, которые приводят к общему увеличению сопротивления резисторов. Однако эти изменения вплоть до Ф = 10^{16} н/см^2 невелики и лежат в пределах разброса номиналов.

Основную опасность представляют токи утечки, возникающие в результате ионизации окружающего воздуха и материала защитного покрытия резисторов, но они исчезают сразу после облучения.

То же самое справедливо и для *намоточных элементов* схем РЭА — трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности. В процессе мощного гамма-импульса сопротивление изоляции обмоток уменьшается на 6-7 порядков, но эти изменения полностью обратимые. Что касается больших доз и флюенсов ИИ, то для них справедливо все сказанное выше о радиационных эффектах в диэлектриках.

В *конденсаторах* ионизационные эффекты (токи утечки) уменьшаются с постоянной времени, зависящей от параметров диэлектрика:

$$\tau = RC = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma ,$$

где σ - удельная проводимость диэлектрика при воздействии ИИ.

Ток разряда конденсатора при воздействии ИИ определяется соотношением:

$$I = U C / \tau = U C К_\gamma P_\gamma,$$

где P_τ – мощность дозы гамма-облучения,

$К_\gamma P_\gamma$ – константа.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

5.1. Деградация полупроводниковых лазеров

В процессе деградации инжекционных полупроводниковых лазеров (ИПЛ) при длительной работе в условиях воздействия термотоковых или радиационных факторов происходят необратимые изменения параметров их активной среды, приводящие к ухудшению основных характеристик приборов и в конечном счете к их отказу. При этом под отказом понимают не только полную невозможность лазерной генерации, но и выход хотя бы одного из основных параметров (выходной мощности генерации и порогового тока) за пределы установленных норм.

Возможны отказы, связанные с явным или скрытым технологическим браком, но существуют и принципиально неустранимые причины отказов, обусловленные процессами старения.

Деградация ИПЛ проявляется в возрастании порогового тока, снижении квантового выхода излучения и мощности генерации. Кинетика деградации ИПЛ отличается многостадийностью. Например, для ИПЛ с двойной гетероструктурой получены следующие зависимости мощности генерации от времени наработки:

- постоянство $P_{вык}$ в течение некоторого времени, а затем спад;
- экспоненциальный спад с первых же часов работы;

– спад с различной скоростью (иногда скачками);

– первоначальный рост, сменяющийся быстрым спадом.

В результате усреднения экспериментальных данных по большому объему испытанных изделий установлены некоторые общие закономерности кинетики деградации ИПЛ: быстрое возрастание порога генерации в начале испытаний, затем медленный линейный рост, а приблизительно после 1000 ч испытаний - новое ускорение роста порогового тока.

На стадии линейного роста порогового тока механизмы деградации ИПЛ включают в себя следующие факторы:

– образование и перестройку структурных дефектов – центров безызлучательной рекомбинации инжектированных НЗ;

– диффузию примесей и дефектов с границ гетеослоев в активную область, стимулированную высоким уровнем инжекции в ИПЛ;

– релаксацию упругих напряжений, рост и перемещение дислокаций.

Качественные особенности деградации ИПЛ состоят в образовании в активной области деградировавших лазеров специфических дефектов двух типов: дефектов темных линий (ДТЛ) и дефектов темных пятен (ДТП). Специфичны и внешние проявления деградации: помимо возрастания порогового тока и снижения выходной мощности генерации увеличивается число генерируемых мод и угол расходимости лазерного излучения, изменяются временные характеристики генерации.

Дополнительным фактором ненадежности в ИПЛ является деградация *поверхности зеркал* (сколотых граней кристалла).

ДТЛ представляют собой сетку дислокационных линий, легко обнаруживаемую в растровом электронном микроскопе. Чем больше степень деградации ИПЛ, тем больший объем их активной области занимают ДТЛ. Темные линии образуются в результате движения и размножения дислокаций, которые группируются по определенным направлениям и присоединяют к себе точечные дефекты. Характерная особенность дислокаций в ДТЛ - наличие петель и полупетель размером 2…10 мм. Такая плотная сеть дислокаций может развиваться из одиночной дислокации, пронизывающей всю гетероструктуру.

Развитию сетки дислокаций способствуют механические напряжения в структуре и повышение температуры. Помимо остаточных напряжений, возникающих в процессе производства, при работе ИПЛ появляются термоупругие напряжения из-за градиента температуры и несовпадения коэффициентов термического расширения различных слоев структуры. Существуют также «контактные» напряжения, обусловленные закреплением лазера на теплоотводе и зависящие от толщины и эластичности припоя.

ДТП возникают при выращивании гетероструктур даже на высококачественных, бездислокационных подложках. Они инициируются локальными дефектами, к которым относятся морфологические дефекты в виде участков с непланарными гетерограницами и локальным градиентом напряжений; дефекты загрязнения слоев кислородом и другими веществами; микроскопические капельки галлия (температура плавления которого 30 °С),

дефекты вжигания напыленного слоя металла в полупроводник; механические повреждения слоев и др.

После включения лазера в работу дефект начинает расти. Это объясняется тем, что возникновение любой поглощающей свет неоднородности активной среды приводит к локальному повышению её температуры и возникновению термонапряжений вследствие огромных значений плотности мощности излучения (до 10^7 Вт/см^2).

Разрушение зеркал резонатора наблюдается во *всех* типах лазеров. На них появляются сколы и трещины, что приводит к резкому снижению мощности излучения. В ИПЛ наблюдается также образование трещин и изломов в объеме активного слоя, но всегда с выходом на поверхность. Водяные пары в атмосфере ускоряют эрозию зеркал. Разрушения происходят под действием механических напряжений из-за локального разогрева активной среды, а также под действием электрического поля световой волны.

Для ИПЛ характерным является большой разброс срока службы (10^3 - 10^4 ч). Поэтому эффективным способом обеспечения заданных показателей надежности партии приборов является *отбраковка* потенциально ненадежных приборов по различным информативным параметрам.

Отбраковка начинается с наружного осмотра кристаллов и приборов и контроля соответствия параметрам нормам ТУ. Оставшиеся приборы подвергают ресурсным испытаниям в течение 100 ч для выявления технологического брака, вызывающего ранние отказы. Как правило, эти испытания проводят в более жестком температурном и электрическом режимах, близким к предельно допустимым.

После этого оставшиеся годными приборы подвергают *неразрушающим* испытаниям. При этом информативными параметрами могут быть:

– интенсивность люминесценции с боковых граней ИПЛ;

– частота следования импульсов возбуждения, при которой начинается падение пиковой мощности излучения;

– критическая температура, при которой начинается быстрый рост порогового тока и др.

Вообще информативными считаются параметры, изменение которых проявляет корреляцию со сроком службы приборов. Но при неразрушающих испытаниях эти изменения обратимы и восстанавливаются после снятия нагрузки.

Приборы, прошедшие и этот этап испытаний, будут деградировать в результате процессов старения, которые поддаются прогнозированию на основе *ускоренных* испытаний определенной выборки приборов в форсированных режимах, если известен коэффициент ускорения - отношение времен наработки ИПЛ в нормальном режиме к времени наработки в форсированном (по температуре или току накачки) режиме.

Для *повышения стойкости* ИПЛ к деградации применяют комплекс мер. В первую очередь, стараются исключить все факторы, приводящие к появлению ДТЛ и ДТП, всемерно снижать упругие напряжения в структуре (устранять

несоответствие параметров решетки гетеослоев и различия КТР и т.д.). При создании *p-n* переходов необходимо использовать наименее подвижные примеси; большой эффект дает ионно-плазменное травление зеркальных граней резонаторов и нанесение на них защитных диэлектрических покрытий, а также использование лазерного отжига для ликвидация структурных дефектов активной области.

При эксплуатации ИПЛ целесообразно по возможности применять щадящий режим накачки, предпочитая внешнюю модуляцию внутренней, так как нестационарное возбуждение ускоряет деградацию.

В заключение рассмотрим основные результаты исследований радиационной стойкости (РС) инжекционных лазеров.

Стойкость лазерных диодов к воздействию различных видов ИИ: нейтронов, гамма-излучения, электронов и протонов высоких энергий выше стойкости светодиодов (СД) − источников некогерентного излучения. Это объясняется более высоким током накачки, вызывающим отжиг радиационных дефектов в объеме кристалла, а также малыми значениями исходного времени жизни НЗ и меньшими размерами активной области, чем у СД.

Было также экспериментально установлено, что повышение температуры при облучении снижает РС лазерных диодов.

Интересно, что имеет место прямая линейная корреляция необратимых радиационных изменений порогового тока ИПЛ и его обратимых изменений при повышении температуры кристалла (без облучения).

Наличие подобной линейной корреляции с весьма высоким коэффициентом парной линейной корреляции (до 0,9) нами было экспериментально обнаружено и для СД на основе прямозонных полупроводников: GaAs и GaAlAs.

Эти результаты позволили разработать и защитить авторским свидетельством способ неразрушающей отбраковки СД по РС на основе корреляции радиационных (необратимых) и температурных (обратимых) изменений мощности излучения (силы света).

На основе экспериментальных исследований кинетики процессов старения (без облучения) и радиационной деградации ИПЛ на GaAlAs и InGaAsP П.Г. Елисеевым с сотрудниками показана возможность описания *кинетики* изменения порогового тока $I_{пор}$ в функции времени t ресурсных испытаний (или дозы облучения) одним и тем же выражением вида

$$I_{пор} = I_0 + C \ln(t / т), \text{ где } C = \text{const.}$$

Прогнозирование процессов старения и РС гетеролазеров ими предложено проводить с использованием гак называемого «параметра эквивалентности» обоих этих факторов ненадежности: C/I_0, где I_0 − значение порогового тока до начала испытаний. В этой модели также подразумевается глубокая физическая аналогия механизмов старения и радиационной деградации.

Несмотря на более высокую РС инжекционных гетеролазеров по сравнению со СД, эти различия сравнительно невелики (не более одного порядка), и проблема повышения РС для них остается актуальной.

Для других видов лазеров проблема повышения РС не стоит так остро, как для ИПЛ. Их РС сравнима со стойкостью электронно-лучевых и газоразрядных приборов, в то время как полупроводниковым излучателям деградация свойственна по самой их природе: любые дефекты структуры полупроводника служат центрами безызлучательной рекомбинации, следовательно - источником деградации, фактором ненадежности этих ОЭП.

5.2. Деградация светодиодов и оптронов

Результаты проведенных исследований деградации светодиодов (СД) и оптронов при воздействии ИИ, а также при ускоренных испытаниях в импульсном режиме прямого тока позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследования деградации СД в составе оптронов при воздействии стационарного гамма-излучения с мощностью дозы 240 Р/с на установках ^{60}Co (кобальта-60) в различных электрических режимах показали, что необратимые изменения параметров оптронов обусловлены деградацией светодиодов.

При одинаковых дозах облучения длительное гамма-облучение малой интенсивности не приводит к увеличению скорости деградации СД по сравнению с высокоинтенсивным облучением на установке ^{60}Co.

Это имеет большое практическое значение для сокращения сроков испытаний ОЭП на радиационную стойкость.

2. Кинетика деградации СД в составе оптронов имеет качественно аналогичный характер, независимый от мощности дозы гамма - облучения и электрического режима приборов при облучении. Он отличается немонотонностью дозовой зависимости критериальных параметров (силы света или мощности излучения), возрастающей при увеличении мощности дозы.

3. Исследования кинетики деградации дискретных СД на основе GaAlAs и GaP при гамма-облучении ^{60}Co с мощностью дозы 100...500 Р/с в активном и пассивном электрических режимах позволили впервые обнаружить наличие двух максимумов дозовой зависимости силы света.

4. Предложен, апробирован и защищён авторским свидетельством способ восстановления работоспособности оптронов с излучателями на GaAs и GaAlAs после гамма-облучения, основанный на использовании инжекционного отжига РД в импульсном режиме прямого тока.

Отжиг проводят при комнатной температуре в режиме импульсного прямого тока с параметрами для GaAs и GaAlAs соответственно: длительность импульсов 8... 10 мкс и 1...2 мкс, амплитуда 10...12 А и 15...20 А, частота следования 200...300 Гц и 100...150 Гц.

Измерение параметров и электротренировку завершают после достижения параметрами оптронов номинальных значений, но суммарное время отжига не

должно превышать предел, за которым начинается параметрическая деградация (обычно 10...15 мин.).

5. Исследование кинетики и необратимых изменений параметров СД на GaAlAs и GaP при деградации в импульсном режиме с I > 1 А показали, что изменение длительности импульса с 5 до 20 мкс при соответствующем изменении частоты повторения и скважности не изменяет общих закономерностей деградации СД, но существенно облегчает обеспечение постоянства тока или напряжения на СД в процессе импульса возбуждения, что весьма важно для отбраковки потенциально ненадёжных СД.

6. Деградация СД в выбранном оптимальном режиме проявляет *многостадийность,* в основных чертах совпадающую с кинетикой радиационной деградации аналогичных СД. Часто наблюдаются и двойные максимумы зависимости относительных изменений силы света от времени испытаний $J(t)/J(0)$. Для отдельных СД эта зависимость может существенно отличаться от усреднённой.

В целом кинетика деградации аналогична наблюдавшейся ранее для СД на GaP, GaAsP и GaAlAs в стационарном или импульсном режимах испытаний при меньшей (на порядок) амплитуде импульсов тока. Необратимые изменения характеристик СД (ВАХ, ЛАХ, С(V)) после деградации также типичны и для ранее описанных.

7. Для СД на GaAlAs получена экспоненциально спадающая зависимость медианного времени наработки от амплитуды импульсного тока, что даёт возможность определения коэффициента ускорения при форсированных испытаниях на надёжность.

8. Предварительное гамма-облучение ^{60}Co дозами $(1...6)\cdot10^7$ Р вызывает значительное увеличение скорости деградации СД на основе GaAlAs при последующих испытаниях в импульсном режиме. Это свидетельствует о возрастании рекомбинационной активности радиационных дефектов при последующих импульсных испытаниях.

Однако, испытания в импульсном режиме существенно не снижают стойкости СД к последующему гамма-облучению, так как дополнительные дислокации, введённые при релаксации внутренних напряжений в процессе импульсных испытаний, могут служить стоками для радиационных дефектов, вводимых гамма-облучением.

Таким образом, при поочередном воздействии гамма-излучения и термотоковых нагрузок в различной последовательности принцип линейного суммирования повреждений не выполняется вследствие нелинейных эффектов взаимодействия различных видов первичных повреждений, вносимых этими воздействиями.

Однако, вторичные процессы перестройки ПДК имеют *общий характер,* и гамма-облучение ещё более усиливает немонотонность, типичную для зависимости силы света от дозы облучения или от времени термотоковых испытаний.

Исследования кинетики люминесценции СД в импульсном режиме возбуждения по сравнению со стационарным (в режиме ТУ) показали, что при импульсном возбуждении происходит уширение основных полос ЭЛ со сдвигом максимумов в длинноволновую область на величину (15...20) нм и увеличение времен нарастания и спада импульса излучения. Эти изменения спектров ЭЛ и переходных характеристик хорошо объясняются возникновением градиента температуры на границе активной области СД с подложкой и не связаны с изменением фундаментального механизма излучательных переходов.

Они качественно и количественно аналогичны для СД с совершенно различным механизмом излучательной рекомбинации на GaAlAs и GaP.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие надежности технического объекта и его основные составляющие.
2. Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов.
3. Интегральная и дифференциальная функции распределения вероятности.
4. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины.
5. Нормальное распределение и его характеристики.
6. Распределение Вейбулла и его параметры.
7. Доверительный интервал и доверительная вероятность.
8. Идентификация законов распределения случайных величин.
9. Понятие отказа и классификация отказов.
10. Виды испытаний ИЭТ на воздействие внешних факторов.
11. Виды испытаний ИЭТ на надежность при промышленном производстве.
12. Понятия производственной и эксплуатационной надежности.
13. Основные виды и механизмы отказов полупроводниковых приборов.
14. Виды и механизмы отказов интегральных микросхем.
15. Виды и механизмы отказов электронных ламп.
16. Виды и механизмы отказов резисторов и конденсаторов.
17. Классификация неразрушающих методов контроля качества ИЭТ.
18. Прогнозирование надежности ПП по уровню собственных шумов.
19. Прогнозирование надежности ПП по виду ВАХ.
20. Классификация методов локальной диагностики ИЭТ.
21. Сущность и применение метода ультразвуковой дефектоскопии.
22. Сущность и применение радиационных методов дефектоскопии.
23. Сущность и применение метода «тепловидения».
24. Обеспечение надежности ИЭТ на этапе проектирования.
25. Обеспечение надежности ИЭТ на этапе разработки.
26. Обеспечение надежности ИЭТ на этапе промышленного выпуска.
27. Обеспечение надежности ИЭТ при эксплуатации в РЭА.

28. Комплексный характер проблемы повышения надежности ИЭТ.
29. Экономические вопросы обеспечения надежности ИЭТ.
30. Роль стандартизации в обеспечении надежности ИЭТ.
31. Микроминиатюризация ИЭТ и надежность РЭА.
32. Влияние режима работы в схемах РЭА на надежность ИЭТ.
33. Влияние режима работы в схемах РЭА на надежность ИЭТ.
34. Естественные источники ионизирующих излучений (ИИ) и их опасность для РЭА.
35. Искусственные источники ИИ и их опасность для РЭА.
36. Радиационные дефекты в твердых телах.
37. Радиационные эффекты в металлических материалах.
38. Радиационные эффекты в диэлектрических материалах.
39. Радиационные эффекты в полупроводниках.
40. Радиационные эффекты в полупроводниковых диодах.
41. Радиационные эффекты в транзисторах.
42. Процессы деградации полупроводниковых лазеров.
43. Дефекты «темных линий» и «темных пятен» в ИПЛ.
44. Процессы деградации светодиодов при воздействии ИИ.
45. Общность процессов деградации светодиодов при воздействии внешних факторов различной физической природы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Груничев А.С. Обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры и комплектующих изделий при эксплуатации / А.С. Груничев, А.В. Однодушнов, П.Ф. Якимов. - М.: Сов. Радио, 1976. - 240 с.

2. Митрейкин Н.А. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов / Н.А. Митрейкин, А.И. Озерский. - М.: Радио и связь, 1981. - 272 с.

3. Надежность электронных элементов и систем / Под ред. Х. Шнайдера ; пер. с нем. - М.: Мир, 1977. - 258 с.

4. Доценко Н.С. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги) / Н.С. Доценко, В.В. Соболев. - Л.: Энергия, 1973. - 160 с.

5. Бердичевский Б.Е. Неразрушающий контроль элементов и узлов РЭА / Б.Е. Бердичевский, Л.Г. Дубицкий, Г.М. Сушинцев, А.П.Агеев. - М.: Сов. радио, 1976. - 296 с.

6. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н.Ермолов, Ю.Я.Останин. - М.: Высш.шк., 1988. - 368 с.

7. Физические основы надежности интегральных схем / Под ред. Ю.Г. Миллера. - М.: Сов. радио, 1976. - 320 с.

8. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А.Чернышев. - М.: Радио и связь, 1988. - 256 с.

9. Готра З.Ю. Контроль качества и надежность микросхем / З.Ю. Готра, И.М. Николаев. - М.: Радио и связь, 1989. - 168 с.

10. Аронов В.Л. Испытание и исследование полупроводниковых приборов / В.Л. Аронов, Я.А. Федотов. - М.: Высш.шк., 1975. - 325 с.

11. Перельман Б.Л. Методы испытаний и оборудование для контроля качества полупроводниковых приборов / БЛ. Перельман, В.Г. Сидоров. - М.: Высш. шк., 1979. - 215 с.

12. Перроте А.И. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность / А.И. Перроте, Г.Д. Карташов, К.Н. Цветаев. - М.: Сов. радио, 1868. - 224 с.

13. Карташов Г.Д. Основы теории форсированных испытаний / Г.Д.Карташов. - М.: Знание. 1977. - 114 с.

14. Воротинский В.А. Ускоренные испытания полупроводниковых приборов и интегральных схем на надежность / В.А. Воротинский, Н.К. Дадерко // Зарубежная радиоэлектроника. - 1977. - В. 7. - С. 106-125.

15. Воротинский В.А. Надежность оптоэлектронных полупроводниковых приборов / В.А. Воротинский, Н.К. Дадерко, Л.П. Егоров. - М.: Радио и связь, 1983. - 136 с.

16. Перроте А.И. Вопросы надежности РЭА / А.И. Перроте, М.А. Сторчак. - М.: Сов.радио, 1976. - 185 с.

17. Глудкин О.П. Технология испытаний микроэлементов РЭА и интегральных микросхем / О.П. Глудкин, В.П. Черняев. - М.: Энергия, 1980. - 360 с.

18. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон ; пер. с англ. - М.: Мир, 1980. - 604 с

19. Сотсков Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б.С. Сотсков. - М.: Высш. шк., 1970. - 270 с.

20. Якимов О.П. Моделирование режимов и оценка качества электронных приборов / О.П. Якимов. - М.: Радио и связь, 1989. - 176 с.

21. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П.С. Давыдов. - М.: Радио и связь. 1988. - 256 с.

22. Литвинский И.Б. Обеспечение безотказности микроэлектронной радиоаппаратуры на этапе производства / И.Е. Литвинский, В.А. Прохоренко, А.П. Смирнов. - Мн.: Беларусь, 1989. - 191 с.

23. Кейджян Г.А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС / Г.А. Кейджян. - М.: Радио и связь, 1987. - 152 с.

24. Смирнов Н.И. Оценка безотказности интегральных микросхем / Н.И. Смирнов. В.Б. Широков. - М.: Радио и связь, 1983. - 104 с.

25. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. - М.: Радио и связь, 1988. - 296 с.

26. Коршунов Ф.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. - Мн.: Наука и техника, 1978. - 232 с.

27. Коршунов Ф.П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А. Вавилов. - Мн.: Наука и техника, 1986. - 254 с.

28. Першенков В.С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В.С. Першенков, В. Д. Попов, А.В. Шальнов. - М.: Атомиздат, 1988. - 256 с.

29. Никулин С.М. Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры / С.М.Никулин. - М.: Энергия, 1979. - 80 с.

30. Маньковский В.А. Прочность и надежность материалов и оборудования АЭС / В.А. Маньковский, В.Н. Подтынных. - Севастополь: Изд. «Арг-Принт», 2000. - 95 с.

У ч е б н о е и з д а н и е

Ломоносов Сергей Евгеньевич
Шевченко Николай Витальевич

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Учебно-методическое пособие

Часть 2

В авторской редакции

Изд. № 79/2022. Объем 2,75 п.л. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,695.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»