Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

На правах рукописи

СИМОНОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕТОДИОДАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Градобоев Александр Васильевич

Томск – 2019

Оглавление

Введение……..……4
Глава 1. Изменение параметров светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов и ионизирующего излучения…..……....11
1.1. Изменение параметров светодиодов при воздействии эксплуатации …...…12
1.1.1. Катастрофические отказы при эксплуатации……...13
1.1.2. Изменение ВАХ светодиодов при эксплуатации…….18
1.1.3. Изменение мощности излучения СД при эксплуатации…….25
1.2. Изменение параметров светодиодов при воздействии различных видов ионизирующего излучения……30
1.2.1. Радиационная стойкость гетероструктур……..31
1.2.2. Изменение электрофизических и светотехнических характеристик светодиодов при облучении……...34
Выводы по главе 1…….37
Глава 2. Объекты и методы исследования надежности и радиационной стойкости светодиодов……39
2.1. Объекты исследований. Конструкция и технология изготовления светодиодов……39
2.1.1. Светодиоды ИК-диапазона на основе гетероструктур AlGaAs……...39
2.1.2. Светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP……...42
2.2. Оборудование для измерения основных параметров светодиодов……44
2.3. Оборудование, используемое при анализе отказов светодиодов……..46
2.4. Методика определения сопротивления омических контактов……...46
2.5. Анализ характеристик исходных светодиодов……52
2.6. Используемое оборудование для ступенчатых испытаний светодиодов……..59
2.7. Используемое оборудование для исследования радиационной стойкости…..61
2.7.1. Гамма-установка «Исследователь»……62
2.7.2. Установка «БАРС-4»……...……64
2.7.3. Ядерный реактор ИРТ-Т…….66

Выводы по главе 2…….67
Глава 3. Исследование надежности светодиодов……...68
3.1. Анализ катастрофических отказов……68
3.2. Изменение электрофизических характеристик светодиодов……72
3.3. Изменение светотехнических характеристик светодиодов……79
Выводы по главе 3…….....88
Глава 4. Комбинированное действие ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов на светодиоды……..90
4.1. Обоснование выбранных уровней воздействия предварительного облучения……..90
4.2. Влияние гамма-облучения на эксплуатационные характеристики светодиодов……...92
4.3. Влияние облучения быстрыми нейтронами на эксплуатационные характеристики светодиодов……102
4.4.Контроль изменения граничного тока как способ прогнозирования и повышения надежности светодиодов при эксплуатации……..108
4.4.1. Контроль изменения граничного тока для СД партии СД ИК-1…….....108
4.4.2. Контроль изменения граничного тока для СД партии СД ИК-4...……...109
4.4.3. Контроль изменения граничного тока для СД партии СД ИК-5……..110
4.4.4. Изменение граничного тока между областями низкой и средней инжекции электронов на ВтАХ при ступенчатых испытаниях СД……111
Выводы по главе 4……...113
Заключение……...114
Список литературы……..116
Приложение 1. Акт использования……129
Приложение 2. Акт внедрения……...130

Введение

Актуальность работы. В настоящее время светодиоды активно применяются практически во всех отраслях науки и техники. В том числе для волоконно-оптических линий связи, интегрированных оптоэлектронных устройств, систем оптической связи с открытым каналом, медицинского приборостроения и т.д. При этом в атомной, космической и военной промышленностях особое внимание уделяется проблемам их надежности и радиационной стойкости. В условиях космического пространства и на ядерных энергетических объектах они подвергаются комплексному и комбинированному воздействию различных видов ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов. В данном случае комбинированное действие – это разнесенное во времени действие двух и более факторов, в то время как комплексное действие – их одновременное действие. Основными факторами, которые приводят к снижению мощности излучения светодиодов при эксплуатации, являются повышенная температура их активных элементов и электрическое поле (далее эксплуатационные факторы), при этом наблюдаются как параметрические отказы (в основном снижение интенсивности излучения), так и катастрофические отказы.

На основании изложенного выше можно сделать вывод о том, что исследование комбинированного действия ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов на светотехнические и электрофизические характеристики светодиодов является **актуальной задачей**.

Степень разработанности. В настоящее время имеется незначительное количество работ по комбинированному облучению полупроводниковых приборов, а сведения о комбинированном действии ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов практически отсутствуют. Из отечественных ученых можно выделить работы Белоуса М.В., Коган Л.М., Беляева А.Е., Карташова Г.Д., Генкина А.М., Генкину В.К., Градобоева А.В., Никифорова С.Г., Перроте А.И., Тарасову Е.А., Трусову А.Ю., Черных М.И., Шмидт Н.М. и др. Из зарубежных ученых проблемам надежности и радиационной стойкости уделяют внимание

Berg A., Dalapati P., Ettenberg M., Gupta K.M., Jinrong P., Kayali S., Kressel H., Lockwood H.F., Ponchak G., Schubert E.F., Ueda O., Yang L. и др.

Действие эксплуатационных факторов на различные полупроводниковые приборы обычно определяется по результатам ускоренных испытаний, в основе которых лежит форсирование процессов старения, что позволяет сократить длительность получения необходимой информации. Практическое применение таких испытаний достаточно ограничено, поскольку имеющиеся факторы ускорения (повышение температуры и электрического поля) можно изменять только в достаточно узких диапазонах. В свою очередь, для определения радиационной стойкости полупроводниковых приборов используются различные моделирующие установки.

Таким образом, для решения задачи исследования комбинированного и комплексного действия ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов необходимо сопоставить действие этих факторов на светотехнические и электрофизические характеристики СД как совместно, так и в отдельности.

Объектом исследований в данной работе является промышленные светодиоды на основе двойных гетеростуктур AlGaAs, а также на основе гетероструктур AlGaInP.

Цель диссертационной работы: установить закономерности изменения светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов при комбинированном действии ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Установить закономерности изменения светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP при воздействии эксплуатационных факторов.

2. Определить закономерности изменения светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP, предварительно обученных гамма-квантами и быстрыми нейтронами, при воздействии эксплуатационных факторов.

Научная новизна

1. Снижение мощности излучения светодиодов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP, как при воздействии эксплуатационных факторов, так и при воздействии ионизирующего излучения может быть описано идентичными по характеру проявления закономерностями трансформации дефектной структуры.

2. При эксплуатации светодиодов возрастает вклад диффузионных процессов на границе «полупроводник – многослойный омический контакт», что приводит к росту сопротивления омических контактов, появлению объемных каналов утечки тока (предположительно дислокаций), расположенных параллельно p-n-переходу, к локальному дополнительному нагреву, изменению формы прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) и, в итоге, к повышению вероятности развития катастрофических отказов.

3. Ионизирующее излучение при воздействии на активный слой кристалла светодиода вызывает перестройку структуры исходных дефектов, что приводит к снижению как интенсивности процессов старения, так и вероятности развития катастрофических отказов при эксплуатации.

Теоретическая значимость работы

Полученные результаты позволяют сопоставить закономерности деградации критериальных параметров светодиодов (мощность излучения, прямая ветвь ВАХ, спектры излучения и т.д.) при эксплуатации и при воздействии ионизирующих излучений, как в области стимулированной воздействием перестройки исходной структуры дефектов, так и в области введения новых дефектов вследствие воздействия.

Практическая значимость работы

1. Показано, что предварительное облучение гамма-квантами (быстрыми нейтронами) позволяет повысить надежность светодиодов.

2. Разработан комплекс методов оценки сопротивления омических контактов для приборов с p-n-переходом, основанный на анализе формы прямой ветви ВАХ и ее изменения в результате действия различных внешних факторов.

3. Разработана методика определения сопротивления объемных каналов утечки тока, подключаемых параллельно p-n-переходу, на основе анализа формы прямой ветви ВАХ.

4. Установленные закономерности снижения мощности излучения светодиодов в результате воздействия эксплуатационных факторов позволяют прогнозировать их надежность по светотехническим и электрофизическим характеристикам исходных диодов.

5. Предложена методика прогнозирования надежности светодиодов на основе результатов исследования их стойкости к воздействию ионизирующего излучения.

6. Результаты работы использованы в АО «Научно- исследовательский институт полупроводниковых приборов» (г. Томск) при разработке новых и модернизации серийных изделий оптоэлектроники (Акт использования) и используются в учебном процессе в ФГАОУ НИ ТПУ (Акт внедрения).

Методология и методы исследований

Работа строилась исходя из гипотезы о том, что основной причиной старения светодиодов при низких уровнях воздействия является трансформация исходной дефектной структуры светодиода. Предполагалось, что ее вклад можно снизить путем воздействия ионизирующим излучением.

Электрофизические и светотехнические характеристики светодиодов контролировали путем измерения прямой ветви ВАХ и ватт-амперной характеристик (ВтАХ) до и после каждого воздействия. Используемое измерительное оборудование, источники ионизирующего излучения, оборудование для ступенчатых испытаний, а также методы контроля параметров приборов сертифицированы и аттестованы в соответствии с существующими требованиями. Полученные результаты измерений обрабатывались методами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

1. При воздействии эксплуатационных факторов снижение мощности излучения светодиодов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs и

AlGaInP, сначала происходит в результате перестройки исходной дефектной структуры (первый этап). После ее завершения развиваются процессы формирования новых дефектов (второй этап). Увеличение дефектности кристаллической структуры в итоге приводит к катастрофическому отказу. Эти процессы идентичны процессам, наблюдаемым при воздействии ионизирующего излучения, что является основанием для разработки новых методов ускоренных испытаний светодиодов.

2. Установленные коэффициенты повреждаемости определяются типом гетероструктуры и позволяют прогнозировать изменение мощности излучения светодиодов при эксплуатации путем анализа характеристик исходных диодов.

3. В условиях повышенной температуры происходит интенсификация диффузионных процессов на границе «омический контакт – полупроводник» и в объеме активного слоя гетероструктуры, приводящих к росту сопротивления омических контактов и формированию объемных каналов утечки тока параллельно p-n-переходу, что приводит к изменению формы прямой ветви ВАХ. Этот факт дает основание использовать динамику изменения прямой ветви ВАХ для оценки вероятности катастрофических отказов при эксплуатации.

4. Предварительное облучение светодиодов гамма квантами (быстрыми нейтронами) и последующий термический отжиг приводит к перестройке исходной дефектной структуры, в результате чего снижается интенсивность процессов деградации светодиодов и, как следствие, увеличивается их срок эксплуатации.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановки цели и задач исследований и их обоснованностью; обеспечивается систематическим характером исследований, большим объемом экспериментальных данных, применением проверенных методик измерений и общепринятых методов статистической обработки результатов измерений, воспроизводимостью полученных результатов, использованием сертифицированного и аттестованного оборудования, а также внутренним единством и непротиворечивостью представленных данных и данных,

полученных другими исследователями.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: II Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Современное состояние и проблемы естественных наук» (Юрга, 2015г.), VI, VII и IX Школа-конференция молодых атомщиков Сибири (Томск, 2015г., 2016г. и 2018г.), European Materials Research Society Spring Meeting (Лилль, Франция, 2016г.; Страсбург, Франция, 2017г. и 2018г.), International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems (Отвок, Польша, 2016г.), XII Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON) (Москва, 2016г.), VII Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития» (г. Курчатов, ВКО, Республика Казахстан, 2016г.), V и VI International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Томск, 2016г. и 2018г.), IX Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2017г.), Conference of Radiation Effects on Components and Systems (Женева, Швейцария, 2017г.), 27th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics (Бордо, Франция, 2017г.), VIII Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (Курчатов, ВКО, Республика Казахстан, 2018г.).

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта Благотворительного Фонда культурных инициатив (Фонда Михаила Прохорова) для студентов старших курсов, аспирантов и молодых преподавателей «Академическая мобильность», 2017г.

Публикации. По теме работы опубликовано 34 работы: 11 – в журналах, входящих в перечень ВАК / индексируемых международными базами данных Scopus / Web of Science; глава в коллективной монографии; 22 публикации в материалах конференций.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования (совместно с научным руководителем); проведении экспериментальных исследований надежности и по влиянию предварительного облучения гамма-квантами и быстрыми нейтронами на стойкость светодиодов к воздействию эксплуатационных факторов с соавторами при непосредственном участии; обработке результатов экспериментов; формулировании выводов и положений, выносимых на защиту; написание статей совместно с соавторами при непосредственном участии; подготовке докладов и выступлениях на семинарах и конференциях.

Структура и объем и работы: диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 130 страниц. Работа содержит 5 таблиц, 76 рисунков. Библиография включает 115 наименований.

Глава 1. Изменение параметров светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов и ионизирующего излучения

В настоящее время светодиоды (СД) активно применяются практически во всех отраслях науки и техники. В том числе для волоконно-оптических линий связи, интегрированных оптоэлектронных устройств, систем оптической связи с открытым каналом, медицинского приборостроения и т.д. Таким образом, СД можно отнести к полупроводниковым приборам, которые эксплуатируются в самых разнообразных условиях. К настоящему времени имеется ряд монографий, в которых достаточно подробно рассмотрены используемые для изготовления СД полупроводниковые материалы, их конструктивные особенности, основные характеристики и свойства, а также систематизированы результаты исследования их потребительских свойств [1-4].

Особо отметим, что различные устройства на основе СД очень часто эксплуатируются в жестких условиях [5-8]. В частности, в условиях космического пространства и на ядерных энергетических объектах устройства на основе СД подвергаются комплексному и комбинированному воздействию различных видов ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов. В данном случае комбинированное действие – это разнесенное во времени действие двух и более факторов, в то время как комплексное действие – одновременное действие двух и более факторов. Под эксплуатационными факторами чаще всего понимают действие повышенных температур и электрических полей, поскольку именно эти параметры во многом определяют деградационные процессы, которые развиваются в процессе эксплуатации (диффузия, электростимулированная диффузия, электромиграция, размывание гетерограниц, возникновение температурных градиентов и т.д.).

При оценке действия внешних факторов на любое изделие чаще всего используют понятие ***критериальный параметр или группа критериальных параметров. Критериальный параметр*** – это параметр, изменение которых ограничивает работоспособность изделия под воздействием внешних факторов

[9]. Обычно в качестве критериальных параметров для СД используют мощность (интенсивность) излучения при заданном рабочем токе, ватт-амперную (ВтАХ) или ватт-вольтную (ВВХ) характеристики, вольт-амперную характеристику (ВАХ) и спектр излучения. При этом контролируют какой-то один параметр или их комплекс.

Изменения критериальных параметров СД при воздействии эксплуатационных факторов и различных видов ионизирующего излучения и являются объектами анализа в данной работе.

Основным материалом для изготовления СД в настоящее время являются различные гетероструктуры [3,4], которые представляют собой слоистую структуру, образованную из различных материалов (например, AlGaAs, AlGaInP, InGaN и т.д.). Использование гетероструктур позволяет обеспечить наилучшие выходные параметры и эксплуатационные свойства СД. Поэтому при рассмотрении действия различных внешних факторов на СД мы отдельное внимание уделим стойкости гетероструктур, поскольку именно исходный полупроводниковый материал во многом определяет эксплуатационные свойства получаемых приборов. Именно исследование стойкости гетероструктур позволяет установить виды вводимых внешним воздействием дефектов и их комплексов и установить их влияние на основные характеристики гетероструктур. Поскольку к настоящему времени наиболее изученными с точки зрения воздействия эксплуатационных факторов и различных видов ионизирующего излучения являются СД, изготовленные на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP, то при анализе основное внимание сосредоточим именно на этих СД (тем более что в данной работе эти СД выбраны в качестве объектов исследования).

1.1. Изменение параметров светодиодов при воздействии эксплуатации

Известно достаточно большое количество работ по исследованию изменения параметров СД при эксплуатации, среди которых можно отметить ряд монографий [10-13]. Поскольку, разработанные к настоящему времени СД, имеют

достаточно высокую надежность и срок их эксплуатации во многих случаях превышает десятки тысяч часов, то для проведения исследований по влиянию эксплуатационных факторов используют ускоренные (форсированные) методы испытаний [14-19], что позволяет существенно сократить время получения требуемой информации. Напомним, что для объяснения результатов форсированных испытаний следует привлекать физические методы [20].

Анализ имеющихся литературных данных по результатам исследования влияния эксплуатационных факторов на СД позволяет сделать вывод о том, что наблюдаются как параметрические (далее ПО), так и катастрофические отказы (далее КО). При этом КО проявляются в виде мгновенного прекращения работы СД либо в процессе воздействия, либо в процессе проведения измерений после определенного этапа испытаний. Изменение критериальных параметров СД в результате воздействия внешних факторов приводит к тому, что при определенном уровне воздействия значение критериального параметра выходит за пределы допустимого диапазона изменений, что и приводит к появлению параметрического отказа. При этом может наблюдаться случай как резкого, так и плавного изменения критериального параметра. Таким образом, при параметрическом отказе СД сохраняет работоспособность, но его критериальные параметры не соответствуют предъявляемым требованиям.

1.1.1 Катастрофические отказы при эксплуатации

В данном разделе более подробно рассмотрим появление КО при эксплуатации СД. Анализ достаточно большого количества обзоров по исследованию развития КО в СД [21-27] показал, что основное внимание сосредоточено на анализе катастрофических отказов, появление которых связано с нарушением режима эксплуатации СД, с проявлением действия статического электричества, с качеством теплоотвода. Кроме того, рассматривают влияние конструктивных особенностей на вероятность появления КО. Мы опустим

подробное рассмотрение данных причин возникновения КО, поскольку они в явном виде не связаны с активным элементом СД.

В [28] исследуемые СД на основе AlGaAs и AlGaInP были разделены на две характерные группы: СД с быстрой деградацией и СД с медленной деградацией. Для СД с быстрой деградацией появляются КО, которые были обусловлены перегревом кристалла. Данная группа СД характеризовалась высокими токами или высоким сопротивлением омических контактов (ОК). Было установлено, что высокое сопротивление ОК обусловлено введением дислокационной сетки в месте крепления электрического контакта к кристаллу СД, при этом наблюдалось нарушение стехиометрии вследствие ухода фосфора в окружающую атмосферу.

В [29] представлены подобные результаты исследования КО. При этом установлено появление, так называемых, дефектов темных линий (dark line defect, далее ДТЛ), в области крепления электрического вывода к кристаллу, как это показано на рисунке 1.1.

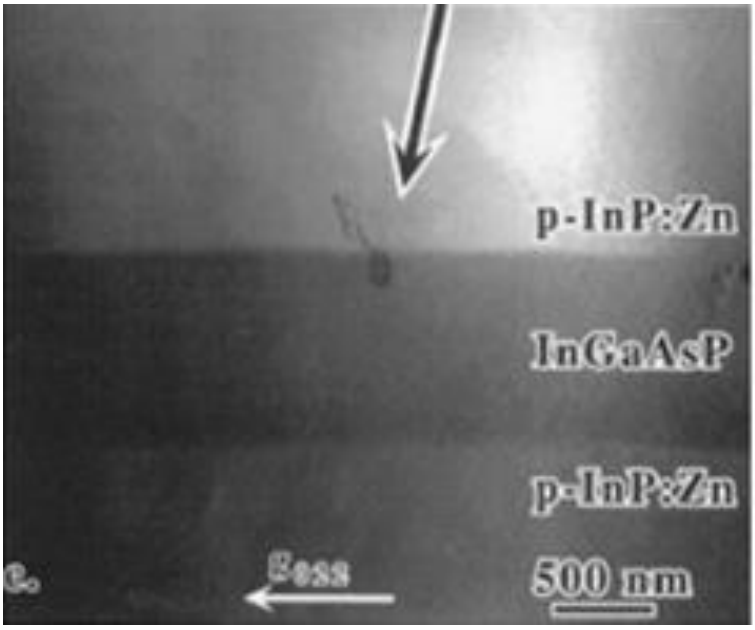
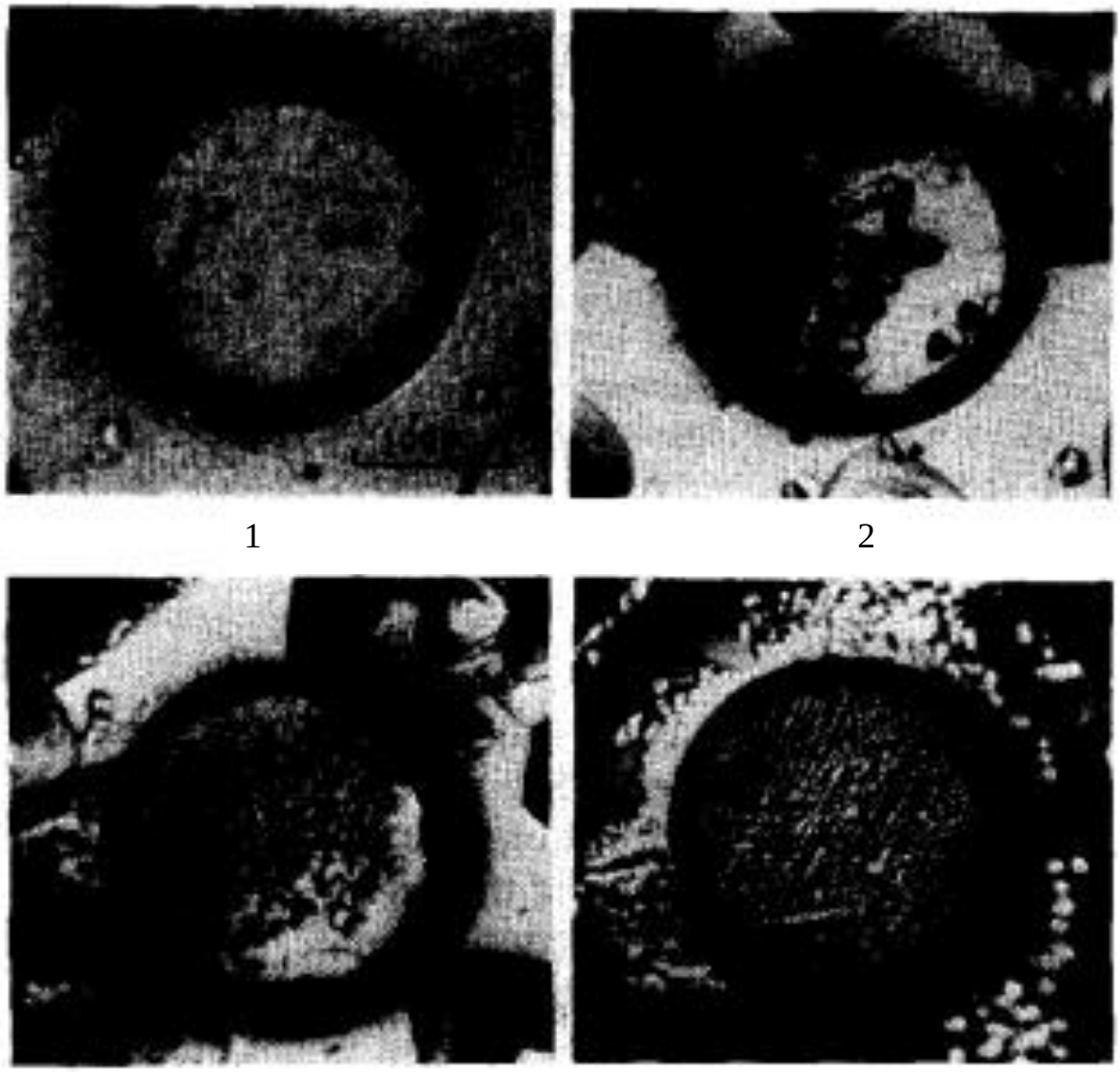


Рисунок 1.1 – Дефекты темных линий в области крепления электрического вывода к кристаллу (показаны стрелкой) [29]

Подобное влияние режима крепления выводов к чипам диодов Ганна на сопротивление омических контактов и надежность приборов наблюдалось и ранее

[30-33]. На рисунке 1.2 показано появление дислокационной сетки в месте крепления электрического вывода к чипу диода Ганна на основе GaAs при использовании различных режимов термокомпрессии [30].



1 2

3 4

Рисунок 1.2 – Дислокации, образованные в местах крепления электрического вывода к чипу диода Ганна на основе GaAs при использовании различных режимов термокомпрессии: 1 – выращенный кристалл арсенид галлия; 2 – 4 – кристаллы после проведения термокомпрессии под давлениями в 750, 1000 и 1500 кг/см^2, соответственно [30]

В свою очередь на рисунке 1.3 показано изменение концентрации носителей заряда при пластической деформации GaAs [30].

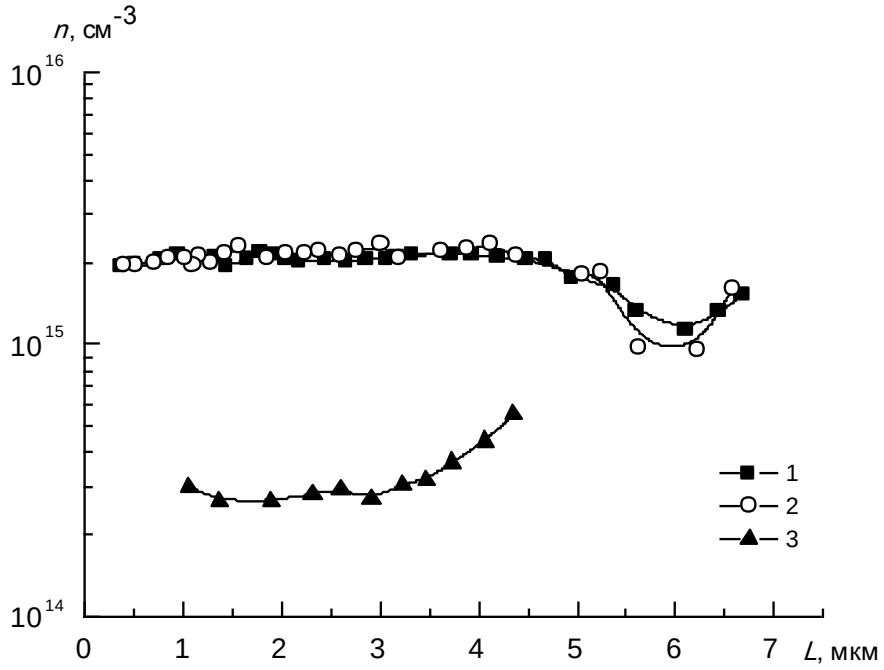


Рисунок 1.3 – Изменение концентрации носителей заряда *n* при пластической деформации GaAs в зависимости от расстояния до поверхности *L* [30]

Следует особо отметить работу [34] где представлены результаты исследований развития катастрофических отказов вследствие действия статического электричества. В данной работе выявлены случаи пробоя кристалла СД через объем, несмотря на то, что пробой по боковой поверхности кристалла СД в явном виде преобладает при возникновении КО. На рисунке 1.4 приведена фотография чипа СД со следами пробоя через объем.

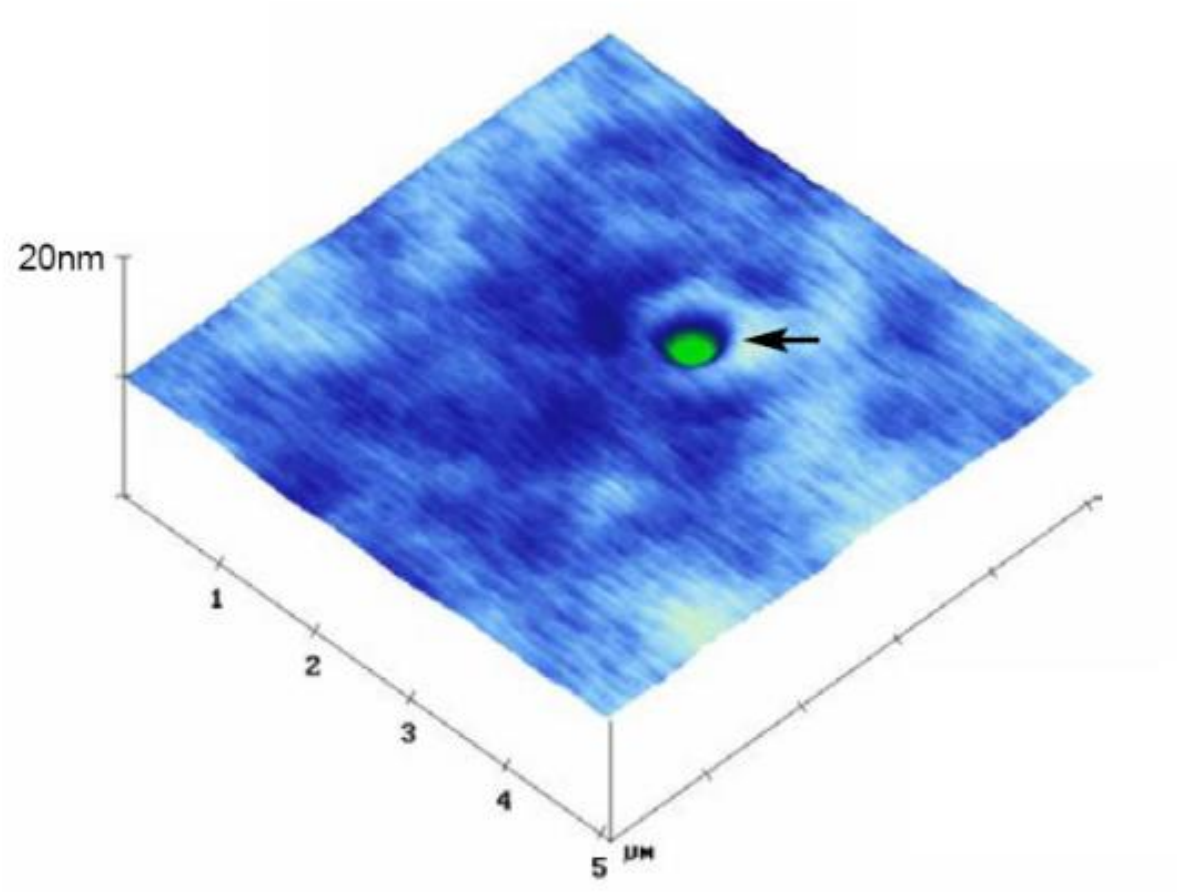


Рисунок 1.4 – Пробой электростатического разряда через поверхность кристалла [34]

Выполненные исследования показали, что диаметр канала пробоя вблизи p-n-перехода 0,5 мкм. Авторами предложено следующее объяснение наблюдаемому эффекту. Ростовые дислокации зарождаются вблизи границы эпитаксиальный слой – подложка и распространяются к поверхности эпитаксиального слоя, их часто называют нанотрубками или микротрубками из-за природы дефекта в ядре дислокации. Причиной возникновения пробоя является миграция материала омического контакта через полый центр дислокации, что приводит к созданию омического контакта между *p*- и *n*-слоями матрицы. Подобные экспериментальные результаты были получены в [35].

На основании представленного выше анализа можно сделать следующие выводы. Среди разнообразия причин возникновения КО в СД можно выделить

основные причины, которые связаны непосредственно с его активным элементом. Прежде всего, СД с аномально высокими сопротивлениями ОК, а также с аномально высокими рабочими токами имеют более высокую вероятность развития КО вследствие перегрева кристалла и его отсоединения от теплоотвода. Данные СД также можно охарактеризовать высокой скоростью деградации при эксплуатации. Выявлены факты пробоя кристалла СД вследствие электростатического разряда в локальной точке кристалла.

1.1.2 Изменение ВАХ светодиодов при эксплуатации

ВАХ СД является одной из его основных электрофизических характеристик. В процессе эксплуатации вследствие развития деградационных явлений наблюдается изменение ВАХ. Рассмотрим более подробно имеющиеся литературные данные. Известно, что контроль обратной ветви ВАХ СД позволяет выявлять токи утечки через *p*-*n*-переход и браковать потенциально ненадежные СД с низкими пробивными напряжениями, с другой стороны контроль прямой ветви ВАХ СД позволяет выявлять случаи роста прямого напряжения вследствие дополнительного падения напряжения питания СД [16]. Прежде всего, рассмотрим изменение обратной ветви ВАХ СД в процессе эксплуатации.

В [34] представлены результаты исследований изменения обратной ветви ВАХ СД на основе GaN (см. рисунок 1.5).

Из представленных результатов видно, что с ростом длительности эксплуатации наблюдается существенный рост обратного тока, что приводит к снижению пробивного напряжения и, соответственно, к повышению вероятности развития КО. Подобные результаты получены и целого ряда других материалов и являются типичными для приборов на основе *p*-*n*-перехода [36-40].

Далее рассмотрим изменение прямой ветви ВАХ СД при эксплуатации. К настоящему времени выделено несколько характерных закономерностей изменения прямой ветви ВАХ при эксплуатации. Рассмотрим их более подробно.

В [41,42] представлены результаты исследования изменения прямой ветви ВАХ красных СД на основе гетероструктур AlGaInP. На рисунке 1.6 показано изменение прямой ветви ВАХ СД в зависимости от времени эксплуатации.

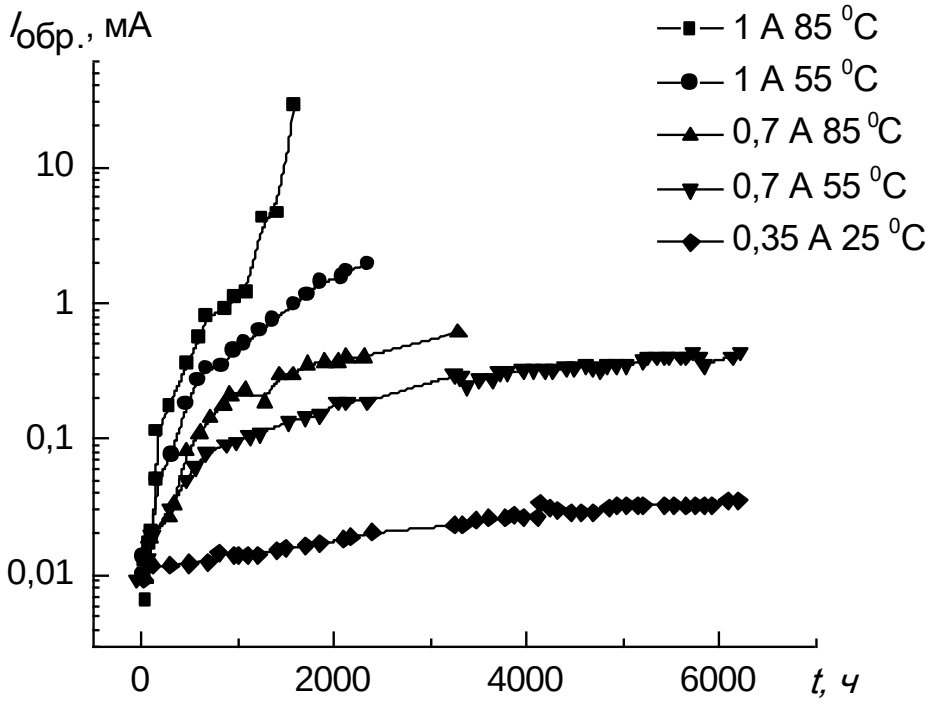


Рисунок 1.5 – Изменение обратного тока СД на основе GaN в процессе эксплуатации [41]

Из представленных результатов видно, что наблюдается поворот ВАХ по часовой стрелке вокруг точки (ток ~0,1 мА, напряжение ~ 1,68 В) по мере роста времени эксплуатации. При этом при напряжениях ниже точки поворота наблюдается рост тока, в то время как при напряжениях выше точки поворота наблюдается спад тока. Повышение рабочего тока в области низкого напряжения питания объясняется ростом тока безызлучательной рекомбинации [43,44], снижение рабочего тока в области высокого напряжения питания – объясняется ростом сопротивления омических контактов, что приводит к появлению дополнительного падения напряжения питания [45]. Подобные результаты наблюдаются для СД на основе других типов гетероструктур.

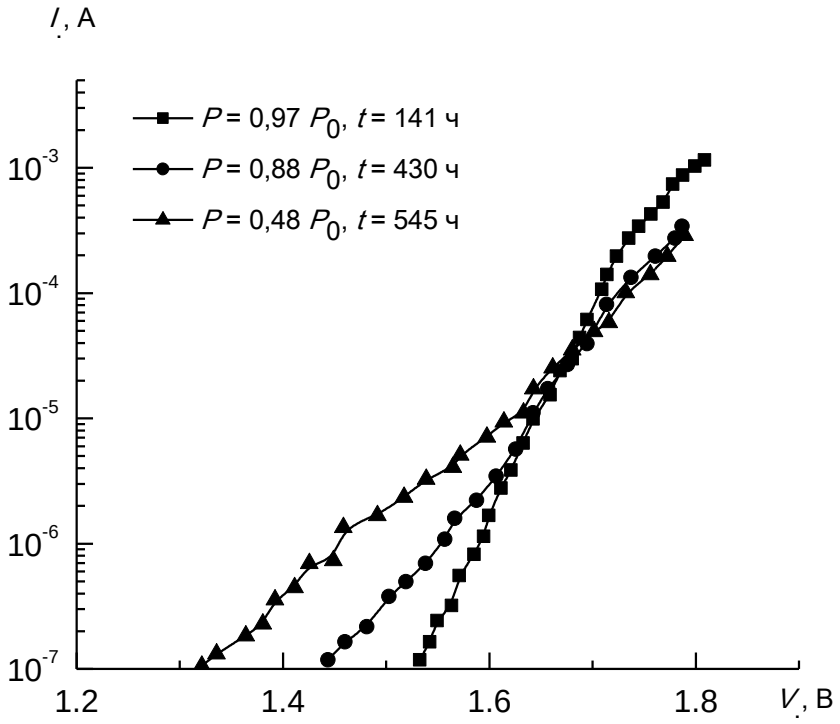


Рисунок 1.6 – Изменение прямой ветви ВАХ красного СД на основе гетероструктуры AlGaInP в процессе эксплуатации при рабочем токе 30 мА и окружающей температуре 150 ^{0}C [41]

В [46] представлены подобные результаты, но они получены для СД на основе гетероструктур AlGaAs (см. рисунки 1.7 и 1.8).

Все исследуемые СД авторы разделили на две характерные группы. Для первой группы характерен рост тока в области малых напряжений питания, при этом ток в области больших напряжений остается практически без изменений. Для второй группы СД наблюдается спад рабочего тока в области малых напряжений питания и, соответственно, рост тока в области высоких напряжений питания. Возрастание рабочего тока в области малых напряжений питания авторы объясняют появлением избыточного тока, который обусловлен туннелированием носителей заряда через обедненный слой p-n-перехода.

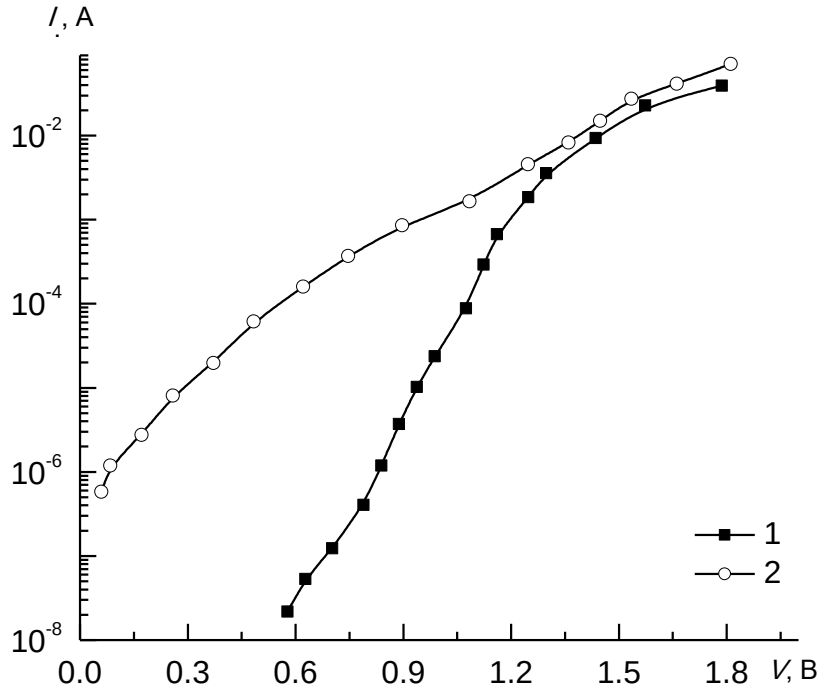


Рисунок 1.7 – Прямая ветвь ВАХ СД на основе гетероструктур AlGaAs до (1) и после (2) эксплуатации при температуре 27 ^{0}С из первой выделенной группы диодов [46]

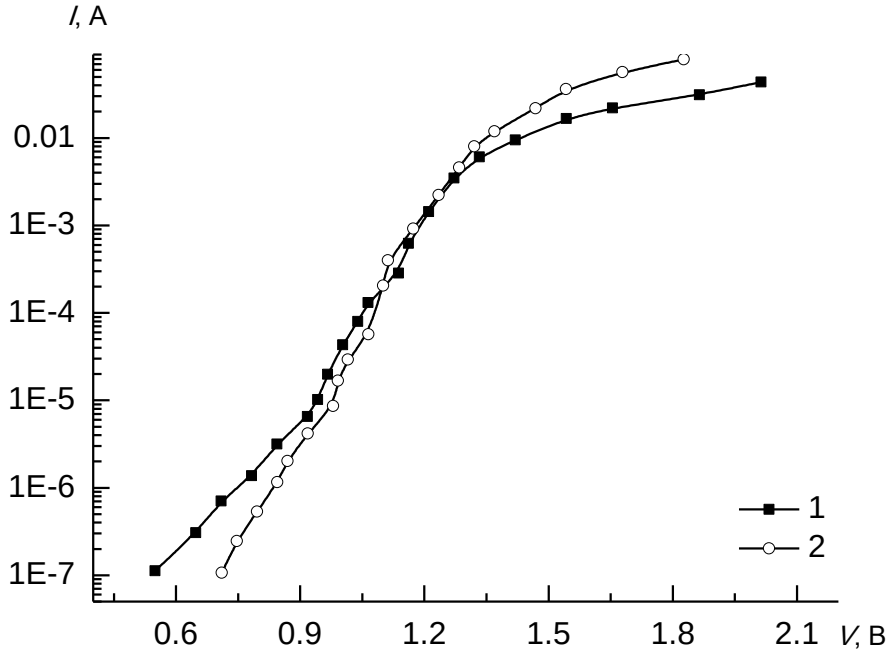


Рисунок 1.8 – Прямая ветвь ВАХ СД на основе гетероструктур AlGaAs до (1) и после (2) деградации при температуре 27 ^{0}С из второй выделенной группы диодов [46]

Для СД, отнесенных ко второй группе, наблюдалось специфическое поведение прямой ветви ВАХ при эксплуатации, как это показано на рисунке 1.9.

В данном случае авторы регистрировали снижение последовательного сопротивления: 13,4 Ом – до деградации; 10,4 Ом – 850 ч и 6,2 Ом после 4000ч. При этом, изменение квантового выхода не превышало 30% от исходного значения. Предположено, что данное явление обусловлено процессами в приконтактных областях кристалла, что может приводить к снижению сопротивления ОК.

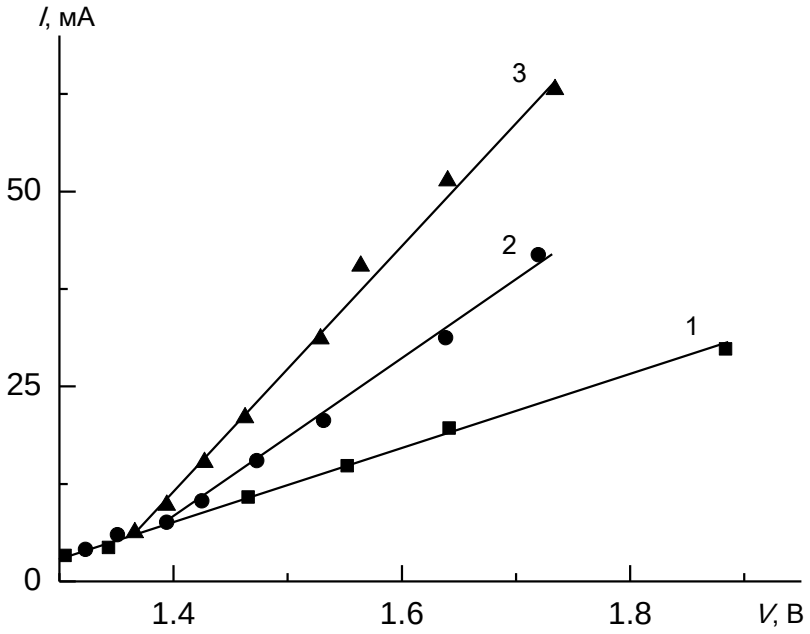


Рисунок 1.9 – ВАХ СД, отнесенного ко второй группе, для области больших токов: 1 – до эксплуатации; 2 – после 850 ч эксплуатации; 3 – после 4000 ч эксплуатации [46]

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что в процессе деградации СД под действием эксплуатационных факторов на прямой ветви ВАХ наблюдается рост тока при достаточно низких напряжениях, вследствие возрастания токов утечки через барьер. При этом в области высоких напряжений

наблюдается сдвиг ВАХ вследствие появления дополнительного падения напряжения на омических контактах. Подобное поведение прямой ветви ВАХ наблюдается для СД, изготовленных их самых различных полупроводниковых материалов [40-55].

В [56] представлены результаты исследования деградации квантовой эффективности СД на основе полупроводниковых нитридов третьей группы. Путем использования инфракрасной микроскопии установлено явление возникновения областей перегрева в кристаллах СД на основе InGaN/GaN и AlGaN/GaN (см. рисунок 1.10).

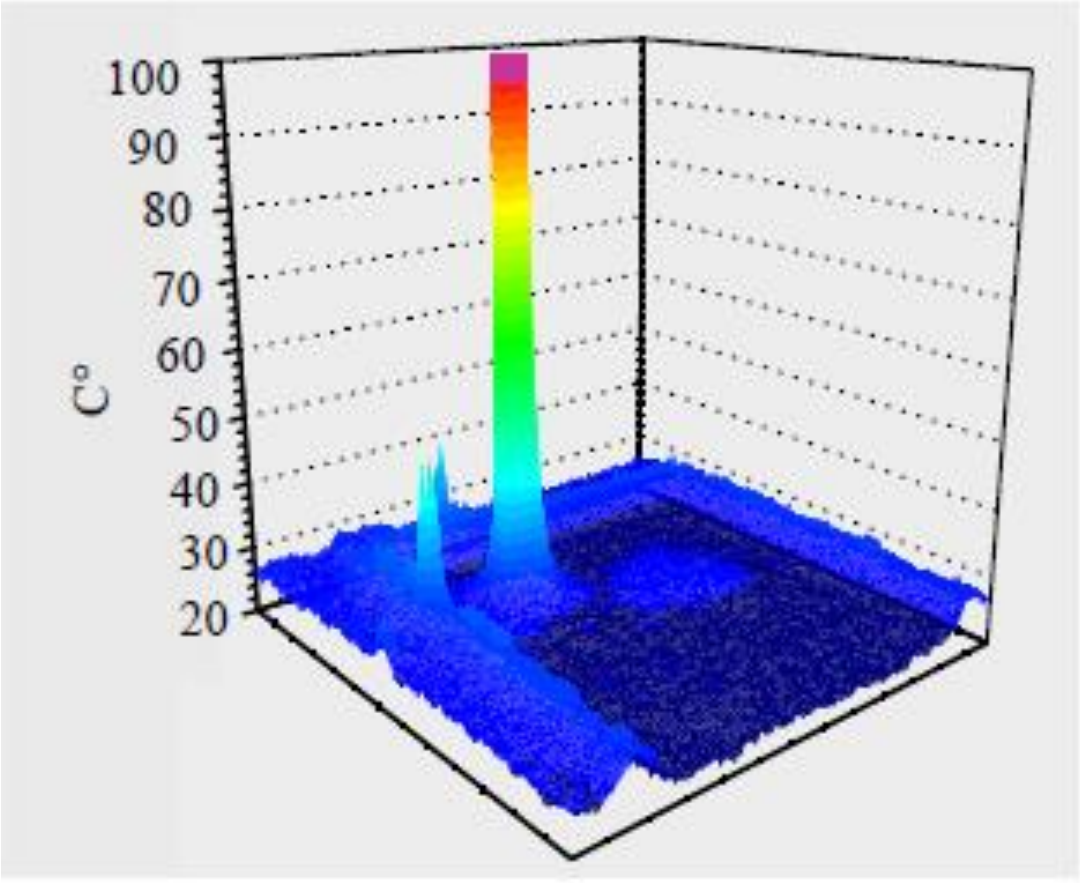


Рисунок 1.10 – Области локального перегрева в синих InGaN/GaN светодиодах, выявленные методом инфракрасной микроскопии. Размер светоизлучающей площади 980 × 980 мкм [56]

На основании выполненных исследований в данной работе предположено существование каналов дефектообразования с металлической фазой (шунтов).

При этом установлено что, что для гетероструктур InGaN/GaN и AlGaN/GaN наблюдается волнообразное дефектообразование в процессе воздействия эксплуатационных факторов, что меняет свойства шунтов и, как следствие, величину внешней квантовой эффективности. Появление шунтов приводит к искажению формы прямой ветви ВАХ (см. рисунок 1.11) и к возрастанию вероятности развития катастрофических отказов. При этом также установлено, что появление шунтов не изменяет обратную ветвь ВАХ, как это показано на рисунке 1.11. Результаты, представленные в работе [56] по своему характеру проявления (рост рабочего тока в области высоких напряжений) коррелируют с описанными выше в работе [46] свойствами СД, отнесенных авторами ко второй группе СД.

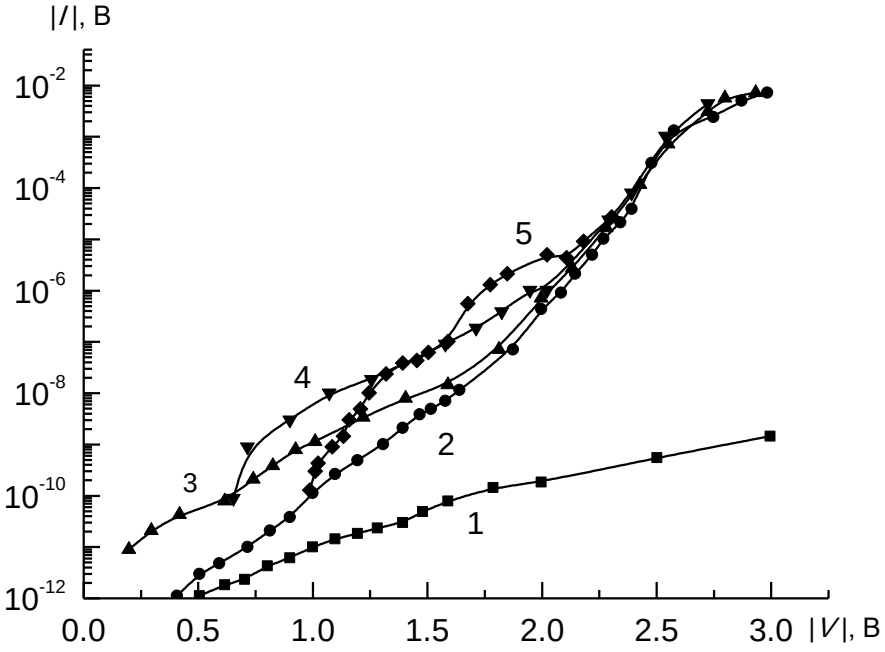


Рисунок 1.11 – Исследование ВАХ СД: 1 – обратная ветвь ВАХ, одинаковая для всех исследуемых образцов, 2 – 5 примеры искаженных прямых ветвей ВАХ СД с катастрофическим выходом из строя – зависимости. Для СД с большим сроком службы прямые ветви близки к зависимости 2 [56]

Рассмотренные выше результаты исследования изменения прямой и

обратной ветвей ВАХ при эксплуатации СД являются типичными для самых разнообразных полупроводниковых структур. Суммируем результаты исследования изменения ВАХ при эксплуатации СД. В результате действия факторов длительной эксплуатации наблюдается рост обратного тока СД (соответственно, снижение пробивного напряжения), что может приводить к снижению стойкости СД к воздействию электростатических разрядов. В области низких напряжений в результате действия эксплуатационных факторов наблюдается рост тока, что обусловлено ростом токов утечки через барьер. Более того, снижение рабочего тока в области высоких напряжений объясняется ростом сопротивления ОК, что приводит к соответствующему сдвигу ВАХ в область более высоких напряжений.

Выявлены аномальные СД, для которых в процессе эксплуатации наблюдается рост рабочего тока в прямом направлении в области высоких напряжений, что нельзя объяснить изменением сопротивления омических контактов.

Кроме того, установлено, что для СД на основе гетероструктур InGaN/GaN и AlGaN/GaN наблюдается появление металлизированных шунтов, что приводит к росту рабочего тока в области высоких напряжений, появлению локальных областей перегрева в кристаллах СД и к повышению вероятности развития катастрофических отказов.

1.1.3 Изменение мощности излучения СД при эксплуатации

Поскольку в результате действия эксплуатационных факторов изменяется ВАХ СД, то наблюдаемое на практике изменение мощности излучения сопровождается соответствующим снижением эффективности работы СД (КПД), как это показано на рисунке 1.12 [57].

Далее рассмотрим изменение ВтАХ СД при эксплуатации. К настоящему времени имеется только незначительное количество работ по анализу изменения

ВтАХ при эксплуатации. В [58,59] представлены результаты исследования влияния эксплуатационных факторов на ВтАХ СД на основе GaN (рисунок 1.13).

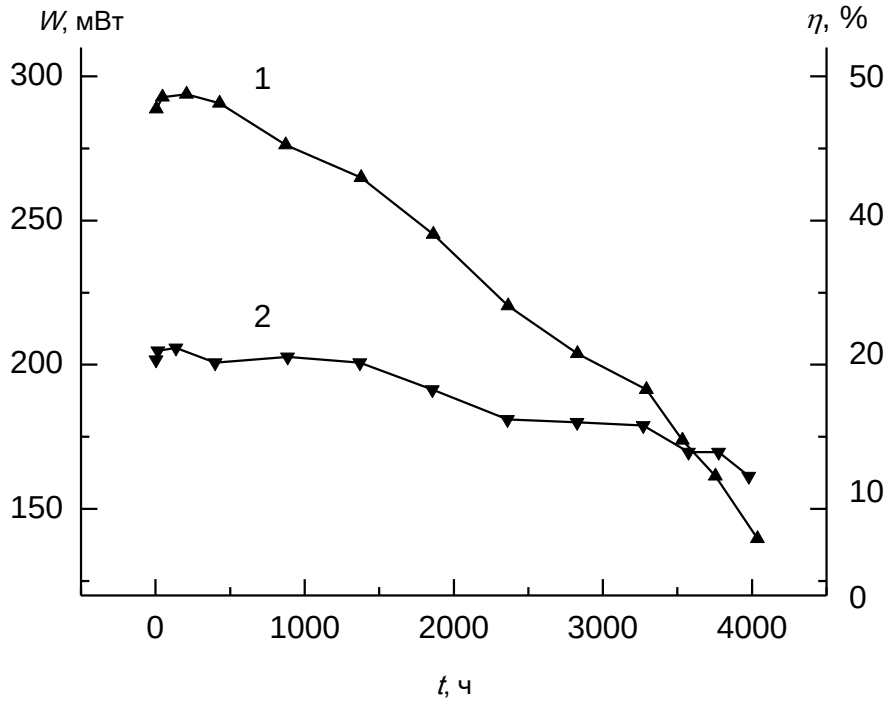


Рисунок 1.12 – Изменение мощности излучения W (1) и КПД η (2) СД, изготовленных на основе гетероструктур InGaN, при эксплуатации [58]

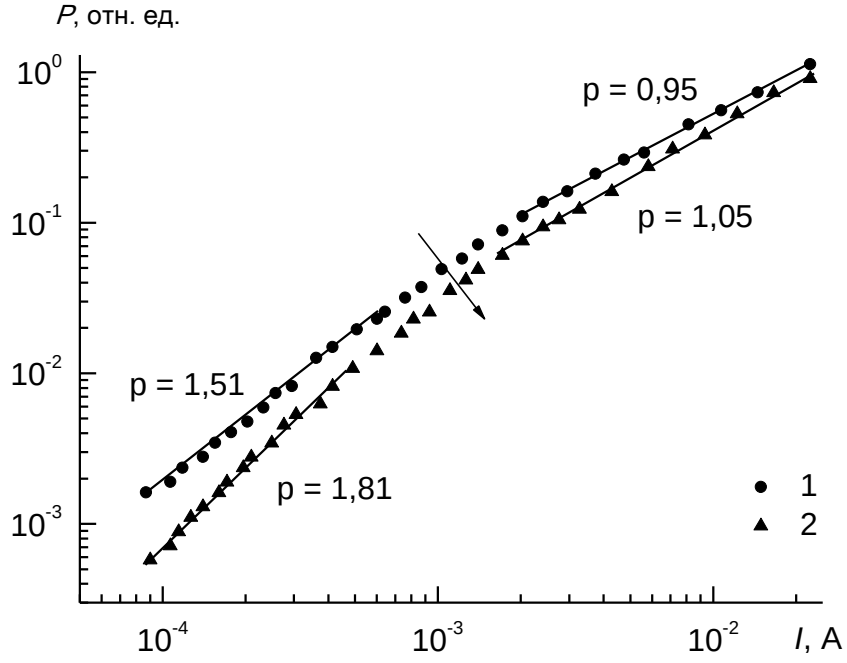


Рисунок 1.13 – Изменение ВтАХ СД на основе GaN при эксплуатации: 1 – до воздействия; 2 – после 100 ч эксплуатации при рабочем токе 20 мА [58]

Из представленных результатов видно, что снижение мощности излучения в процессе эксплуатации существенно зависит от величины рабочего тока, при котором измеряют мощность излучения до и после воздействия. Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что соотношение между центрами излучательной и центрами безызлучательной рекомбинации зависит от плотности рабочего тока и изменяется при эксплуатации. Данный вывод подтверждается результатами, представленными на рисунке 1.14 [58].

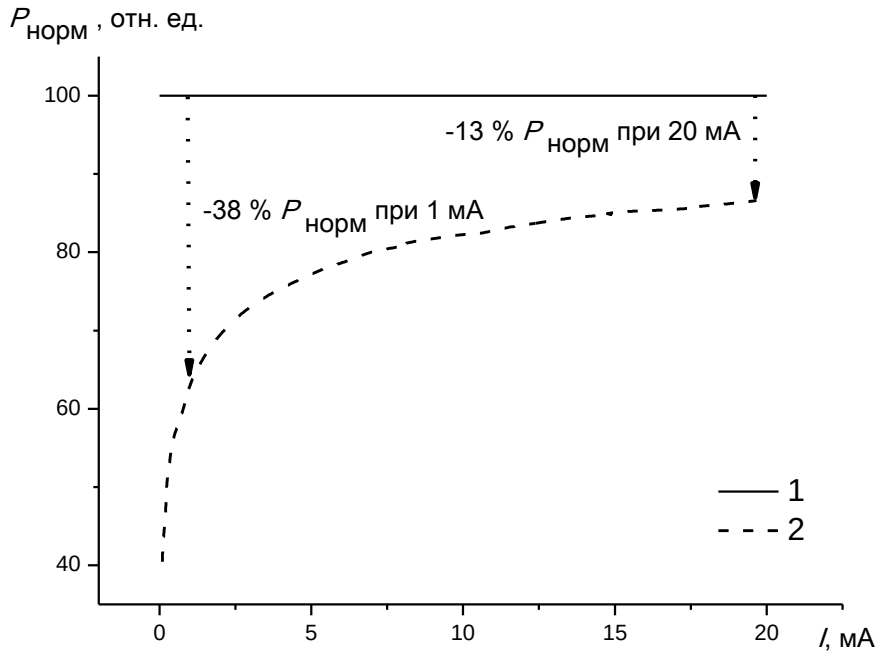


Рисунок 1.14 – Нормализованное изменение мощности излучения СД на основе GaN при эксплуатации: 1 – до воздействия; 2 – после 100 ч эксплуатации при рабочем токе 20 мА [58]

Представленные результаты также позволяют сделать вывод о том, что выбор оптимальной плотности рабочего тока позволяет улучшить эксплуатационные свойства СД.

В [60] представлены результаты исследования надежности СД на основе гетероструктур AlGaAs. На рисунке 1.15 показано относительное изменение мощности от времени эксплуатации.

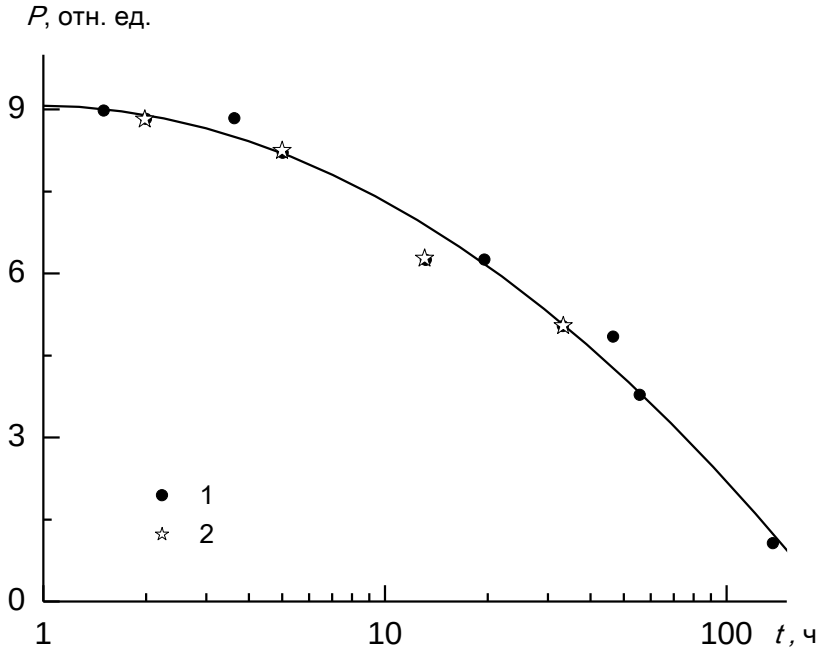


Рисунок 1.15 – Изменение мощности излучения СД, изготовленных на основе AlGaAs гетероструктур, при эксплуатации при плотности тока 1000 А/см^2: 1 – со стандартными омическими контактами на основе индия; 2 – с контактами на основе жидкого галлия [60]

В [41] представлены результаты исследования надежности СД на основе AlGaInP. Представлено изменение мощности излучения СД в зависимости от длительности эксплуатации при различных рабочих токах (рисунок 1.16).

На рисунке 1.17 показано относительное изменение мощности излучения СД в зависимости от времени эксплуатации при различных токах и температурах [61].

На основании представленных выше результатов можно сделать вывод о том, что для СД, изготавливаемых из самых разнообразных полупроводниковых структур, наблюдаются идентичные по виду закономерности изменения мощности излучения при эксплуатации.

При эксплуатации СД также наблюдается изменение светотехнических характеристик, к которым следует отнести ВтАХ, ВВХ и спектр излучения.

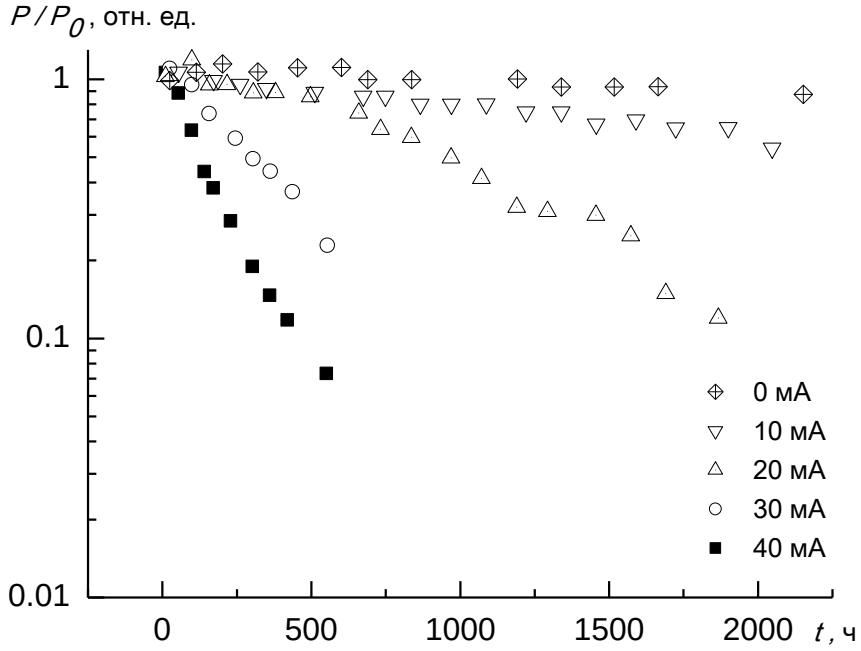


Рисунок 1.16 – Изменение рабочего тока в зависимости от времени эксплуатации при различных рабочих токах [41]

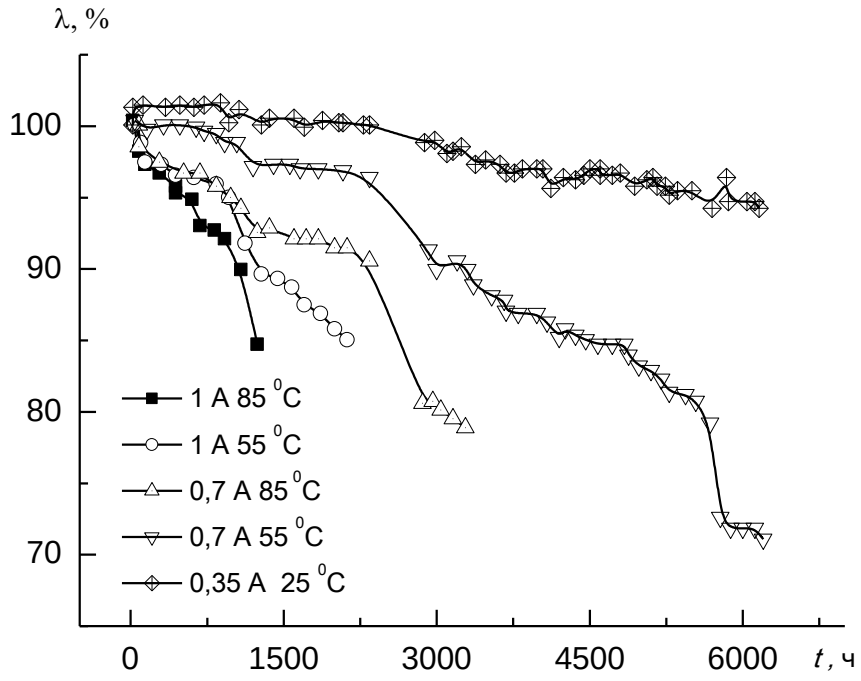


Рисунок 1.17 – Изменение мощности излучения СД в зависимости от времени эксплуатации при различных рабочих токах и температурах [61]

На основании анализа представленных выше результатов можно сделать следующие выводы. Все исследования направлены на установление экспериментальных закономерностей при ускоренных методах испытаний и распространение этих закономерностей на реальные условия испытаний [11-19]. Таким образом, каждый новый полупроводниковый материал, каждое новое конструктивное решение требуют проведения соответствующего комплекса определительных испытаний для оценки эксплуатационных свойств СД.

1.2. Изменение параметров светодиодов при воздействии различных видов ионизирующего излучения

Как уже отмечалось выше, по условиям эксплуатации СД могут подвергаться воздействию различных видов ионизирующего излучения: быстрые нейтроны, протоны и электроны различных энергий, гамма-кванты. При этом можно выделить два характерных механизма радиационного дефектообразования: эффект смещения и ионизационные эффекты [62-68]. Эффекты смещения являются основным механизмом радиационного дефектообразования при взаимодействии с твердыми телами, в то время как гамма-квантам характерны ионизационные процессы дефектообразования [62,65,68]. Для электронов с энергией менее 30 МэВ также характерны ионизационные процессы дефектообразования, а эффекты смещения проявляются только при энергиях более 30 МэВ [65]. В свою очередь для протонов наблюдаются как эффекты смещения, так и ионизационные эффекты [69,70].

Прежде чем приступить к анализу изменения критериальных параметров СД при воздействии ионизирующего излучения рассмотрим результаты исследования радиационной стойкости полупроводниковых материалов, используемых для их изготовления. Именно исходный полупроводниковый материал должен во многом определять стойкость СД.

1.2.1. Радиационная стойкость гетероструктур

Вначале рассмотрим влияние быстрых нейтронов на характеристики гетероструктур, предназначенных для СД. На рисунке 1.18 показано нормированное изменение квантового выхода различных полупроводниковых структур, предназначенных для изготовления СД, при облучении быстрыми нейтронами [71-74].

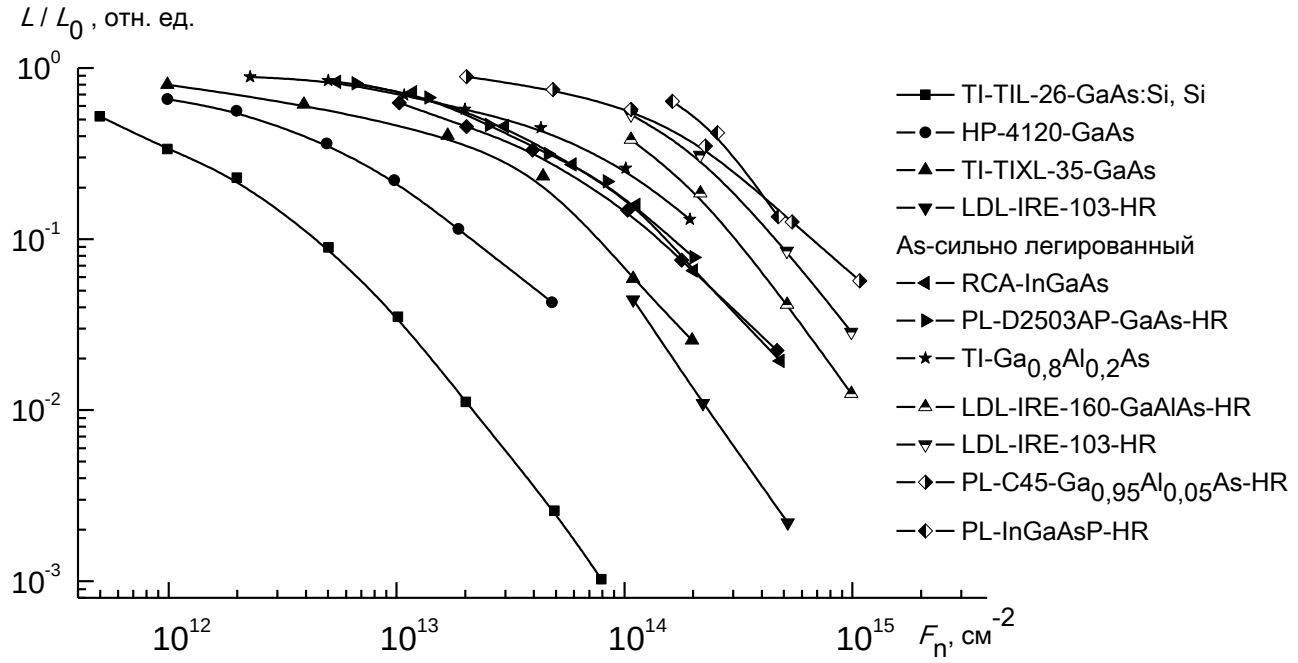


Рисунок 1.18 – Изменение квантового выхода различных структур при облучении быстрыми нейтронами [71-74]

Из представленных результатов видно, что даже близкий по составу полупроводниковый материал обладает существенным отличием в радиационной стойкости. Таким образом, можно сделать вывод о том, что исходный полупроводниковый материал определяет стойкость получаемых светодиодов к облучению быстрыми нейтронами.

В [75] показано, изменение времени жизни неосновных носителей заряда в результате радиационного воздействия приводит к изменению соотношения

между излучательной рекомбинацией и безызлучательной рекомбинацией инжектированных в активную область СД неосновных носителей заряда.

Данное изменение предложено описать следующей формулой

$$\frac{\tau_0}{\tau} = 1 + \tau_0 \cdot K \cdot \Phi \qquad (1.1)$$

где τ_0 и τ – время жизни неосновных носителей до и после облучения, соответственно;

K – коэффициент повреждаемости, величина которого определяется скоростью введения дефектов, видом ионизирующего излучения и материалом СД.

Кроме того, установлено, что увеличение времени жизни неосновных носителей заряда, а также повышение скорости излучательной рекомбинации позволяет повышать радиационную стойкость СД. Данный вывод согласуется с результатами, полученными в [75] (см. рисунки 1.19 и 1.20). Таким образом, установлено, что повышения радиационной стойкости СД можно достичь снижением размеров активного слоя гетероструктуры, повышением степени легирования активного слоя, а также увеличением плотности рабочего тока.

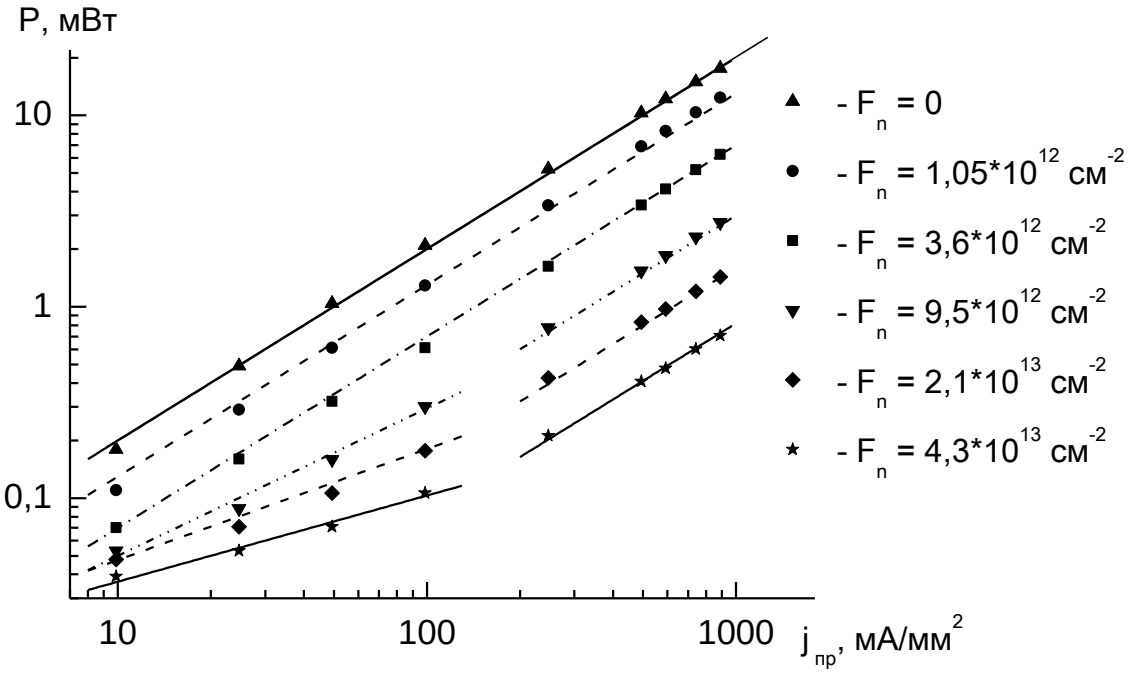


Рисунок 1.19 – Изменение ватт-амперной характеристики СД ИК-диапазона на основе гетероструктуры [75]

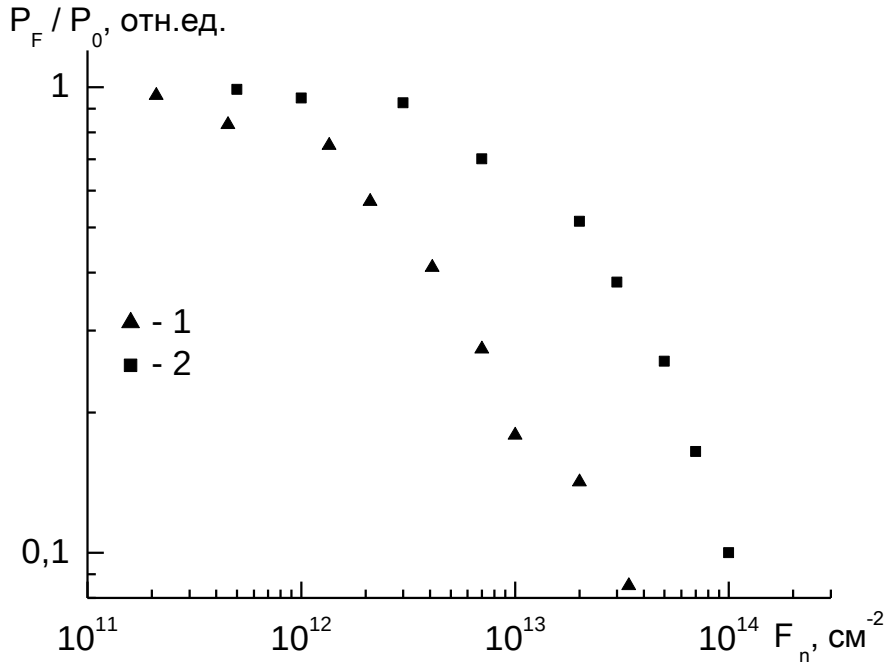


Рисунок 1.20 – Изменение мощности излучения СД на основе AlGaAs при облучении быстрыми нейтронами: 1 – толщина активного слоя 5 мкм; 2 – толщина активного слоя 1 мкм [75]

Зависимость стойкости СД на основе гетероструктур $Ga_{1-x}Al_xAs$ к облучению гамма-квантами и нейтронами от содержания Al была исследована в работах [76,77]. В результате выполненных исследований установлено, что коэффициент повреждаемости СД существенно снижается при облучении гамма-квантами при изменении содержания Al в диапазоне (0 – 10) %, дальнейший рост содержания Al практически не изменяет коэффициент повреждаемости. С другой стороны, при облучении нейтронами наблюдали плавное снижение коэффициента повреждаемости СД с изменением содержания Al в диапазоне (0 – 34)%. По результатам исследований сформулированы требования к элементному составу гетероструктур с повышенной радиационной стойкостью.

1.2.2. Изменение электрофизических и светотехнических характеристик светодиодов при облучении

В [78-81] особо отмечено, что при проведении исследований радиационной стойкости СД, изготовленных из самых разнообразных полупроводниковых структур, не выявлено случаев появления КО.

Результаты исследования радиационной стойкости СД при облучении электронами для различных полупроводниковых структур суммированы на рисунке 1.21 [82,83].

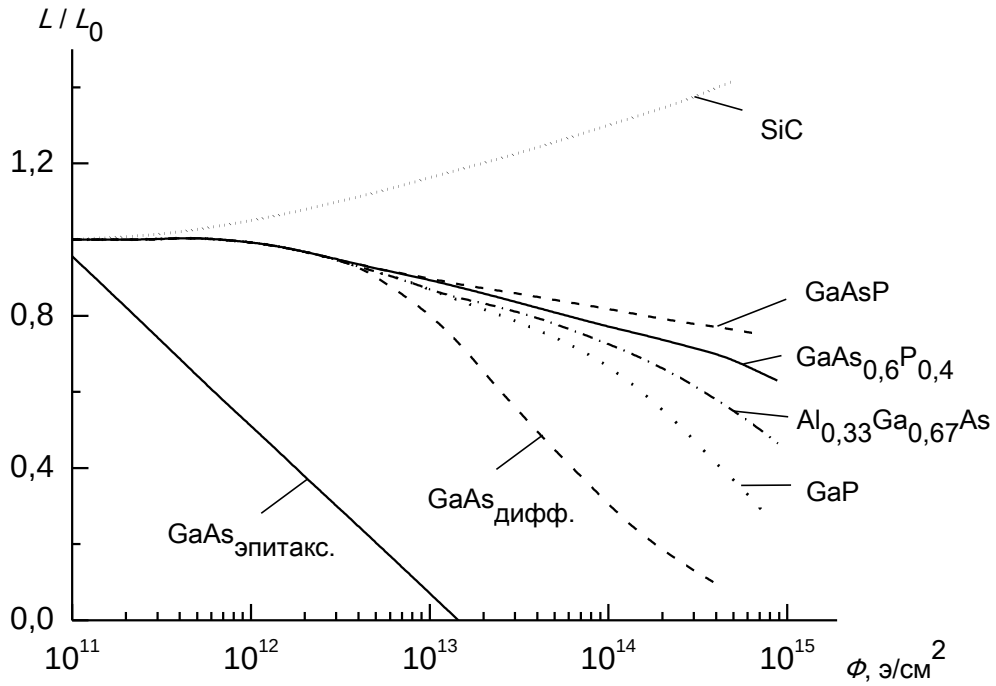


Рисунок 1.21 – Нормированные кривые снижения светоотдачи при облучении электронами 2 МэВ для различных типов СД [83]

Видно, что РС СД существенным образом определяется исходным полупроводниковым материалом. В работе [83] было предложено снижение интенсивности излучения описать следующим соотношением:

$$\left(\frac{L_{U_0}}{L_U}\right)^{\beta} = 1 + \left(\frac{\tau_{n0}}{K_1}\right)\Phi \qquad (1.2)$$

где L_{U_0} и L_U – интенсивности излучения при постоянном смещении соответственно до и после облучения;

β – коэффициент;

τ_{n0} – время жизни электронов в p-области до облучения;

K_1 – константа радиационного повреждения времени жизни;

Φ – интегральный поток электронов.

Это соотношение применимо только для уровня низких токов и низких уровней воздействия. Возможно, что это обусловлено тем фактом, что при высоких значениях рабочего тока все инжектированные носители рекомбинируют излучательно за очень короткое время, что обеспечивает их малую чувствительность к радиационному воздействию [84]. С другой стороны, можно предполагать, что в области более высоких уровней воздействии проявляется другой механизм дефектообразования.

В работах [85-87] представлены результаты исследования радиационной стойкости двойных гетероструктур AlGaAs. Установлено, снижение мощности излучения СД при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами существенно зависит от уровня рабочего тока, при этом можно выделить область низких токов и область высоких токов.

Установлены соотношения, которые описывают ВтАХ мощности степенной функцией, при этом показатель степени определяется типом структуры и выбранным диапазоном рабочих токов, описывается степенной функцией рабочего тока, при этом показатель степени зависит от типа гетероструктуры и от уровня инжекции электронов в активный слой.

На основании анализа закономерностей изменения ВтАХ СД при облучении выделено два характерных этапа:

- на первом этапе (относительно низкие уровни воздействия) происходит радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры;

– на втором этапе (более высокие уровни воздействия) снижение мощности излучения определяется дефектами чисто радиационного происхождения.

Установлены соотношения, которые позволяют прогнозировать изменение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами по характеристикам исходных диодов. При этом выявленные коэффициенты повреждаемости являются константами, величина которых определяется исходной гетероструктурой, этапом снижения мощности, исходной ВтАХ СД.

Изложенные результаты исследований согласуются с результатами исследования поведения аналогичных гетероструктур при облучении электронами с энергий 2 МэВ.

В дальнейшем подобные результаты были получены для других типов гетероструктур с множественными квантовыми ямами [89].

Результаты исследований, представленные в [85-88] позволили разработать феноменологическую радиационную модель СД [89-90], использование которой позволяет прогнозировать изменение ВтАХ СД при воздействии различных видов ионизирующего излучения.

Выводы по главе 1

1. В условиях космического пространства и на ядерных энергетических объектах устройства на основе СД подвергаются комплексному и комбинированному воздействию различных видов ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов.
2. При эксплуатации СД наблюдаются как параметрические, так и катастрофические отказы.
3. При эксплуатации СД наблюдаются катастрофические отказы СД, которые связаны непосредственно с его активным элементом. СД с аномально высокими сопротивлениями ОК, а также с аномально высокими рабочими токами имеют более высокую вероятность развития КО вследствие перегрева кристалла и его отсоединения от теплоотвода. Данные СД также можно охарактеризовать высокой скоростью деградации при эксплуатации. Выявлены факты пробоя кристалла СД вследствие электростатического разряда в локальной точке кристалла. Подобных катастрофических отказов СД при воздействии различных видов ионизирующего излучения не выявлено.
4. В процессе эксплуатации и при воздействии различных видов ионизирующего излучения наблюдается изменение как электрофизических (ВАХ), так и светотехнических (ВтАХ, мощность излучения при заданном рабочем токе, спектр излучения) параметров СД. При этом наблюдается идентичный характер выявленных изменений, проявление которого не зависит от типа используемого полупроводникового материала и вида воздействия.
5. В процессе эксплуатации и при облучении СД на прямой ветви ВАХ наблюдается рост тока при достаточно низких напряжениях, вследствие возрастания токов утечки через барьер. При этом в области высоких напряжений наблюдается сдвиг ВАХ вследствие появления дополнительного падения напряжения на омических контактах.
6. При эксплуатации выявлены аномальные СД, для которых наблюдается рост рабочего тока в прямом направлении в области высоких напряжений, что

нельзя объяснить изменением сопротивления омических контактов. Для данных СД характерно повышение вероятности развития КО и высокая скорость деградации.

7. Для СД на основе гетероструктур InGaN/GaN и AlGaN/GaN наблюдается появление металлизированных шунтов, что приводит к росту рабочего тока в области высоких напряжений, появлению локальных областей перегрева в кристаллах СД и к повышению вероятности развития катастрофических отказов.
8. Все исследования направлены на установление экспериментальных закономерностей изменения параметров СД при ускоренных методах испытаний и распространение этих закономерностей на реальные условия испытаний. Практически отсутствуют закономерности, позволяющие прогнозировать эксплуатационные свойства. Таким образом, каждый новый полупроводниковый материал, каждое новое конструктивное решение требуют проведения соответствующего комплекса определительных испытаний для оценки эксплуатационных свойств СД.

Глава 2. Объекты и методы исследования надежности и радиационной стойкости светодиодов

2.1 Объекты исследований. Конструкция и технология изготовления светодиодов

2.1.1 Светодиоды ИК-диапазона на основе гетероструктур AlGaAs

В данном исследовании объектами исследования являлись промышленные СД инфракрасного диапазона длин волн (СД ИК-диапазона) на основе двойных гетероструктур AlGaAs. Типичная конструкция СД представлена на рисунке 2.1.

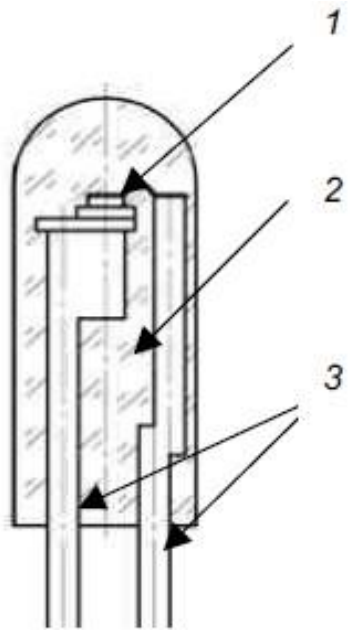


Рисунок 2.1 – Конструкция светодиода: 1 – кристалл; 2 – линза, предназначенная для формирования заданной диаграммы направленности излучения, и корпус, изготовленные из оптического компаунда; 3 – выводы питания

СД изготавливались по стандартной сэндвич-технологии с применением методов осаждения и формирования слоев металлизации для создания омических

контактов; методов фотолитографии и химического травления для формирования кристаллов (чипов) и скайбирования для разделения пластин на отдельные чипы.

Корпус СД изготавливался из смеси оптически прозрачного для ИК-излучения компаунда и кварца плавленного зернистого типа ПКЗ-008С и содержал линзу, для формирования требуемой диаграммы направленности светового потока. Активный элемент СД (кристалл) изготовлен с использованием стандартных технологических операций и смонтирован на теплоотвод. К выводам питания произведена распайка от омических контактов кристалла.

На рисунке 2.2 представлена конструкция кристалла СД типа ИК.

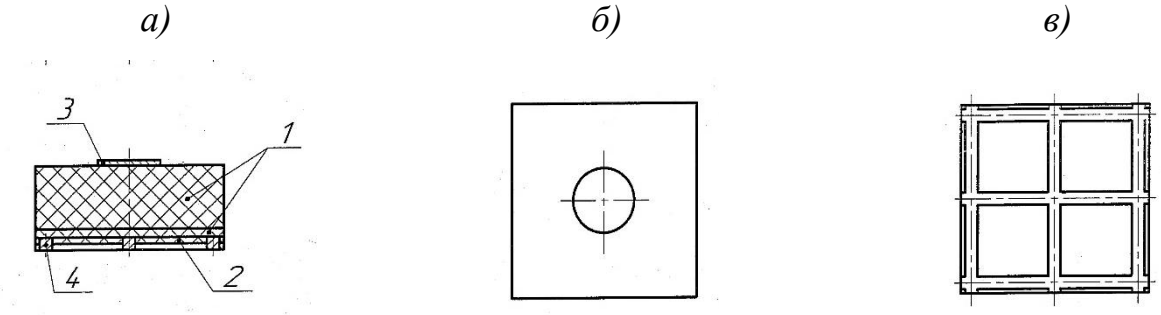


Рисунок 2.2 – Конструкции кристаллов СД типа ИК: *а* – вид сбоку, *б* – вид сверху, *в* – вид снизу; 1 – эпитаксиальные слои, 2 – защитное покрытие, 3 – катодный омический контакт, 4 – анодный омический контакт

В данном случае кристалл (рисунок 2.2*а*) был изготовлен при помощи обратного монтажа (перевернутый кристалл). Достоинством монтажа перевернутого кристалла является то, что все соединения выполняются одновременно. Это повышает также и надежность. Кроме того, использование при монтаже мягкого припоя облегчает демонтаж бракованных кристаллов. Пластичность мягкого припоя частично компенсирует температурные напряжения в соединении. Другим важным преимуществом является то, что потери излучения при таком монтаже являются минимальными, за счет чего эффективность излучения СД увеличивается.

Недостатками данного метода монтажа являются дороговизна, так как

сложны операции подготовки кристаллов и плат, а также метод не обеспечивает хороший теплоотвод от кристаллов и возможны локальные перегревы вследствие некоторой разницы температур в процессе монтажа. При нарушении технологического процесса сборки могут образовываться короткие замыкания между кристаллами и платами.

Структуры выращивались в условиях серийного производства методом жидкофазной эпитаксии. Состав слоев и толщины исследуемых структур были следующие.

На рисунке 2.3 более подробно представлена структура и толщины эпитаксиальной структуры СД типа ИК.

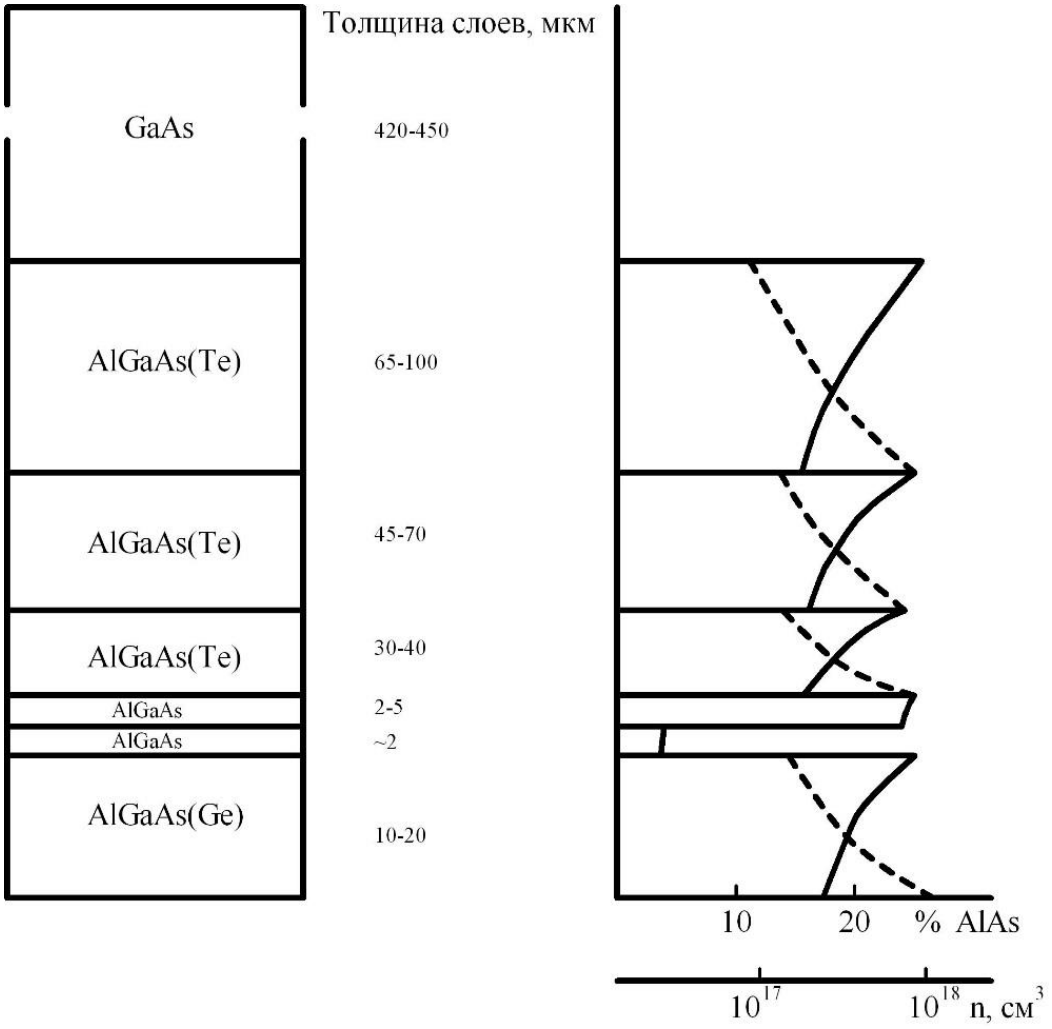


Рисунок 2.3 – Структура и толщины слоев эпитаксиальной структуры СД типа ИК

Эпитаксиальная структура СД представляет собой двойную гетероструктуру, которая состоит из шести слоев AlGaAs. Четыре первых слоя структуры n-типа легированы теллуром, причем четвертый слой n-AlGaAs, примыкающий к активной области, имеет меньшую степень легирования. Активная область p-типа с толщиной до 5 мкм легирована германием, цинком и иттербием. Верхний широкозонный p-AlGaAs слой легирован Ge. Структура выращивалась на подложке n-GaAs. Общая толщина эпитаксиальных слоев составляла не менее 150 мкм.

Катодный омический контакт для данных СД изготовлены на основе Au-(Ge-Ni)-Au, а анодный – на основе Au-(Au-Zn)-Au-Ni-Au.

Для всех исследуемых СД ИК-диапазона величина прямого рабочего тока составляет $I_{\text{ор1}}$ = 50 мА в непрерывном режиме питания, а напряжение питания при этом не превышало $U_{\text{раб}}$ = 2.0 В. Все гетероструктуры имели длину волны в максимуме спектра электролюминесценции λ = (0,82 – 0,90) мкм, что свидетельствует о близком элементном составе активного слоя.

2.1.2 Светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP

В качестве объектов исследования были выбраны СД на основе четверных гетеростуктур AlGaInP красного и желтого свечения. Причем желтого свечения были выбраны светодиоды двух типов. В дальнейшем будем обозначать их как Кр, Ж-1 и Ж-2 соответственно.

Данные СД обладают большим углом рассеяния светового потока благодаря тому, что излучающий кристалл расположен ближе к передней стенке линзы. Такой тип СД получил название Straw Hat («соломенная шляпа»), внешне напоминающий обычные цилиндрические двухвыводные СД, однако с меньшей высотой и увеличенным радиусом линзы.

На рисунке 2.4 представлена эпитаксиальная структура AlGaInP.



Рисунок 2.4 – Структура слоев гетероструктуры СД, изготовленных на основе AlGaInP (Кр, Ж1 и Ж2)

Для всех исследуемых СД на основе гетероструктур на основе AlGaInP величина прямого рабочего тока составляет $I_{раб1}$ = 30 мА в непрерывном режиме питания, а напряжение питания при этом не превышало $U_{раб}$ = 2.5 В. Все гетероструктуры СД красного свечения имели длину волны в максимуме спектра электролюминесценции λ = 0,63 мкм. В то время как все гетероструктуры СД желтого свечения имели длину волны в максимуме спектра электролюминесценции – λ = 0,590 мкм, что свидетельствует о близком элементном составе активного слоя.

2.2 Оборудование для измерения основных параметров светодиодов

Для каждого СД до и после каждого воздействия осуществлялся контроль прямой ветви вольт-амперной (ВАХ), ватт-амперной (ВтАХ) и ватт-вольтной (ВВХ) характеристик в непрерывном режиме питания при нормальной температуре окружающей среды в соответствии со стандартными методиками измерений [91]. Данные характеристики изменяли с помощью установки измерения статических параметров светодиодов «ПОЛИ-500» ЯЮКЛ.411721.003 в шаре, который представляет собой блок фотометрический ФЫМ3.553.012-01 [92].

Установка «ПОЛИ-500» обеспечивает задание прямого тока светодиода в диапазоне от 0 до 500 мА с шагом 1 мА. Погрешность задания прямого тока от установленного уровня составляет ±3%. Также установка обеспечивает измерение падения напряжения на светодиоде от 0 до 5 В, при этом погрешность измерения напряжения – ±2%. Погрешность измерения тока фотоприемника составляет ±2%.

Данная установка обеспечивает высокую воспроизводимость результатов измерений, как это показано на рисунках 2.5 и 2.6. Результаты, представленные на данных рисунках получены путем усреднения 20 независимых измерений одного и того же СД.

Спектр излучения СД измеряли на установке для измерения спектров излучения «Spektra» [93].

Установка «Spektra» обеспечивает измерения спектров излучения в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм. Погрешность измерения длины волны ± 2,5 нм. Спектральное разрешение прибора составляет 3-5 нм.

Измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) проводили на установке ЯЮКЛ.411734.002, работа которой основана на измерителе L, C, R цифрового Е7-12. Данная установка позволяла проводить измерения емкости от 0 до 1 000 пФ на рабочей частоте 1 МГц. Уровень измерительного сигнала 25 мВ. Выдача напряжения смещения на СД от 0 до 29 В с шагом 1 В. Погрешность задания напряжения не более ±2 %.

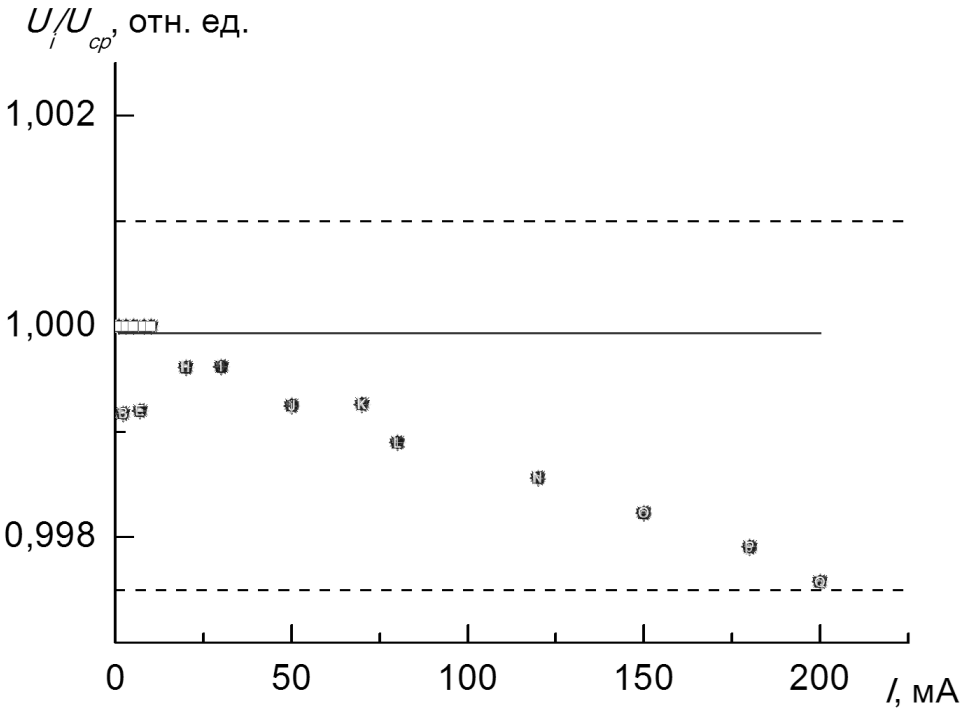


Рисунок 2.5 – Воспроизводимость измерения напряжения на установке «ПОЛИ-500»

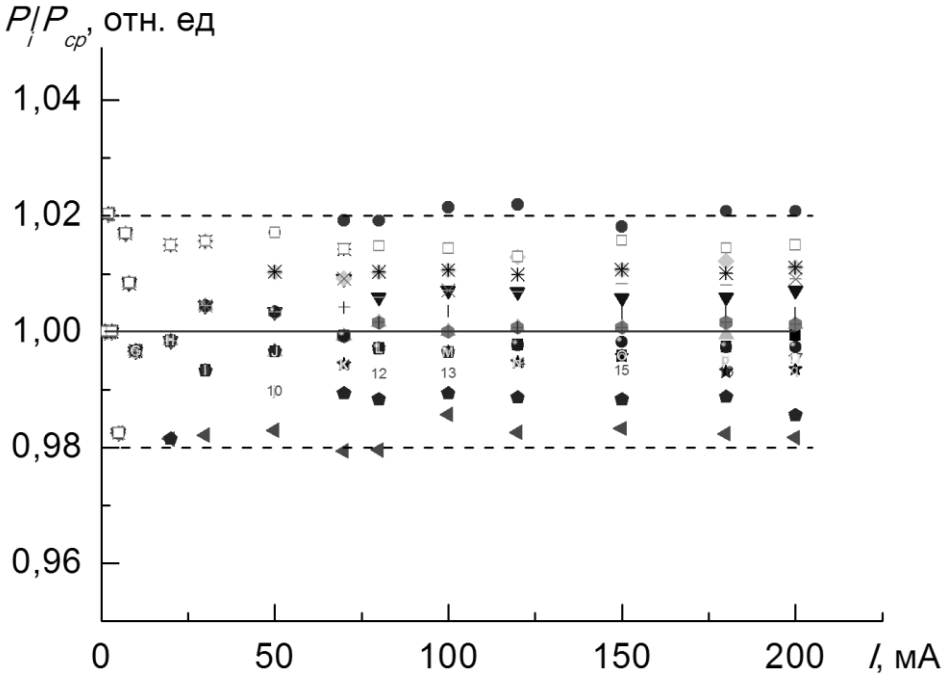


Рисунок 2.6 – Воспроизводимость измерения мощности излучения на установке «ПОЛИ-500» в шаре с помощью блока фотометрического ФЫМ3.553.012-01

2.3 Оборудование, используемое при анализе отказов светодиодов

Для анализа отказов СД в исследовании использовалось следующее оборудование:

– оптический микроскоп Альтами СМ0870-Т;

– рентгеновский микроскоп Phoenix microme|x Microfocus X-ray System.

Данное оборудование позволяет исследовать состояние СД неразрушающим методом.

2.4. Методика определения сопротивления омических контактов

Известно [10,11], что прямую ветвь ВАХ p-n-перехода можно описать следующим соотношением

$$I_{раб} = I_s \left\{ \exp\left[\frac{q}{\eta kT} (U_{раб} - I \cdot R_\Sigma \right] - 1 \right\}, \qquad (2.1)$$

где $I_{раб}$ – рабочий ток диода в прямом направлении; $U_{раб}$ – рабочее напряжение смещения прямой полярности; I_s – ток насыщения, величина которого зависит от высоты барьера, температуры, площади контакта и некоторых других величин; η – коэффициент неидеальности ВАХ; R_Σ – суммарное омическое сопротивление. Остальные обозначения общепринятые.

В свою очередь суммарное омическое сопротивление RΣ можно представить в следующем виде

$$R_\Sigma = R_B + R_C, \qquad (2.2)$$

где R_B – сопротивление базы *p-n*-перехода, величина которого определяется удельным сопротивлением активного слоя и ее геометрическими размерами; R_C – суммарное сопротивление ОК.

Тогда, на основании (2.1), для дифференциального сопротивления p-n-перехода $R_{диф}$ получаем

$$R_{диф} = \frac{1}{dI_{раб} / dU_{раб}} = \frac{\eta kT}{q(I + I_s)} + R_\Sigma \qquad (2.3)$$

Зависимость дифференциального сопротивления p-n-перехода от рабочего тока может быть определена по результатам измерения прямой ветви ВАХ. Если экстраполировать экспериментально измеренную зависимость дифференциального сопротивления от прямого тока в точку $1/I_{раб} = 0$, тогда можно определить величину сопротивления R_Σ.

На рисунке 2.7 представлены типичные результаты определения R_Σ для исходных СД. Как видно из представленных результатов, описанная выше методика позволяет определять величину R_Σ по результатам измерения прямой ветви ВАХ СД. При этом, существующая измерительная техника позволяет обеспечить требуемую точность измерения R_Σ.

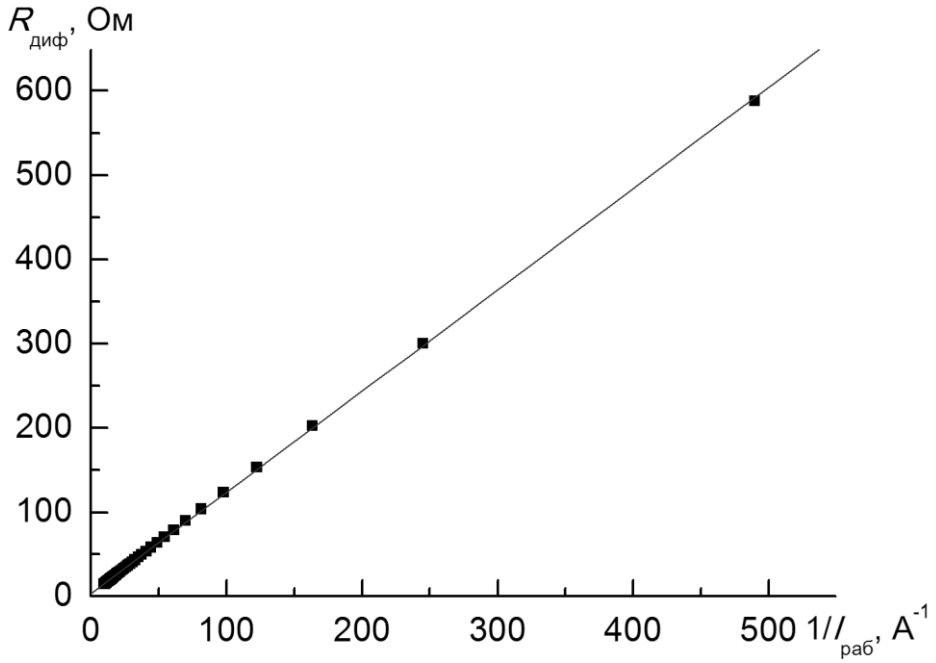


Рисунок 2.7 – Зависимость дифференциального сопротивления p-n-перехода от рабочего тока

Таким образом, на основании анализа изменения прямой ветви ВАХ можно контролировать изменение R_Σ в результате действия различных внешних факторов.

Далее рассмотрим, каким образом можно оценить вклад сопротивления ОК в $R_{\Sigma.}$ Изменение сопротивления ОК можно моделировать подключением набора последовательных сопротивлений R_i. На рисунке 2.8 представлены типичные ВАХ СД, которые были измерены для случая последовательного подключения различных известных омических сопротивлений. Т.е., таким образом, мы использовали физическое моделирование изменения сопротивления ОК путем использования набора прецизионных резисторов R_i, данные о которых приведены ниже в таблице 2.1.

Из рисунка 2.8 видно, что с ростом сопротивления ОК наблюдается характерный сдвиг ВАХ в область более высоких прямых напряжений. Тогда, для данного случая, величину R_Σ в зависимости от величины R_C можно определить их ВАХ несколькими независимыми способами.

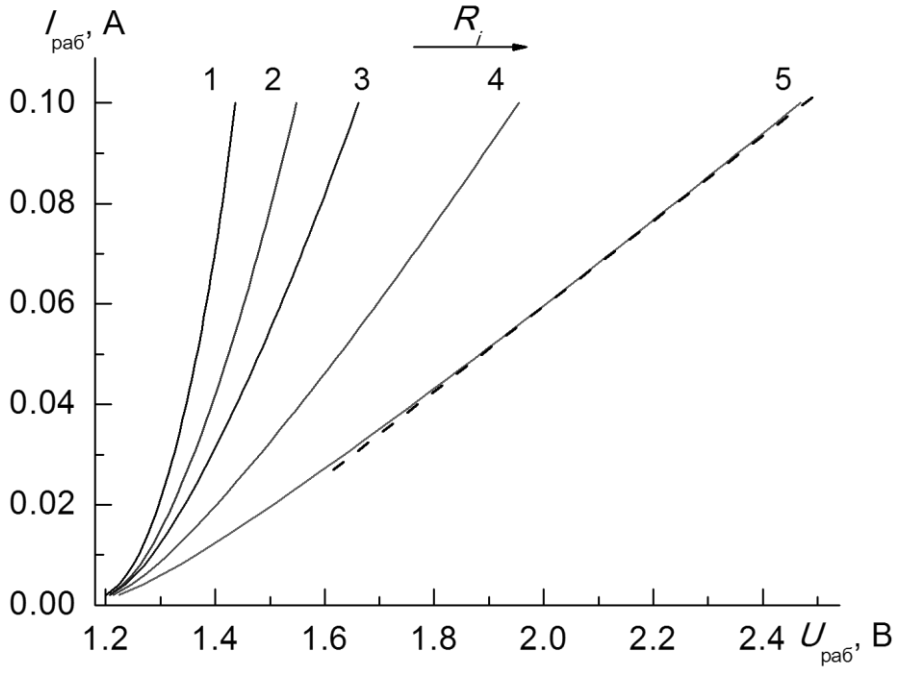


Рисунок 2.8 – Изменение ВАХ СД в зависимости от увеличения сопротивления ОК

Прежде всего, изменение R_Σ с ростом сопротивления ОК можно определить, используя описанную выше процедуру по зависимости $R_{диф}$ от рабочего тока.

Полученные, таким образом, результаты приведены ниже в таблице 2.1 (строка 2).

Из представленных результатов видно, что определяемое таким образом омическое сопротивление R_Σ может быть описано следующим образом

$$R_\Sigma = R_\Sigma(R_i = 0) + R_i \qquad (2.4)$$

В таблице 2.1 (строка 3) приведены результаты расчета по формуле (4). Если сопоставить полученные таким образом результаты (таблица 2.1, строка 2 и строка 3), то можно сделать вывод о том, что наблюдаемые различия обусловлены погрешностью измерений. Таким образом, построение зависимости $R_{диф}$ от рабочего тока позволяет определять изменение величины R_Σ при воздействии различных внешних факторов на приборы с p-n-переходом.

Таблица 2.1. Результаты определения R_Σ

№	Обозначение	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	Способ определения
1	R_i, Ом	0	1,092	2,331	5,278	10,34	-
2	R_Σ, Ом	3,501	4,580	5,730	8,659	13,79	по $R_{диф}$
3	R_Σ, Ом	3,501	4,593	5,832	8,779	13,84	по формуле (4)
4	$\Delta R_C = R_i$, Ом	-	1,083	2,229	5,135	10,30	вычитание ВАХ
5	R_Σ, Ом	3,501	4,584	5,730	8,636	13,80	(строка 4) + $R_\Sigma(R_0)$
6	R_C, Ом	1,255	2,347	3,486	6,393	11,58	из ВАХ, высокие $I_{раб}$
7	ΔR_C, Ом	0	1,092	2,231	5,138	10,33	(строка 6) – 1,255 Ом
8	R_B, Ом	2,246	2,233	2,244	2,266	2,210	(строка 2) – (строка 6)
9	R_B, Ом	2,246	2,246	2,346	2,386	2,260	(строка 3) – (строка 6)
10	R_B, Ом	2,246	2,237	2,244	2,243	2,220	(строка 5) – (строка 6)

С другой стороны, если вычесть исходную ВАХ (R_i = 0) из последующей ВАХ ($R = R_i$), а полученный сдвиг по напряжению ΔU приписать изменению R_Σ (т.е. ΔR_Σ), тогда рост R_Σ можно описать следующим соотношением

$$\Delta R_\Sigma = \Delta R_\Sigma(R_i) = \Delta R_C = R_i \qquad (2.5)$$

На рисунке 2.9 показана зависимость приращения напряжения смещения от величины рабочего тока при различных значениях R_i. Из результатов следует, что значение омического сопротивления ΔR_Σ в данном случае следует определять в области линейной (точнее близкой к линейной) зависимости ΔU от величины рабочего тока, т.е. в области достаточно высоких токов. Полученные таким образом значения ΔR_Σ приведены в таблице 2.1 (строка 4). Тогда, можно определить величину R_Σ как сумму $R_\Sigma(R_0)$ и ΔR_C как это показано в таблице 2.1 (строка 5).

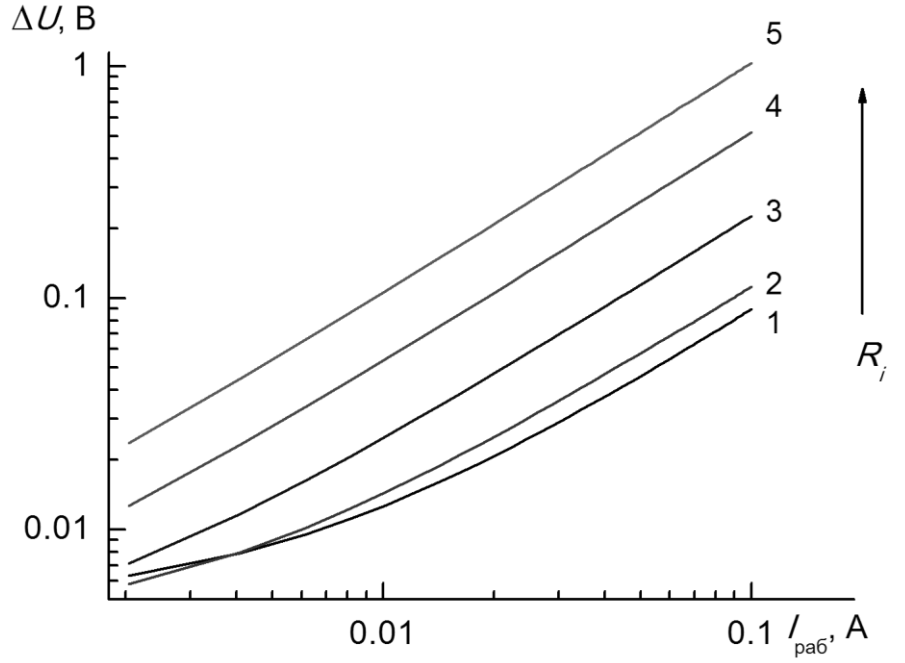


Рисунок 2.9 – Зависимость приращения напряжения смещения от величины рабочего тока СД для различных значений R_i

Таким образом, значения изменения ΔR_Σ в данном случае полностью соответствуют величине подключаемого последовательно дополнительного омического сопротивления, а получаемая различными способами величина R_Σ практически не зависит от способа определения, что вытекает из сравнения строк 2, 3 и 5 в таблице 2.1. При этом наблюдаемые различия полностью объясняются погрешностью измерений.

На основании анализа полученных результатов, можно сделать вывод о том, что сдвиг прямой ветви ВАХ приборов с p-n-переходом в область более высоких напряжений смещения, обусловлен изменением сопротивления ОК, что видно из сравнения строк 1 и 4 в таблице 2.1. Тогда, участок ВАХ в области высоких токов можно экстраполировать линейной зависимостью, наклон которой будет определяться сопротивлением ОК, как это показано на рисунке 2.8 пунктирной линией. При этом необходимо выбрать соответствующий диапазон токов (см. рисунок 2.9).

В таблице 2.1 (строка 6) представлены результаты определения омического сопротивления из наклона ВАХ в области высоких токов. Наклон ВАХ в области высоких токов определяется сопротивлением ОК R_C, что подтверждается расчетами, представленными в таблице 2.1 (сравните строку 7 и строку 1).

Из представленных выше результатов вытекает вывод о том, что линейная экстраполяция ВАХ в области высоких токов позволяет определять величину сопротивления ОК в приборах на основе p-n-перехода. Следует отметить, что для снижения погрешности определения R_C можно использовать измерение ВАХ с подключенным известным омическим сопротивлением (рисунок 2.8).

Зная величину сопротивления ОК можно определить сопротивлении R_B, используя формулу 2.2. В таблице 2.1 представлены результаты определения R_B, которые отличаются в пределах погрешности измерения.

Следует отметить, что при выполнении изложенных выше исследований, мы не предпринимали каких-то дополнительных мероприятий по повышению точности измерений.

Таким образом, изложенные выше результаты позволяют предложить достаточно простую комплексную методику определения сопротивления ОК и сопротивления базы для приборов на основе p-n-перехода. Практическое применение предложенной методики позволяет исследовать влияние различных факторов на работу приборов на основе p-n-перехода.

2.5 Анализ характеристик исходных светодиодов

Рассмотрим основные параметры исходных СД. К ним следует отнести электрофизические характеристики (ВАХ) и светотехнические характеристики (ВтАХ). Именно эти характеристики определяют работоспособность СД. Анализ указанных характеристик при воздействии различных факторов и позволит сделать вывод об основных закономерностях изменения работоспособности СД.

Типичные ВАХ исходных СД ИК-диапазона представлены на рисунке 2.10 (зависимость 1).

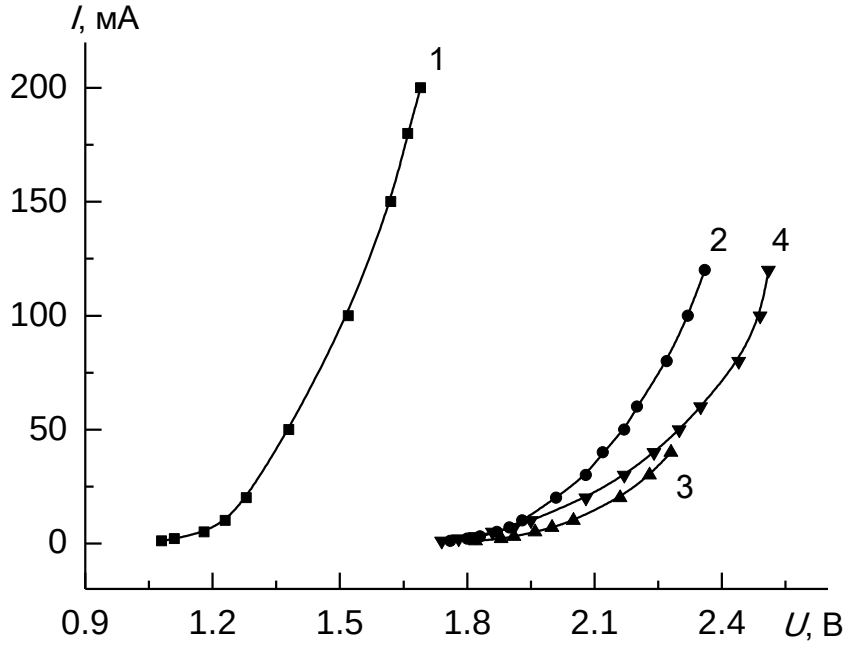


Рисунок 2.10 – ВАХ исходных СД: 1 – СД ИК-диапазона на основе гетероструктур AlGaAs, 2 – СД типа Ж-2, 3 – СД типа Ж-1, 4 – СД типа Кр

Однако ВАХ, построенная в двойных логарифмических координатах, является более информативной. Перестроим зависимость 1 рисунка 2.10 в данных координатах. На основании анализа известных экспериментальных и теоретических (см. Главу 1) результатов исследования влияния дислокаций на форму ВАХ приборов с p-n-переходом исходные СД можно разделить на три характерные группы.

Рассмотрим более подробно каждую из выделенных групп. На рисунке 2.11 показана типичная форма ВАХ СД отнесенных к группе А.

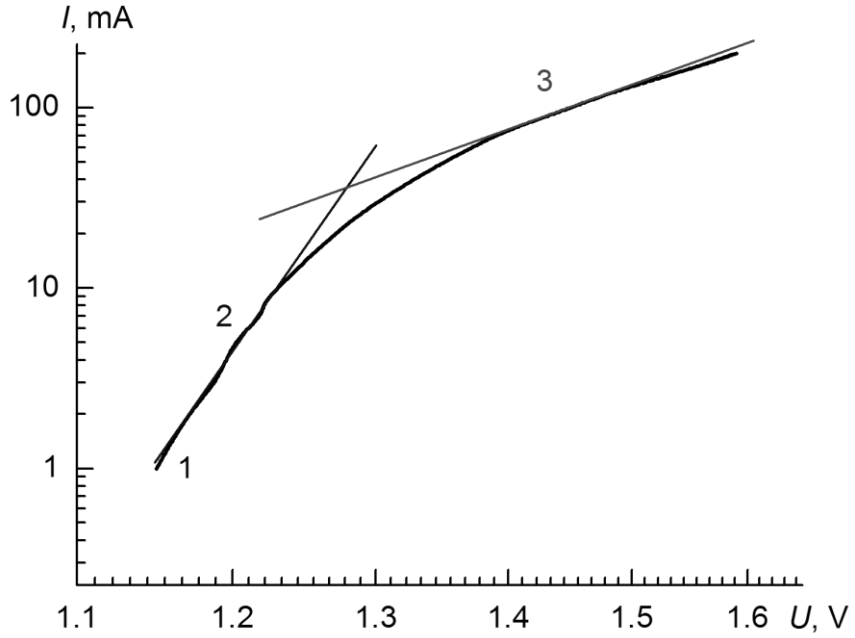


Рисунок 2.11 – ВАХ СД ИК-диапазона группа А: 1 – измеренная ВАХ; 2 – ВАХ СД в области малых токов; 3 – проявление сопротивления ОК в области высоких токов

Таким образом, СД отнесенные к группе А можно характеризовать проявлением сопротивления ОК в области высоких токов. Используя изложенную выше методику (раздел 2.4) можно определить сопротивление ОК для индивидуального СД, и соответственно исследовать его изменение при различных видах воздействия. Для описанной выше формы ВАХ СД можно предложить эквивалентную схему, которая приведена на рисунке 2.12. Таким образом,

получаем, что на основании анализа наклона ВАХ в области высоких токов можно определить суммарное сопротивление омических контактов R_C.



Рисунок 2.12 – Эквивалентная схема СД: $R_{с1}$, $R_{с2}$ – сопротивления омических контактов, p-n-LED – *p*-*n*-переход СД

Следующая группа СД (группа В) имеет форму ВАХ, которая показана на рисунке 2.13. Наблюдаемая прямая ветвь ВАХ уходит в ноль, при этом не проявляется в явном виде напряжение порога проводимости *p*-*n*-перехода СД.

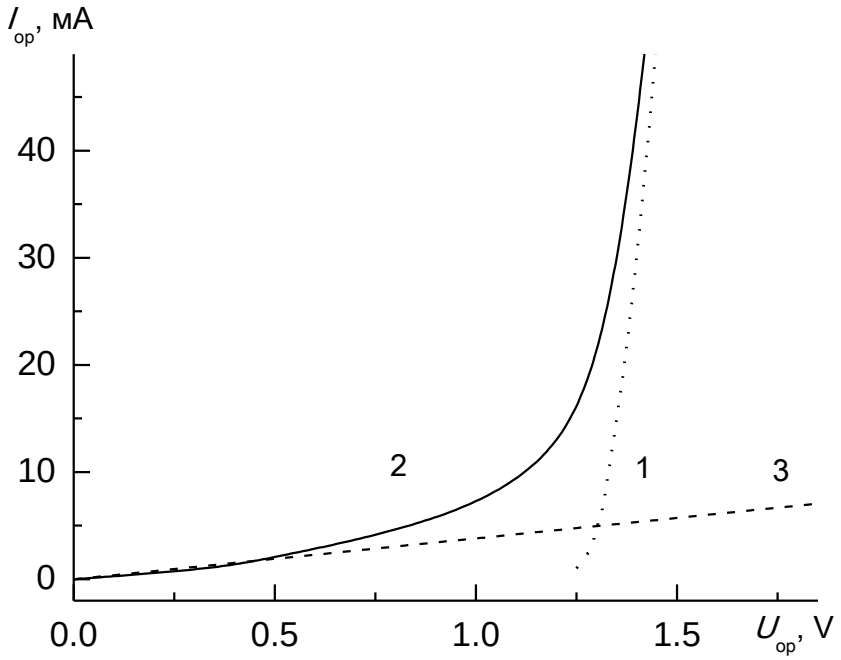


Рисунок 2.13 – ВАХ исследуемых СД ИК-диапазона: 1 – типичная ВАХ; 2 – ВАХ СД с ОКУТ; 3 – ВАХ ОКУТ

Наблюдаемую линейную зависимость тока от напряжения в области высокого сопротивления p-n-перехода СД можно объяснить проявлением

объемного канала утечки тока (предположительно дислокаций, далее ОКУТ) подключенного параллельно *p*-*n*-переходу СД. При этом ОКУТ можно представить в виде омического сопротивления.

Получаемая при этом эквивалентная схема показана на рисунке 2.14.

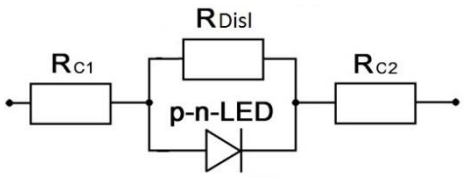


Рисунок 2.14 – Эквивалентная схема СД: R_{c1}, R_{c2} – сопротивления ОК, p-n-LED – *p*-*n*-переход (активный слой) СД, R_{Disl} – омическое сопротивление ОКУТ

Третью группу СД (группа С) можно характеризовать s-образной формой ВАХ, как это показано на рисунок 2.15.

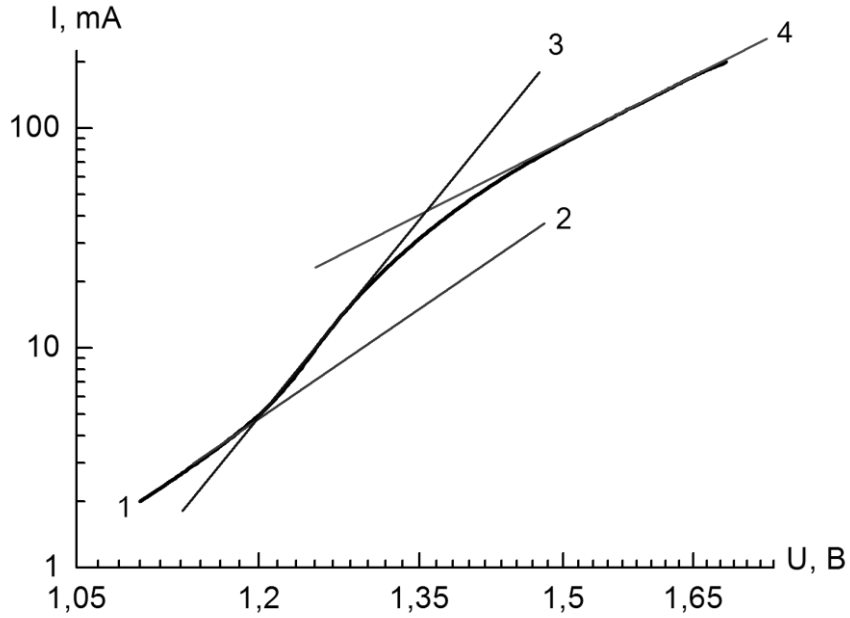


Рисунок 2.15 – СД с s-образной ВАХ: 1 – измеренная ВАХ; 2 –ВАХ *p*-*n*-перехода СД; 3 – суммарная ВАХ *p*-*n*-перехода СД и *p*-*n*-перехода ОКУТ; 4 – проявление сопротивления ОК в области высоких токов

Следует особо отметить, что s-образность выявляется в явном виде только на ВАХ, которая построена в двойных логарифмических координатах. В этом случае можно предложить следующую эквивалентную схему, которая показана на рисунок 2.16.

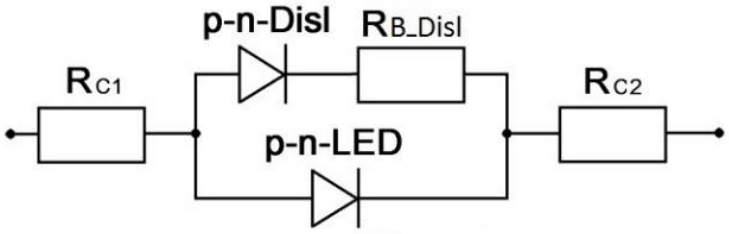


Рисунок 2.16 – Эквивалентная схема СД группы С: R_{c1}, R_{c2} – сопротивления ОК; p-n-LED – *p*-*n*-переход СД; p-n-Disl – *p*-*n*-переход ОКУТ; R_{B_Disl} – сопротивление базы ОКУТ

Таким образом, в данном случае, мы наблюдаем подключение ОКУТ параллельно p-n-переходу СД. Для исходных СД ИК были выявлены ОКУТ с напряжением порога проводимости около 1,2 В. Тогда, если из ВАХ СД, отнесенного к группе С, вычесть ВАХ СД, отнесенного к группе А, то получим ВАХ *p*-*n*-перехода ОКУТ, которая и показана на рисунке 2.17.

Подобные результаты были получены и для других типов СД.

Таким образом, анализ ВАХ исходных СД позволяет выявлять СД с высоким значением сопротивления ОК, а также СД с ОКУТ.

Перейдем к рассмотрению ВтАХ исходных СД. На рисунке 2.18 показана типичная ВтАХ исследуемых СД ИК.

В свою очередь на рисунке 2.19 представлены исходные ВтАХ СД на основе AlGaInP. Если сопоставить данные показанные на рисунках 2.18 и 2.19, то можно сделать однозначный вывод о подобном характере изменения мощности излучения в зависимости от рабочего тока.

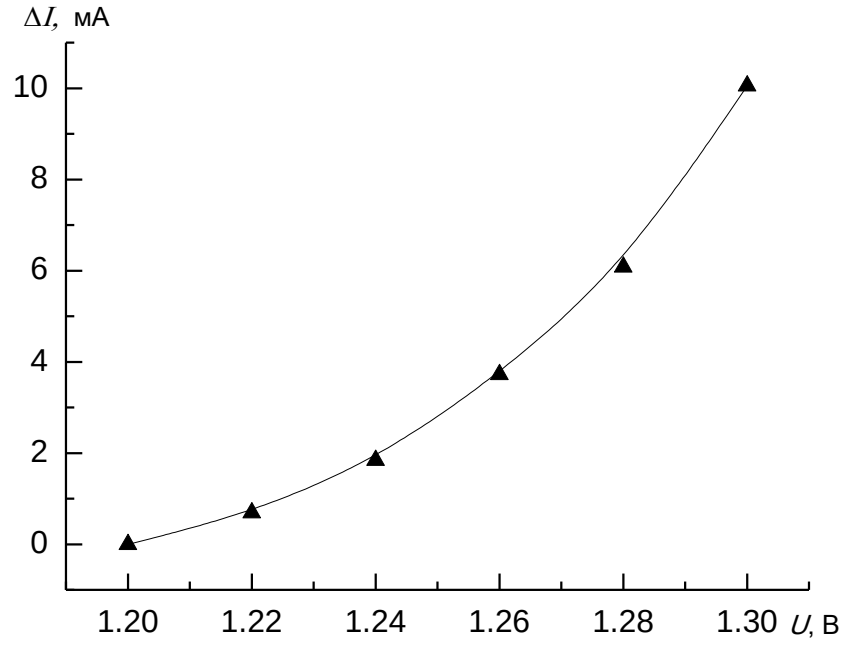


Рисунок 2.17 – Вольт-амперная характеристика ОКУТ СД ИК

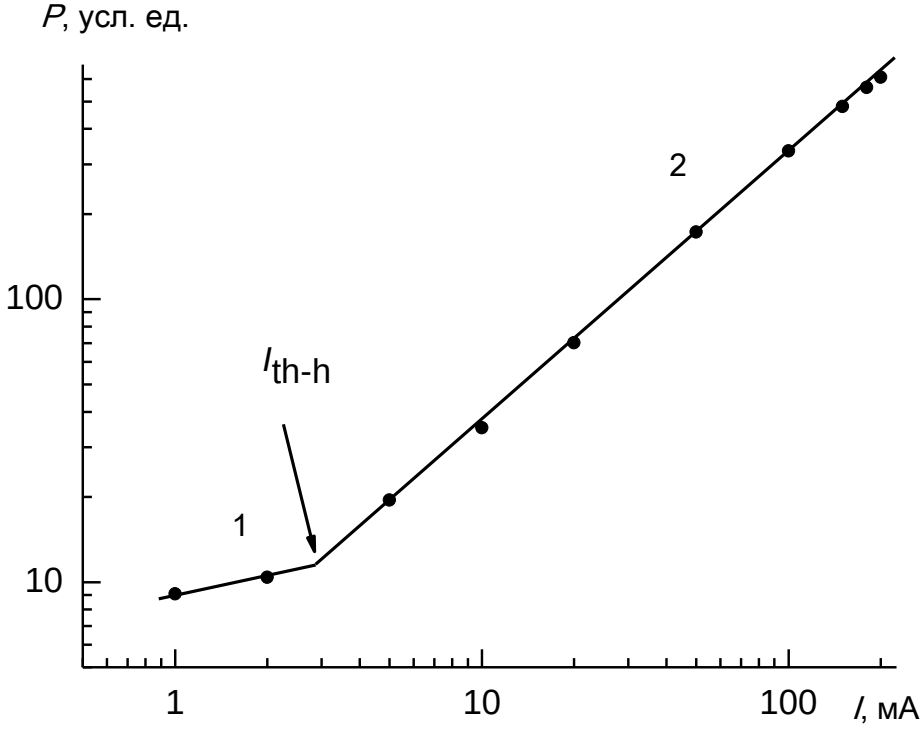


Рисунок 2.18 – ВтАХ исходных СД ИК-диапазона: 1 – область средней инжекции электронов; 2 – область высокой инжекции электронов; $I_{th\text{-}h}$ – граничный ток

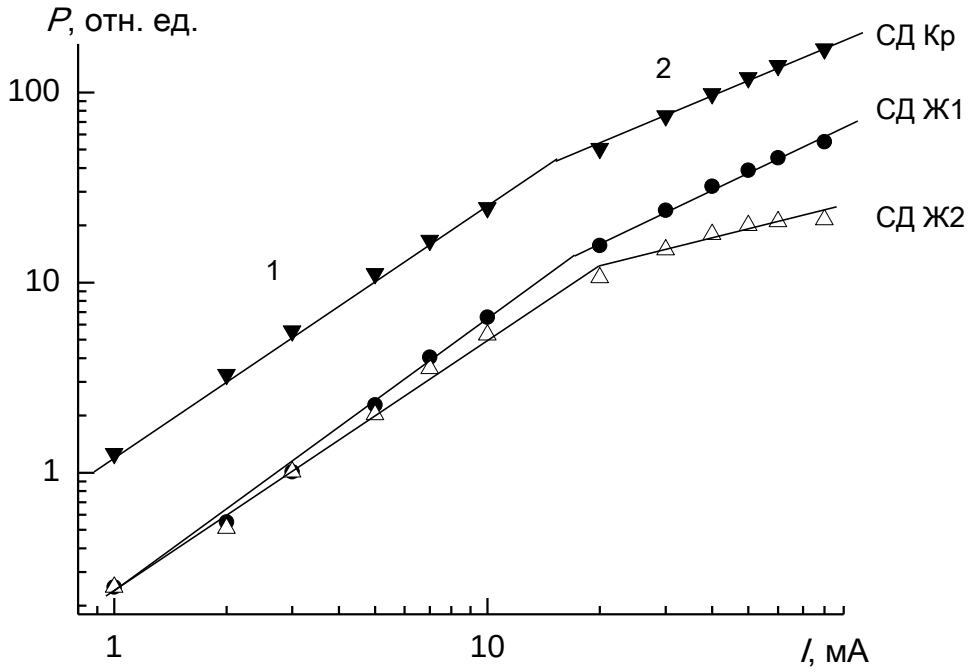


Рисунок 2.19 – ВтАХ исходных СД на основе AlGaInP: 1 – область средней инжекции электронов; 2 – область высокой инжекции электронов

Видно, что на ВтАХ исходных СД можно выделить две характерные области инжекции электронов в активный слой:

- область средней инжекции электронов (область 1);

- область высокой инжекции электронов (область 2).

Тогда, для каждого индивидуального СД можно ввести новую характеристику – граничный ток $I_{\text{th-h}}$ – это ток, разделяющий области средней и высокой инжекции электронов в активный слой СД, как это показано на рисунке 2.18. Тогда, изменение мощности излучения можно описать следующей формулой

$$P = A \cdot I_{раб}^{\beta}, \tag{2.6}$$

где P – мощность излучения;

A – коэффициент пропорциональности, величина которого определяется типом используемого полупроводникового материала, конструкцией СД и характеризует

индивидуальный СД;

β – показатель степени, характеризующий наклон ВтАХ.

Следует отметить, что наклон ВтАХ СД в области средней инжекции всегда меньше наклона ВтАХ в области высокой инжекции. Подобное описание ВтАХ СД было использовано ранее [89,90]. Таким образом, использование такой характеристики как граничный ток между различными уровнями инжекции электронов в активный слой СД позволяет определить и описать изменение формы ВтАХ в результате различных воздействий.

2.6 Используемое оборудование для ступенчатых испытаний светодиодов

Для исследования надежности использовались ускоренные ступенчатые испытания, которые проводились на стандартном сертифицированном стенде для ускоренных испытаний. Принципиальная схема включения приборов представлена на рисунке 2.20. Контроль напряжения в стенде осуществлялся с помощью вольтметра.

Ступенчатые испытания проводили при температуре окружающей среды +65…+85 ºС, шаг ступени при этом составлял ΔI = +25...100 мА, рабочий ток первой ступени I_{op1} = 50 мА, длительность ступени составляла во всех случаях 24 ч.

Температура окружающей среды была выбрана таким образом, чтобы верхняя граница не превышала температуру размягчения компаунда, из которого состоит линза и корпус СД (рисунок 2.1).

Каждую ступень можно характеризовалась как номером N_i, так и током ступени I_{step}. Соотношение между данными величинами можно представить следующими формулами:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{I_{opi} - I_{op1}}{\Delta I} + 1, \\ I_{opi} &= \Delta I \cdot \left(N_i - 1\right) + I_{op1}. \end{aligned} \tag{2.7}$$

В дальнейшем для оценки уровня воздействия факторов длительной эксплуатации, в основном, используется ток ступени.

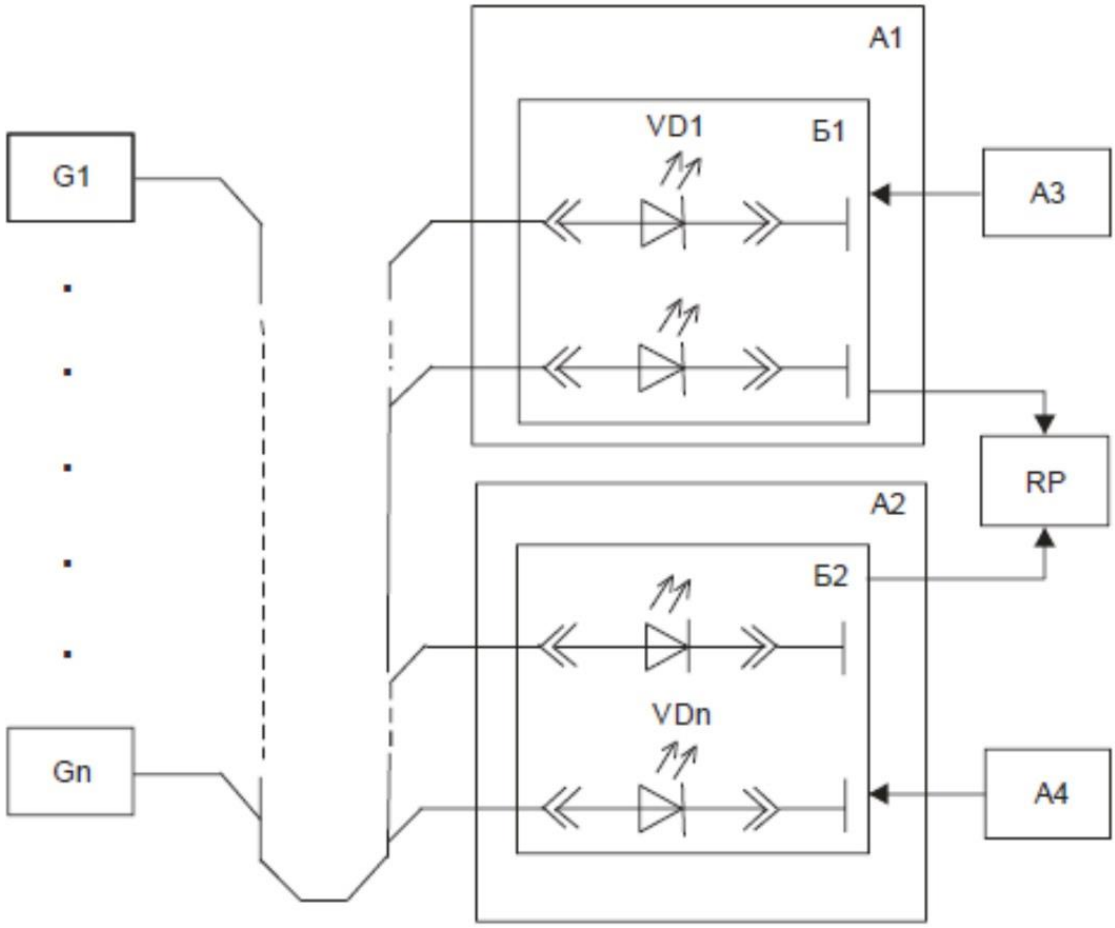


Рисунок 2.20 – Электрическая схема включения СД при ступенчатых испытаниях: А1, А2 – термостат; А3, А4 – регулятор температуры теплоотвода; Б1, Б2 – теплоотвод; RP – измеритель температуры (МИТ 8.10); G1– Gn – стабилизаторы тока; VD1– VDn – испытуемые СД

Кроме того, каждый диод при проведении испытаний можно характеризовать собственным значением температуры активной области СД, которая определяется окружающей температурой, его тепловым сопротивлением и потребляемой электрической мощностью.

Таким образом, при проведении ступенчатых испытаний в качестве

ускоряющих факторов одновременно использовали рабочий ток и температуру.

Следует отметить, что предельная ступень испытаний ограничивалась развитием катастрофических отказов. Испытания прекращались при отказе не менее 80% приборов в каждой из партий СД.

2.7 Используемое оборудование для исследования радиационной стойкости

Во всех случаях облучение проводили при нормальной температуре в пассивном режиме питания, т.е. без наложения электрического поля. Степень воздействия характеризовали для быстрых нейтронов и электронов флюенсом частиц (нейтрон/см$^{-2}$), а для гамма-квантов – поглощенной дозой (Гр).

На предварительном этапе исследований было установлено, что отжигом радиационных дефектов при проведении измерений СД можно пренебречь. Эти результаты также подтверждаются тем фактом, что закономерности, полученные в результате последовательного набора уровня воздействия с проведением промежуточных измерений на одной партии приборов, идентичны закономерностям, полученным на различных партиях приборов при однократном облучении.

Можно утверждать, что наблюдаемые изменения светотехнических характеристик СД при облучении обусловлены только изменениями параметров их активного слоя, поскольку вклад изменения оптических свойств линзы не выявлен.

Полученные результаты измерений обрабатывались методами математической статистики. Каждую партию исследуемых СД характеризовали средними значениями измеряемых параметров. Количество СД в партии составляло 20 штук.

Поскольку наложение электрического поля может вносить заметный вклад в скорость введения радиационных дефектов [89,90] и, следовательно, в скорость изменения мощности излучения СД, то облучение исходных структур и приборов

во всех случаях проводилось в пассивном режиме питания (т.е. без наложения внешнего электрического питания).

Во всех экспериментах по облучению поток частиц был направлен перпендикулярно плоскости подложки кристалла СД.

При обработке полученных экспериментальных данных использовались статистические методы обработки данных, т.е. каждую партию СД характеризовали средними значениями измеряемых параметров.

Для более детального рассмотрения полученных результатов анализировались характеристики отдельных диодов для каждой из исследуемых партий СД.

Используемое измерительное и испытательное оборудование, источники ионизирующего излучения, а также методы контроля параметров сертифицированы и поверены в соответствии с существующими требованиями.

2.7.1 Гамма-установка «Исследователь»

В качестве источника гамма-излучения использовалась установка типа «Исследователь» с мощностью дозы (100-70) Гр/с. Активным элементом в установке служит изотоп ^{60}Co с эффективной энергией гамма-квантов 1,25 МэВ. Дозу облучения задавали временем облучения, используя данные об активности установки на момент проведения исследований. Доза гамма-излучения измерялась в Греях (СИ). Аттестованный объем зоны облучения 3 литра.

Схема гамма-установки «Исследователь» приведена на рисунке 2.21.

При работе установки облучатель неподвижен, к нему перемещается рабочая камера с объектами облучения. Рассмотрим конструктивные особенности. Основная часть установки – цилиндрический облучатель, который представляет собою кассету с источниками излучения кобальта-60.

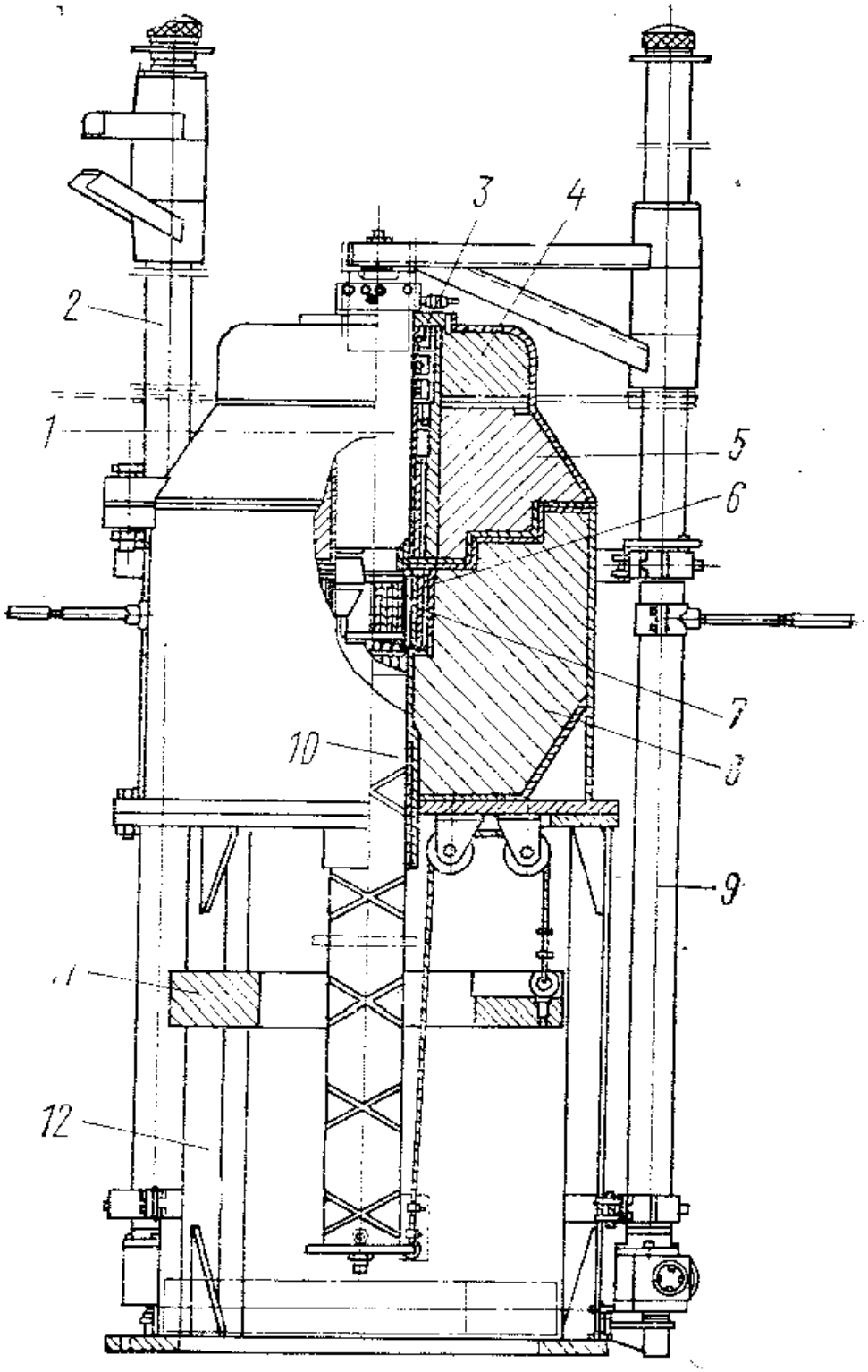


Рисунок 2.21 – Схема гамма-установки «Исследователь»: 1 – пробка с рабочей камерой» 2, 9 – механизм подъема; 3 – противолучевой затвор; 4 – воротник; 5 – крышка контейнера; 6 –кассета облучателя; 7 – источники излучения кобальта-60; 8 – корпус контейнера; 10 – шток; 11 – противовес; 12 – станина

Облучатель размещен в центре контейнера, состоящего из двух частей – крышки и корпуса. Мощность экспозиционной дозы на поверхности контейнера, выполняющего функции защиты от гамма-излучений, не превышает $2{,}0 \cdot 10^{-10}$ А/кг. По оси контейнера в направляющей трубе перемещается шток с термостатированным объемом и рабочей камерой с пробкой.

Облучение некоторых объектов требуется проводить при комнатной температуре. С этой целью рабочий объем штока снабжают водяной рубашкой типа «труба в трубе» с верхним переливом. Конструктивно шток выполнен в виде стакана из нержавеющей стали, в котором проходят спиральные трубы для подвода и отвода охлаждающей воды для термостатированного объема.

2.7.2 Установка «БАРС-4»

БАРС-4 [94,95] – импульсный твердотопливный двухзонный ядерный реактор на быстрых нейтронах (флюенс нейтронов за импульс (E > 0,1 МэВ): в ЦК – до 10^{15} н/см^2, на поверхности активной зоны – $(2{,}4 – 6) \cdot 10^{13}$ н/см^2, средняя энергия нейтронов – 1,4 МэВ, длительность импульса – 60 мкс).

Основные технические характеристики реакторной установки БАРС-4 приведены в таблице 2.2 (параметры максимального импульса). Внешний вид показан на рисунке 2.22.

Таблица 2.2 – Основные характеристики БАРС-4

№ п/п	Наименование	Размерность	Значение
1	Энерговыделение в импульсе (в одной АЗ)	Дел.	$2{,}5 \cdot 10^{17}$
2	Длительность (полуширина) импульса	Мкс	44
3	Флюенс нейтронов: -в центре активной зоны; - на поверхности активной зоны.	н/см^2	10^{15} До $5 \cdot 10^{14}$
4	Топливо	Сплав урана с молибденом (10%)	
5	Обогащение по ^{235}U	%	96



Рисунок 2.22 – Импульсный твердотопливный двухзонный ядерный реактор на быстрых нейтронах

2.7.3 Ядерный реактор ИРТ-Т

Облучение быстрыми нейтронами проводили также на исследовательском реакторе тепловом – Томском (ИРТ-Т) мощностью 6 МВт со следующими основными техническими характеристиками:

– замедлитель – вода;

– отражатель – бериллий-вода;

– горизонтальные каналы – 10 шт.;

– вертикальные каналы – 14 шт.;

– мощность – 6 МВт;

– плотность тепловых нейтронов – $1{,}7 \cdot 10^{14}$ н/см^{2}с;

– плотность быстрых нейтронов – $2{,}0 \cdot 10^{13}$ н/см^{2}с.

Для сравнения флюенсов быстрых нейтронов из двух представленных источников проведен эксперимент по облучению СД ИК. Выявлено, что деградация светодиодов из партии СД ИК идентична как при воздействии быстрых нейтронов, полученных на реакторе ИРТ-Т, так и на реакторе БАРС-4. Это позволяет сделать вывод, что спектральные характеристики быстрых нейтронов, полученные двумя разными способами близки к друг другу.

Выводы по главе 2

1. Основным электрофизическим параметром СД, который наиболее чувствителен к старению и к воздействию ионизирующего излучения, выбрана прямая ветвь ВАХ, а в качестве контролируемого светотехнического параметра – ВтАХ.
2. Контроль выбранных параметром позволяет изучить действие эксплуатационных факторов и ионизирующего излучения на деградацию СД, а также установить закономерности их изменения.
3. Разработана методика определения сопротивления ОК в СД, которая применима для других полупроводниковых приборов, работа которых основана на использовании p-n-перехода.
4. На основании анализа формы ВАХ исходных СД выделено три характерные группы СД:
   - СД с типичной ВАХ без аномалий;
   - СД с подключенными объемными каналами утечки тока, которые проявляются в виде омического сопротивления подключенного от одного омического контакта к другому омическому контакту;
   - СД с s-образной ВАХ, для которой характерно подключение p-n-перехода ОКУТ параллельно p-n-переходу СД.
5. Установлены соотношения, которые описывают изменение мощности излучения СД в зависимости от рабочего тока, при этом выделены две характерные области инжекции электронов в активный слой СД.

Глава 3. Исследование надежности светодиодов

Рассмотрим результаты исследования изменения светотехнических и электрофизических характеристик СД при воздействии эксплуатационных факторов, которое моделировали ступенчатыми испытаниями. Наблюдаемые отказы разделяются на две характерные группы: КО и параметрические отказы (ПО). При этом для всех исследуемых типов СД катастрофические отказы наблюдались только при высоких уровнях воздействия и практически ограничивали ступенчатые испытания. Только для единичных СД наблюдались КО на ранних стадиях.

3.1. Анализ катастрофических отказов светодиодов

В данном разделе рассмотрим основные виды КО, которые наблюдались при ступенчатых испытаниях. Прежде всего рассмотрим СД ИК. Анализ наблюдаемых для СД ИК случаев КО позволяет выделить три характерных типа:

1. КО, связанные с механическим разрушением корпуса;
2. КО, обусловленные отсоединением кристалла СД от теплоотвода как с механическим разрушением корпуса, так и без него;
3. КО, связанные с перегоранием электрического вывода.

Рассмотрим более подробно выявленные характерные типы КО. Первый тип КО наблюдается для СД, у которых происходит неравномерное распределение теплового поля по объему корпуса, вследствие чего происходит разлом в плоскости А-А (рисунок 3.1). В большинстве случаев для данного типа КО характерно отсутствие соосности теплоотвода и корпуса СД. Таким образом, данный тип КО можно считать обусловленным некачественной сборкой СД. СД с данным типом КО было незначительное количество (не более (2-3) % для исследуемых типов СД). Типичный случай такого КО показан на рисунке 3.2.

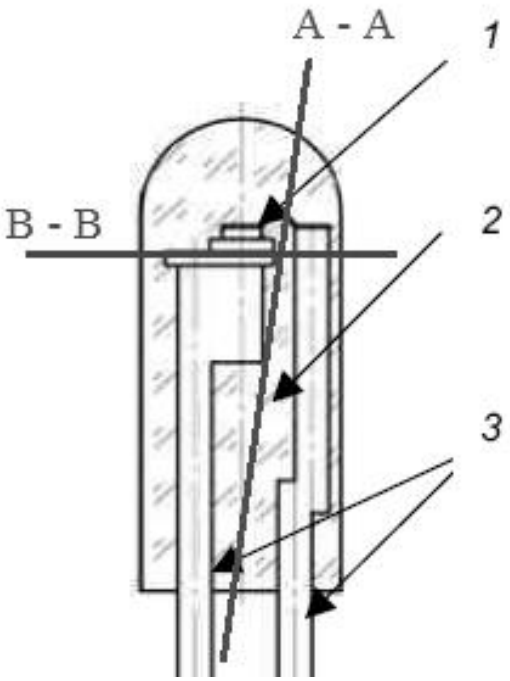


Рисунок 3.1 – Типовая конструкция светодиода: 1 – кристалл, 2 – линза и корпус из оптического компаунда, 3 – выводы питания; А-А – плоскость механического разрушения корпуса при температуре T_1; В-В – плоскость разрушения механического разрушения корпуса СД при температуре T_2, причем $T_1 < T_2$

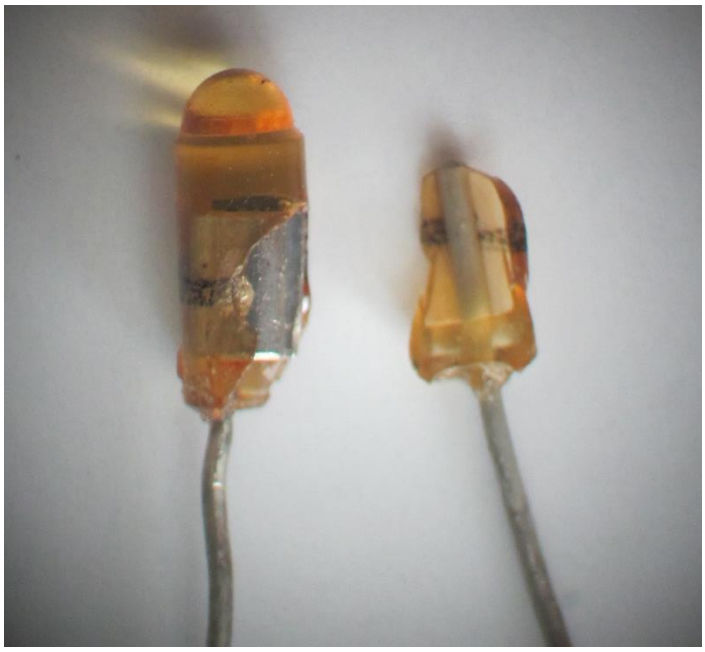


Рисунок 3.2 – Фотография светодиода с КО, который произошел по плоскости А-А, полученная на оптическом микроскопе Альтами СМ0870-Т

Второй тип КО наблюдается при достижении на кристалле СД температуры плавления ОК. Здесь может происходить отрыв кристалла от теплоотвода как с механическим разрушением корпуса, так и без разрушения. Наиболее часто наблюдается слом корпуса по плоскости В – В (см. рисунок 3.1). Но иногда наблюдается слом корпуса и по плоскости А – А (рисунок 3.3).

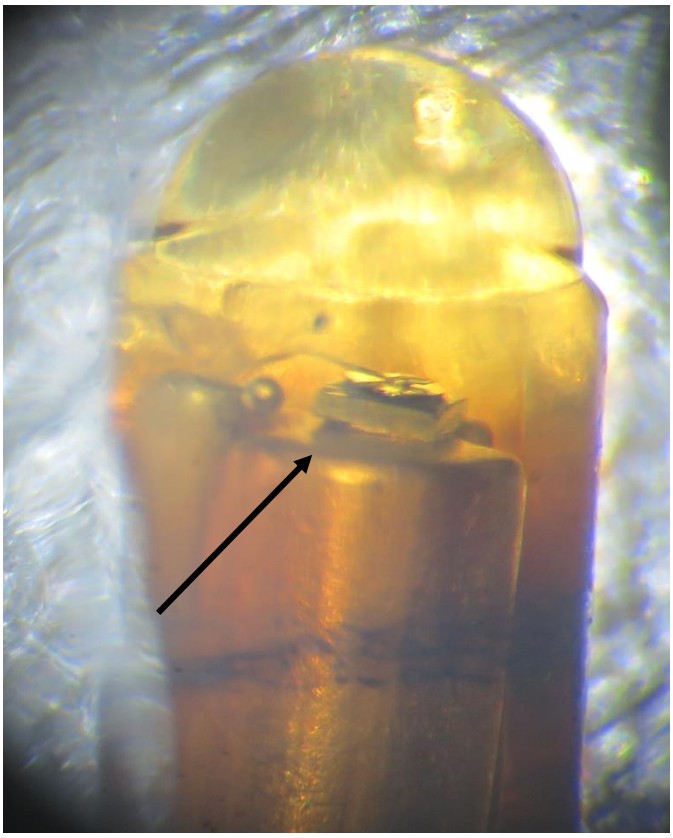


Рисунок 3.3 – Фотография светодиода с КО, который произошел по плоскости В-В, полученная на оптическом микроскопе Альтами СМ0870-Т. Стрелкой показано отсоединение кристалла СД от теплоотвода.

Второй вид КО является самым распространенным. Чаще всего он наблюдается на заключительных ступенях испытаний. На начальных ступенях испытаний данный тип КО появляется только для СД с аномально высоким сопротивлением ОК или с аномально высокими рабочими токами.

Следуем особо отметить, что достаточно редко (единичные случаи) наблюдаются КО, связанные с перегоранием электрического вывода, как это показано на рисунке 3.4. Данный тип КО может быть связан с неоднородностью

толщины золотой проволоки, используемой для электрических контактов.



Рисунок 3.4 – Фотография СД с перегоревшим электрическим выводом при проведения ступенчатых испытаний, полученная на рентгеновском микроскопе Phoenix microme|x Microfocus X-ray System. Стрелкой показано место разрыва электрического вывода

Следуем особо отметить, что достаточно редко (единичные случаи) наблюдаются КО, связанные с перегоранием электрического вывода, как это показано на рисунке 3.4. Данный тип КО может быть связан с неоднородной толщиной вывода.

В результате ступенчатых испытаний СД на основе AlGaInP (Кр, Ж1, Ж2) также были выявлены случаи КО второго и третьего типов. Поскольку данные СД конструктивно имели более мощный корпус, то случаев механического разрушения корпуса при отсоединении кристалла от теплоотвода не наблюдалось.

Анализ экспериментальных результатов, полученных в данной работе в сопоставлении с известными литературными данными [26,28], позволяет сделать

ряд выводов. Появление КО на ранних стадиях ступенчатых испытаний характерно для СД с аномальными ВАХ (аномалии ВАХ, появляющиеся при ступенчатых испытаниях, рассмотрим позднее в разделе 3.2) характеризовались высоким значением сопротивления ОК или аномально высокими рабочими токами. Подобное поведение СД при эксплуатации наблюдалось ранее [28,29].

Основной причиной развития КО СД при эксплуатации является отсоединение кристалла от теплоотвода при его температуре близкой к температуре плавления ОК.

3.2. Изменение электрофизических характеристик

Как уже отмечали ранее, основной электрофизической характеристикой СД является ВАХ. В результате исследований выявлено несколько характерных закономерностей изменения ВАХ СД при эксплуатации. Рассмотрим СД, для которых на исходных ВАХ изначально отсутствуют признаки появления ОКУТ, а сопротивление ОК существенно не отличается от средних значений. На рисунке 3.5 показано изменение ВАХ при ступенчатых испытаниях таких СД ИК.

В данном случае можно сделать однозначный вывод о том, что наблюдается рост сопротивления ОК в процессе испытаний, о чем свидетельствует сдвиг ВАХ в область более высоких напряжений. Используя описанную ранее методику, было рассчитано изменение сопротивление ОК, а полученные результаты показаны на рисунке 3.6.

Результаты исследований позволяют определить вероятность развития КО в зависимости от режима испытаний. На рисунке 3.7 показано изменение суммы накопленных КО (вероятности развития КО) от тока ступени при различном шаге ступени. Аналогичные зависимости можно построить и для вероятности развития КО в зависимости от окружающей температуры. Совокупность представленных результатов позволяет прогнозировать КО при различных режимах эксплуатации.

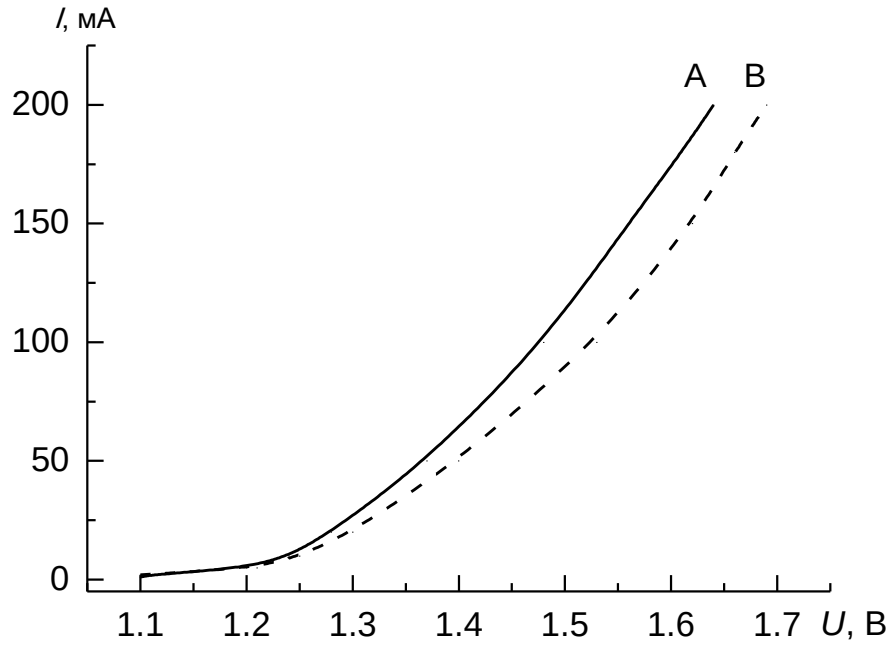


Рисунок 3.5 – Типичное изменение ВАХ СД ИК при ступенчатых испытаниях: А – исходная ВАХ; В – после 16 ступени перед развитием КО (шаг ступени - 25 мА, температура + 65 ^{0}С)

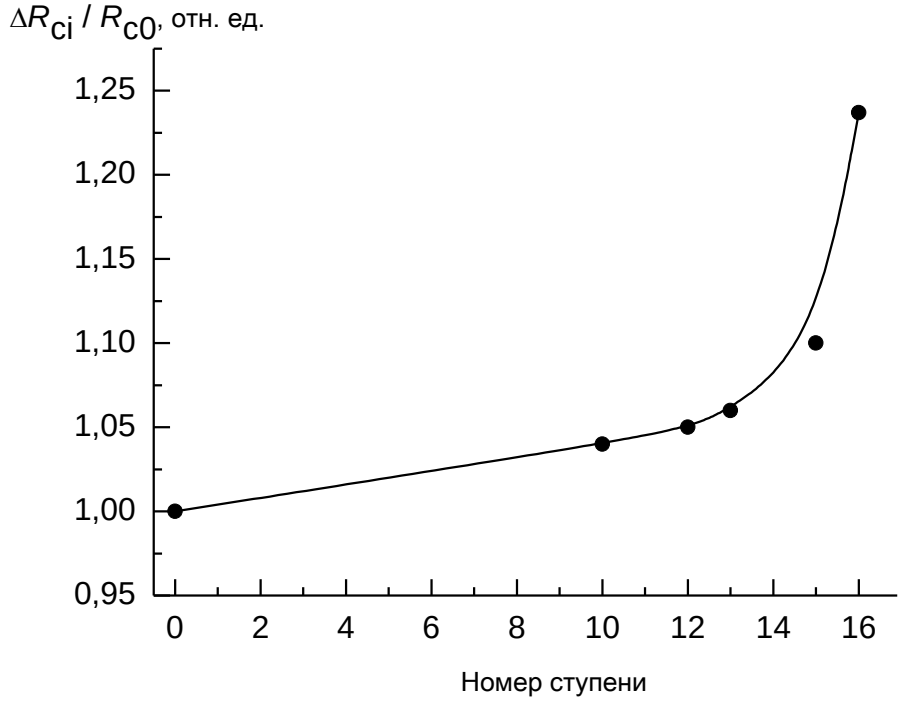


Рисунок 3.6 – Типичное изменение сопротивления ОК при ступенчатых испытаниях СД ИК с исходной ВАХ без аномалий

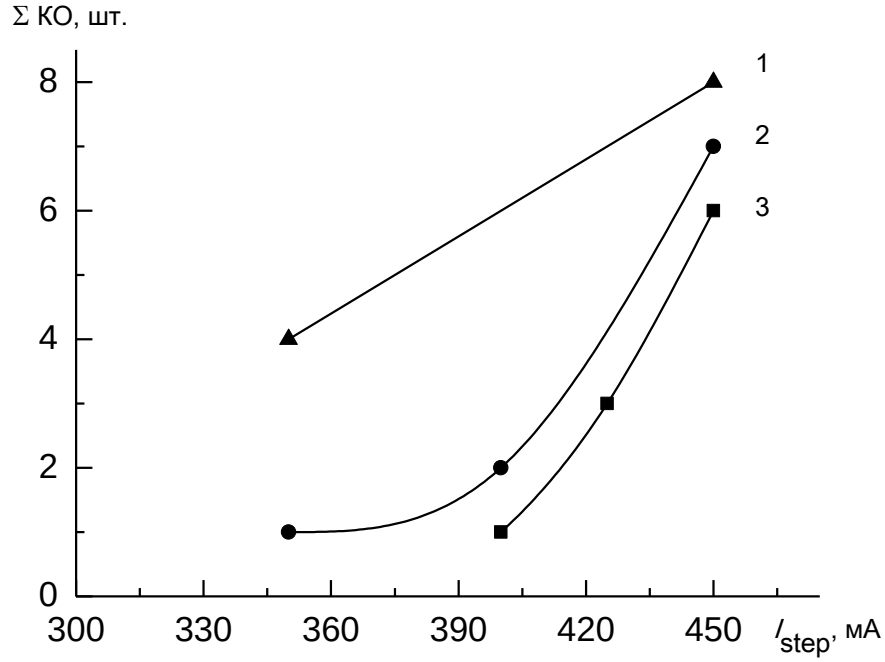


Рисунок 3.7 – Изменение суммы накопленных КО в зависимости от тока ступени при одинаковой температуре испытаний 65^0С. Шаг ступени: 1 – 100 мА; 2 – 50 мА; 3 – 25 мА

Таким образом, в данном случае наблюдаемое изменение ВАХ полностью обусловлено деградацией сопротивления ОК вследствие диффузионных процессов на границе «омический контакт – полупроводник». Соответственно, развитие КО обусловлено разогревом кристалла до температуры близкой к температуре плавления материала ОК. Этот вывод согласуется с результатами анализа КО при ступенчатых испытаниях, который был представлен ранее. Среди других типов СД также были выявлены СД с подобным поведением ВАХ и КО при эксплуатации.

Можно сделать вывод о том, что для СД с ВАХ без аномалий развитию КО предшествует рост сопротивления ОК вследствие диффузионных процессов на границе «омический контакт – полупроводник».

Как уже отмечалось ранее в Главе 2 среди исследуемых СД были выделены

СД с s-образной исходной ВАХ. Рассмотрим изменения ВАХ при эксплуатации, наблюдаемые для данных СД. На рисунке 3.8 показано изменение ВАХ СД ИК с s-образной исходной ВАХ. Из представленных результатов видно, что в процессе испытаний наблюдаются незначительные изменения вида ВАХ (зависимости А и В, рисунок 3.8) и только перед развитием КО, происходит скачкообразное изменение ВАХ (зависимость С, рисунок 3.8). Отметим, что регистрируемые изменения ВАХ являются статистически значимыми и не могут быть списаны на погрешность измерений. Наблюдаемый сдвиг ВАХ по напряжению можно объяснить скачкообразным ростом сопротивления ОК. При этом количественные оценки в данном случае сделать очень сложно. Необходимо продолжить исследования в данном направлении.

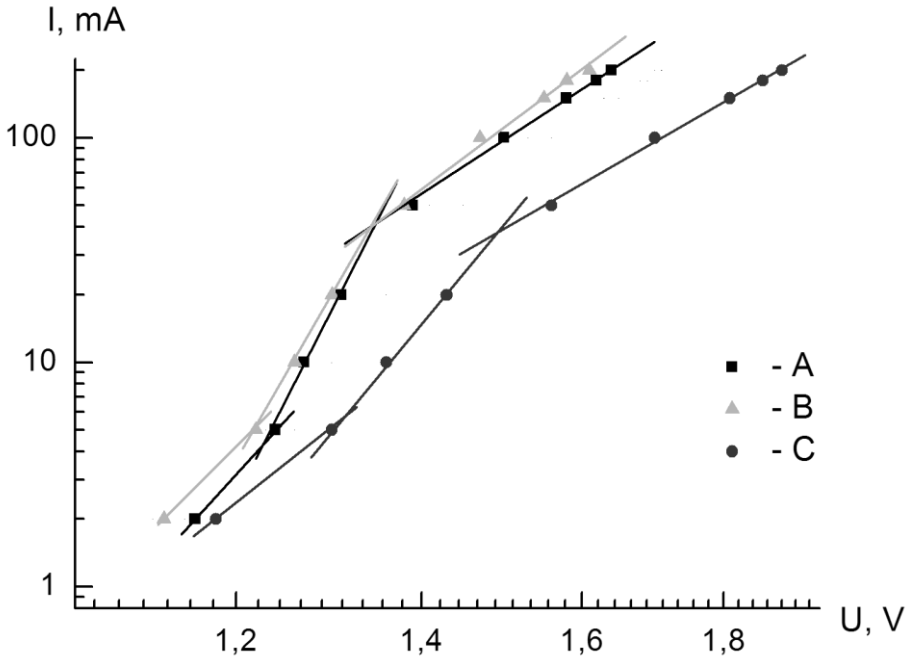


Рисунок 3.8 – Изменение ВАХ СД ИК при ступенчатых испытаниях: А – исходная ВАХ, В – в процессе ступенчатых испытаний; С – перед развитием КО

Подобное изменение формы ВАХ наблюдалось и для СД на основе AlGaInP (см. рисунок 3.9).

Существенные изменения ВАХ СД наблюдаются только для ступеней

испытаний непосредственно перед появлением КО (зависимость С, рисунок 3.8). Наблюдаемый сдвиг ВАХ в область более высокого напряжения питания объясняется деградацией ОК, что приводит к росту их омического сопротивления, дополнительному падению напряжения питания на ОК, их дополнительному разогреву и, в итоге, к появлению КО.

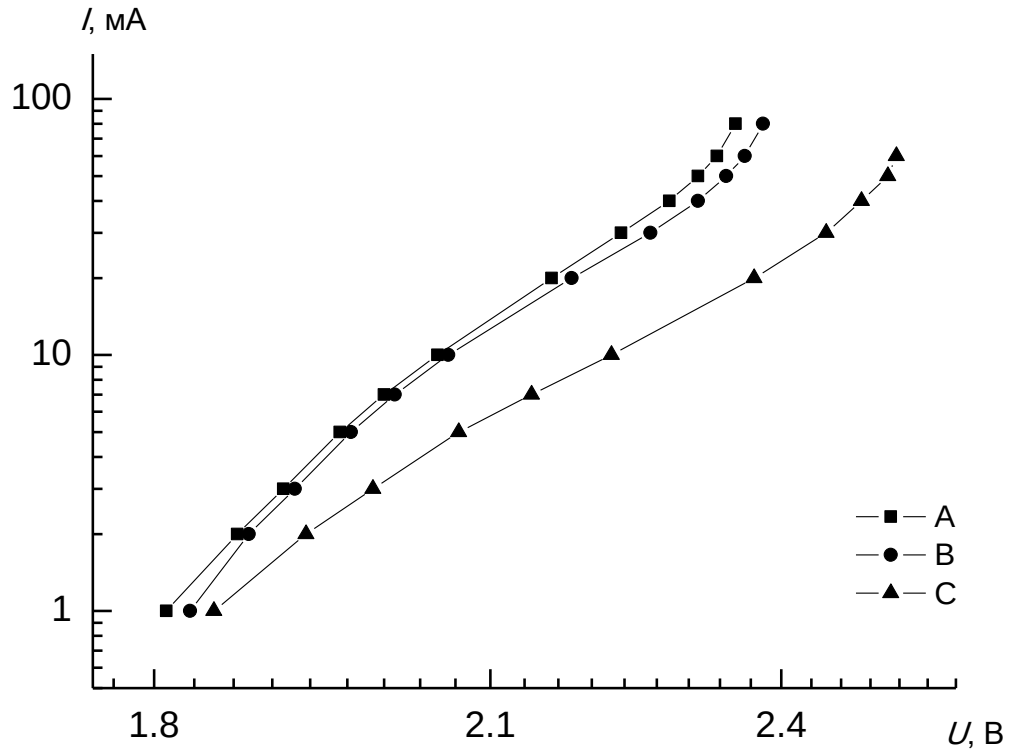


Рисунок 3.9 – Изменение ВАХ СД Ж2 при ступенчатых испытаниях: А – исходная ВАХ, В – в процессе ступенчатых испытаний; С – перед развитием КО

Таким образом, можно сделать вывод о том, что вероятность развития КО СД при ступенчатых испытаниях определяется ускоренной деградации омических контактов и температурой активной области.

Подобное поведение ВАХ СД наблюдалось ранее при исследовании радиационной стойкости СД [86,89,90].

Анализ показал, что заметные изменения прямой ветви ВАХ наблюдаются непосредственно перед развитие КО. Это позволяет сделать вывод о том, что

изменением электрофизических характеристик активных слоев исследуемых СД при воздействии эксплуатационных факторов можно пренебречь. На основании анализа изменений формы ВАХ установлено, что на ступенях, предшествующих развитию КО, наблюдается рост сопротивления ОК и/или подключение дислокаций параллельно p-n-переходу СД, что может быть использовано для прогнозирования развития КО.

Была выделена группа СД с изменениями формы ВАХ, показанными на рисунке 3.10.

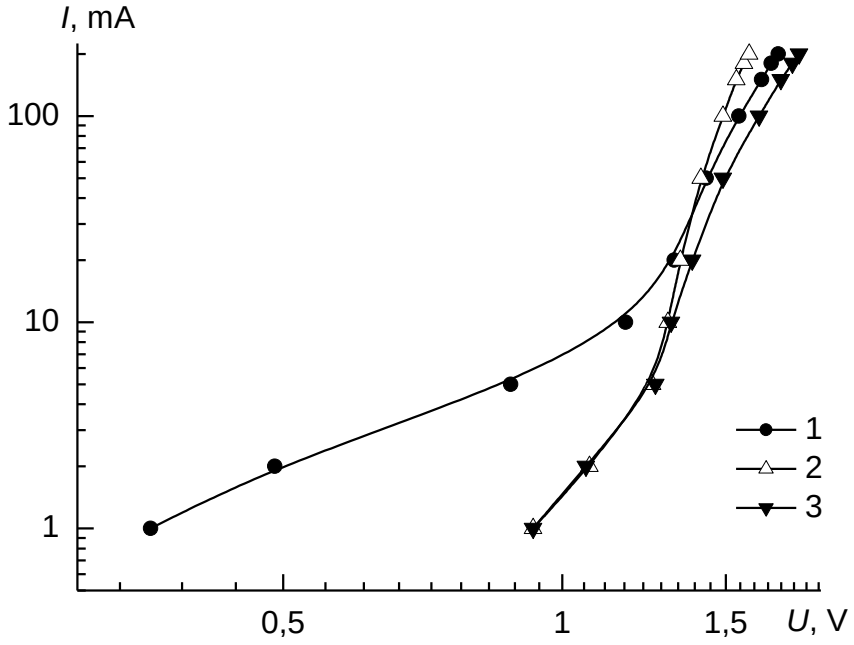


Рисунок 3.10 – Изменение ВАХ СД ИК при ступенчатых испытаниях: 1 – исходные СД, 2 – СД при рабочем токе I_{step} =300 мА (шаг ступени 25 мА), 3 –СД перед развитием КО (I_{step} =350 мА)

Для данных СД на начальных ступенях испытаний практически отсутствует изменение формы ВАХ. Непосредственно на ступени предшествующей развитию КО наблюдается существенный спад тока в области малых напряжений питания, при этом в области высоких напряжений происходит сдвиг ВАХ влево (зависимость В, рисунок 3.10), что может быть объяснено формированием объемных каналов утечки тока (ОКУТ). На последующей ступени наблюдается

рост сопротивления ОК (зависимость С, рисунок 3.10) и КО на следующей ступени.

При рассмотрении ВАХ исходных СД была выделена группа СД с подключением ОКУТ по линии «омический контакт – омический контакт». В этом случае прямая ветвь ВАХ уходит в ноль и тогда наклон ВАХ в области малых токов позволяет определить сопротивление ОКУТ, подключенное параллельно СД. СД с подобными ВАХ выявлены и при проведении ступенчатых испытаний.

Суммируем основные результаты исследования изменения формы прямой ветви ВАХ СД при эксплуатации. Установлено, что при эксплуатации СД развиваются как КО, так и ПО. Именно КО ограничивают ступенчатые испытания, что согласуется с результатами, опубликованными ранее [26,29]. Выявлено незначительное количество КО, обусловленных механическим разрушением корпуса, которые объясняются дефектами сборки диодов. КО, появляющиеся на ранних стадиях испытаний, характерны аномальным исходным СД, которые имеют большое сопротивление ОК или объемные каналы утечки тока. В этом случае развитие КО происходит вследствие ускорения диффузионных процессов при эксплуатации на границе «многослойный омический контакт – полупроводник», обусловленного дополнительным разогревом кристалла СД. Если исходные СД имели ОКУТ, то при ступенчатых испытаниях наблюдается снижение их проводимости, рост температуры кристалла, ускорение диффузионных процессов и развитие КО.

Развитию КО на более поздних стадиях испытаний способствует появление ОКУТ, что вызывает дополнительный рост температуры и ускоренную деградацию ОК.

3.3. Изменение светотехнических характеристик

Процесс снижения мощности излучения СД при ступенчатых испытаниях начинается практически с первых ступеней испытаний и продолжается вплоть до развития КО. Таким образом, именно КО ограничивают ступенчатые испытания. Рассмотрим изменение мощности излучения СД ИК при эксплуатации. Установлено, что весь объем испытуемых СД ИК по виду наблюдаемых зависимостей четко делится на три характерные группы (группа А – 35%; группа В – 25% и группа С – 40%). Рассмотрим результаты испытаний СД ИК, отнесенных нами к группе А, которые показаны на рисунке 3.11.

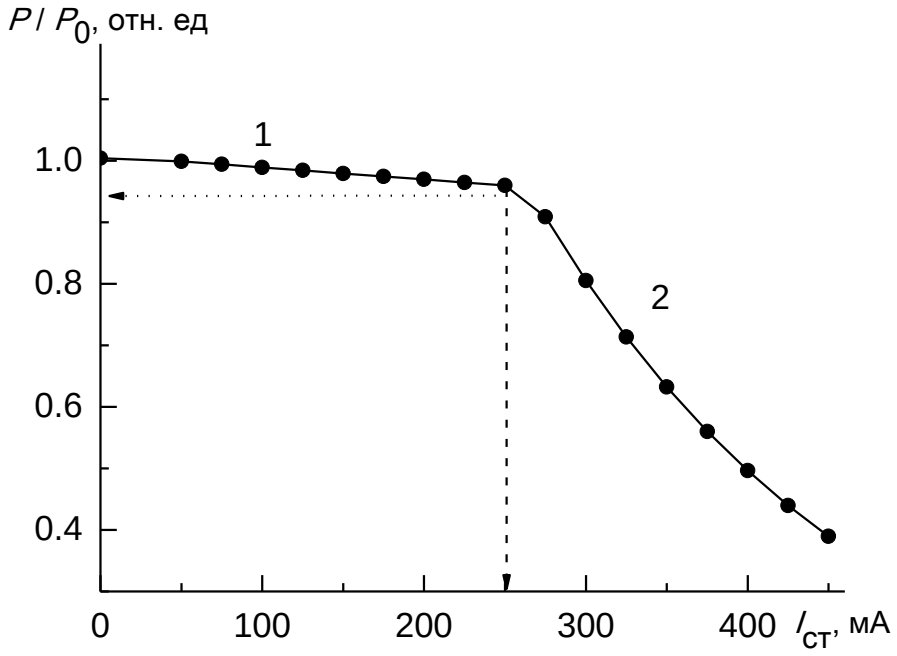


Рисунок 3.11 – Изменение мощности СД ИК группы А при рабочем токе 50 мА при ступенчатых испытаниях (шаг ступени 25 мА, температура +65 ^{0}C)

Видно, что снижение мощности при ступенчатых испытаниях СД ИК группы А происходит в 2 характерных этапа. Подобное поведение наблюдали ранее при исследовании снижения мощности излучения СД при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами [85-90]. При этом было установлено [85,89,90], что на первом этапе снижение мощности излучения при облучении гамма-квантами и быстрыми нейтронами обусловлено радиационно стимулированной перестройкой

исходной дефектной структуры. На втором этапе – снижение мощности излучения при облучении было обусловлено чисто радиационными дефектами. При этом авторы выделяли третий этап, при котором СД переходил в режим низкой инжекции электронов с последующим развитием КО.

Тогда для полученных нами результатов (см. рисунок 3.11) можно предположить следующую модель снижения мощности излучения в процессе эксплуатации СД типа А. На первом этапе ступенчатых испытаний снижение мощности излучения СД типа А происходит вследствие перестройки исходной дефектной структуры под действием эксплуатационных факторов. Тогда на втором этапе снижение мощности происходит вследствие введения новых структурных дефектов под действием факторов ступенчатых испытаний.

Полученные результаты (см. рисунок 3.11) позволяют ввести некоторые новые определения:

- граница между выделенными этапами снижения мощности (вертикальная стрелка на рисунке 3.11), с ростом температуры, при которой проводятся ступенчатые испытания, и с ростом шага испытаний она сдвигается влево;

- вклад первого этапа (горизонтальная стрелка на рисунке 3.11), величина которого возрастает с ростом температуры испытаний.

В этом случае снижение мощности излучения на первом этапе можно описать следующим соотношением

$$P_N / P_0 = A + B \cdot \exp(-k_1 \cdot N) \qquad (3.1)$$

где P_N / P_0 – относительное изменение мощности излучения СД после N-ой ступени испытаний;

B – вклад первого этапа в общее снижение мощности излучения;

А – вклад второго этапа снижения мощности, величина которого определяется формулой $A = 1 - B$;

k_1 – коэффициент повреждаемости, величина которого характеризует скорость снижения мощности излучения СД на первом этапе.

На втором этапе относительное изменение мощности излучения СД можно описать следующим соотношением

$$P_N / P_0 = (k_2 \cdot N)^{-\alpha} \qquad (3.2)$$

где k_2 – коэффициент повреждаемости, величина которого характеризует скорость снижения мощности излучения СД на втором этапе;

α – показатель степени, величина которого зависит от условий ступенчатых испытаний.

Подобные формулы могут быть записаны для любого значения рабочего тока, при котором измеряем мощность излучения СД. Т.е. используя соотношения (3.1, 3.2) получим соотношения, описывающие изменение ВтАХ в целом при ступенчатых испытаниях и, соответственно, при эксплуатации.

На рисунке 3.12 показаны результаты испытаний СД ИК, отнесенных к группам В и С.

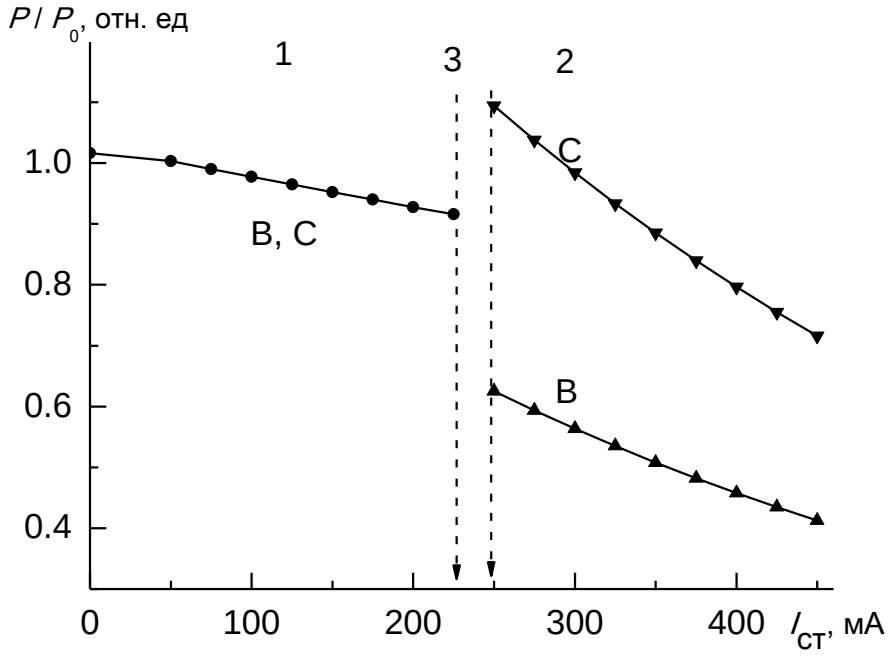


Рисунок 3.12 – Изменение мощности излучения СД групп В и С при ступенчатых испытаниях (шаг ступени 25 мА, температура +65 ^{0}С): 1 – первый этап снижения мощности; 2 – второй этап снижения мощности; вертикальные стрелки (область 3) – область переходных процессов

Для диодов СД ИК, отнесенных к данным группам, также выделяются два

характерных этапа снижения мощности. При этом снижение мощности излучения на первом этапе полностью соответствует наблюдаемому ранее для СД группы А. На втором этапе становятся явными различия для выявленных подгрупп. Группа В характерна тем, что вблизи границы между этапами, выделенными для группы А, происходит резкое скачкообразное снижения мощности излучения СД, в то время как для группы С наблюдается скачкообразное возрастание мощности излучения СД. Указанные процессы происходят в достаточно узкой области – области переходных процессов, которая показана на рисунке 3.12 вертикальными стрелками. Ширина области переходных процессов для индивидуальных СД варьируется в диапазоне (1 – 3) ступени испытаний. Описанный выше 2 этап снижения мощности излучения СД, отнесенных к группам В и С, подобно СД группы А, заканчивается деградацией омического контакта и последующим развитием КО. Особо отметим, что вблизи выявленной границы между этапами не наблюдается каких-либо аномалий на ВАХ.

Результаты, наблюдаемые для СД групп В и С можно объяснить существованием двух дефектов (или комплексов дефектов). Первый дефект является центром безызлучательной рекомбинации и его появление приводит к снижению мощности, а второй дефект является центром излучательной рекомбинации и его появление приводит к росту мощности излучения. Поскольку данные дефекты проявляются при достаточно близких условиях, то можно предполагать, что они должны иметь близкую природу (например, два квазистационарных состояния одного и того же дефекта). Исследование данного дефекта представляет особый интерес с научной точки зрения и с практической точки зрения.

Следует особо отметить, что для СД, отнесенных к группам В и С характерно аномально высокое содержание КО, как это показано на рисунке 3.13.

Рассмотрим результаты изменения мощности излучения СД на основе AlGaInP при ступенчатых испытаниях, которые показаны на рисунке 3.14. Видно, что для данных СД наблюдаются зависимости, идентичные по виду рассмотренным ранее зависимостям для СД ИК.

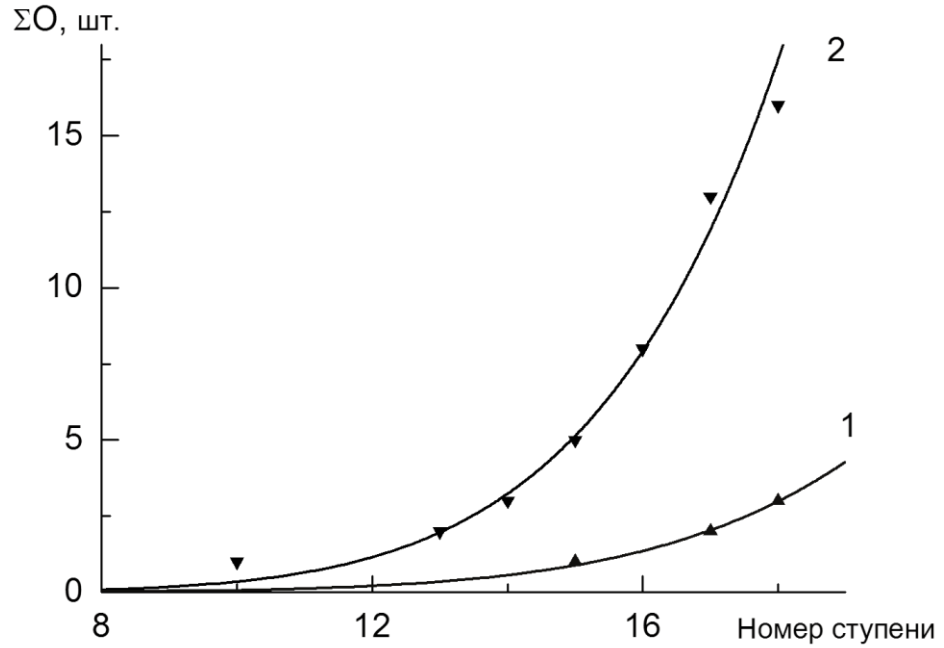


Рисунок 3.13 – Суммарное содержание КО для СД ИК различных групп в зависимости от номера ступени (шаг ступени 25 мА, температура +65 ^{0}С): 1 – СД группы А; 2 – СД групп В и С

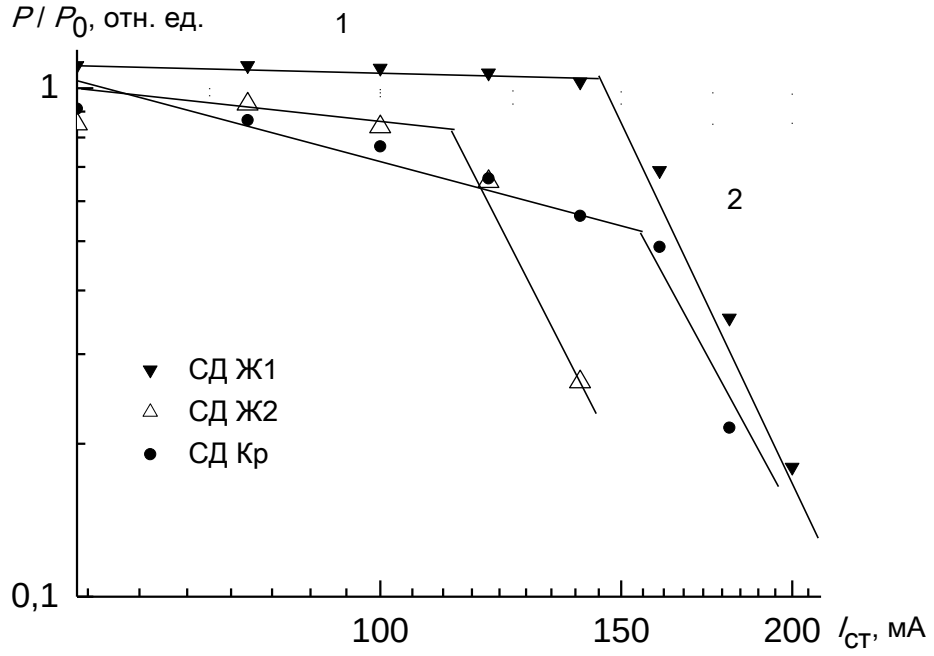


Рисунок 3.14 – Изменение мощности излучения СД на основе AlGaInP при ступенчатых испытаниях (шаг 20 мА, температура + 65 ^{0}С)

В данном случае, ступенчатые испытания были также ограничены КО.

Закономерности (3.1 и 3.2) позволяют описать полученные результаты и определить коэффициенты повреждаемости для этих СД.

Поскольку, установленные закономерности снижения мощности излучения СД при эксплуатации по своему характеру идентичны установленным ранее [85-90] закономерностям изменения мощности излучения СД при облучении, то можно прогнозировать воздействие эксплуатационных факторов по результатам исследования радиационной стойкости СД.

Если сопоставить вклад первого этапа снижения мощности излучения СД при облучении гамма-квантами [85,86] с вкладом первого этапа снижения мощности СД при ступенчатых испытаниях, то получим зависимость 1, которая показана на рисунке 3.15.

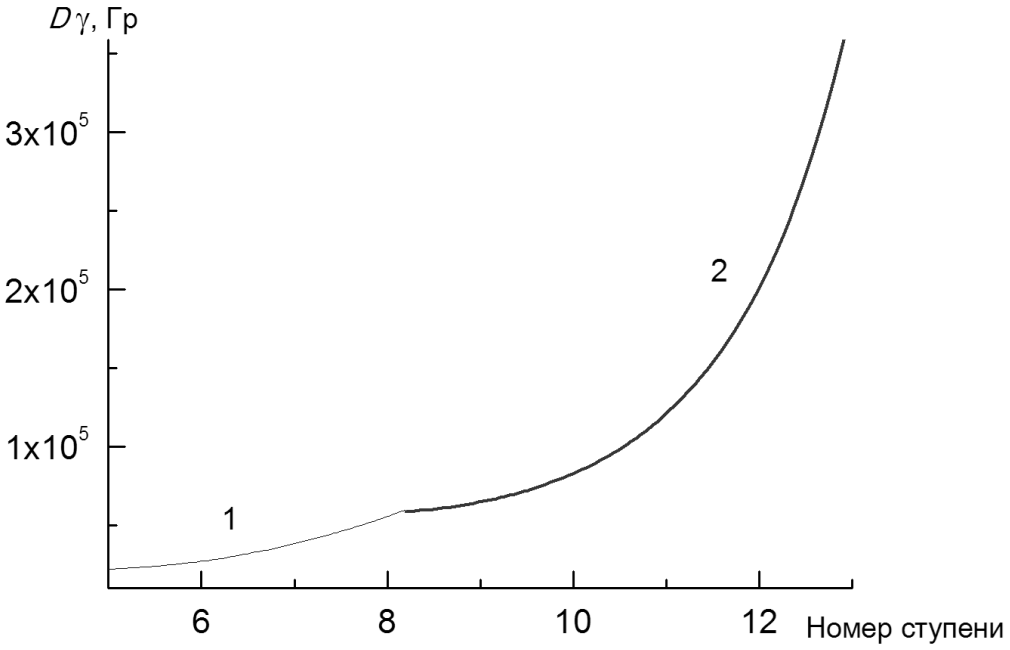


Рисунок 3.15 – Сопоставление действия облучения СД ИК гамма-квантами и ступенчатых испытаний (шаг ступени 25 мА, температура +65 ^{0}C)

Аналогичным образом, можно получить зависимость 2 (рисунок 3.15) для второго этапа снижения мощности излучения. Зависимости, которые показаны на рисунке 3.15, характерны для выбранного типа гетероструктуры. Поскольку

гетероструктура характеризуется собственным вкладом каждого из выявленных этапов, тогда, зная вклад этапов при облучении гамма-квантами и установленные коэффициенты пропорциональности (см. рисунок 3.15), можно прогнозировать изменение мощности при эксплуатации. На рисунке 3.16 показаны результаты прогнозирования изменения мощности излучения СД ИК при ступенчатых испытаниях в сопоставлении с экспериментальными результатами.

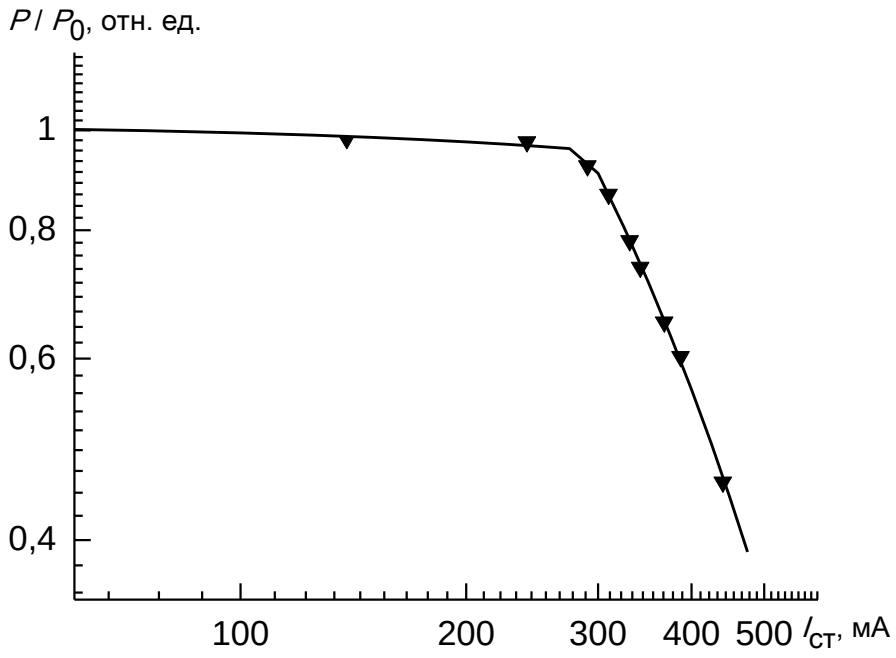


Рисунок 3.16 – Относительное изменение мощности излучения СД ИК при ступенчатых испытаниях: линия – расчет; символы - эксперимент

Рассмотрим изменение ВтАХ СД ИК при ступенчатых испытаниях. На рисунке 3.17 показано изменение ВтАХ СД ИК при ступенчатых испытаниях (зависимость II), здесь же представлены исходные ВтАХ (зависимость I). Из представленных результатов можно сделать следующие выводы. Во всем диапазоне рабочих токов наблюдается снижение мощности излучения СД с ростом номера ступени испытаний. Кроме того, по мере роста номера ступени на ВтАХ появляется в явном виде область низкой инжекции электронов в активный слой СД, которая характерна слабой зависимостью мощности излучения СД от величины рабочего тока (участок а, зависимость II, рисунок 3.17). При этом

область средней инжекции электронов смещается в область более высоких рабочих токов (участок b, зависимость II, рисунок 3.17), что приводит к сокращению области высокой инжекции электронов (область c, зависимость II, рисунок 3.17).

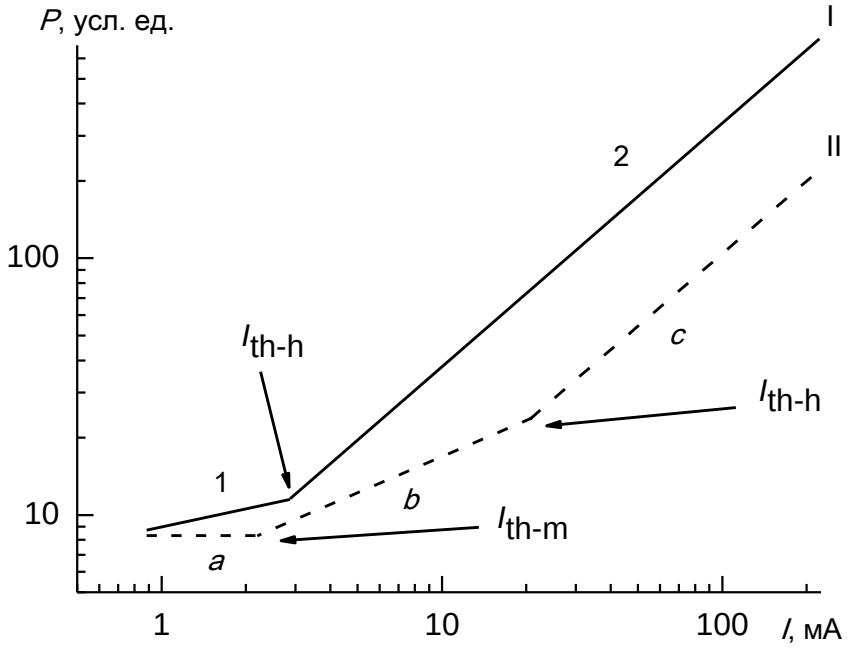


Рисунок 3.17 – ВтАХ для СД ИК: I – исходные, II – перед развитием катастрофических отказов; *a* – область низкой инжекции электронов; 1, *b* – область средней инжекции электронов; 2, *c* – область высокой инжекции в активный слой СД

Тогда, изменение ВтАХ в процессе эксплуатации можно характеризовать изменениями граничных токов – тока на границе области низкой и области средней инжекции электронов $I_{th\text{-}m}$ и тока $I_{th\text{-}h}$ на границе средней и высокой области инжекции электронов в активный слой СД.

Таким образом, представленные выше результаты позволяют предложить следующий механизм снижения мощности излучения СД в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации СД в результате введения различных дефектов в активную область СД происходит снижение мощности излучения, которое сопровождается появлением в явном виде области слабой инжекции электронов.

При этом с ростом времени эксплуатации растет граничный ток $I_{th\text{-}m}$, что сопровождается ростом граничного тока $I_{th\text{-}h.}$ В пределе наблюдается последовательное исчезновение в начале области высокой инжекции, а затем и области средней инжекции электронов.

Следует особо отметить, что подобной поведение ВтАХ СД наблюдалось ранее при исследовании радиационной стойкости СД [89,90], что свидетельствует об идентичности процессов, происходящих в активных слоях СД при эксплуатации и при воздействии ионизирующего излучения.

Выводы по главе 3

1. Наблюдаемые отказы при эксплуатации разделяются на две группы: катастрофические и параметрические отказы. При этом КО наблюдаются в основном при высоких уровнях воздействия и практически ограничивают ступенчатые испытания.
2. Для СД с аномально высоким сопротивлением ОК и объемными каналами утечки тока КО появляются на ранних стадиях ступенчатых испытаний.
3. При воздействии эксплуатационных факторов снижение мощности излучения светодиодов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP, сначала происходит в результате перестройки исходной дефектной структуры (первый этап). После ее завершения развиваются процессы формирования новых дефектов (второй этап). Увеличение дефектности кристаллической структуры в итоге приводит к катастрофическому отказу. Эти процессы идентичны процессам, наблюдаемым при воздействии ионизирующего излучения, что является основанием для разработки новых методов ускоренных испытаний светодиодов.
4. Установленные коэффициенты повреждаемости определяются типом гетероструктуры и позволяют прогнозировать изменение мощности излучения светодиодов при эксплуатации путем анализа характеристик исходных диодов.
5. В условиях повышенной температуры происходит интенсификация диффузионных процессов на границе «омический контакт – полупроводник» и в объеме активного слоя гетероструктуры, приводящих к росту сопротивления омических контактов и формированию объемных каналов утечки тока параллельно p-n-переходу, что приводит к изменению формы прямой ветви ВАХ. Этот факт дает основание использовать динамику изменения прямой ветви ВАХ для оценки вероятности катастрофических отказов при эксплуатации.
6. Полученные результаты позволяют сопоставить закономерности деградации критериальных параметров светодиодов при эксплуатации и при воздействии

ионизирующих излучений, как в области стимулированной воздействием перестройки исходной структуры дефектов, так и в области введения новых дефектов вследствие воздействия.

7. Установленные закономерности снижения мощности излучения светодиодов в результате воздействия эксплуатационных факторов позволяют прогнозировать их надежность по светотехническим и электрофизическим характеристикам исходных диодов.
8. Поскольку каждая из гетероструктур характеризуется собственным вкладом выявленных этапов, тогда, зная вклад этапов при облучении и установленные коэффициенты пропорциональности, можно прогнозировать изменение мощности при эксплуатации.
9. Изменение ВтАХ в процессе эксплуатации можно характеризовать изменениями граничных токов – тока на границе области низкой и области средней инжекции электронов $I_{\text{th-m}}$ и тока $I_{\text{th-h}}$ на границе средней и высокой области инжекции электронов в активный слой СД.

Глава 4. Комбинированное действие ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов на светодиоды

Установленные закономерности изменения мощности излучения при облучении гамма-квантами, быстрыми нейтронами и эксплуатационными факторами идентичны по происходящим процессам. Это позволяет предполагать, что надежность СД может быть повышена за счет снижения вклада первого этапа в общее изменение мощности при эксплуатации путем предварительного облучения.

4.1 Обоснование выбранных уровней воздействия предварительного облучения

Для проверки данной гипотезы рассмотрим влияние предварительного облучения гамма-квантами и быстрыми нейтронами на эксплуатационные свойства СД на основе гетероструктур AlGaAs. Прежде всего, необходимо обосновать уровень предварительного облучения. В работе [87] представлены результаты исследования изменения мощности излучения СД на основе AlGaAs при облучении гамма-квантами, при этом исследуемые СД были идентичны СД ИК. Установленная авторами зависимость снижения мощности излучения с ростом дозы облучения показана на рисунке 4.1. Авторами выделено 2 характерных этапа снижения мощности излучения СД, которые по своей сути идентичны этапам, выделенным при ступенчатых испытаниях (см. рисунок 3.11).

Первая доза облучения гамма-квантами выбрана таким образом, чтобы снижение мощности излучения в результате предварительного облучения соответствовало первому этапу снижения мощности излучения СД. А вторая доза предварительного облучения, в свою очередь, соответствовала второму этапу снижения мощности излучения исследуемых СД при облучении гамма-квантами. Тогда в результате исследований сформированных партий СД можно будет получить информацию о суммарном воздействии гамма-квантов и факторов

длительной наработки на эксплуатационные свойства СД.

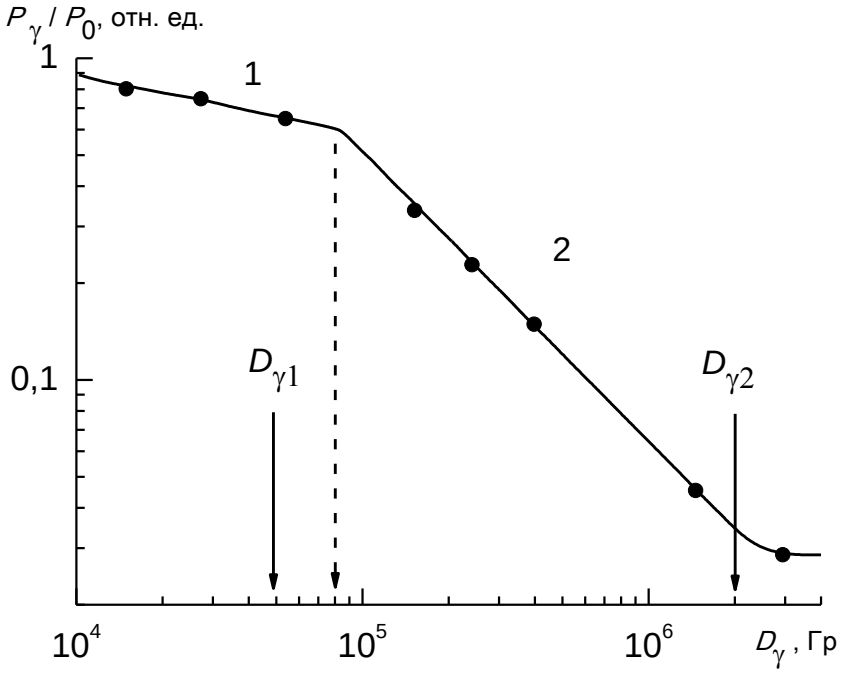


Рисунок 4.1 – Изменение мощности излучения СД на основе AlGaAs при облучении гамма-квантами: 1,2 – этапы снижения мощности излучения, стрелками показаны выбранные уровни предварительного облучения

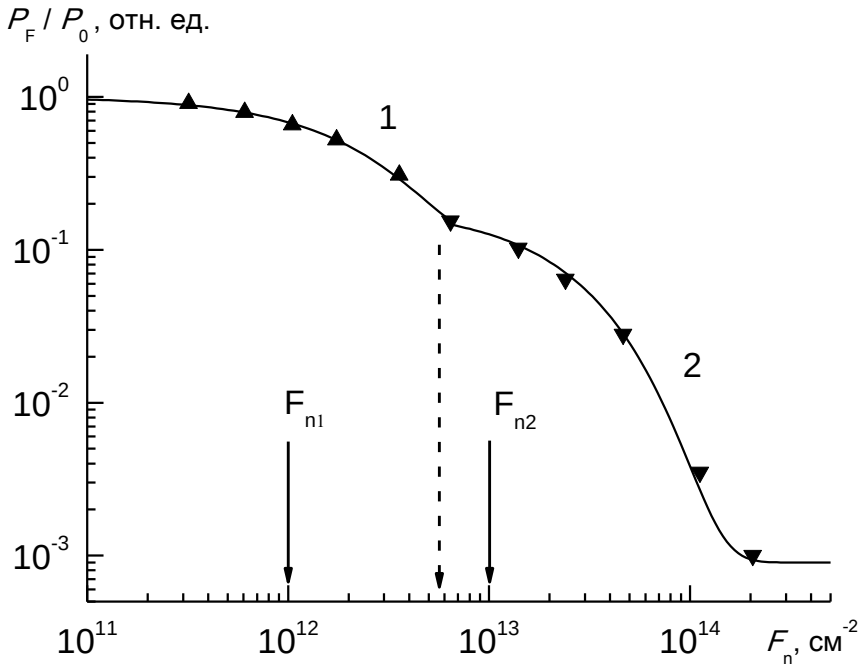


Рисунок 4.2 – Изменение мощности излучения СД на основе AlGaAs при облучении быстрыми нейтронами: 1,2 – этапы снижения мощности излучения, стрелками показаны выбранные уровни предварительного облучения

Аналогичным образом, используя известные данные для исследуемых СД [85,96,97] были выбраны флюенсы предварительного облучения быстрыми нейтронами, как это показано на рисунке 4.2.

Таким образом были сформированы 5 партий СД, как это показано в таблице 4.1 Наблюдаемое после предварительного облучения снижение мощности излучения устраняли проведением токовой тренировки (см. таблицы 4.2 и 4.3).

Предварительное облучение гамма-квантами ^{60}Co и быстрыми нейтронами проводили в пассивном режиме питания СД, то есть без наложения внешних электрических полей.

Таблица 4.1 – Уровни предварительного облучения для исследуемых партий

Партия СД	Предварительное облучение	Уровень облучения
СД ИК-1	нет	-
СД ИК-2	Гамма-кванты, $D_{\gamma 1}$, Гр	$5 \cdot 10^4$
СД ИК-3	Гамма-кванты, $D_{\gamma 2}$, Гр	$2 \cdot 10^6$
СД ИК-4	Быстрые нейтроны, F_{n1}, нейтрон/см^2	10^{12}
СД ИК-5	Быстрые нейтроны, F_{n2}, нейтрон/см^2	10^{13}

4.2 Влияние гамма-облучения на эксплуатационные характеристики светодиодов

Перейдем к рассмотрению предварительно облученных гама-квантами партий СД. На рисунке 4.3 представлено изменение ВАХ для партии СД ИК-2. Данные СД были предварительно облучены гамма-квантами ^{60}Co дозой $5 \cdot 10^4$ Гр, что соответствует первому этапу снижения мощности излучения при облучении СД. Как видно из рисунка 4.3, практически отсутствуют существенные изменения вида ВАХ. При этом отметим, что наблюдаемые незначительные изменения ВАХ статистически значимы. Но в настоящее время мы не можем их объяснить.

Таким образом, сопоставление результатов, представленных на данном рисунке, с результатами, представленными на рисунке 3.11, позволяют сделать вывод о том, что в данном случае вероятность развития КО не связана с ускоренной деградацией омических контактов. Развитие КО в данном случае определяется только температурой активной области СД.

Тогда получаем, что выключение (частичное или полное) стадии снижения мощности излучения при ступенчатых испытаниях за счет перестройки исходной дефектной структуры предварительным облучением гамма-квантами позволяет повысить надежность СД за счет повышения надежности омических контактов. Следовательно, можно сделать вывод о том, что такое предварительное облучение гамма-квантами с выбранной дозой облучения позволяет свести к минимуму дополнительный вклад омических контактов в вероятность развития КО при ступенчатых испытаниях.

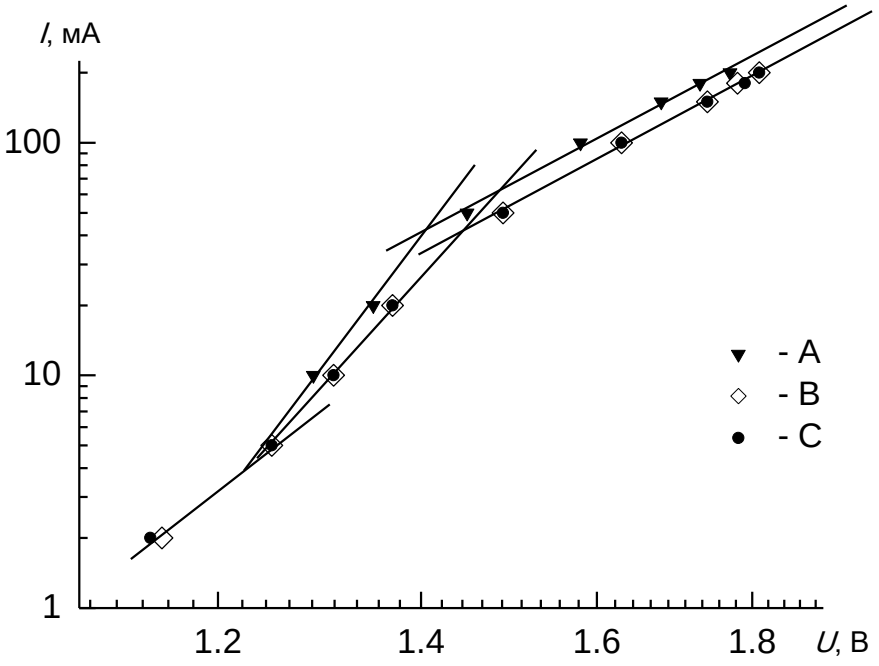


Рисунок 4.3 – Изменение ВАХ СД ИК-2 при ступенчатых испытаниях: А – исходная ВАХ, В – в процессе ступенчатых испытаний; С – перед развитием КО.

Рассмотрим изменения ВАХ СД ИК-3 при ступенчатых испытаниях, которые представлены на рисунке 4.2. В данном случае наблюдается заметное смещение ВАХ в сторону больших напряжений вследствие воздействия предварительного облучения гамма-квантами.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранная доза предварительного облучение гамма-квантами приводит к ускоренной деградации омических контактов. И только на ступенях, предшествующих развитию КО наблюдается снижение сопротивления омических контактов. Можно предполагать, что данный процесс обусловлен частичным отжигом при соответствующих температурах радиационных дефектов, ответственных за деградацию омических контактов.

Кроме того, представленные на рисунке 4.4 результаты позволяют предполагать появление КО на более ранних ступенях испытаний.

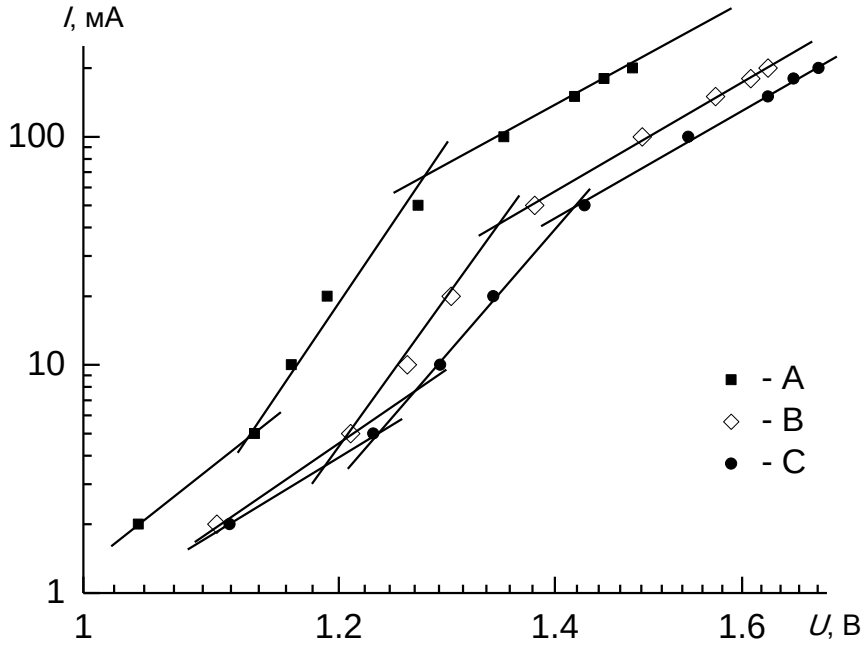


Рисунок 4.4 – Изменение ВАХ СД ИК-3 при ступенчатых испытаниях: А – исходная ВАХ, В – в процессе ступенчатых испытаний; С – перед развитием КО.

Рассмотрим каким образом предварительное облучение гамма-квантами влияет на вероятность развития КО в процессе длительной эксплуатации. На рисунке 4.5 показана зависимость накопленного количества КО от номера ступени испытаний для исследуемых партий СД.

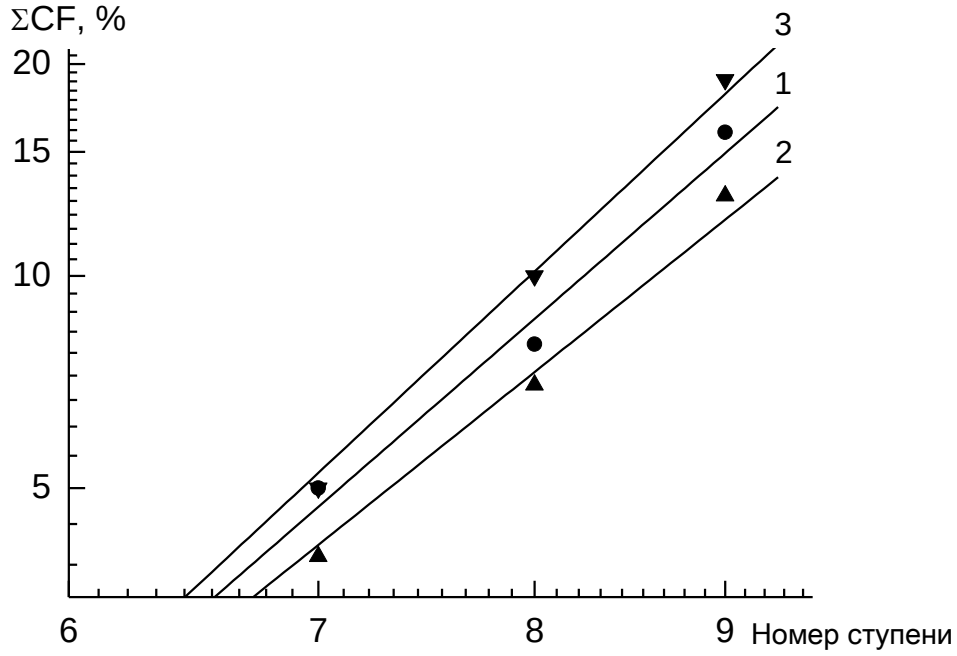


Рисунок 4.5 – Влияние предварительного облучения гамма-квантами от дозы облучения на развитие КО в зависимости номера ступени: 1 – СД ИК-1; 2 – СД ИК-2; 3 – СД ИК-3.

Представленные результаты однозначно подтверждают выводы, полученные ранее по результатам анализа изменения ВАХ исследуемых партий СД. Вероятность развития КО при ступенчатых испытаниях определяется ростом сопротивления омических контактов и температурой активной области СД.

Предварительное облучение СД гамма-квантами в области доз, которая соответствует радиационно-стимулированной перестройке исходной дефектной структуры, позволяет повысить стойкость омических контактов к воздействию факторов длительной наработки и, таким образом, снизить вероятность развития КО на ранних стадиях ступенчатых испытаний и повысить надежность СД.

Предварительное облучение гамма-квантами дозами в области снижения мощности излучения СД вследствие введения радиационных дефектов приводит к деградации омических контактов и повышению вероятности развития КО на ранних стадиях ступенчатых испытаний и, следовательно, к снижению надежности СД.

Полученные результаты позволяют рекомендовать предварительное облучение гамма-квантами в технологии изготовления СД для улучшения их эксплуатационных показателей, но при условии использования доз облучения в строго регламентированной области радиационно-стимулированной перестройки исходной дефектной структуры.

Рассмотрим влияние предварительного облучения гамма-квантами на надежность СД (партии СД ИК-2 и СД ИК-3). Напомним, что партии различаются дозой предварительного облучения гамма-квантами ^{60}Co.

Анализ ВАХ до и после облучения для СД ИК-2 и СД ИК-3 показал отсутствие заметных изменений. Это позволяет сделать вывод о том, что облучение гамма-квантами в выбранном диапазоне доз не приводит к изменению электрофизических характеристик активного слоя СД, омических контактов и дислокаций.

На рисунке 4.6 показано изменение ВтАХ для СД ИК-2 после облучения. Видно, что для данной партии СД наблюдается полное восстановление ВтАХ после токовой тренировки.

Рассмотрим действие гамма-квантов на ВтАХ СД ИК-3. На рисунке 4.7 показано изменение ВтАХ в результате облучения для СД ИК-3. Видно, что на ВтАХ в явном виде появляется область низкой инжекции электронов (область a, рисунок 4.7), область средней инжекции сдвигается в область более высоких рабочих токов (область b, рисунок 4.7), а область сильной инжекции сокращается (область c, рисунок 4.7). Таким образом, наблюдается характерное изменение ВтАХ.

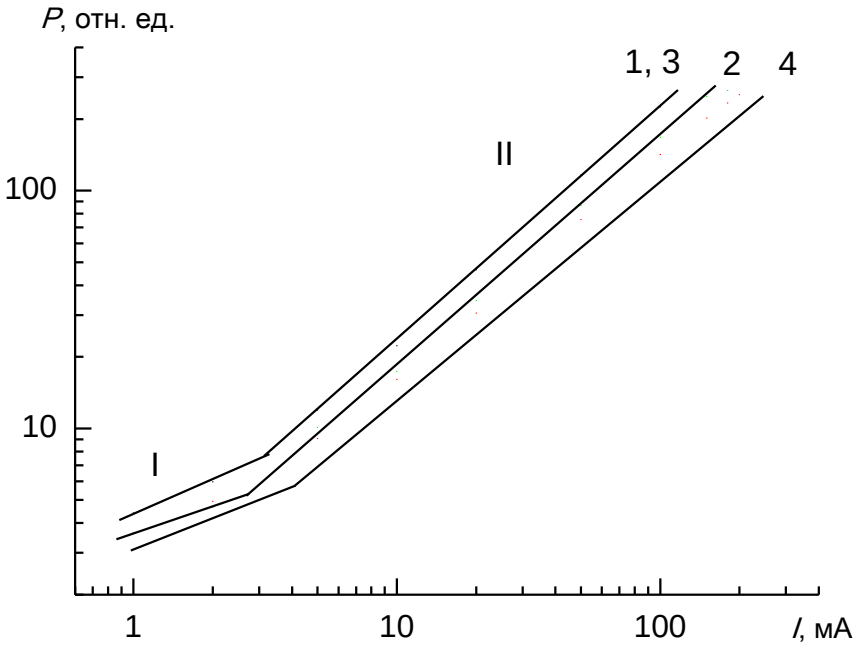


Рисунок 4.6 – ВтАХ для партии СД ИК-2: 1 – исходные СД; 2 – после предварительного облучения; 3 – после токовой тренировки; 4 – перед развитием КО; I – область средней инжекции электронов; II – область высокой инжекции электронов.

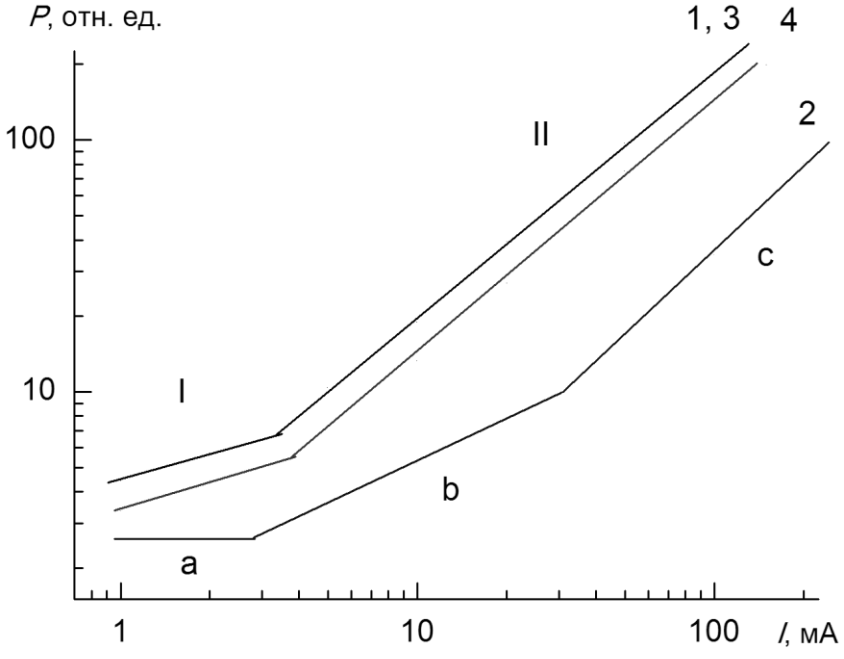


Рисунок 4.7 – ВтАХ для партии СД ИК-3: 1 – исходные; 2 – после предварительного облучения; 3 – после токовой тренировки; 4 – перед развитием катастрофических отказов; a – область низкой инжекции электронов в активный слой; b – область средней инжекции; II, c – область высокой инжекции.

Рассмотрим результаты влияния предварительного облучения первой дозой гамма-квантов на изменение мощности излучения СД при ступенчатых испытаниях. В данном случае исследуемая партия СД распадается на 2 характерные подгруппы. Первая подгруппа характерна тем, что для нее наблюдается двух стадийный процесс снижения мощности излучения СД при ступенчатых испытаниях, при этом каждая из подгрупп характеризуется собственным вкладом первого этапа, как это показано на рисунке 4.8. Видно, что зависимости СД ИК-2а имеют один и тот же вид, но отличаются вкладом первого этапа в общее снижение мощности излучения.

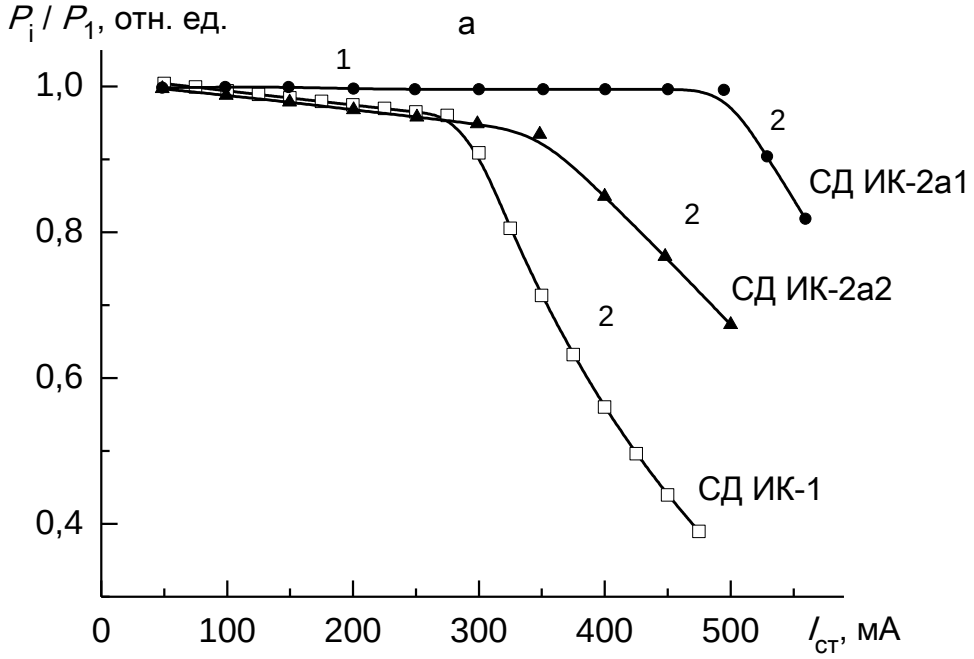


Рисунок 4.8 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для различных партий СД ИК при облучении первой дозой гамма-квантов: 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-1 – без предварительного облучения; СД ИК-2а1, СД ИК-2а2 – выделенные подгруппы.

Вторая характерная подгруппа СД ИК-2б отличается полным отсутствием первого этапа снижения мощности излучения, но при этом распадается на 2 характерные подгруппы, каждая из которой имеет собственный коэффициент повреждаемости при ступенчатых испытаниях (рисунок 4.9). Из представленных

на рисунках 4.8 и 4.9 результатов, можно сделать вывод о том, что предварительное облучение гамма-квантами позволяет снизить вклад первого этапа (вплоть до его полного исключения для СД-2а1) в общее снижение мощности излучения при ступенчатых испытаниях.

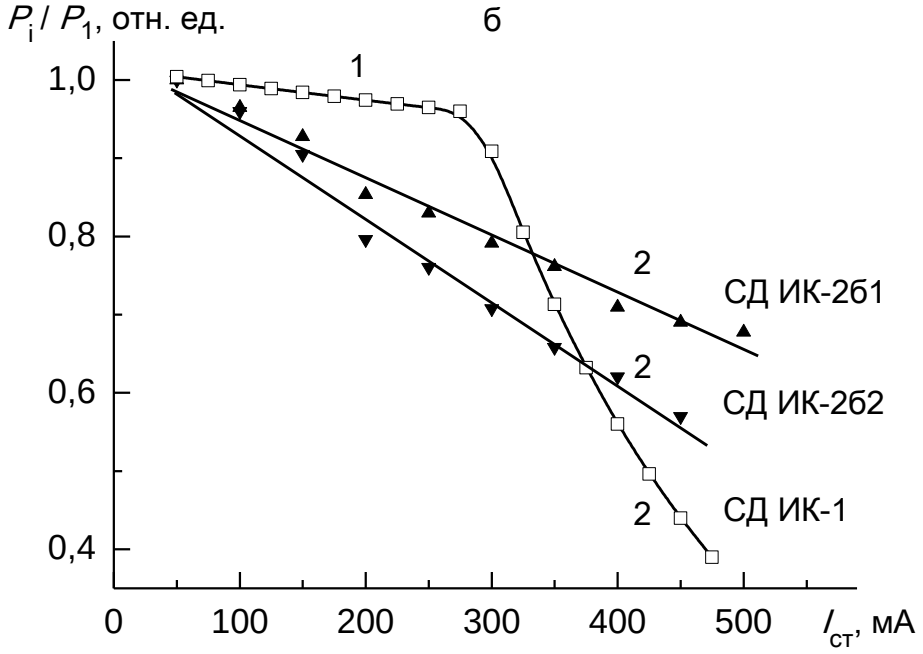


Рисунок 4.9 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для различных партий СД ИК при облучении первой дозой гамма-квантов: 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-1 – без предварительного облучения; СД ИК-2b1, СД ИК-2b2 – выделенные подгруппы.

На рисунке 4.10 представлены результаты ступенчатых испытаний СД ИК-3 после предварительного облучения второй дозой гамма-квантов. Видно, что после проведения токовой тренировки мощность излучения приборов из партии СД ИК-3 (подобно СД ИК-2) практически полностью возвращается к исходной, как это показано в таблице 4.2, несмотря на то, что после предварительного облучения наблюдалось существенное снижение мощности излучения. Видно, что при ступенчатых испытаниях наблюдается как снижение мощности излучения, так и ее восстановление. При этом проявляются три характерные стадии восстановления мощности, которые можно связать с отжигом соответствующих

дефектов или их комплексов.

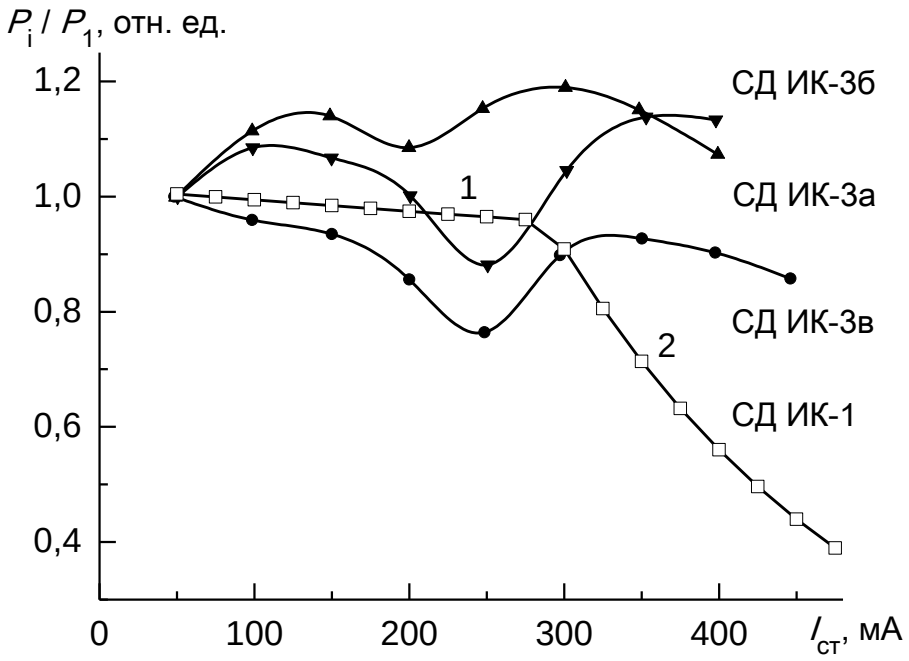


Рисунок 4.10 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний СД ИК при облучении второй дозой гамма-квантов: СД ИК-1 – без предварительного облучения; 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-3а, СД ИК-3б, СД ИК-3в – выделенные подгруппы.

Данная партия СД ИК-3 распадается на три характерные подгруппы, каждая из которых характеризуется собственным уровнем восстановления мощности излучения на первом этапе ступенчатых испытаний. Далее рассмотрены особенности изменения формы ВтАХ. В таблице 4.2 суммированы результаты ступенчатых испытаний СД ИК, подвергнутых предварительному облучению гамма-квантами.

Таблица 4.2 – Изменение уровня мощности излучения светодиодов для партий с предварительным облучением гамма-квантами

Стадия исследования	Уровень мощности излучения, % от исходного							
	СД ИК-1	СД ИК-2				СД ИК-3		
		СД ИК-2а		СД ИК-2б		а	б	в
		а1	а2	б1	б2			
Предварительное воздействие								
После предварительного облучения гамма-квантами	-	95				8		
После токовой тренировки	-	102				97		
Ступенчатые испытания								
Перед развитием катастрофических отказов	39	82	67	65	56	107	136	85
Ток ступени появления катастрофических отказов (I_{stepi}, mA)	475	550	500	500	450	400	400	450

Установлено, что предварительное обучение гамма-квантами дозой, соответствующей первому этапу снижения мощности излучения снижает вероятность развития КО, а для второй дозы облучения гамма-квантами наблюдается повышение вероятности развития КО. В таблице 4.2 также представлены результаты изменения коэффициенты повреждаемости и вероятности развития КО с и без предварительного облучения гамма-квантами. Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что предварительное облучение оптимальными дозами гамма-квантами, позволяет практически полностью исключить вклад первого этапа снижения мощности при эксплуатации и снизить вероятность развития КО. Кроме того, установлено, что предварительное облучение оптимальными дозами гамма-квантов позволяет существенно снизить вероятность развития ПО.

4.3 Влияние облучения быстрыми нейтронами на эксплуатационные характеристики светодиодов

Перейдем к рассмотрению результатов ступенчатых испытаний для партии СД ИК4. Как и в предыдущем случае заметных изменений ВАХ при ступенчатых испытаниях партии СД-ИК-4 не выявлено. Только на стадиях, предшествующих КО, на ВАХ наблюдается заметный рост сопротивления омических контактов.

На рисунок 4.11 представлены ВтАХ для партии СД ИК-4 на различных стадиях ступенчатых испытаний.

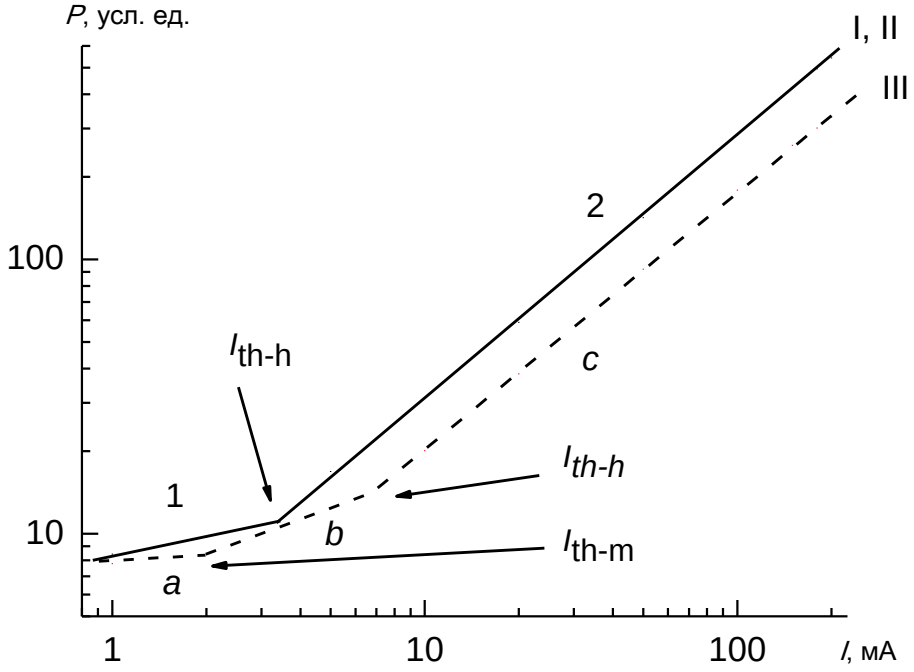


Рисунок 4.11 – ВтАХ, характерные для СД ИК-4: I, II – начальная ВтАХ и ВтАХ после предварительного облучения и токовой тренировки; III – ВтАХ, наблюдаемая на ступени испытаний, которая предшествует КО; a – область низкой инжекции электронов; 1, b – область средней инжекции электронов; 2, c – область высокой инжекции электронов в активный слой СД.

Видно, что для данной партии СД предварительное облучение быстрыми нейтронами с последующим отжигом не приводит к изменению ВтАХ.

В процессе испытаний на ВтАХ СД партии СД ИК-4 наблюдаются

следующие изменения:

- появляется область низкой инжекции электронов;
- области среднего и высокого уровня инжекции электронов сдвигаются в сторону более высоких токов.

Кроме того, видно, что если в области сильной инжекции электронов наклон ВтАХ в процессе испытаний остается практически без изменений, то в области средней инжекции наблюдается увеличение наклона ВтАХ. Напомним, что подобное изменение наклона ВтАХ наблюдалось нами ранее для партии СД ИК-1.

Для партии СД ИК-5 наблюдались изменения ВАХ, идентичные изменениям, описанным ранее для СД ИК-1 и СД ИК-4. Аналогичным образом, перед развитием КО наблюдается заметный рост сопротивления омических контактов.

На рисунке 4.12 показана типичная ВтАХ СД партии СД ИК-5, которая измерена после предварительного облучения и отжига (зависимость II, рисунок 4.12). Здесь же показана ВтАХ исходных СД (зависимость I, рисунок 4.12). Из представленных результатов видно, что внешний вид ВтАХ СД партии СД ИК-5 существенно отличается от вида ВтАХ исходных СД.

В случае СД партии СД ИК-5 уже после предварительного облучения быстрыми нейтронами и последующего отжига выделяются три характерные области инжекции электронов в активный слой СД, как это показано на рисунке 4.12. При этом наблюдается существенное снижение мощности излучения во всем диапазоне рабочих токов. Следует отметить, что для данной партии СД характерно появление области низкой инжекции электронов уже после предварительного облучения нейтронами, при этом она сохраняется и после токовой тренировки. Для ранее рассмотренных партий СД область низкой инжекции электронов появлялась только непосредственно перед развитием КО.

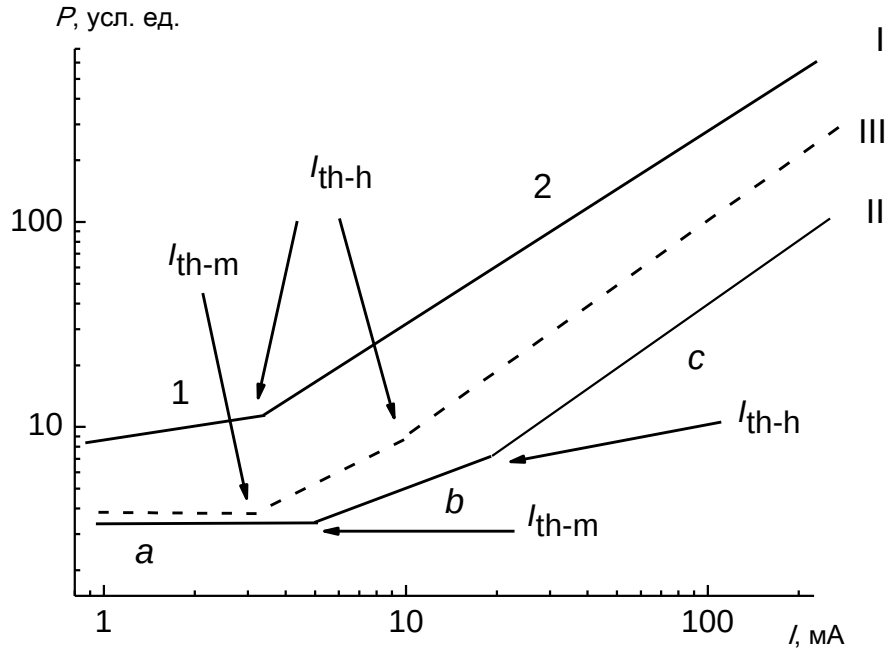


Рисунок 4.12 – Типичная ВтАХ, характерная для СД ИК-5 при ступенчатых испытаниях: I – начальная ВтАХ, II – ВтАХ после предварительного облучения нейтронами; III – ВтАХ, наблюдаемая на ступени испытаний, которая предшествует КО; a – область слабой инжекции электронов в активную область, 1, b – область средней инжекции электронов, 2, c – область сильной инжекции электронов.

В процессе ступенчатых испытаний СД партии СД ИК-5 наблюдается постепенное восстановление мощности излучения с ростом номера ступени, при этом практически объединяются области средней и высокой инжекции электронов.

Таким образом, в результате ступенчатых испытаний СД партии СД ИК-5 установлено восстановление формы ВтАХ и частичное восстановление мощности излучения СД во всем диапазоне рабочих токов.

В таблице 4.1 представлены выбранные уровни воздействия быстрых нейтронов. А в таблице 4.3 показано изменение уровня мощности излучения на различных стадиях данных исследований.

Таблица 4.3 – Изменение уровня мощности излучения светодиодов для партий с предварительным облучением быстрыми нейтронами

Стадия исследования	Уровень мощности излучения, % от исходного				
	СД-1	СД-4		СД-5	
		а	б	а	б
Предварительное воздействие					
После предварительного облучения нейтронами	-	95		14	
После токовой тренировки	95	111		32	
Ступенчатые испытания					
Перед развитием катастрофических отказов	39	88	73	353	284
Ток ступени появления катастрофических отказов (I_{stepi}, mA)	475	500		425	

На рисунках 4.13 и 4.14 показано изменение мощности излучения СД ИК в зависимости от ступени испытаний с предварительным облучением быстрыми нейтронами. Вначале рассмотрим изменение мощности для СД ИК-4 (рисунок 4.13).

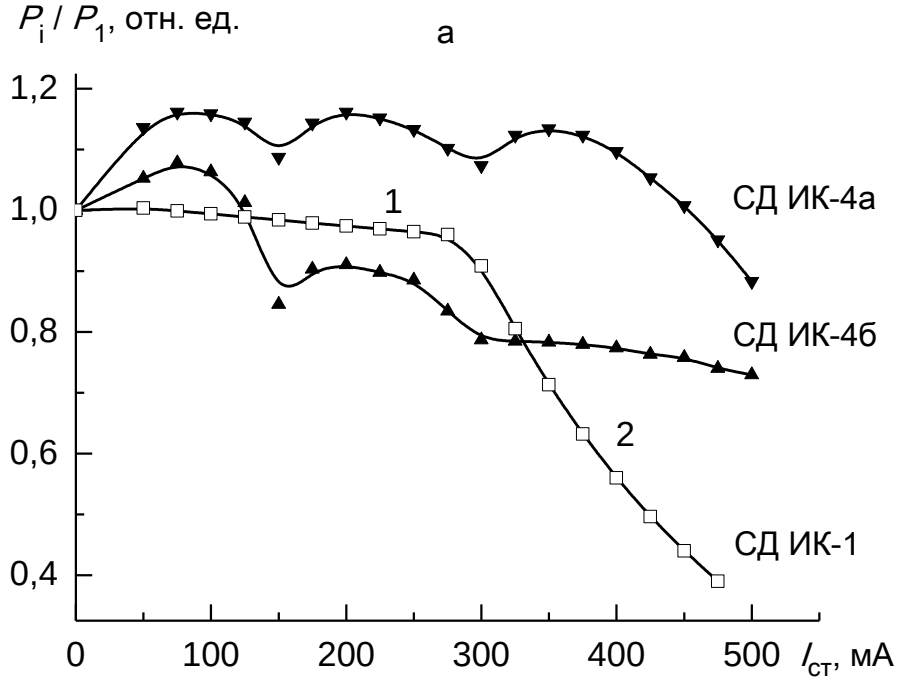


Рисунок 4.13 – Изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для СД ИК при облучении первым флюенсом быстрых нейтронов: 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-1 – без предварительного облучения; СД ИК-4а, СД ИК-4а – выделенные подгруппы

В данном случае в качестве начального значения использовали значение мощности излучения после проведения токовой тренировки. Видно, что наблюдается как снижение мощности излучения, так и ее восстановление. При этом наблюдается три характерные стадии восстановления мощности, которые можно связать с отжигом соответствующих дефектов или их комплексов.

При этом, вся партия СД ИК-4 разделяется на две характерные группы:

- группа СД ИК-4а (55%) – максимальное восстановление мощности излучения (рисунок 4.13, зависимость СД ИК-4а);
- группа СД ИК-4б (45%) – минимальное восстановление мощности излучения (рисунок 4.13, зависимость СД ИК-4б).

Как и в случае СД ИК-2 заметных изменений ВАХ при ступенчатых испытаниях партии СД ИК-4 не выявлено. Только на стадиях, предшествующих КО, на ВАХ наблюдается заметный рост сопротивления ОК и/или подключение дислокаций параллельно p-n-переходу СД. При этом можно сделать вывод о том, что применение предварительного облучения быстрыми нейтронами снижает вероятность развития ПО. Также наблюдается снижение вероятности развития КО. В процессе роста номера ступеней испытаний на ВтАХ СД партии СД ИК-4 наблюдаются области инжекции электронов, характеризуемые собственным наклоном ВтАХ. При этом в области сильной инжекции наклон ВтАХ в процессе ступенчатых испытаний остается практически без изменений. Напомним, что подобное изменение наклона ВтАХ наблюдалось нами ранее для партии СД ИК-1.

В случае СД ИК-5 уже после предварительного облучения быстрыми нейтронами и последующей токовой тренировки на ВтАХ выделяются три характерные области инжекции электронов в активный слой СД, каждый из которых характеризуется собственным наклоном. При этом наблюдается существенное снижение мощности излучения во всем диапазоне токов. Подобные области инжекции электронов проявлялись ранее при ступенчатых испытаниях только непосредственно перед развитием КО.

На рисунке 4.14 показана зависимость изменения мощности излучения СД ИК-5 от номера ступени. Видно, что данная партия распадается на две

характерные группы:

- группа СД ИК-5а (70%) – наблюдаются две характерные стадии восстановления мощности излучения, которые можно связать с отжигом соответствующих дефектов или их комплексов (рисунок 4.14, зависимость СД ИК-5а);
- группа СД ИК-5б (30%) – отсутствует первая стадия восстановления мощности излучения, но при этом в явном виде проявляется вторая стадия восстановления мощности излучения (рисунок 4.14, зависимость СД ИК-5а).

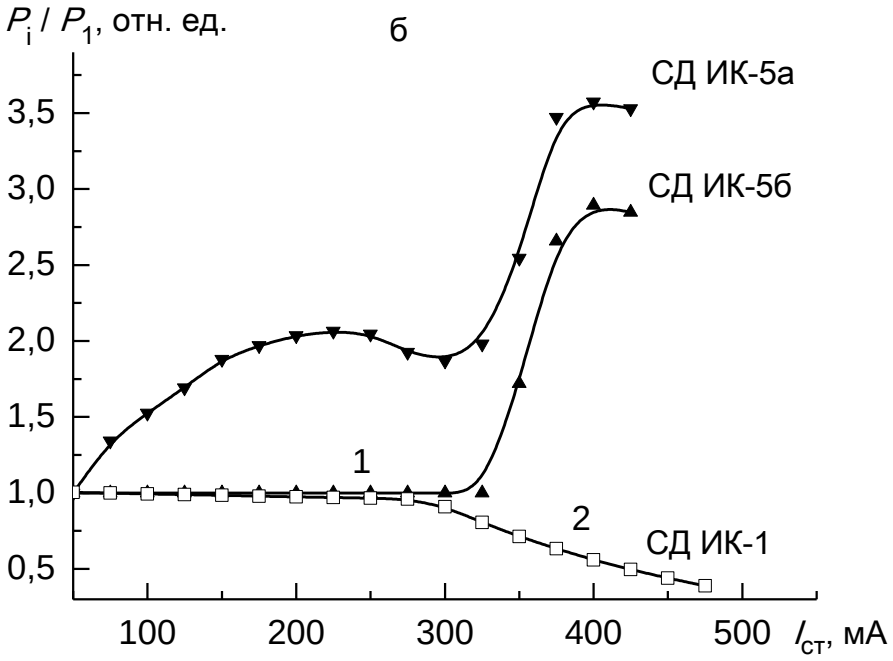


Рисунок 4.14 – Изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для СД ИК при облучении вторым флюенсом быстрых нейтронов: 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-1 – без предварительного облучения; СД ИК-5а, СД ИК-5б – выделенные подгруппы.

Кроме того, видно, что наблюдаемое в данном случае восстановление мощности излучения СД происходит в два этапа, что свидетельствует об отжиге двух типов дефектов и/или их комплексов в процессе ступенчатых испытаний. Анализ ВАХ показал, что для СД партии СД ИК-5 рост сопротивления ОК проявляется во всех случаях только на ступени предшествующей появлению КО.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для данной партии СД наблюдается рост вероятности развития КО, но при этом наблюдается существенное снижение вероятности развития ПО.

4.4 Контроль изменения граничного тока как способ прогнозирования и повышения надежности светодиодов при эксплуатации

Рассмотрим изменения граничного тока между областями средней и высокой инжекции электронов на ВтАХ в течение длительной эксплуатации для СД из разных партий. Прежде всего мы рассмотрим изменение данного граничного тока при эксплуатации, а затем определим его поведение вследствие предварительного облучения быстрыми нейтронами. Данные исследования позволят нам оценить влияние предварительного облучения на изменение формы ВтАХ.

4.4.1 Контроль изменения граничного тока для СД партии СД ИК-1

На рисунке 4.15 показано изменение граничного тока $I_{th\text{-}h}$ для СД партии СД ИК-1 в процессе ступенчатых испытаний.

Из рисунка видно, что с ростом номера ступени наблюдается соответствующий рост данного граничного тока $I_{th\text{-}h}$. При этом в явном виде можно выделить два характерных участка роста граничного тока $I_{th\text{-}h}$ (1,2 на рисунке 4.15). На первом участке наблюдается незначительный рост граничного тока $I_{th\text{-}h}$ (ток возрастает в ~ 1,75 раза к 13 ступени испытаний). В то время как на втором участке наблюдается существенный рост граничного тока $I_{th\text{-}h}$, который возрастает в ~ 4 раза на участке от 13 до 18 ступени.

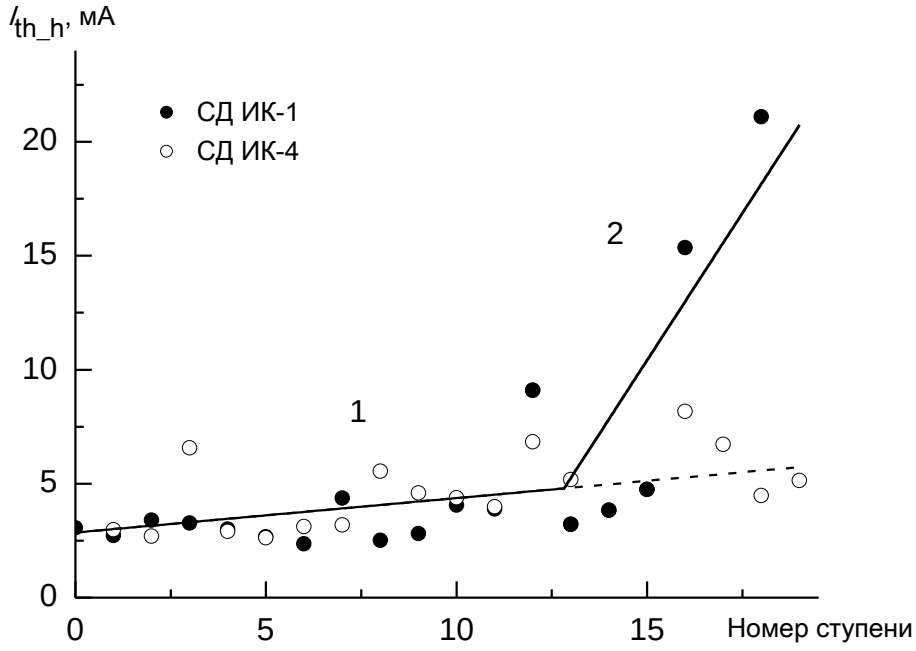


Рисунок 4.15 – Изменение граничного тока $I_{th\text{-}h}$ в зависимости от номера ступени для СД партии СД ИК-1 и партии СД-ИК ИК-4

Анализ ВАХ СД партии СД ИК-1 показал, что участок с высокой скоростью роста граничного тока между областями средней и высокой инжекциями электронов появляется вследствие деградации омических контактов, что в итоге приводит к развитию КО.

Таким образом, установлено, что рост сопротивления омических контактов СД сопровождается резким ростом граничного тока между выделенными в данной работе областями средней и высокой инжекции электронов на ВтАХ.

4.4.2 Изменение граничного тока $I_{th\text{-}h}$ для СД партии СД ИК-4

Рассмотрим изменения граничного тока $I_{th\text{-}h}$ для СД партии СД ИК-4, которые показаны на рисунке 4.15. Видно, что в процессе ступенчатых испытаний СД партии СД-2 наблюдается только незначительный рост граничного тока $I_{th\text{-}h}$ с ростом номера ступени. При этом полностью отсутствует второй участок роста

граничного тока $I_{th\text{-}h}$, который наблюдался ранее для СД партии СД ИК-1 (см. рисунок 4.15). Граничный ток $I_{th\text{-}h}$ в процессе испытаний возрастает в ~ 2,2 раза.

Кроме того, анализ ВАХ показал, что для СД партии СД ИК-4 рост сопротивления омических контактов проявляется во всех случаях только на ступени предшествующей появлению КО, что является существенным отличием от результатов исследований, полученных для СД партии СД ИК-1.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предварительное облучение СД быстрыми нейтронами флюенсом F_{n1} повышает радиационную стойкость их омических контактов и, следовательно, их надежность при эксплуатации.

4.4.3 Контроль изменения граничного тока для СД партии СД ИК-5

Перейдем к рассмотрению изменения граничного тока $I_{th\text{-}h}$ при ступенчатых испытаниях для СД партии СД ИК-5, которое показано на рисунке 4.16 (зависимость А). Видно, что характер зависимости граничного тока $I_{th\text{-}h}$ существенным образом отличается от результатов ступенчатых испытаний рассмотренных ранее. В данном случае наблюдается снижение уровня граничного тока с увеличением номера ступени испытаний в ~ 2 раза, что является существенным отличием для СД партии СД-3 по сравнению с СД партий СД ИК-1 и СД ИК-4. Можно утверждать, что основной причиной такого поведения граничного тока $I_{th\text{-}h}$ является отжиг радиационных дефектов при ступенчатых испытаниях, о чем свидетельствует частичное восстановление ВтАХ.

Анализ развития КО для СД партии СД ИК-5 показал, что они проявляются на более ранних ступенях испытаний, что свидетельствует о снижении их надежности. Анализ ВАХ СД партии СД ИК-5 показал, что наблюдается рост сопротивления омических контактов намного раньше развития КО. При этом установлено, что рост сопротивления омических контактов для СД партии СД ИК-5 наблюдается на более ранних ступенях испытаний по сравнению с СД партии СД ИК-1.

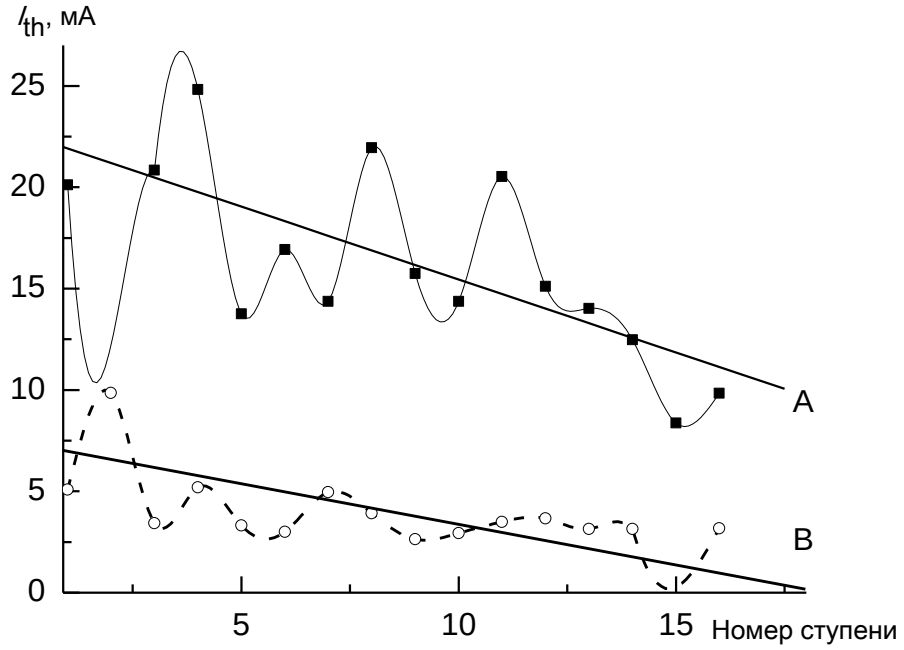


Рисунок 4.16 – Изменение граничного тока между областями инжекции электронов в активный слой СД в зависимости от номера ступени для партии СД-ИК-5: А – между высокой и средней областями инжекции, В – между средней и низкой областями инжекции

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предварительное облучение СД быстрыми нейтронами флюенсом F_{n2} снижает радиационную стойкость их омических контактов и, следовательно, их надежность при эксплуатации.

4.4.5 Изменение граничного тока между областями низкой и средней инжекцией электронов

Рассмотрим изменения граничного тока $I_{th\text{-}m}$ в течение длительной эксплуатации для СД из разных партий. Данные исследования позволят нам оценить влияние предварительного облучения на изменение формы ВтАХ.

Для партий СД ИК-1 и СД ИК-4 нельзя полноценно рассмотреть изменения граничного тока I_{th_m} с ростом номера ступени испытаний, так как данная граница проявляется на ВтАХ только на последних ступенях испытаний непосредственно перед развитием КО.

Однако для СД партии СД ИК-5 граничный ток I_{th_m} проявляется уже после предварительного облучения быстрыми нейтронами флюенсом F_{n2} и отжигом до проведения ступенчатых испытаний. На рисунке 4.16 (зависимость В) показано изменение граничного тока I_{th_m} в процессе ступенчатых испытаний СД партии СД ИК-5. Видно, что в данном случае происходит снижение уровня граничного тока I_{th_m} с ростом ступени испытаний в ~ 1,5 раза.

Можно утверждать, что основной причиной такого поведения граничного тока I_{th_m} является отжиг радиационных дефектов при ступенчатых испытаниях, о чем свидетельствует частичное восстановление ВтАХ.

Таким образом, на основании экспериментальных результатов, полученных для изменения граничных токов I_{th_h} и I_{th_m} при ступенчатых испытаниях СД партии СД ИК-5 можно сделать вывод о том, что при ступенчатых испытаниях данных СД наблюдается не только частичное восстановление мощности излучения, но и частичное восстановление формы ВтАХ.

Выводы по главе 4

1.Предварительное облучение СД гамма-квантами в области доз, которая соответствует радиационно-стимулированной перестройке исходной дефектной структуры, позволяет повысить стойкость омических контактов к воздействию факторов длительной наработки и, таким образом, снизить вероятность развития КО и повысить надежность СД.

2. Предварительное облучение гамма-квантами дозами в области снижения мощности излучения СД вследствие введения радиационных дефектов приводит к ускорению деградации омических контактов при дальнейшей эксплуатации, повышению вероятности развития КО и, в итоге, к снижению надежности СД.

3. Предварительное облучение гамма-квантами можно использовать в технологии изготовления СД для улучшения их эксплуатационных показателей, но при условии выбора доз облучения в строго регламентированной области радиационно-стимулированной перестройки исходной дефектной структуры.

4. Предварительное облучение гамма-квантами ^{60}Co дозой в области радиационно-стимулированной перестройки исходной дефектной структуры позволяет повысить надежность и увеличить срок эксплуатации СД.

5. Предварительное облучение гамма-квантами ^{60}Co дозой в области действия чисто радиационных дефектов приводит к росту мощности излучения СД при эксплуатации, что позволяет более существенно повысить надежность и увеличить срок эксплуатации СД.

Заключение

1. В результате исследований воздействия эксплуатационных факторов на светодиоды, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs и AlGaInP, установлено, что процесс снижения мощности излучения характеризуется двумя этапами:

   - на первом этапе снижение мощности обусловлено перестройкой исходной дефектной структуры;

   - на втором этапе – введением новых дефектов под действием эксплуатационных факторов.

   При этом коэффициент повреждаемости на первом этапе существенно превосходит аналогичный параметр на втором этапе.
2. Установленные закономерности изменения мощности излучения светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов по своему характеру проявления идентичны наблюдаемым при воздействии различных видов ионизирующего излучения: выделяются два характерных этапа.
3. Идентичность закономерностей снижения мощности излучения светодиодов при воздействии факторов длительной эксплуатации и при воздействии различных видов ионизирующего излучения позволяет прогнозировать значение коэффициентов повреждаемости при эксплуатации по результатам исследования стойкости их к воздействию быстрых нейтронов и гамма-квантов.
4. Развитию катастрофических отказов светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов предшествует рост температуры активной области вследствие увеличения сопротивления омических контактов и/или подключения объемных каналов утечки тока параллельно его активной области. Анализ формы прямой ветви ВАХ светодиодов позволяет прогнозировать вероятность появления катастрофических отказов при эксплуатации.

5. Предложена методика определения сопротивления омических контактов и объемных каналов утечки тока на основе анализа формы прямой ветви ВАХ.
6. Предварительное облучение гамма-квантами (быстрыми нейтронами) можно использовать в технологии изготовления светодиодов для улучшения их эксплуатационных показателей. Дальнейшее совершенствование эксплуатационных характеристик возможно при оптимизации уровней предварительного облучения и режимов токовой тренировки после предварительного облучения.

Представленные результаты исследований опубликованы в [97 – 115].

Список литературы

1. Берг, А. Светодиоды / А. Берг, П. Дин.; пер. с англ.; под ред. канд. физ.-мат. наук А.Э. Юновича. – М.: Мир, 1979. – 677 с.
2. Коган, Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л.М. Коган – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 210 с.
3. Шуберт, Ф. Светодиоды / Ф. Шуберт; пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
4. Коган, Л.М. Новые светодиоды и устройства на их основе / Л.М. Коган // Светотехника. – 1997. – №3. – С. 27–30.
5. Кулаков, В.М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцев. – М.: Сов. радио. – 1980. – 224 с.
6. Srour, J.R. Radiation effects on microelectronics in space / J.R. Srour, J. M. McGarrity // Proceedings of the IEEE. – 1988. – V. 76. – № 11. – P. 1443 – 1469.
7. Wall, J. A. Gamma dose distributions at and near the interface of different materials / J.A. Wall, E. A. Burke // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1970. – V. 17. – 305 p.
8. Semiconductor devices in harsh conditions. (Devices, Circuits, and Systems) / K.Weide-Zaage, M.Chrzanowska-Jeske (ed.) – CRC Press. – 2016. – 256 p.
9. ГОСТ РВ 20.57.413-97. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Контроль качества готовых изделий и правила приемки. – М.: Госстандарт России, 1997. – 26 с.
10. Solid state lighting reliability: components to systems / ed. by W. D. Van Driel, X. J. Fan // Springer Science & Business Media. –2012. – Vol. 1. – 202 p.
11. Materials and reliability handbook for semiconductor optical and electron devices / O. Ueda, S. J. Pearton (ed.). – Springer Science & Business Media, 2012. – 641 p.

12. Daum, W. POF Handbook: Optical short range transmission systems / W. Daum, O. Ziemann, J. Krauser, P.E. Zamzow. – Springer. – 2008. – 885 p.
13. Landzberg, A. Microelectronics Manufacturing Diagnostics Handbook / A. Landzberg. – Springer Science & Business Media, 2012. – 712 p.
14. ГОСТ РВ 0027-009-2008. Надежность военной техники. Методы оценки соответствия требованиям надежности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 31 с.
15. ОСТ 11 336.938-83. Приборы полупроводниковые. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
16. Горюнов, Н. Н. Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранении / Н.Н. Горюнов. – М.: Энергия, 1970. – 102 с.
17. Манего, С.А. Экспериментальное определение энергии активации процесса старения светодиодов при форсированных испытаниях // Материалы межд. конференции. – Минск. – 2013. –123 с.
18. Боровиков, С.М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств: учебно-метод. пособие /С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян. – Минск: БГУИР.– 2010. – 71 с.
19. Байхельт, Ф. Франкен, П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь. – 1988. –392 с.
20. Вилисов, А.А. Мощные излучающие диоды на основе двойных гетероструктур в AlGaAs: разработка и применение / Вилисов, Анатолий Александрович/ дисс… докт. техн. наук. 01.04.10. – Томск: ТГУ, 2001. – 341 с.
21. Wu, F. Failure modes and failure analysis of white LEDs / F. Wu, W. Zhao, S. Yang, C. Zhang. // 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. – IEEE, 2009. – P. 4-978.
22. Fumagalli, K. Analysis of possible LED failure mode /, K. Fumagalli, R. Faranda, L. Farnè // 2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. – IEEE, 2014. – P. 1-8.

23. Fumagalli, K. Analysis of possible LED failure mode / K. Fumagalli, R. Faranda, L. Farnè // 2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. – IEEE, 2014. – P. 1-8.

24. Guoguang, L. The relationship between LED package and reliability / L. Guoguang, S. Yang, Y. Huang // 2009 16th IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. – IEEE. – 2009. – P. 323-326.

25. Hsu, Y. C. Failure mechanisms associated with lens shape of high-power LED modules in aging test / Y.C. Hsu, Y.K. Lin, T. Ming-Hung // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2008. – Vol. 55. – №. 2. – P. 689-694.

26. Packard, H. Reliability of precision optical performance AllnGaP LED lamps in traffic signals and variable message signs //Application Brief I-004. – 1997. –P. 12.

27. Shailesh, K. R., Kurian C. P., Kini S. G. Solid state lighting reliability from failure mechanisms perspective: a review of related literature / K.R. Shailesh, C.P. Kurian, S.G. Kini // International Journal of Semiconductor Science & Technology. – 2012. – Vol. 3. – №. 1. – P. 43-50.

28. Ueda, O. On degradation studies of III–V compound semiconductor optical devices over three decades: focusing on gradual degradation / O. Ueda // Japanese Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 49. – №. 9R. – P. 090001

29. Lu, G., Yang S., Huang Y. Analysis on failure modes and mechanisms of LED / G. Lu, S. Yang, Y. Huang // 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. – IEEE, 2009. – P. 1237-1241.

30. Hasegawa, F. Degradation of Gunn diode by dislocation induced during thermocompression bonding / F. Hasegawa, H. Ito // Appl. Phys. Lett. – 1972. – Vol.21. – №3 – P. 107-108.

31. Kotani, M. Design of low noice Gunn diode with consideretion of a thermocompression bonding effects / M Kotani // IEEE Trans. Electron. Dev. – 1976. – Vol. ED – 23, № 6 – P. 567-572.

32. Mitsui, S. Influence of thermocompression GaAs crystals for Gunn diode / S. Mitsui, O. Ishihara // Jap.J.Appl.Phys. – 1972. – Vol. 11. – № 4. – P. 603-604.
33. Градобоев, А.В. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия [Текст] /: дис. … д. техн. наук: 01.04.10: / Градобоев Александр Васильевич. – Томск, 2003. – 284 с. – Библиогр.: с.236 - 284.
34. Yang S. C. Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes / S.C. Yang, P. Lin, C.-P. Wang, Sh. B. Huang, Ch.-L. Chen, P.-F. Chiang, A.T. Lee, M.T. Chu // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50. – №. 7. – P. 959-964.
35. Закгейм, А.Л. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Н. Мизеров, В.Г. Половинкин, И.В. Рожанский, А.Е. Черняков // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – № 3. – С. 390-397.
36. Kim J. et al. Effect of V-shaped pit size on the reverse leakage current of InGaN/GaN light-emitting diodes //IEEE Electron Device Letters. – 2013. – Vol. 34. – №. 11. – P. 1409-1411.
37. Shan, Q. Transport-mechanism analysis of the reverse leakage current in GaInN light-emitting diodes / Q. Shan //Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 99. – № 25. – P. 253506.
38. Chang, S. J. Improved ESD protection by combining InGaN-GaN MQW LEDs with GaN schottky diodes / S.J. Chang // IEEE Electron Device Letters. – 2003. – Vol. 24. – №. 3. – P. 129-131.
39. Томашевич, А. А. Исследование изменений обратных вольт-амперных характеристик светодиодов на основе нитрида галлия в зависимости от режимов и времени испытаний / А.А. Томашевич С.Г. Еханин С.Л. Аржаков, К.К. Слепцов // Электронные средства и системы управления. – 2017. – № 11. – С. 172-175.

40. Полищук, А. Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации / А. Полищук // Современная электроника. – 2006. – №. 4. – С. 20.

41. Vázquez, M. Degradation of AlInGaP red LEDs under drive current and temperature accelerated life tests / M. Vázquez // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50. – №. 9-11. – P. 1559-1562.

42. Streubel, K. High brightness AlGaInP light-emitting diodes / K. Streubel // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2002. – Vol 8. – №. 2. – P. 321-332.

43. Pursiainen, O. Identification of aging mechanisms in the optical and electrical characteristics of light-emitting diodes / O. Pursiainen //Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – №. 18. – P. 2895-2897.

44. Yanagisawa, T. Estimation of the degradation of InGaN/AlGaN blue light-emitting diodes / T. Yanagisawa // Microelectronics reliability. – 1997. – Vol. 37. – №. 8. – P. 1239-1241.

45. Meneghini M. A review on the reliability of GaN-based LEDs / M. Meneghini // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2008. – Vol. 8. – №. 2. – P. 323-331.

46. Ирха, В.И. Исследование деградации светоизлучающих диодов для ВОСП / В.И. Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова – №1. – 2010. С. 95-98.

47. Бочкарева, Н. И. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN-светодиодов / Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Д.А. Лавринович, Ю.Г Шретер // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – №. 7. – С. 829-833.

48. Бочкарева Н.И. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Д.А. Лавринович, Ю.Г Шретер //Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40. – №. 1. – С. 122-127.

49. Бочкарева, Н. И. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN-светодиодов / Н.И. Бочкарева, Е.А. Жирнов, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Д.А. Лавринович, Ю.Г Шретер // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39. – №. 7. – С. 829-833.

50. Маняхин, Ф.И. Проблема деградации параметров светодиодов и пути ее решения. / Ф.И. Маняхин // Изв. вузов, сер. Матер. электрон. техн. – 1997. – № 1. – С. 63.

51. Ковалев, А. Н. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе / Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – №. 2. – С. 224-232.

52. Ковалев, А. Н. Изменения люминесцентных и электрических свойств светодиодов из InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе / Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33. – №. 2. – С. 224-232.

53. Закгейм, А. Л. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах / А.Л. Закгейм // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №. 2. – С. 219-223.

54. Рабинович, О. И., Некоторые аспекты рабочих характеристикК AlGaInN излучающих диодов [Электронный ресурс] / О. И. Рабинович, Е.К. Наими, В.П. Сушков. – Режим доступа: http://nsk2009.svetotech.com/wp-content/uploads/rsk_reports.pdf

55. Маняхин, Ф. И. Влияние режимов эксплуатации светодиодов на процесс дефектообразования в области p-n-перехода и снижение квантового выхода / Ф.И. Маняхин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2010. – №. 2. – С. 54-57.

56. Шмидт, Н.М. Изучение механизмов, ответственных за деградацию эффективности светодиодов на основе нитридов третьей группы / Шмидт Н.М., Усиков А.С., Шабунина Е.И. // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15.– № 1. – С. 46-52.

57. Hu, J. Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light-emitting diodes / J. Hu, L. Yang, M.W. Shin // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Vol. 41. – №. 3. – P. 035107.
58. Meneghini M. A review on the physical mechanisms that limit the reliability of GaN-based LEDs /M.A. Meneghini // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2009. – Vol. 57. – №. 1. – P. 108-118.
59. Rossi F. Influence of short-term low current dc aging on the electrical and optical properties of InGaN blue light-emitting diodes / F. Rossi // Journal of applied physics. – 2006. – Vol. 99. – №. 5. – P. 053104.
60. Kressel, H. Effect of edges on the reliability of GaAs and (AlGa) As heterojunction LEDs / H. Kressel, M. Ettenberg, H. F. Lockwood // Journal of Electronic Materials. – 1977. – Vol. 6. – №. 5. – P. 467-481.
61. Yang, S. C. Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes / S.-C. Yang, P. Lin, C.-P. Wang, Sh. B. Huang, Ch.-L. Chen, P.-F. Chiang, A.T. Lee, M.T. Chu // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50. – №. 7. – P. 959-964.
62. Вавилов, В.С. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах / В.С. Вавилов, Н.А Ухин. – М.: Атом-издат., 1969. – 312 с.
63. Эфрос, В.Я., Методы оценки радиационной стойкости ИЭТ СВЧ / В.Я. Эфрос, А.И. Петров, С.А. Полевич, В.Д. Чибирев, Е.И. Шимин // Обз. по электр. технике. Серия 1 Электроника СВЧ. – 1976.– № 13. – 32 с.
64. Кулаков, В.М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцев; под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
65. Вавилов, В.С. Действие излучений на полупроводники: учеб. руководство / В. С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. – М.: Наука, 1988. – 191 с.

66. Эффекты космической радиации в микроэлектронике. Малый тематический выпуск /под ред. Ш.Э. Кернс и К.Ф. Галлоуэй // ТИИЭР – 1988. – Т. 76. – № 11. – С. 23-159.
67. Градобоев, А.В. Радиационная стойкость СВЧ приборов на основе арсенида галлия. / А.В. Градобоев, А.П. Суржиков. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2005. – 277 с.
68. Claeus, C. Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices / C. Claeus, E. Simoen. – Berlin: Springer, 2002. – 426 p.
69. Burke, E.A., Energy dependence of proton-induced displasement damage in gallium arsenide / E.A. Burke, C.J. Dale, A.B. Campbell, T. Palmer, R. Zuleeg // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1987. – Vol. NS-34. – № 6. – P. 1220-1226.
70. Summers, G.P. Displacement damage in GaAs structures / G.P. Summers, E.A. Burke, M.A. Xapsos, C.J. Dale, P.W. Marshall, E.L. Petersen // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1988. – Vol .NS-35. – No. 6 – P.1221-1226.
71. Barnes, C.E. Radiation effects on light sources and detectors / C.E. Barnes // Proc. SPIE 541. – 1985. – 139 p.
72. Barnes, C.E. Radiation hardened optoelectronic components: sources / C.E. Barnes // Proc. SPIE 616 – 1986. – 248 p.
73. Barnes, C.E. The effects of radiation on optoelectronic devices / C.E. Barnes // Proc. SPIE/ – 1986. – Vol. 721.– P.18.
74. Barnes C.E. The effects of radiation on optoelectronic devices / C.E. Barnes // Fiber optics in adverse environments III. – International Society for Optics and Photonics. –1987. – Vol. 721. – P. 18-27.
75. Градобоев, А.В. Влияние плотности тока на деградацию гетероструктур AlGaAs при облучении нейтронами, протонами и электронами / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Труды V Международной научной конференции. – Томск, 2006. – С. 292 – 295.

76. Polimadei, R.A. Performance of $Ga_{1-x}Al_xAs$ light-emitting diodes in radiation environments / R.A. Polimadei, S. Share, A.S. Epstein // IEEE Trans. Nucl. Sci. – Vol. 21. – 1974. – No. 6, P. 96–102.

77. Карацюба, А.П. Исследование действия проникающих излучений на твердые растворы $Al_xGa_{1-x}As$ и p-n-переходы на их основе / А.П. Карацюба, М.В. Ованесов, В.П. Сушков // ФТП. – 1980. – Т. 14. – № 7. – С. 1450.

78. Mukherjee, B. Application of low-cost Gallium Arsenide light-emitting-diodes as kerma dosemeter and fluence monitor for high-energy neutrons / B. Mukherjee, S. Simrock, J. Khachan, D. Rybka, R. Romaniuk // Radiation Protection Dosimetry. – 2007. – Vol. 126. – №. 1-4. – P. 256-260.

79. Beringer, J. Radiation hardness and lifetime studies of LEDs and VCSELs for the optical readout of the ATLAS SCT / J. Beringer, K. Borera, R.K. Mommsen, R.B. Nickerson, A.R. Weidberg, E. Monnier, H.Q Hou, K.L. Leard // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1999. – Vol. 435. – №. 3. – P. 375-392.

80. Dawson, I. Irradiation tests of optoelectronic components for LHC inner detectors / I. Dawson // Nucl. Instr. and Meth. – 1997. – Vol. A387. – P. 369.

81. Johnston, A. H. Radiation damage of electronic and optoelectronic devices in space / A.H. Johnston. – 2000. – P. 56-59.

82. Stanley, A.G. Comparison of Light Emitting Diodes in a Space Radiation Environment / A.G. Stanley // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1970 – Vol. 17. – № 6. – P. 239–244.

83. Селезнев, Д.В. Анализ влияния облучения на светоиндикаторы из $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ / Д.В. Селезнев // В сб. «Моделирование и исследование сложных систем». – М.: МГАПИ, 2004. – С. 91 – 102.

84. Вилисов, А.А. Радиационная стойкость мощных излучающих диодов / А.А. Вилисов, Г.Н. Захарова // 9 конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» «GaAs-2006»: Материалы конференции. – Томск: Томский госуниверситет, 2006 – С. 393 – 395.

85. Градобоев, А.В. Радиационная стойкость гетероструктур AlGaAs / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 1-2. – С. 49-52.

86. Градобоев, А.В., Рубанов П.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs при облучении электронами / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов // Изв. вузов. Физика. – 2011. – №1/2. – С. 195-197.

87. Градобоев, А.В., Бессонов Д.Г., Рубанов П.В. Деградация светодиодов при облучении гамма-квантами ^{60}Co / А.В. Градобоев, Д.Г. Бессонов, П.В. Рубанов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2005. – Т. 2. – №3. – С. 81-84.

88. Градобоев, А.В., Вилисов А.А., Асанов И.А., Рубанов П.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN при облучении быстрыми нейтронами/ А.В. Градобоев, А.А. Вилисов, И.А. Асанов, П.В. Рубанов // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы: 7-я Всероссийская конференция. – СПб: Издательство ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2010. – С. 207 – 208.

89. Gradoboev, A.V., Orlova K.N. Radiation model of light emitting diode based on algainp heterostructures with multiple quantum wells/ A.V. Gradoboev, K.N. Orlova // Advanced Materials Research. – 2014. –Vol. 880. – P. 237-241.

90. Орлова, К.Н., Градобоев А.В. Радиационные модели Algainp светоизлучающих диодов / К.Н. Орлова, А.В. Градобоев // Курск, 2016. – 212 с.

91. ГОСТ 19834.4-79. Диоды полупроводниковые излучающие инфракрасные. Методы измерения мощности излучения. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 7 с.

92. Руководство пользователя ЯЮКЛ.411734.002 РЭ. Установка измерения статпараметров светодиодов POLI_500. – 2009. – 28 с.

93. Руководство пользователя. Индикатор Спектра «Spectra».– ИТМ, 2005. – 8 с.

94. Anashin, V.S. Methods for monitoring the resistance of specialized VLSI integrations to natural ionizing radiation from outer space / V.S. Anashin, I.O.

Ishutin, V.N. Ulimov. Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development. – 2010. – P. 233-236.

95. The pulse solid-core dual-zone reactor on fast neutrons "BARS-4." [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.niipriborov.ru/model_ustanov.html

96. Градобоев А.В., Асанов И.А., Салчак Я.А. Влияние облучения быстрыми нейтронами на надежность светодиодов ИК-диапазона. – Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 11/3. – С. 111.

97. Gradoboev, A.V. The fast neutron irradiation influence on the AlGaAs IR-LEDs reliability / A.V. Gradoboev, K.N. Orlova, I.A. Asanov, A.V. Simonova // Microelectronics Reliability. – 2016. – V. 65. – P. 55-59.

98. Gradoboev, A.V. Influence of irradiation by ^{60}Co gamma-quanta on reliability of IR-СДs based upon AlGaAs heterostructures / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova // Physica Status Solidi (c). – 2016. – V. 13. – №. 10-12. – P. 895-902.

99. Орлова, К.Н. Исследование изменения электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP (λ=624 нм) с множественными квантовыми ямами при воздействии быстрых нейтронов [Электронный ресурс] / К.Н. Орлова, А.В. Градобоев, А.В. Симонова // Журнал радиоэлектроники. 2016. – № 10. – Режим доступа http://jre.cplire.ru/jre/oct16/10/text.pdf

100. Gradoboev, A.V. In-service change in radiant power of infrared СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova // Control and Communications (SIBCON), 2016 International Siberian Conference on. – IEEE.– 2016. – P. 1-5.

101. Gradoboev, A.V. Influence of preliminary irradiation by gamma-quanta on development of catastrophic failures during operation of IR-СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova // Journal of Physics: Conference Series – IOP Publishing, 2017. – Vol. 830. – № 1. – P. 012132.

102. Gradoboev, A.V. СДs based upon AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells: comparison of fast neutrons and gamma-quanta irradiation / A.V.

Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 363. – № 1. – P. 012010.

103. Gradoboev, A.V. Main principles of developing exploitation models of semiconductor devices / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 363. – № 1. – P. 012025.

104. Gradoboev, A.V. Combined action of fast neutrons and operational factors on reliability of infrared СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova // Inorganic Materials: Applied Research, 2018. – Vol. 9. – № 5. – P. 848–854.

105. Градобоев, А.В. Комбинированное действие быстрых нейтронов и эксплуатационных факторов на надежность светодиодов ИК-диапазона / А.В. Градобоев, А.В. Симонова, К.Н. Орлова // Перспективные материалы, 2018. – № 6. – С. 16–25.

Gradoboev, A.V. Combined action of fast neutrons and operational factors on reliability of infrared СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova, // Inorganic Materials: Applied Research, 2018. – Vol. 9. – № 5. – P. 848–854.

106. Градобоев, А.В. Информативность прямой ветви ВАХ приборов на основе p-n-перехода [Электронный ресурс] / А.В. Градобоев, А.В. Симонова, К.Н. Орлова // Журнал радиоэлектроники. – 2019 – №1. – Схема доступа: http://jre.cplire.ru/jre/jan19/8/text.pdf DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.8

107. Gradoboev, A.V. Analysis of the Use of Reflectors and Reflective Surfaces for Increasing the Light Efficiency of LEDs Based on AlGaInP Heterostructures / A.V. Gradoboev, K.N. Orlova, A.V. Simonova // Materials Science Forum, 2019. – Vol. 942. – P. 77-86.

108. Gradoboev, A.V. Application of radiation technologies for quality improvement of LEDs based upon AlGaAs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova, O.O. Babich // Ionizing Radiation Effects and Application, editor Boualem Djezzar. – InTech, 2018. – P. 1-20.

109. Градобоев, А.В. Влияние комбинированного действия факторов длительной эксплуатации и облучения гамма-квантами на работоспособность светодиодов ИК-диапазона / А.В. Градобоев,

А.В. Симонова // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: мат-лы VIII междунар. конф. – г. Курчатов: РГП НЯЦ РК. – 2018. – С. 158.

110. Effect of Sequence of combined impact of influencing factors on operation of IR-СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova // // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. – P. 511.

111. Gradoboev, A.V. Reliability of СДs based upon AlGaAs heterostructures: combined influence of fast neutrons and operational factors / A.V. Gradoboev, K.N. Orlova, A.V. Simonova // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. – P. 512.

112. Gradoboev, A.V. Radiation hardness of GaP LEDs to gamma-quantum irradiation / A.V. Gradoboev, K.N. Orlova, A.V. Simonova // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. – P. 542.

113. Градобоев, А.В. Надежность предварительно облученных нейтронами светодиодов ИК-диапазона при эксплуатации / А.В. Градобоев, А.В. Симонова, К.Н. Орлова // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов. – г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 108.

114. Градобоев, А.В. Эксплуатационные модели изделий электронной техники / А.В. Градобоев, А.В. Симонова // Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития. – Павлодар: Дом печати. – 2016. – С. 131 – 132.

115. Gradoboev, A.V. Influence of preliminary irradiation by gamma-quanta on development of catastrophic failures during operation of IR-СДs / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova // International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects: Abstracts. – Tomsk: TPU Publishing House, 2016. – P. 437.

Приложение 1. Акт использования

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «РОССИЙСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ» (АО «НИИПП»)

✉ Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 99а, ИНН\КПП 7017084932\701701001
☎☎ (382-2) 288-288 (приемная), факс (382-2) 55-50-89
E-mail: niipp @ niipp.ru www.niipp.ru

_____ N _____

На N _____

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
В.И. Исюк
«27» 09 2018г.

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ТОКАРЕВ А.В. ПО ДОВЕРЕННОСТИ №107-ЮР ОТ 19.09.2018

АКТ

использования результатов диссертационной работы

Симоновой Анастасии Владимировны,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Результаты диссертационной работы Симоновой А.В. использованы при выполнении ОКР «Оптрон» и введены в технологию изготовления разработанных серийных изделий.

Зам. директора по научной работе
– начальник 110 отдела _____ Бакин Н.Н.

Приложение 2. Акт внедрения

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной
деятельности ТПУ
А.Р. Вагнер
2019 г.

АКТ
внедрения результатов кандидатской диссертации
Симоновой Анастасии Владимировны
в учебный процесс ТПУ

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Симоновой Анастасии Владимировны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», используются в учебном процессе в Инженерной школе неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета при изучении дисциплин «Физические методы контроля» для бакалавров по направлению 12.03.01 – Приборостроение.

Директор ИШКНБ
к.т.н., доцент Д.А. Седнев

Заведующий кафедрой - руководитель
отделения на правах кафедры
д.ф.-м.н., профессор А.П. Суржиков