

На правах рукописи



Симонова Анастасия Владимировна

**ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕГРАДАЦИОННЫЕ
ПРОЦЕССЫ В СВЕТОДИОДАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Научный руководитель: **Градобоев Александр Васильевич**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Коханенко Андрей Павлович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет (г. Томск),
профессор кафедры квантовой электроники и
фотоники

Клопотов Анатолий Анатольевич
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет» (г. Томск),
профессор кафедры прикладной механики и
материаловедения

Защита состоится «26» декабря 2019 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, пр. Ленина, 2а строение 4, аудитория 242.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://www.dis.tpu.ru>

Автореферат разослан «___» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.03
доктор технических наук



С.А. Гынгазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 промышленности 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., 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., Kogan L.M., 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 являются промышленные светодиоды на основе двойных гетероструктур 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 р-п-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 р-п-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 р-п-переходу, на основе анализа формы прямой ветви ВАХ.
4. Установленные закономерности снижения мощности излучения свето-

диодов 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 р-п-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, за-

ключения, библиографии и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 130 страниц. Работа содержит 5 таблиц, 76 рисунков. Библиография включает 115 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена и обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании анализа литературных данных рассмотрены условия эксплуатации различных изделий электронной техники в космическом пространстве, в верхних слоях атмосферы, на ядерных энергетических объектах. Показано, что при этом изделия электронной техники подвергаются комплексному и комбинированному действию ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов. Таким образом, условия эксплуатации изделий электронной техники выдвигают особые требования к их основным компонентам – полупроводниковым приборам. Однако, к настоящему времени, имеется только незначительное количество работ по комбинированному облучению полупроводниковых приборов, а сведения о комбинированном действии ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов практически отсутствуют. Далее рассмотрены основные механизмы деградации светодиодов при эксплуатации. Также представлен анализ изменения светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов при воздействии ионизирующего излучения.

На основании анализа литературных данных обоснованы актуальность, цель и задачи исследований комбинированного действия ионизирующего излучения и эксплуатационных факторов на светотехнические и электрофизические характеристики светодиодов.

Во второй главе описаны объекты исследований: светодиоды инфракрасного диапазона длин волн, изготовленные на основе двойных гетероструктур AlGaAs, $\lambda = 820 - 900$ нм (далее СД ИК), а также желтого $\lambda = 590$ нм (далее СД Ж1, СД Ж2) и красного $\lambda = 630$ нм (далее СД Кр) свечения на основе гетероструктур AlGaInP. СД Ж1 и СД Ж2 отличаются конструктивным исполнением. Представлены структура и толщины эпитаксиальных слоев, используемых гетероструктур. Кратко изложены технология изготовления светодиодов, их конструктивные особенности.

Затем рассмотрено оборудование, используемое при проведении исследований. Для измерения прямой ветви ВАХ и ВtАХ светодиодов в шаре (блок фотометрический ФЫМЗ.553.012-01) использовали измерительный комплекс «ПОЛИ-500» (ЯЮКЛ.411721.003), который позволял изменять прямое напряжение в пределах от (0 – 5) В при изменении прямого тока в диапазоне (1 – 500) мА с шагом не менее 1 мА. Погрешность задания прямого тока от установленного уровня составляла $\pm 2\%$, а погрешность измерения прямого напряжения $\pm 2\%$. Вольт-фарадные характеристики контролировали с помощью установки Е7-20. Для анализа катастрофических отказов использовались оптический (Альтами СМ0870-Т) и рентгеновский (Phoenix micromex Microfocus X-ray System) микроскопы. Полученные результаты измерений обрабатывались методами математической статистики на основе программ Origin, MS Excel.

Для ускорения действия факторов длительной эксплуатации (повышенная температура и электрическое поле) использовали специальный стенд для ступенчатых испытаний светодиодов на базе АО «НИИПП». При этом, каждую ступень испытаний характеризовали током ступени и окружающей температурой. Шаг тока ступени варьировали в диапазоне от 25 до 100 мА, а окружающую температуру – в диапазоне от + 65 °С до + 85 °С. Длительность одной ступени составляла 24 часа. Номер ступени и ток ступени при этом связаны следующими соотношениями

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{I_{cmi} - I_{cm1}}{\Delta I} + 1, \\ I_{cmi} &= \Delta I \cdot (N_i - 1) + I_{cm1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где N_i – номер i -той ступени, I_{cmi} – ток на i -той ступени, I_{cm1} – ток на первой ступени, ΔI – шаг ступени.

Облучение гамма-квантами проводили на стационарном сертифицированном изотопном источнике «Исследователь» на основе кобальта-60 (АО «НИИПП», г. Томск). Уровень воздействия характеризовали поглощенной дозой, величину которой определяли по времени облучения и мощности дозы в активной зоне установки на момент проведения облучения.

Облучение быстрыми нейтронами проводили на импульсном твердотопливном двухзонном ядерном реакторе на быстрых нейтронах БАРС-4 (АО «НИИПП», г. Лыткарино, МО) и на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т (НИ ТПУ, г. Томск). Воздействие быстрыми нейтронами характеризовали флюенсом частиц (нейтрон/см²).

В последующих разделах **главы 2** представлен анализ характеристик исходных приборов. Установлено, что форма ВтАХ изменяется с ростом тока в зависимости от выбранного диапазона рабочих токов. ВтАХ исходных СД можно выделить две характерные области инжекции электронов в активный слой: область средней и высокой инжекции электронов. Тогда, для каждого индивидуального СД можно ввести новую характеристику – граничный ток I_{th-h} – это ток, разделяющий области средней и высокой инжекции электронов в активный слой СД, как это показано на рисунке 2.19. Тогда, изменение мощности излучения можно описать следующей формулой

$$P = A \cdot I_{раб}^{\beta}, \quad (2)$$

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.

Затем представлен анализ ВАХ, на основании которого выделены характерных группы, отличающиеся друг от друга проявлением омических контактов в области высоких токов и/или наличием объемных каналов утечки тока. Так же описана комплексная методика определения сопротивления омических контактов по результатам измерения прямой ветви ВАХ, суть которой заключается в линейной

экстраполяции ВАХ в области высоких токов. Таким образом, на основании анализа наклона ВАХ в области высоких токов можно определить суммарное сопротивление омических контактов R_c . В заключении по результатам анализа исходных светодиодов сформированы выводы, часть из которых использованы при формулировке положений выносимых на защиту.

В третьей главе рассмотрены результаты исследования изменения светотехнических и электрофизических характеристик светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов, которое моделировали ступенчатыми испытаниями. Выявлено два вида отказов: катастрофические и параметрические. Анализ катастрофических отказов позволил установить два их типа:

- отказы, связанные с механическим разрушением корпуса;
- отказы, обусловленные отсоединением кристалла от теплоотвода.

Установлено, что отказы, обусловленные механическим разрушением корпуса, являются следствием не качественной сборки диодов.

Катастрофические отказы второго типа наблюдаются при температуре близкой к температуре плавления омических контактов. Анализ показал, что заметные изменения прямой ветви ВАХ наблюдается непосредственно перед развитием катастрофических отказов. Установлено, что изменения ВАХ на стадии развития параметрических отказов незначительны. Это позволяет прийти к выводу, что изменением электрофизических характеристик активных слоев светодиодов при воздействии эксплуатационных факторов на данной стадии можно пренебречь. Таким образом, повышение температуры кристалла при эксплуатации стимулирует диффузионные процессы на границе «полупроводник – многослойный омический контакт», следствием которых является рост сопротивления омических контактов и соответствующее дополнительное повышение температуры кристалла. Наложение электрического поля при эксплуатации дополнительно стимулирует эти процессы. Градиент температуры в активном слое кристалла светодиодов стимулирует диффузионные процессы в нем, что приводит к появлению объемных каналов утечки тока (предположительно дислокаций), расположенных параллельно р-п-переходу. Тогда анализ изменения формы ВАХ может быть использован для прогнозирования развития катастрофических отказов. Представлена зависимость вероятности развития катастрофических отказов от условий ступенчатых испытаний.

Затем представлен анализ параметрических отказов. Снижение мощности излучения светодиодов начинается практически с первых ступеней испытаний и продолжается вплоть до последней ступени. Следует отметить, что для отдельных диодов наблюдается рост мощности излучения вследствие отжига части исходных дефектов и/или их комплексов. Испытания были остановлены только тогда, когда мощность излучения светодиодов стала ниже чувствительности измерительного оборудования. На рисунке 1 показано изменение мощности излучения исследуемых светодиодов измеряемой при рабочем токе в процессе ступенчатых испытаний при различных условиях. Видно, что снижение мощности излучения при воздействии эксплуатационных факторов (рисунок 1) можно описать двумя этапами:

- на первом этапе – вследствие перестройки исходной дефектной структуры под воздействием эксплуатационных факторов;
- на втором этапе – вследствие формирования новых дефектов под действием

эксплуатационных факторов.

Снижение мощности излучения можно описать следующими соотношениями

$$P_N / P_0 = \begin{cases} A + B \cdot \exp(-k_1 \cdot N), & \text{при } N \leq N_{кр} \\ (k_2 \cdot N)^{-\alpha}, & \text{при } N \geq N_{кр} \end{cases} \quad (4)$$

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

N – номер ступени испытаний;

$N_{гр}$ – граничное значение уровня воздействия эксплуатационных факторов, которое разделяет первый и второй этапы снижения мощности;

A – снижение мощности излучения при $N = N_{гр}$, данная величина определяет относительный вклад второго этапа в общее снижение мощности излучения;

$B = 1 - A$ – относительный вклад первого этапа;

k_1, k_2 – коэффициенты повреждаемости, определяющие скорость снижения мощности излучения на первом и втором этапах, соответственно, величина которых определяется материалом, используемым для изготовления светодиодов, рабочим током и условиями ступенчатых испытаний;

α – константа, величина которой зависит от условий ступенчатых испытаний и материала, используемого для изготовления светодиодов.

Далее обсуждаются экспериментальные зависимости изменения мощности излучения при рабочем токе 50 мА при облучении гамма-квантами и быстрыми нейтронами, полученные ранее в [1,2] для светодиодов на основе AlGaAs (рисунок 2). Для гетероструктур AlGaInP получены подобные результаты.

Анализ результатов исследований, представленных на рисунках 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что представленные закономерности идентичны по характеру проявления, несмотря на различие в воздействующих факторах.

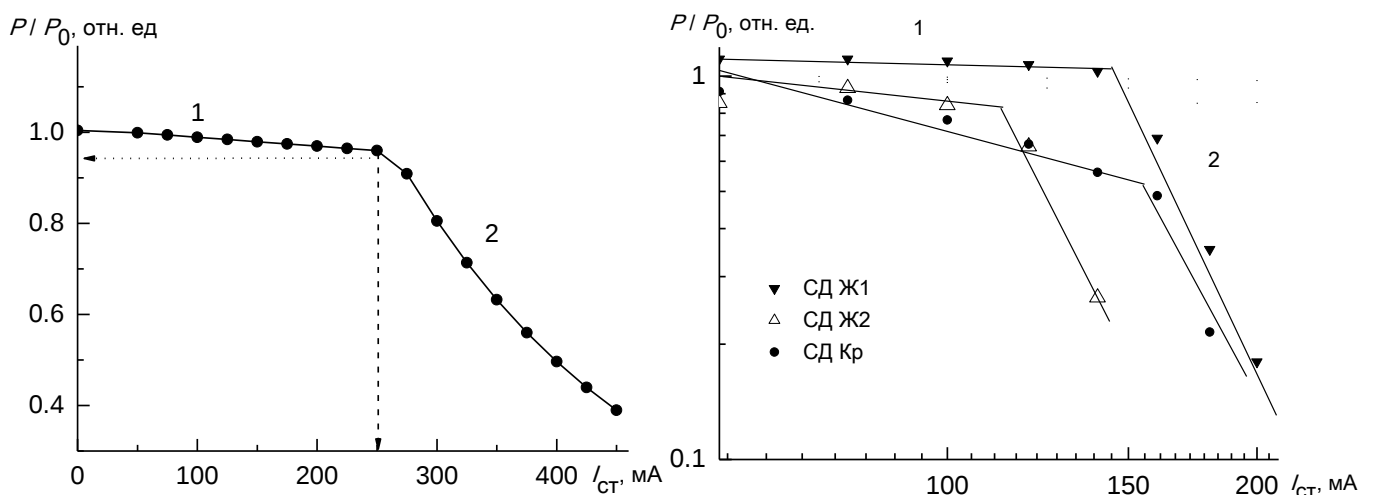


Рисунок 1 – Относительное изменение мощности излучения светодиодов, измеряемой при рабочем токе, в процессе ступенчатых испытаний:

слева для светодиодов, изготовленных на основе AlGaAs гетероструктур;

справа – для светодиодов, изготовленных на основе AlGaInP гетероструктур;

1, 2 – выделенные этапы снижения мощности излучения светодиодов.

Таким образом, используя закономерности изменения мощности излучения при воздействии ионизирующего излучения можно прогнозировать воздействие и эксплуатационных факторов (рисунок 3). Показана возможность проводить оценку показателей надежности СД по результатам исследований их радиационной стойкости.

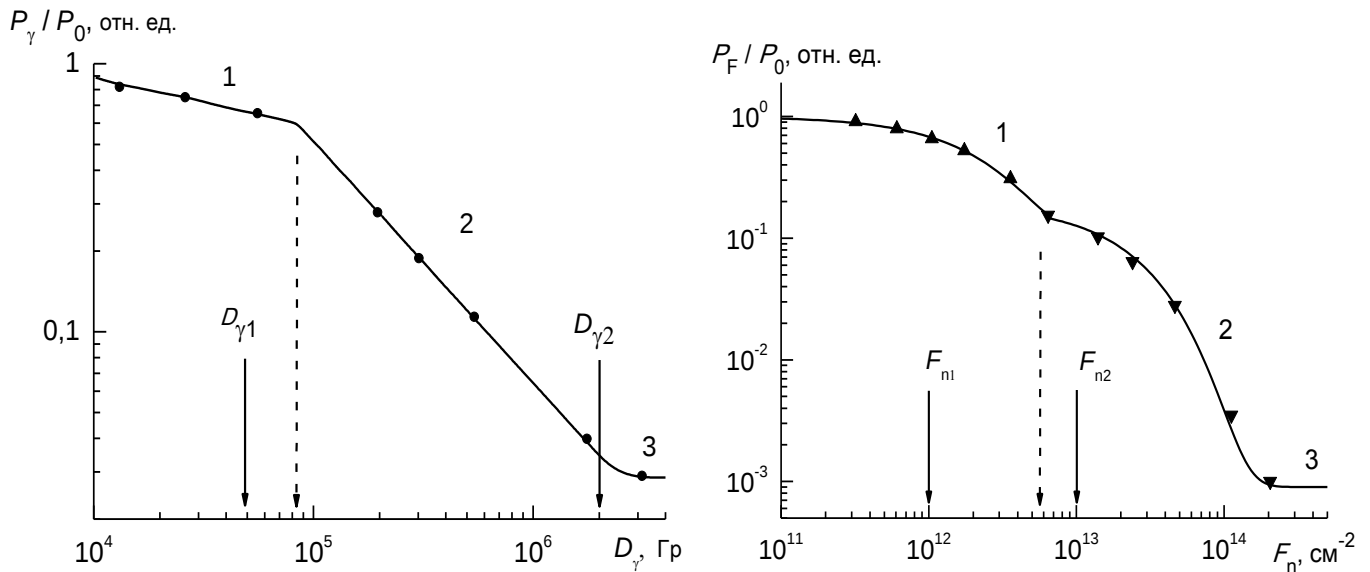


Рисунок 2 – Относительное изменение мощности излучения СД ИК в зависимости от дозы гамма-квантов (слева) и флюенса быстрых нейтронов (справа):

1,2 – этапы снижения мощности излучения;

3 – область развития катастрофических отказов; пунктирной стрелкой показана граница между первым и вторым этапами снижения мощности излучения; сплошными стрелками показаны выбранные уровни предварительного облучения [1,2].

Далее представлены результаты анализа изменения формы ВТАХ при ступенчатых испытаниях. Показано, что с ростом уровня воздействия эксплуатационных

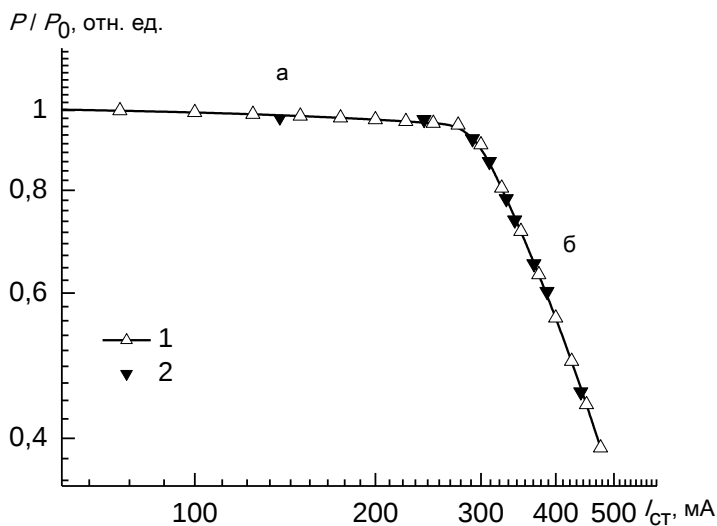


Рисунок 3 – Относительное изменение мощности излучения СД ИК, измеряемой при рабочем токе, в процессе ступенчатых испытаний:

1 – результаты эксперимента,

2 – результаты расчета.

факторов граница между выделенными областями рабочих токов на ВТАХ сдвигается в область более высоких токов. Таким образом, наблюдаемые изменения формы ВТАХ можно представить в виде изменения соответствующих граничных токов с ростом ступени испытаний.

Установлено, что в процессе ступенчатых испытаний отсутствуют заметные изменения вольт-фарадных характеристик, что позволяет сделать вывод о том, что в результате действия эксплуатационных факторов концентрация носителей заряда в активных слоях светодиодов и их подвижность не изменяются. Кроме того, установлено, что наблюдается из-

менение спектров излучения при воздействии эксплуатационных факторов. Заметных изменений теплового сопротивления в процессе ступенчатых испытаний не установлено.

Таким образом, в результате выполненных исследований воздействия эксплуатационных факторов для различных типов светодиодов получены результаты, идентичные по характеру установленных закономерностей, что позволяет предполагать подобные результаты и для светодиодов, изготовленных из других полупроводниковых материалов. В заключении к **Главе 3** сформированы основные выводы, часть из которых использованы при формулировке положений, выносимых на защиту.

В четвертой главе рассмотрено влияние предварительного облучения гамма-квантами и быстрыми нейтронами на стойкость светодиодов к воздействию эксплуатационных факторов. Установленные закономерности изменения мощности излучения при облучении гамма-квантами, быстрыми нейтронами и эксплуатационными факторами подобны по характеру наблюдаемых изменений. Это позволяет предполагать возможность повышения надежности светодиодов при эксплуатации за счет снижения вклада первого этапа в изменение мощности путем предварительного облучения. Результаты исследований, представленные на рисунке 2, позволяют обосновать выбор дозы предварительного облучения гамма-квантами и флюенсом быстрых нейтронов следующим образом. Первая доза гамма-квантов выбрана таким образом, чтобы снижение мощности излучения светодиодов в результате предварительного облучения соответствовало первому этапу, а вторая доза гамма-квантов второму этапу снижения их мощности излучения. Аналогичным образом были выбраны флюенсы быстрых нейтронов. Выбранные уровни предварительного облучения показаны на рисунке 2 вертикальными стрелками. Таким образом, для проведения данных исследований были сформированы следующие партии приборов с соответствующими уровнями облучения (таблица 1).

Таблица 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}

В главе представлен детальный анализ влияния предварительного облучения гамма-квантами. Для отдельных партий диодов наблюдалось снижение мощности излучения после предварительного облучения гамма-квантами (таблица 2). Проведение токовой тренировки после предварительного облучения (65 °С, 50 мА, 24 часа) позволило практически полностью восстановить исходное значение мощности излучения. Изменение мощности излучения светодиодов после предварительного облучения гамма-квантами и последующей токовой тренировки показано в таблице 2.

Партия СД ИК-2 распадается на 2 характерные сопоставимые по объему группы (рисунок 4а и 4б). Для сопоставления на графиках показано изменение мощности

излучения при ступенчатых испытаниях светодиодов без предварительного облучения (партия СД ИК-1). Для группы СД ИК-2а (рисунок 4а) наблюдается полное (СД ИК-2а1) или частичное (СД ИК-2а2) исключение первого этапа снижения мощности излучения при воздействии эксплуатационных факторов, при этом наблюдается заметное снижение вероятности развития катастрофических отказов и существенное повышение надежности.

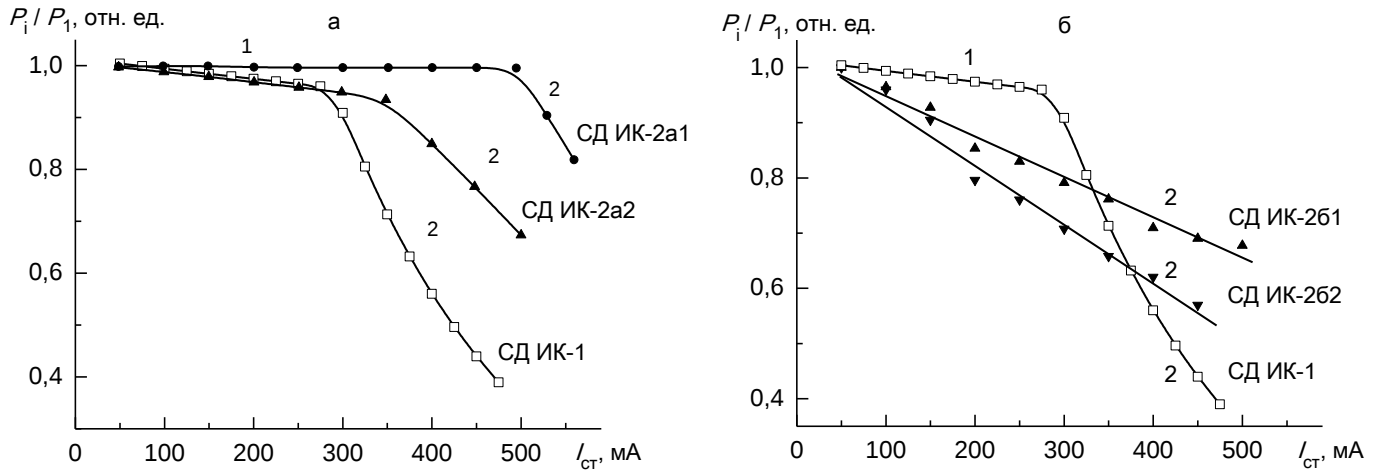


Рисунок 4 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для СД ИК-2 в сравнении с партией СД ИК-1: а – подгруппа СД ИК-2а; б – подгруппа СД ИК-2б; 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-2а1, СД ИК-2а2, СД ИК-2б1, СД ИК-2б2 – выделенные подгруппы.

Группа СД ИК-2б отличается отсутствием ярко выраженных этапов снижения мощности излучения. Отметим, что для всего диапазона воздействий эксплуатационных факторов в данном случае наблюдается закономерность, характерная первому этапу, но при более высоком коэффициенте повреждаемости. Вероятность развития катастрофических отказов остается практически без изменений.

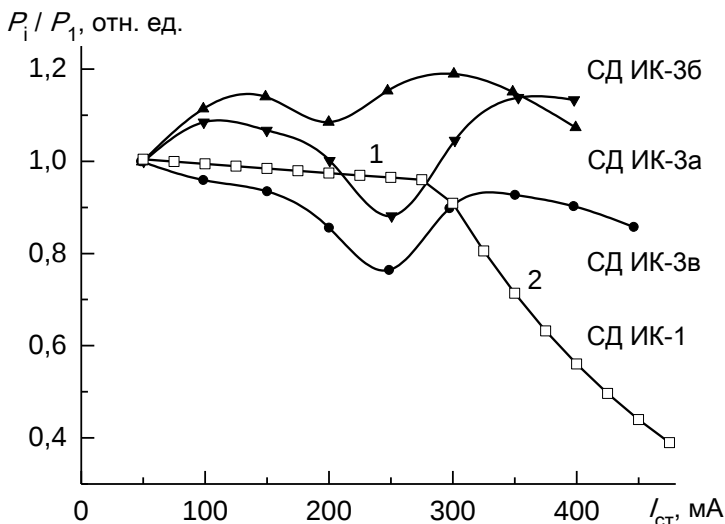


Рисунок 5 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний СД ИК при облучении второй дозой гамма-квантов: СД ИК-1 – без предварительного облучения; 1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-3а, СД ИК-3б, СД ИК-3в – выделенные подгруппы.

Кроме того, для этой партии светодиодов наблюдается повышение надежности в области высоких уровней воздействия.

На рисунке 5 представлены результаты ступенчатых испытаний СД ИК-3. 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 2, несмотря на существенное снижение мощности излучения после предварительного облучения. При ступенчатых испытаниях наблюдается как снижение мощности

излучения, так и ее восстановление, что может быть обусловлено частичным отжигом двух типов дефектов или их комплексов. Наблюдаемое при этом изменение мощности излучения происходит в диапазоне (0,8 – 1,2) от исходного значения вплоть до развития катастрофических отказов. Отмечено, что в данной партии светодиодов наблюдается повышение вероятности развития катастрофических отказов. В таблице 2 суммированы результаты ступенчатых испытаний СД ИК, подвергнутых предварительному облучению гамма-квантами.

Таблица 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

Таким образом, установлено, что предварительное облучение гамма-квантами дозой, соответствующей первому этапу снижения мощности излучения снижает вероятность развития катастрофических отказов, а для второй дозы облучения гамма-квантами наблюдается повышение вероятности развития катастрофических отказов. Кроме того, наблюдается общее повышение стойкости к воздействию эксплуатационных факторов.

Далее рассмотрено предварительное облучение быстрыми нейтронами. В таблице 1 представлены выбранные уровни воздействия быстрых нейтронов, а в таблице 3 показано изменение уровня мощности излучения на различных стадиях исследований.

На рисунке 6 показано изменение мощности излучения СД ИК в зависимости от ступени испытаний. Вначале рассмотрим изменение мощности для партии СД ИК-4 (рисунок 6а).

Для партии СД ИК-4 наблюдается полное отсутствием ярко выраженных этапов снижения мощности излучения. При этом наблюдается как снижение мощности излучения, так и ее восстановление в диапазоне (0,8 – 1,2) от ее значения после токовой тренировки. В данном случае в явном виде наблюдается повышение стойкости светодиодов к воздействию эксплуатационных факторов. Всю партию СД ИК-4 можно разделить на две характерные группы:

- группа СД ИК-4а (55%) – максимальное восстановление мощности излучения (рисунок 6а, зависимость СД ИК-4а);
- группа СД ИК-4б (45%) – минимальное восстановление мощности излучения (рисунок 6а, зависимость СД ИК-4б).

Как и в случае партии СД ИК-2 заметных изменений ВАХ при ступенчатых испытаниях партии СД ИК-4 не выявлено. Сделан вывод о том, что предварительное облучение быстрыми нейтронами снижает скорость параметрических отказов. Также наблюдается снижение вероятности развития катастрофических отказов.

На рисунке 6б показана зависимость изменения мощности излучения СД ИК-5 от уровня воздействия эксплуатационных факторов. 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 6б, 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 6б, зависимость СД ИК-5а).

Кроме того, видно, что наблюдаемое в данном случае восстановление мощности излучения происходит в два этапа, что свидетельствует об отжиге двух типов дефектов и/или их комплексов в процессе ступенчатых испытаний. Анализ ВАХ показал, что для диодов партии СД ИК-5 рост сопротивления омических контактов проявляется во всех случаях только на ступени предшествующей появлению катастрофических отказов. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для данной партии диодов наблюдается рост вероятности развития катастрофических отказов, но при этом наблюдается существенное снижение вероятности развития параметрических отказов.

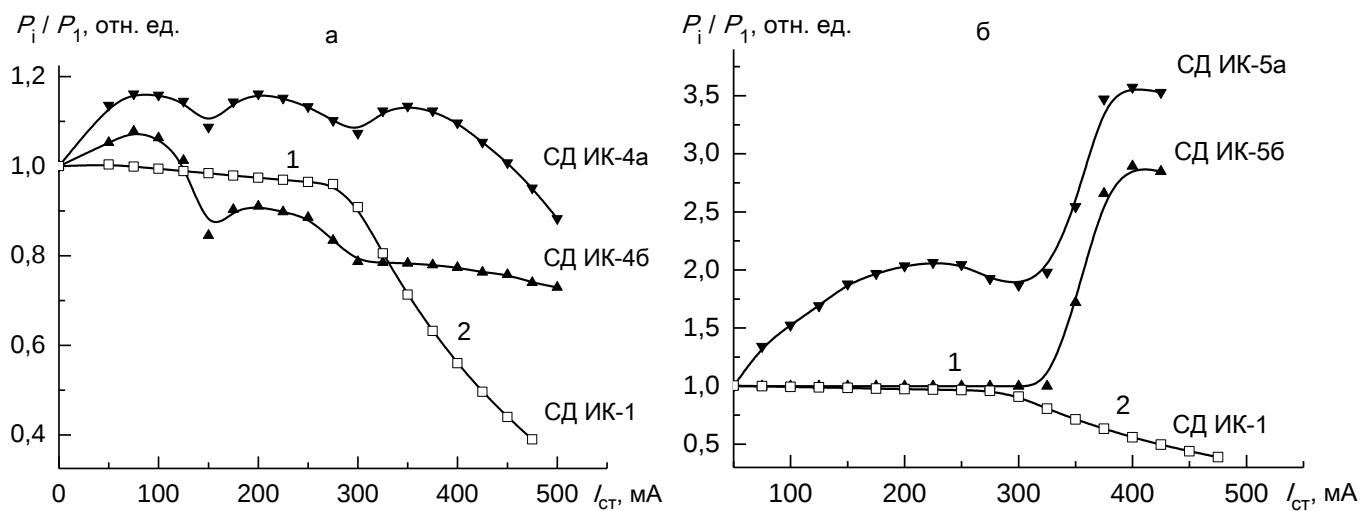


Рисунок 6 – Относительное изменение мощности излучения в процессе ступенчатых испытаний для различных партий СД ИК при облучении первым (а) и вторым (б) флюенсом быстрых нейтронов:

1,2 – выявленные этапы снижения мощности излучения; СД ИК-1 – без предварительного облучения; СД ИК-2а1, СД ИК-2а2, СД ИК-2б1, СД ИК-2б2 – выделенные подгруппы.

Таблица 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_{steni} , mA)	475	500		425	

Полученные результаты исследований позволяют все исследуемые в данном разделе светодиоды разделить на три класса:

- 1 класс – СД ИК-2а и СД ИК-4а;
- 2 класс – СД ИК-2б и СД ИК 4б;
- 3 класс – СД ИК-3 и СД ИК-5.

В заключении к **Главе 4** сделан вывод о возможности разработки радиационной технологии изготовления светодиодов на основе использования предварительного облучения гамма-квантами или быстрыми нейтронами с последующим отжигом.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

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.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ / индексируемых БД Scopus / Web of Science

1. Simonova A.V. The fast neutron irradiation influence on the AlGaAs IR-LEDs reliability / Gradoboev A.V., Orlova K.N., Asanov I.A., Simonova A.V. // Microelectronics Reliability. – 2016. – V. 65. – Pp. 55-59.
2. Simonova A.V. Influence of irradiation by ^{60}Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based upon AlGaAs heterostructures / A.V. Gradoboev, A.V. Simonova, K.N. Orlova // physica status solidi (c). – 2016. – V. 13. – №. 10-12. – Pp. 895-902.
3. Симонова А.В. Исследование изменения электрофизических характеристик светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP ($\lambda=624$ нм) с множественными квантовыми ямами при воздействии быстрых нейтронов / Орлова К.Н., Градобоев А.В., Симонова А.В. // Журнал радиоэлектроники 10 (2016). [Электронный ресурс] Схема доступа <http://jre.cplire.ru/jre/oct16/10/text.pdf>
4. Simonova A.V. In-service change in radiant power of infrared LEDs / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // Control and Communications (SIBCON), 2016 International Siberian Conference on. – IEEE, 2016. – Pp. 1-5.
5. Simonova A.V. Influence of preliminary irradiation by gamma-quanta on development of catastrophic failures during operation of IR-LEDs / Gradoboev A.V., Simonova A.V. // Journal of Physics: Conference Series – IOP Publishing, 2017. – Vol. 830. – No. 1. – P. 012132.
6. Simonova A.V. LEDs based upon AlGaInP heterostructures with multiple quantum wells: comparison of fast neutrons and gamma-quanta irradiation / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 363. – No. 1. – P. 012010.
7. Simonova A.V. Main principles of developing exploitation models of semiconductor devices / Gradoboev A.V., Simonova A.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 363. – No. 1. – P. 012025.
8. Simonova A.V. Combined action of fast neutrons and operational factors on reliability of infrared LEDs / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // Inorganic

Materials: Applied Research, 2018. – Vol. 9. – No. 5. – Pp. 848–854.

9. Симонова А.В. Комбинированное действие быстрых нейтронов и эксплуатационных факторов на надежность светодиодов ИК-диапазона / Градобоев А.В., Симонова А.В., Орлова К.Н. // Перспективные материалы, 2018. – № 6. – С. 16–25. DOI: 10.30791/1028-978X-2018-6-16-25

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

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

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

Глава в коллективной монографии

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

Публикации в материалах конференций

13. Симонова А.В. Надежность светоизлучающих диодов / Симонова А.В. // Современное состояние и проблемы естественных наук: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 4-5 июня 2015 г. – Томск, 2015. – 2015. – С. 98-102.

14. Симонова А.В. Исследование снижение мощности излучения светодиодов ИК-диапазона в процессе эксплуатации / Градобоев А.В., Симонова А.В., Орлова К.Н. // VI Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 14-16 октября 2015г., г. Томск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 68.

15. Simonova A.V. Influence of irradiation by ^{60}Co gamma-quanta on reliability of IR-LEDs based on AlGaAs heterostructures / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // European Materials Research Society Spring Meeting 2016, Nanomaterials, Symposium BB, May 06, 2016. – BB.12.7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/2016-spring-symposium-bb-european-materials-research-society#collapse107> (Дата обращения 26.09.2018).

16. Simonova A.V. Influence of irradiation by ^{60}Co gamma-quanta on durability of IR-LEDs on AlGaAs heterostructure emitter / Simonova A.V. // International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://isros2016.ncbj.gov.pl/program/> (Дата обращения 26.09.2018).

17. Simonova A.V. In-service change in radiant power of infrared LEDs / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // International Siberian Conference on Control and Communications, 2016. – 060iv5e [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://sibcon.hse.ru/data/2016/04/26/1129955556/SibCon%202016%20programma.pdf>

(Дата обращения 26.09.2018).

18. Симонова А.В. Надежность предварительно облученных нейтронами светодиодов ИК-диапазона при эксплуатации / Градобоев А.В., Симонова А.В., Орлова К.Н. // VII Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 19-21 октября 2016 года, г. Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 108.

19. Симонова А.В. Эксплуатационные модели изделий электронной техники / Градобоев А.В., Симонова А.В. // Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития. 21-23 сентября 2016г. – Павлодар: Дом печати, 2016. – 160 с. – русский, английский. Proceedings of the VII International scientific and practical conference/ September 21-23, 2016 – Pavlodar: Publishing House 2016. – С. 131 – 132.

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

21. Simonova A.V. LEDs based upon AlGaAs heterostructures: effect of ionizing radiation and factors of long-term operation / Gradoboev A.V., Simonova A.V. // European Materials Research Society Spring Meeting 2017, Semiconductors, Symposium O, May 23, 2017. – O.6.4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/wide-bandgap-semiconductors-LEDs-solar-and-related-energy-technologies-emrs#collapse27> (Дата обращения 26.09.2018).

22. Simonova A.V. Influence of ionizing irradiation on reliability of LEDs based upon AlGaAs heterostructures / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // European Materials Research Society Spring Meeting 2017, Semiconductors, Symposium O, May 23, 2017. – O.7.5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/wide-bandgap-semiconductors-LEDs-solar-and-related-energy-technologies-emrs#collapse34> (Дата обращения 26.09.2018).

23. Simonova A.V. Influence of ionizing irradiation on reliability of LEDs based upon AlGaAs heterostructures / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // European Materials Research Society Spring Meeting 2017, Semiconductors, Symposium O, May 23, 2017. – O.7.5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/wide-bandgap-semiconductors-LEDs-solar-and-related-energy-technologies-emrs#collapse34> (Дата обращения 26.09.2018).

24. Simonova A.V. Parameters changes of LEDs based on GaP under irradiation by gamma-quanta / Gradoboev A.V., Orlova K.N., Simonova A.V. // European Materials Research Society Spring Meeting 2017, Semiconductors, Symposium O, May 23, 2017. – O.7.14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/wide-bandgap-semiconductors-LEDs-solar-and-related-energy-technologies-emrs#collapse43> (Дата обращения 26.09.2018).

25. Симонова А.В. Радиационные технологии в производстве полупроводниковых приборов / Градобоев А.В., Симонова А.В. // Ф503 Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции. – Томск, 2017. – 78 с.

26. Simonova A.V. The effect of preliminary neutron irradiation on IR-LED characteristics during operation / Simonova A.V., Gradoboev A.V., Orlova K.N. // Conference of Radiation Effects on Components and Systems, 2017. – Poster Session & Data Workshop. – DW-27 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radecs2017.com/Radecs2017/assets/images/PocketProgram.pdf> (Дата обращения 26.09.2018).

27. Simonova A.V. Influence of preliminary irradiation by neutrons on emissive power changing of IR-LEDs during operation / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Orlova K.N. // 28th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics, 2017. – I2-1 #207 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://esref2017.sciencesconf.org/data/paper_schedule_ESREF2017.html (Дата обращения 26.09.2018).

28. Simonova A.V. Changes of watt-ampere characteristic shape of IR-LEDs during operation / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Astrakhantseva A.A. // European Materials Research Society Spring Meeting 2018, Nanomaterials, Symposium K, Lun 21, 2018. – K.PII.22 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/defect-induced-effects-nanomaterials-emrs#collapse140> (Дата обращения 26.09.2018).

29. Simonova A.V. Influence of operation factors on resistance of IR-LEDs irradiated by gamma-quanta / Gradoboev A.V., Simonova A.V. // European Materials Research Society Spring Meeting 2018, Nanomaterials, Symposium K, Lun 21, 2018. – K.PII.23 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/defect-induced-effects-nanomaterials-emrs#collapse141> (Дата обращения 26.09.2018).

30. Simonova A.V. Influence of dislocations on operation characteristics of LEDs based upon AlGaAs heterostructures / Gradoboev A.V., Simonova A.V., Plotnikova I.V. // European Materials Research Society Spring Meeting 2018, Nanomaterials, Symposium K, Lun 21, 2018. – K.PII.24 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.european-mrs.com/defect-induced-effects-nanomaterials-emrs#collapse142> (Дата обращения 26.09.2018).

31. Симонова А.В. Влияние комбинированного действия факторов длительной эксплуатации и облучения гамма-квантами на работоспособность светодиодов ИК-диапазона / Градобоев А.В., Симонова А.В. // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: материалы VIII междунар. конф. (11–13 сент. 2018 г.) Semipalatinsk Test Site: VIII International conference (September 11–13, 2018). – г. Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2018. – С. 158.

32. Simonova A.V. Effect of Sequence of combined impact of influencing factors on operation of IR-LEDs / 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.

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

34. Simonova A.V. Radiation hardness of GaP LEDs to gamma-quantum irradiation

tion / Gradoboev A.V., Orlova K.N., Simonova A.V. // 6th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2018): Abstracts. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2018. – P. 542.

Список цитированной литературы

1. Gradoboev, A.V. Research on the radiation exposure “memory effects” in AlGaAs heterostructures / A.V. Gradoboev, V.V. Sednev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2015. – T. 81. – №. 1. – С. 012007.
2. Gradoboev, A.V. The influence of power mode on IR-LED resistance to the irradiation with fast neutrons / A.V. Gradoboev, V.V. Sednev // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Fizika. – 2014. – T. 57. – №. 10-3. – С. 20-23.