

На правах рукописи



Орлова Ксения Николаевна

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaInP С
МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Юргинском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Юрга

Научный руководитель: доктор технических наук
Градобоев Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Олешко Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной и световой техники Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

Войцеховский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт приборов», г. Лыткарино

Защита состоится «06» ноября 2013 г. в ___ ч ___ мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.02 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.02, д. ф.- м.н.



М.В. Коровкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Разработанные в конце 80х – начале 90х годов гетероструктуры на основе соединений алюминия-галлия-индия-фосфида (AlGaInP) являются основой для светодиодов, излучающих в видимой области спектра, в частности, в красном, оранжевом и желтом диапазонах. Этот диапазон широко используется:

- в сфере оптической сигнальной обработки;
- лазерных принтеров;
- фотопреобразователях и солнечных батареях;
- движущихся информационных табло;
- светофоров и дорожных знаков на автострадах;
- элементах бортовой аппаратуры железнодорожных поездов и авиатехники;
- лампах автомобилей;
- морских и речных маяков и т.п.

Также они являются кандидатами для использования в качестве источников для оптических волоконных систем связи, где оптические потери в 660 нм режимах самые низкие.

По условиям эксплуатации гетероструктуры могут подвергаться значительному воздействию ионизирующих излучений, например, в условиях космического пространства или на объектах атомной энергетики. К числу таких излучений чаще всего относят гамма-излучение, нейтронное, протонное. В этих условиях важно прогнозирование радиационной стойкости на первой стадии производства, то есть на стадии конструирования приборов.

Ионизирующее излучение приводит к генерации радиационных дефектов, снижению концентрации электронов и уменьшению их подвижности. Это приводит в конечном итоге к изменению электрофизических и светотехнических характеристик полупроводниковых приборов, а также и эксплуатационных параметров.

Поскольку для эксплуатации приборов необходимо знание его выходных характеристик и параметров, то для цели прогнозирования радиационной стойкости важно знать изменения электрофизических и светотехнических характеристик в результате облучения. При этом следует помнить, что радиационная стойкость светодиодов и других полупроводниковых приборов на основе гетероструктур AlGaInP, в основном, определяется стойкостью самого полупроводникового материала.

Знание закономерностей изменения параметров гетероструктур AlGaInP и светодиодов на их основе при облучении позволит прогнозировать радиационную стойкость светодиодов на стадии разработки и конструирования. При этом будет отсутствовать необходимость проводить длительные исследования по определению стойкости в каждой партии приборов и, соответственно, минимизировать затраты на их производство.

Следует отметить, что в настоящее время практически отсутствуют сведения о радиационном воздействии различных радиационных факторов как

на гетероструктуры AlGaInP, так и на светодиоды на их основе.

Таким образом, исследование радиационной стойкости гетероструктур AlGaInP является актуальным и позволит решать задачи прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на стадии их проектирования.

Цель работы

Исследовать радиационную стойкость гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами и разработать методику прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на их основе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать деградацию электрофизических и светотехнических параметров светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами.
2. Исследовать деградацию электрофизических и светотехнических параметров светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении гамма-квантами.
3. Разработать методику прогнозирования радиационной стойкости и рекомендации по повышению радиационной стойкости светодиодов.

Научная новизна

1. Впервые установлено, что процесс снижения мощности излучения активных слоев светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами состоит из трех стадий.

2. Снижение мощности излучения активных слоев гетероструктур AlGaInP красного и желтого свечения при облучении быстрыми нейтронами на первой стадии снижения мощности излучения обусловлено созданием центров поглощения излучения в активном слое и/или в соседних слоях.

3. Снижение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами на второй стадии снижения мощности излучения для гетероструктур AlGaInP красного свечения обусловлено созданием центров безызлучательной рекомбинации, а для гетероструктур AlGaInP желтого свечения созданием центров поглощения излучения в активном слое и/или в соседних слоях.

4. Снижение мощности излучения активных слоев гетероструктур AlGaInP красного и желтого свечения при облучении гамма-квантами на первой и второй стадиях обусловлено введением центров поглощения излучения в активном слое и/или в соседних слоях.

5. При облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами гетероструктур AlGaInP красного и желтого свечения наблюдаются релаксационные процессы на границе между первой и второй стадиями снижения мощности излучения в результате облучения, обусловленные частичным отжигом дефектов с восстановлением мощности излучения, что приводит к снижению вклада второй стадии в общий процесс снижения мощности.

Практическая ценность работы

1. На основании установленных закономерностей разработана методика

прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, которая позволяет по результатам измерения граничного тока, ниже которого наблюдается режим низкой инжекции электронов и мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов прогнозировать изменение мощности при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами.

2. Применение разработанной методики прогнозирования позволяет повысить эффективность производства светодиодов с требуемой радиационной стойкостью.

3. Разработаны рекомендации по повышению радиационной стойкости светодиодов и гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами.

4. Представленные в работе результаты использованы при разработке новых светодиодов и частично введены в ТУ на серийные светодиоды (акт внедрения).

Работа выполнена при поддержке ГК 14.513.11.0119 и Минобрнауки (госзадание «Наука», проект 2.3302.2011).

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (г. Томск) и использованы при разработке ТУ, конструкторско-технической документации, справочных и информационных материалов на выпускаемые и вновь разрабатываемые приборы.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Снижение мощности излучения светодиодов при облучении состоит из стадии снижения мощности излучения вследствие радиационно-стимулированной перестройки исходных дефектов, стадии снижения мощности введением радиационных дефектов и стадии перехода в режим низкой инжекции электронов.

2. Вклад первой стадии снижения мощности излучения при облучении определяется граничным током исходных светодиодов и рабочим током. Вклад второй стадии, зависит от вклада первой стадии, и определяется мощностью излучения в режиме низкой инжекции электронов для исходных светодиодов.

3. При переходе от первой стадии ко второй наблюдаются релаксационные процессы в виде частичного отжига введенных дефектов с частичным восстановлением мощности излучения на фоне общего снижения мощности, при этом для гетероструктур AlGaInP красного свечения происходит изменение механизма протекания тока.

4. Методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на основе установленных закономерностей основана на расчете изменения мощности излучения при облучении по результатам измерения граничного тока и мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов для исходных светодиодов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач, использованием апробированных методов и методик исследования, большим объемом экспериментальных данных и применением статистических методов для их обработки, анализом

литературных данных и согласованием полученных результатов с данными других авторов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на следующих конференциях и симпозиумах: 54-й Международной научной конференции Московского физико-технического института «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе» (Москва, 2011); Международной Интернет-конференции «Актуальные проблемы биохимии и бионанотехнологии» (Казань, 2011); 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012) (Tomsk, 2012); XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2012); Международной молодежной конференции «Инновации в машиностроении» (Юрга, 2012); 16-ом Международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 2012); Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Радиационная стойкость электронных систем (Стойкость – 2013)» (Москва, 2013).

Публикации. По содержанию работы и результатам исследований опубликовано 12 печатных работ в научных журналах, сборниках трудов российских и зарубежных конференций, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов, в анализе результатов экспериментальных исследований, формулировке выводов. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из списка используемых сокращений, введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации состоит из 159 страниц, включая 74 рисунка, 1 таблицу и списка литературы из 124 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования; сформулированы цель исследований и определены решаемые задачи; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; указаны научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе рассмотрены электрофизические, светотехнические свойства гетероструктур AlGaInP и свойства по радиационной стойкости этой материальной системы (на примере радиационной стойкости соединений $A_{III}B_V$).

Описаны используемые методы изготовления гетероструктур; а также основные технологические приемы, используемые при изготовлении гетероструктур AlGaInP. Показаны особенности изменения параметров роста гетероструктур методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений, который является основным для промышленного производства

светодиодов AlGaInP с множественными квантовыми ямами, с характеристиками гетероструктур.

Показано, что причиной изменения электрических и световых характеристик светодиодов является изменение соотношения между концентрацией центров излучательной и безызлучательной рекомбинации и, как следствие, изменение соотношения между излучательным и безызлучательным временем жизни. При этом практически отсутствуют работы по исследованию радиационной стойкости гетероструктур AlGaInP или изделий на их основе.

Анализ литературных данных определил сформулированные во введении актуальность работы, цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены основные геометрические и структурные характеристики объектов исследования. В качестве объектов исследования были выбраны светодиоды, изготовленные на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами в условиях серийного производства. Гетероструктуры были получены как от отечественных, так и от зарубежных производителей.

Рассмотрены используемые методы контроля параметров светодиодов и контролируемые при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами характеристики светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами.

Исследования выполнены с использованием следующих моделирующих установок, аттестованных в установленном порядке:

- БАРС-4 – импульсный твердотопливный двухзонный ядерный реактор на быстрых нейтронах;
- ГУ-200 – мощный изотопный источник непрерывного гамма-излучения (изотоп излучателя – ^{60}Co , средняя энергия гамма-квантов – 1,25 МэВ).

Использование указанного выше оборудования позволило выполнить исследования радиационной стойкости для следующих диапазонов воздействий:

- быстрые нейтроны – флюенсы до $5 \cdot 10^{15} \cdot \text{см}^{-2}$;
- гамма-кванты ^{60}Co – дозы до $5 \cdot 10^6$ Грей.

Для проведения исследований светодиоды на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами были сформированы в партии. Количество приборов в партии составляло 20 штук. Облучение светодиодов проводили в нормальных условиях в пассивном режиме питания, т.е. без подачи рабочего тока. Степень воздействия при облучении характеризовали флюенсом нейтронов (см^{-2}) – для облучения быстрыми нейтронами и экспозиционной дозой гамма-излучения (Гр). Дозиметрическое сопровождение для контроля уровня воздействия при облучении обеспечивалось в соответствии с утвержденной методикой проведения испытаний по воздействию ионизирующего излучения на изделия электронной техники и радиоэлектронную аппаратуру ФГУП «НИИП».

До и после облучения для каждой партии светодиодов проводили измерение всего комплекса контролируемых параметров:

- ватт-амперную характеристику, при этом мощность излучения регистрировали в шаре;
- прямую ветвь вольт-амперной характеристики;
- ватт-вольтную характеристику;
- спектр интенсивности излучения (после некоторых доз облучения);
- вольт-фарадную характеристику (после некоторых доз облучения).

Результаты измерений усреднялись для каждой партии. Разброс параметров светодиодов внутри партии до облучения не превышал $\pm 10\%$, а после облучения – $\pm 15\%$, при этом каждому символу на графиках результатов исследований соответствует среднее значение для партии приборов. Все параметры светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP измеряли в соответствии со стандартными методиками контроля параметров светодиодов.

Требуемый уровень воздействия обеспечивали как последовательным набором дозы облучения, так и однократным облучением. Кроме того, на предварительном этапе исследований было установлено, что в результате многократных измерений характеристик светодиодов после облучения обнаруживаются идентичные результаты. Поэтому отжигом радиационных дефектов при проведении измерений диодов можно пренебречь. Также было установлено, что оптический компаунд, используемый для изготовления линз, не изменяет свои оптические свойства при облучении. Таким образом, все изменения оптических свойств диодов в результате облучения можно объяснить только изменениями оптических свойств гетероструктур.

В третьей главе представлены результаты исследований исходных характеристик гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами.

Профили распределения носителей заряда позволяют выявлять квантовые ямы в исследуемых гетероструктурах, размеры которых согласуются с известными литературными данными.

Показано, что по виду полученных ВАХ, можно выделить области, относящиеся к областям средней и сильной инжекции электронов. При этом, в области средней инжекции электронов преобладает ток, связанный с инжекцией носителей заряда. При дальнейшем увеличении тока наряду с инжекцией электронов сказывается изменение сопротивления активной области и происходит изменение механизма протекания тока. Область слабой инжекции электронов исключена из анализа, поскольку в этом случае величина протекающего тока практически не зависит от напряжения прямого смещения.

Кроме того, показано, что светодиоды желтого цвета свечения имеют более высокий коэффициент полезного действия (их мощность излучения примерно в три раза выше по сравнению со светодиодами красного цвета свечения при тех же самых значениях прямого тока). В частности, наблюдается увеличение вклада сопротивления омических контактов металл-полупроводник в области более высокого прямого напряжения.

В четвертой главе представлены результаты исследований характеристик гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами. Определены параметры, определяющие радиационную стойкость светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами.

В результате выполненных исследований установлено, что облучение светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP быстрыми нейтронами и гамма-квантами ^{60}Co , в указанных диапазонах воздействий не приводят к заметным изменениям в вольт-фарадных характеристиках и в спектрах излучения светодиодов.

Снижение мощности излучения гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами происходит в три стадии (рис.1):

- на первой стадии вследствие радиационной перестройки исходных дефектов, о чем свидетельствуют насыщение процесса снижения мощности с ростом уровня воздействия. Отмечено, что уровень насыщения определяется величиной граничного тока, при котором режим низкой инжекции электронов переходит в режим средней инжекции;
- на второй стадии вследствие создания дефектов радиационного происхождения, при этом коэффициент повреждаемости зависит от вклада первой стадии;
- на третьей стадии наблюдается переход в режим низкой инжекции электронов, при этом мощность излучения не зависит от величины рабочего тока и не изменяется с дальнейшим ростом флюенса быстрых нейтронов.

Вклад первой стадии снижения мощности излучения гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами обратно пропорционален плотности рабочего тока и зависит от граничного тока, при котором происходит переход в режим низкой инжекции электронов.

Коэффициент повреждаемости на стадии 1 снижения мощности излучения в результате облучения, характеризующий стойкость гетероструктуры:

- не зависит от уровня воздействия
- не зависит от величины рабочего тока;
- определяется типом гетероструктуры.

Изменение мощности излучения и рабочего тока при облучении зависит от ширины запрещенной зоны и уровня инжекции электронов. Вследствие облучения быстрыми нейтронами наблюдается ускоренная деградация омических контактов (рис. 2), что проявляется в сдвиге ВАХ в сторону больших напряжений в области высоких токов (рис. 3).

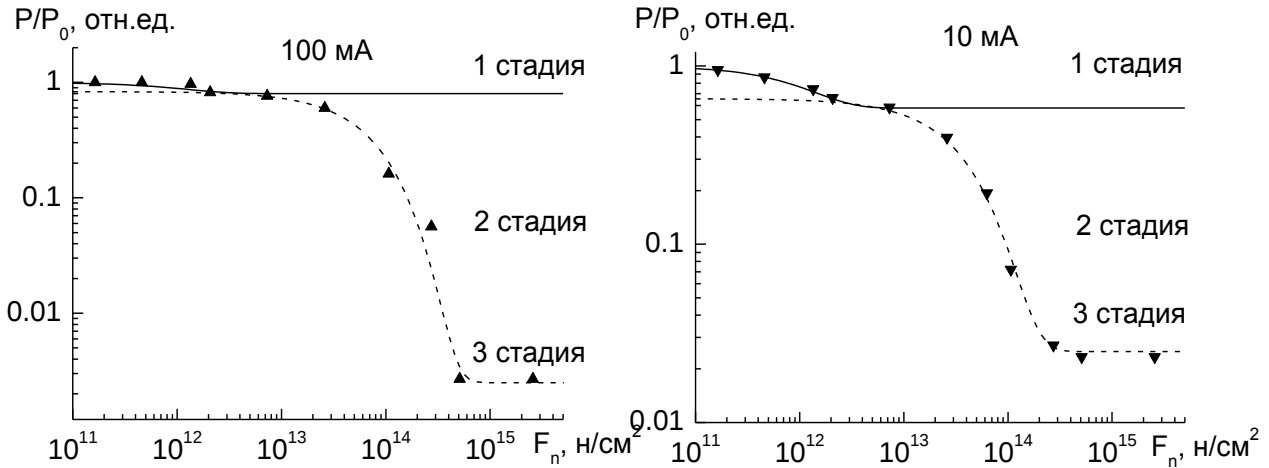


Рис. 1 – Относительное изменение мощности излучения гетероструктур ($\lambda=630$ нм.) тип I при облучении быстрыми нейтронами в области средней (10 мА) и высокой (100 мА) инжекции электронов

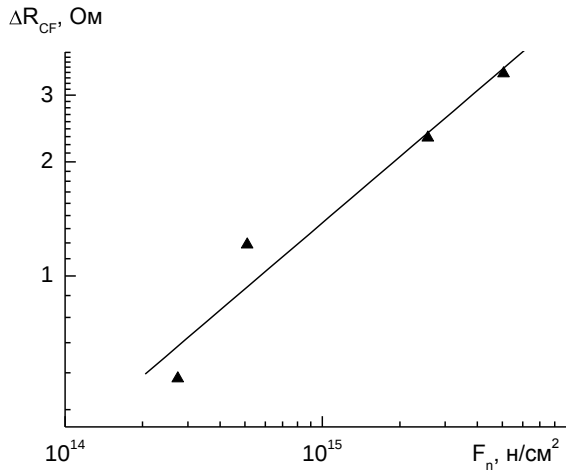


Рис. 2 – Зависимость доли сопротивления омического контакта обусловленного облучением быстрыми нейтронами от уровня воздействия

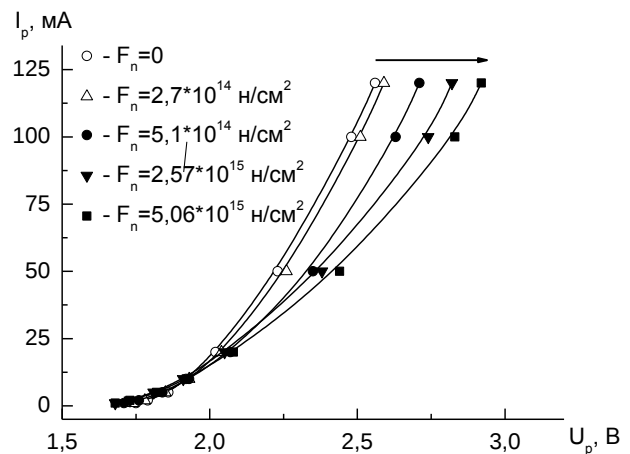


Рис. 3 – Изменение вольт-амперной характеристики для гетероструктур ($\lambda=630$ нм.) тип I при облучении быстрыми нейтронами: а) – линейные координаты; б) – полулогарифмический масштаб

Для стадии 2 снижения мощности излучения в результате облучения процесс насыщения отсутствует и происходит создание дефектов радиационного происхождения.

Коэффициент повреждаемости на стадии 2 снижения мощности излучения в результате облучения, характеризующий стойкость гетероструктуры:

- зависит от вклада первой стадии в общее снижение мощности;
- не зависит от величины рабочего тока;
- определяется типом гетероструктуры.

Для всех типов гетероструктур на границе между стадией 1 и стадией 2 наблюдается радиационно-стимулированный отжиг дефектов, следствием которого является частичное восстановление мощности излучения на фоне

общего снижения мощности излучения в результате облучения (рис.4 и рис.5).

В области малых доз при облучении гамма-квантами для некоторых

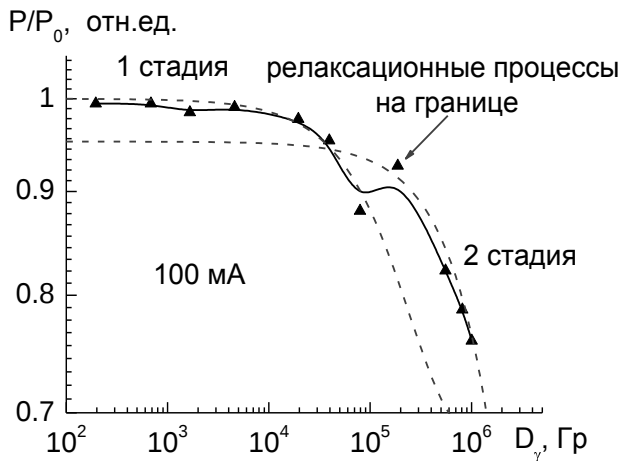


Рис. 4 – Релаксационные процессы на границе между первой и второй стадиями изменения мощности излучения гетероструктур ($\lambda=590$ нм.) тип III при облучении быстрыми нейтронами

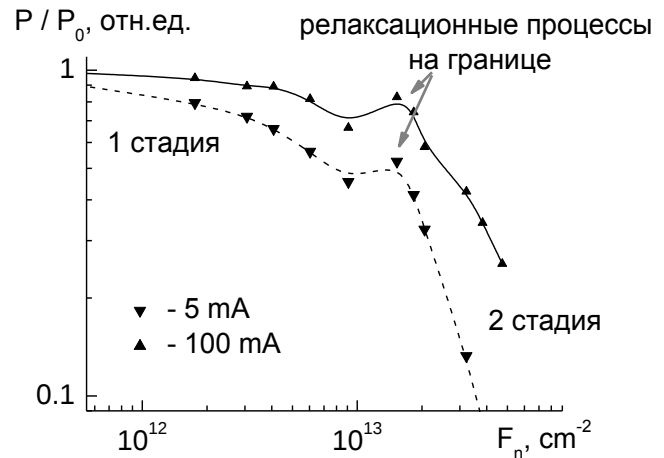


Рис.5 – Изменение мощности излучения гетероструктур ($\lambda=630$ нм.) тип I при облучении гамма-квантами при рабочем токе 100 мА

гетероструктур наблюдается восстановление мощности излучения (рис. 6) вследствие радиационно-стимулированной релаксации механических напряжений в слоях гетероструктуры, вводимых на стадии выращивания гетероструктуры и/или на стадии изготовления диодов. При этом гетероструктуры, для которых наблюдается восстановление мощности излучения при облучении малыми дозами гамма-квантов имеют более высокую радиационную стойкость по сравнению с гетероструктурами, для которых не наблюдается эффект малых доз.

Вклад первой стадии снижения мощности излучения гетероструктур

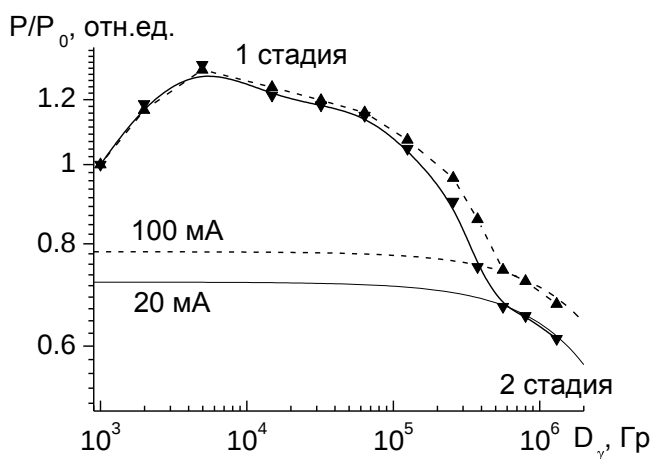


Рис. 6 – Изменение мощности излучения гетероструктур AlGaInP ($\lambda=630$ нм.) при облучении гамма-квантами

AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении гамма-квантами обратно пропорционален плотности рабочего тока и зависит от граничного тока, при котором светодиод переходит в режим низкой инжекции электронов.

Для некоторых типов гетероструктур (рис. 7) релаксационные процессы наблюдаются уже на стадии 1 процесса снижения мощности излучения в результате облучения. На зависимостях, показанных на рис. 7 для

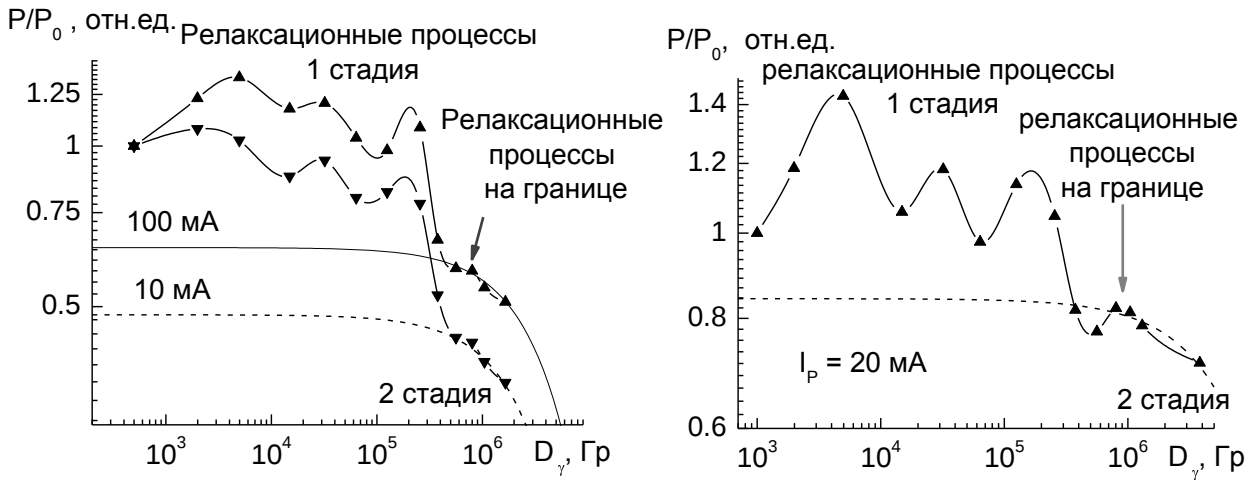


Рис. 7 – Изменение мощности излучения гетероструктур AlGaInP ($\lambda=630$ нм.) (а) и гетероструктур AlGaInP ($\lambda=590$ нм.) (б) при облучении гамма-квантами

гетероструктур AlGaInP ($\lambda=630$ нм.) можно выделить несколько участков восстановления мощности излучения при воздействии гамма-квантов, которые характеризуются следующими диапазонами доз облучения:

- первый участок – от $1 \cdot 10^3$ Гр до $4 \cdot 10^3$ Гр;
- второй участок – от $1 \cdot 10^4$ Гр до $3 \cdot 10^4$ Гр;
- третий участок – от $6 \cdot 10^4$ Гр до $1,4 \cdot 10^5$ Гр;
- четвертый участок – от $6 \cdot 10^5$ Гр до $1,15 \cdot 10^6$ Гр

Для гетероструктур AlGaInP ($\lambda=590$ нм.) также можно выделить несколько участков восстановления мощности излучения при воздействии гамма-квантов, которые характеризуются следующими диапазонами доз облучения:

- первый участок – от $1 \cdot 10^3$ Гр до $4 \cdot 10^3$ Гр;
- второй участок – от $1 \cdot 10^4$ Гр до $3 \cdot 10^4$ Гр;
- третий участок – от $1 \cdot 10^5$ Гр до $2 \cdot 10^5$ Гр;
- четвертый участок – от $4 \cdot 10^5$ Гр до $8 \cdot 10^5$ Гр.

Рассмотрим выделенные участки более подробно. Фактически первый участок роста мощности излучения в обоих случаях полностью совпадает с областью малых доз облучения. Четвертый участок можно однозначно связать с описанными выше релаксационными процессами на границе между первой и второй стадиями снижения мощности излучения.

Вопрос о природе второго и третьего участка к настоящему времени остается открытым. Можно только говорить о том, что в процессе радиационно-стимулированной перестройки исходной дефектной структуры гетероструктур при облучении гамма-квантами наблюдается преобразование простых дефектов в более сложные.

Таким образом, в результате исследований установлено, что дефектность исходных гетероструктур во многом определяет как эффективность работы исходных светодиодов, так и их радиационную стойкость. При этом, чем выше эффективность работы светодиодов, тем выше их радиационная стойкость.

В пятой главе представлена методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов, изготовленных на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, что является целью исследований, выполняемых в данной работе.

Методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами.

Из результатов исследований, видно, что критериальным параметром, т.е. параметром определяющим радиационную стойкость светодиодов, является мощность излучения. Поэтому установленные соотношения, описывающие изменение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами, использовались в качестве основы для создания методики прогнозирования радиационной стойкости светодиодов.

В результате исследований было установлено, что весь объем исследуемых гетероструктур можно разделить на два класса:

- **1 класс** – объединяет типы гетероструктур, которые имеют нелинейную ВВХ и линейную ВтАХ с/или без ярко выраженной области сильной инжекции электронов;

- **2 класс** – объединяет типы гетероструктур, которые имеют ВВХ близкую к линейной (подобные ВВХ наблюдаются на гетероструктурах 1 класса на второй стадии снижения мощности излучения). Для них характерно отсутствие первой стадии снижения мощности излучения, т.е. снижение мощности излучения, описывается закономерностями, установленными для второй стадии.

Рассмотрим методику прогнозирования радиационной стойкости светодиодов для гетероструктур, отнесенных к 1 классу. В этом случае изменение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами, описывается тремя стадиями, при этом на границе между стадией 1 и стадией 2 наблюдаются переходные процессы – частичное восстановление мощности излучения на фоне ее общего снижения при облучении. Изменение мощности излучения на стадии 1 описывается следующим соотношением:

$$\frac{P}{P_0} = A_{n1} + B_{n1} \cdot \exp\left(-\frac{F_n}{K_{n1}}\right) \quad (1)$$

где P/P_0 – относительное изменение мощности излучения; A_{n1} – коэффициент пропорциональности; B_{n1} – коэффициент пропорциональности, определяющий вклад первой стадии в снижение мощности излучения, величина которого зависит от рабочего тока; K_{n1} – коэффициент повреждаемости; F_n – флюенс нейтронов.

Величина коэффициента B_{n1} определяется величиной граничного тока и величиной рабочего тока:

$$B_{n1} = \left(\frac{I_{\alpha\delta}}{I_{\delta}} \right)^{\alpha} \cdot 100\% \quad (2)$$

где $I_{\text{гр}}$ – граничный ток, ниже которого наблюдается режим низкой инжекции электронов; α – показатель степени, величина которого зависит от вида гетероструктуры и вида облучения.

При облучении быстрыми нейтронами коэффициент α для гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами ($\lambda=630$ нм.) равен 0,28.

Коэффициент повреждаемости K_{n1} определяется величиной граничного тока и может быть определен по следующему соотношению

$$\hat{E}_{n1} = 1,3 \cdot 10^{12} \cdot I_{\alpha\delta}^{-2} \cdot \tilde{m}^{-2} \quad (3)$$

где величина $I_{\text{гр}}$ взята в [мА], а коэффициент K_{n1} получаем в [см⁻²].

В свою очередь, коэффициент A_{n1} определяется следующим образом:

$$A_{n1} = 1 - B_{n1} \quad (4)$$

На второй стадии снижение мощности излучения описывается соотношением (5):

$$\frac{P}{P_0} = \frac{P_{\min}}{P_0} + A_{n2} \cdot \exp\left(-\frac{F_n}{K_{n2}}\right) \quad (5)$$

где $P_{\min}$ – уровень мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов; A_{n2} – коэффициент пропорциональности, отражающий вклад второй стадии в общий процесс снижения мощности излучения; K_{n2} – коэффициент повреждаемости, характеризующий стойкость гетероструктуры на второй стадии.

Коэффициент A_{n2} определяется величиной коэффициента A_{n1} по следующему соотношению:

$$A_{n2} = k_n + A_{n1} \quad (6)$$

где k_n – коэффициент, определяющий вклад восстановления мощности излучения при переходном процессе на границе между стадией 1 и стадией 2 снижения мощности излучения в результате облучения, величина которого определяется дефектностью исходной гетероструктуры, т.е. величиной граничного тока.

В свою очередь коэффициент повреждаемости K_{n2} также определяется значением коэффициента B_n :

$$K_{n2} = \hat{E} \cdot \hat{A}_n^{-1,2} \quad (7)$$

где K – коэффициент пропорциональности, величина которого для гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами ($\lambda=630$ нм.) составляет $1,75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Заключительная стадия 3 снижения мощности излучения в результате облучения определяется режимом низкой инжекции электронов и описывается соотношением:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{P_{\min}}{P_0} = \text{const} \quad (8)$$

Таким образом, изложенная выше совокупность установленных соотношений практически представляет собой феноменологическую радиационную модель гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, отнесенных нами ранее к 1 классу.

Представленные соотношения позволяют рассчитать закономерности снижения мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами для любых гетероструктур, отнесенных к первому классу, по результатам измерения граничного тока, ниже которого наблюдается режим низкой инжекции электронов и мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов. Т.е именно эти две характеристики (граничный ток и мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов) определяют радиационную стойкость гетероструктур в целом.

Методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов для гетероструктур AlGaInP, отнесенных нами к классу 2.

Для них характерно снижение мощности излучения, описываемое стадией 2, которая переходит в стадию 3, т.е. полностью отсутствует стадия 1 снижения мощности излучения в результате облучения.

Для гетероструктур, отнесенных к классу 2 изменение мощности излучения описывается соотношениями, приведенными ранее (5) и (8), при этом коэффициент $A_{n2}(I_p)$ для заданного значения рабочего тока определяется величиной мощности излучения в области низкой инжекции электронов:

$$A_{n2}(I_p) = 1 - \frac{P_{\min}}{P(I_p)} \quad (9)$$

где $P(I_p)$ - мощность излучения при заданном значении рабочего тока.

В свою очередь коэффициент повреждаемости K_{n2} определяется соотношением:

$$\hat{E}_{n2} = C_n \cdot I_p^{0,32} \quad (10)$$

где C – коэффициент пропорциональности определяемый значением граничного тока для данной гетероструктуры.

Таким образом, представленные выше результаты позволяют сделать следующий вывод. Методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов для второго класса гетероструктур AlGaInP практически является усеченным вариантом методики прогнозирования радиационной стойкости светодиодов для гетероструктур AlGaInP первого класса.

Тогда вытекает более общий вывод. Для всех исследованных разновидностей гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами процесс снижения мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами

описывается единой феноменологической моделью радиационной стойкости светодиодов.

Методика прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении гамма-квантами.

Изменение мощности излучения на первой стадии снижения мощности излучения, в этом случае можно описать соотношением, подобным установленному ранее для случая быстрых нейтронов (1):

$$\frac{P}{P_0} = A_{\gamma 1} + B_{\gamma 1} \cdot \exp\left(-\frac{D_{\gamma}}{K_{\gamma 1}}\right) \quad (11)$$

где P/P_0 – относительное изменение мощности излучения; $A_{\gamma 1}$ – коэффициент пропорциональности; $B_{\gamma 1}$ – коэффициент пропорциональности, определяющий вклад первой стадии в снижение мощности излучения при облучении гамма-квантами, величина которого зависит от рабочего тока; $K_{\gamma 1}$ – коэффициент повреждаемости; D_{γ} – поглощенная доза гамма-квантов.

Вклад стадии 1 в общий процесс снижения мощности излучения описывается следующим соотношением:

$$B_{\gamma 1} = \left(\frac{I_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}}{I_{\tilde{\delta}}}\right)^{\alpha} \cdot 42\% \quad (12)$$

где $I_{\text{гр}}$ – граничный ток, ниже которого наблюдается режим низкой инжекции электронов; $\alpha = 0,11$ – показатель степени при облучении гамма-квантами.

В свою очередь коэффициент $A_{\gamma 1}$ определяется следующим образом:

$$A_{\gamma 1} = 1 - B_{\gamma 1} \quad (13)$$

Коэффициент повреждаемости $K_{\gamma 1}$ на первой стадии снижения мощности излучения определяется вкладом стадии 1 в общее снижение мощности излучения и может быть определен по следующему соотношению:

$$K_{\gamma 1} = 2,6 \cdot 10^5 I_{\tilde{\alpha}\tilde{\delta}}^2 \tilde{\alpha}\tilde{\delta} \quad (14)$$

где $I_{\text{гр}}$ – величина граничного тока в [мА].

На второй стадии снижение мощности излучения описывается соотношением (15):

$$\frac{P}{P_0} = \frac{P_{\min}}{P_0} + A_{\gamma 2} \cdot \exp\left(-\frac{D_{\gamma}}{K_{\gamma 2}}\right) \quad (15)$$

где $P_{\min}$ – уровень мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов; $A_{\gamma 2}$ – коэффициент пропорциональности, отражающий вклад второй стадии в общий процесс снижения мощности излучения; $K_{\gamma 2}$ – коэффициент

повреждаемости, характеризующий стойкость гетероструктуры на второй стадии.

Коэффициент $A_{\gamma 2}$ определяется величиной коэффициента $B_{\gamma 1}$ по следующему соотношению:

$$A_{\gamma 2}(I_p) = \left(\frac{\hat{A}_{\gamma \max}}{B_{\gamma 1}(I_p)} \right)^{10} \quad (16)$$

где $A_{\gamma 2}(I_p)$ – коэффициент, определяющий вклад второй стадии при заданном значении рабочего тока; $B_{\gamma \max}$ – значение коэффициента при граничном токе; $B_{\gamma 1}(I_p)$ – величина коэффициента $B_{\gamma 1}$ при заданном значении рабочего тока.

Величина коэффициента повреждаемости также определяется величиной коэффициента $B_{\gamma 1}$:

$$\hat{E}_{\gamma 2} = 2,5 \cdot 10^5 \left(\frac{\hat{A}_{\gamma \max}}{B_{\gamma}(I_p)} \right)^4 \quad (17)$$

В данном случае различие в коэффициентах $A_{\gamma 2}$ и $A_{\gamma 1}$ определяют вклад релаксационных процессов на границе между первой и второй стадиями

$$A_{\gamma 2} = k_{\gamma} + A_{\gamma 1} \quad (18)$$

где k_{γ} – коэффициент, определяющий вклад восстановления мощности излучения при переходном процессе на границе между стадией 1 и стадией 2 процесса снижения мощности излучения в результате облучения при облучении гамма-квантами, величина которого определяется дефектностью исходной гетероструктуры, т.е. величиной граничного тока.

В случае гетероструктур, для которых наблюдаются релаксационные процессы на стадии 1 процесса снижения мощности излучения при облучении гамма-квантами, можно также применить методику прогнозирования радиационной стойкости, если стадию 1 описать неким средним значением.

Методики прогнозирования радиационной стойкости светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами, описание которых представлено выше, позволяют однозначно прогнозировать радиационную стойкость светодиодов и, соответственно, гетероструктур на основе которых они изготовлены.

Достоверность прогнозирования на основании разработанных феноменологических моделей радиационной стойкости подтверждается достаточно хорошим совпадением между экспериментальными данными (символы) и результатами расчетов по установленным соотношениям (линии), которые представлены практически на всех рисунках, представленных в данной работе, где символами обозначены экспериментальные данные, а линии – результаты расчета по данным соотношениям.

Таким образом, достоверность разработанных феноменологических моделей радиационной стойкости подтверждается всем объемом экспериментальных данных, полученных в работе для всего многообразия

исследованных гетероструктур.

Из представленной выше методики прогнозирования радиационной стойкости следует, что радиационная стойкость светодиодов определяется значением граничного тока и минимальной мощностью излучения, измеряемой в режиме низкой инжекции электронов в активную область светодиода.

Таким образом, контроль указанных выше параметров позволяет гарантировать заданную радиационную стойкость. Используя установленные закономерности, разработчик светодиодов может очень четко обосновать выбор плотности рабочего тока, обосновать стратегию обеспечения заданной радиационной стойкости. Из представленных выше результатов видно, что контроль граничного тока и уровня мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов позволяет изготавливать светодиоды с заданной радиационной стойкостью, что на практике позволит существенно повысить эффективность производства таких светодиодов.

Полученные экспериментальные результаты также позволяют разработать ряд рекомендаций по повышению радиационной стойкости гетероструктур:

1. Необходимо снизить уровень дефектности исходных гетероструктур, что позволит снизить величину граничного тока.
2. Поскольку одной из причин снижения мощности излучения является введение центров поглощения излучения в активный слой гетероструктуры и/или в соседние слои, то снижение концентрации легирующей примеси в активном и/или соседних слоях также позволит снизить вклад первой стадии снижения мощности излучения при облучении.
3. Введение облучения гамма-квантами в области малых доз, где наблюдается релаксация механических напряжений, сопровождаемая восстановлением мощности излучения, позволит повысить радиационную стойкость светодиодов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По виду полученных ВАХ и ВтАХ, выделены области, относящиеся к областям средней, сильной и слабой инжекции электронов. При этом, в области средней инжекции электронов преобладает ток, связанный с инжекцией носителей заряда. С дальнейшим увеличением тока наряду с инжекцией электронов сказывается изменение сопротивления активной области светодиодов и происходит изменение механизма протекания тока.
2. Снижение мощности излучения происходит прямо пропорционально дозе облучения (флюенсу нейтронов) и обратно пропорционально величине рабочего тока, при котором производится измерение мощности излучения.
3. Снижение мощности излучения гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами ^{60}Co зависит от ширины запрещенной зоны и уровня инжекции электронов и происходит в три стадии:

- на первой стадии вследствие радиационной перестройки исходных дефектов (введение центров поглощения излучения), о чем свидетельствуют независимость коэффициента повреждаемости от уровня воздействия и насыщение процесса снижения мощности с ростом уровня воздействия. Отметим, что уровень насыщения определяется величиной граничного тока, при котором режим низкой инжекции электронов переходит в режим средней инжекции;
 - на второй стадии вследствие введения дефектов радиационного происхождения (центров безызлучательной рекомбинации), при этом коэффициент повреждаемости зависит от вклада первой стадии;
 - на третьей стадии наблюдается режим низкой инжекции электронов, при котором мощность излучения не зависит от величины рабочего тока и не изменяется с дальнейшим ростом флюенса быстрых нейтронов. Для гетероструктур AlGaInP при облучении гамма-квантами стадия 3 не была достигнута.
2. Для всех типов гетероструктур между стадией 1 и стадией 2 наблюдается радиационно-стимулированный отжиг дефектов, следствием которого является частичное восстановление мощности излучения.
 3. Для некоторых типов гетероструктур в области малых доз наблюдается восстановление мощности излучения вследствие радиационно-стимулированной релаксации механических напряжений в слоях гетероструктуры, вводимых на стадии выращивания гетероструктуры и/или на стадии изготовления диодов.
 4. Вклад первой стадии снижения мощности излучения гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами ^{60}Co обратно пропорционален плотности рабочего тока и зависит от граничного тока, при котором происходит переход в режим низкой инжекции электронов.
 5. Для красных гетероструктур характерно изменение механизма протекания тока при переходе от стадии 1 к стадии 2, при этом в области высоких токов проводимость падает, а в области низких токов возрастает. Причем одновременно растут различия между областями средней и сильной инжекцией электронов.
 6. Дефектность исходных гетероструктур во многом определяет как эффективность работы исходных светодиодов, так и их радиационную стойкость. При этом, чем выше эффективность работы светодиодов, тем выше их радиационная стойкость.
 7. Если для исходных гетероструктур определить значение граничного тока, ниже которого наблюдается режим низкой инжекции электронов, и минимальное значение мощности излучения в режиме низкой инжекции электронов, то можно рассчитать зависимость снижения мощности излучения на первой и второй стадиях, что позволяет прогнозировать стойкость гетероструктур к облучению гамма-квантами и быстрыми нейтронами. Достоверность такого прогноза подтверждается совпадением экспериментальных и расчетных данных.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Орлова, К.Н. Исследование деградации мощности излучения гетероструктур AlGaInP красного и желтого цвета свечения при облучении гамма-квантами [Электронный ресурс] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 4. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/7/text.pdf>.
2. Орлова, К.Н. Деградация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами [Текст] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2013; вып. 2. – С. 64 – 66.
3. Орлова, К.Н. Облучение гамма-квантами ^{60}Co светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP с множественными квантовыми ямами [Текст] / А.В. Градобоев, К.Н. Орлова, И.А. Асанов // Перспективные материалы. – 2013; № 7. – С. 49 – 55.

В международном научном издании:

1. Orlova, K.N. Resistance of LEDs Based on AlGaInP Heterostructures to Irradiation by Fast Neutrons [Text] / A.V. Gradoboev, K.N. Orlova, I.A. Asanov // J. Chem. Chem. Eng. – 2013. – №7. – P. 409-413.

В других научных изданиях:

2. Orlova, K. N. Gamma degradation of light-emitting diodes based on heterostructured AlGaInP [Text] / K. N. Orlova, A. V. Gradoboev, I. A. Asanov // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – V. 1. – P. 192-195.
3. Орлова, К. Н. Способы увеличения мощности излучения светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP [Текст] / К.Н. Орлова // Приволжский научный вестник. – 2012. – №. 10(14). – С. 17-20. – Библиогр.: с. 20.
4. Орлова, К. Н. Деградация светодиодов на основе AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами [Текст] / А.В. Градобоев, К. Н. Орлова // Труды 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». Общая и прикладная физика, Москва, 10-30 Ноября 2011. – М.: МФТИ, 2011. – С. 146-147. – Библиогр.: с. 147.
5. Орлова, К. Н. Радиационная модель светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP. I. Облучении гамма-квантами ^{60}Co [Текст] / А. В. Градобоев, К. Н. Орлова, И. А. Асанов // «Радиационная физика твердого тела»: труды XXII Международной конференции, Севастополь, 9-14 Июля 2012. – Москва: НИИ ПМТ, 2012. – С. 510-516. – Библиогр.: с. 516.

6. Орлова, К. Н. Диагностика радиационной стойкости светодиодов с наноразмерными квантовыми ямами на основе гетероструктур AlGaInP [Текст] / К. Н. Орлова, А.В. Градобоев // Студент и научно-технический прогресс: сборник научных работ победителей Международного молодежного конкурса, Ростов-на-Дону, 1 Июня-1 Июля 2012. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012. – Т. 2. – С. 71-74.

7. Орлова, К. Н. Эпитаксиальные методы получения наноразмерных гетероструктур InGaAlP [Текст]/ К. Н. Орлова // Актуальные проблемы биохимии и бионанотехнологии: сборник трудов Международной Интернет-конференции, Казань, 10-12 Ноября 2011. – Казань: Изд-во КФУ, 2011. – С. 43.

8. Орлова, К. Н. Технологии получения гетероструктур AlGaInP [Текст]/ К. Н. Орлова // Инновации в машиностроении: сборник трудов международной молодежной конференции, Юрга, 27-29 Августа 2012. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 141-143. – Библиогр.: с. 143.

9. Орлова, К. Н. Основные способы увеличения мощности излучения светодиодов AlGaInP с квантовыми ямами [Текст] / К. Н. Орлова // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: сборник материалов форума, Харьков, 17-19 Апреля 2012. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – Т. 1. – С. 29-30.