

На правах рукописи



**Рубанов Павел Владимирович**

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs  
ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ ИК-ДИАПАЗОНА**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2012

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: Зыков Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией № 51 радиационных испытаний материалов и изделий Института неразрушающего контроля Национального исследовательского Томского политехнического университета

Коханенко Андрей Павлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт приборов»

Защита состоится «28» марта 2012 г. в 16 ч 00 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 «27» февраля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.02



М.В. Коровкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Светодиоды инфракрасного диапазона (далее СД), изготавливаемые на основе гетероструктур AlGaAs используются в качестве элементной базы радиоэлектронной аппаратуры, эксплуатируемой на ядерных энергетических объектах, в космических аппаратах, а также военной технике и вооружении, в следующих областях:

- оптические связи с открытым каналом;
- волоконно-оптические линии связи;
- управление движущимися объектами;
- устройства видеонаблюдения, телеметрии, приборы ночного видения, охранные комплексы;
- медицина и биология.

При этом СД могут подвергаться действию различных радиационных факторов, вызывающих значительные изменения свойств полупроводниковых материалов, на основе которых они изготовлены. К числу таких факторов относят следующие виды ионизирующих излучений (ИИ): нейтронное, протонное, электронное и гамма-квантов.

Физическая сущность воздействия ИИ состоит в том, что оно вызывает определенные изменения (обратимые или необратимые) характеристик полупроводниковых материалов, приводящие в конечном итоге к изменению функциональных параметров полупроводниковых приборов и других их эксплуатационных характеристик.

В реальных условиях эксплуатации на СД могут действовать два и более радиационных фактора комплексно (одновременно) и/или комбинированно (последовательно).

Таким образом, наличие при эксплуатации СД различных радиационных факторов выдвигает требование обеспечения их гарантированной работы, то есть СД должны обладать определенной радиационной стойкостью.

Следует особо отметить, что радиационная стойкость полупроводниковых приборов в основном определяется радиационной стойкостью используемого полупроводникового материала. При этом технология изготовления приборов вносит незначительный вклад в их стойкость.

В настоящее время определение радиационной стойкости СД осуществляют при помощи прямых испытаний на моделирующих установках. Данный метод имеет следующие недостатки:

- большая длительность во времени;
- высокая стоимость;
- необходимость применения длинных линий для обеспечения испытаний в активном режиме питания, а иногда и для замера параметров после испытаний в связи с высокой наведенной активностью.

При этом отсутствует радиационная модель, которая позволяла бы прогнозировать изменение критериальных параметров СД в результате воздействия радиационных факторов. Следует особо отметить, что практически нет сведений о комплексном и комбинированном действии различных радиационных факторов на СД. Отсутствие перечисленных выше сведений приводит к низкой эффективности разработки СД с заданной радиационной стойкостью, а также затрудняет поиск путей повышения радиационной стойкости серийно выпускаемых СД.

Все вышеизложенное обуславливает актуальность разработки радиационной модели гетероструктур AlGaAs, которая бы позволяла прогнозировать стойкость СД на их основе еще на стадии проектирования, с учетом комбинированного действия различных радиационных факторов. Также актуальны поиск путей повышения радиационной стойкости СД.

### **Цель работы**

Разработать радиационную модель гетероструктур AlGaAs с учетом комбинированного действия различных радиационных факторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать деградацию гетероструктур AlGaAs при облучении:
  - быстрыми нейтронами;
  - электронами;
  - гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ .
2. Исследовать деградацию гетероструктур AlGaAs при комбинированном облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ .
3. Разработать рекомендации по прогнозированию и повышению радиационной стойкости светодиодов ИК-диапазона на основе гетероструктур AlGaAs.

### **Научная новизна**

1. Спад мощности излучения активных слоев двойных гетероструктур AlGaAs при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами происходит вследствие введения центров безизлучательной рекомбинации и существенно отличается в области слабой и сильной инжекции электронов.
2. Впервые показано, что снижение мощности излучения активных слоев двойных гетероструктур AlGaAs при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами происходит в два этапа:
  - на первом этапе происходит радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры;
  - на втором этапе вводится центр безизлучательной рекомбинации чисто радиационного происхождения.
3. Впервые представлены результаты исследования комбинированного облучения двойных гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами.

4. Впервые установлено, что комбинированное облучение двойных гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами позволяет повысить их радиационную стойкость.

#### **Практическая ценность работы**

1. На основании установленных соотношений разработана радиационная модель двойных гетероструктур AlGaAs, описывающая изменение мощности излучения при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами, с учетом их комбинированного действия, которая позволяет прогнозировать изменение мощности при облучении в зависимости от уровня инжекции электронов в активный слой гетероструктуры.

2. Применение радиационных технологий позволяет повысить эффективность разработки и производства светодиодов с повышенной радиационной стойкостью (патенты РФ №2303314, 2303315, 2304823, 2304824).

3. При разработке светодиодов с повышенной радиационной стойкостью на основе двойных гетероструктур AlGaAs необходимо использовать плотности рабочих токов более 200 мА/мм<sup>2</sup>.

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

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Мощность излучения двойных гетероструктур AlGaAs изменяется пропорционально рабочему току в степени  $B$ , при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами коэффициент  $B$  не зависит от уровня воздействия в области сильной инжекции, а в области слабой инжекции уменьшается при переходе ко второму этапу деградационного процесса.

2. Снижение мощности излучения активных слоев двойных гетероструктур AlGaAs при заданном рабочем токе в результате облучения быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами происходит в два этапа:

- на первом этапе наблюдается радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры, при этом вклад первого этапа определяется толщиной активного слоя;
- на втором этапе вводится центр безизлучательной рекомбинации чисто радиационного происхождения.

3. При комбинированном облучении двойных гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами отсутствует аддитивность, т.е. получаемые результаты зависят от последовательности облучения.

4. Предварительное облучение двойных гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами приводит к повышению их стойкости при последующем облучении электронами и гамма-квантами, точно также как предварительное облучение электронами приводит к повышению стойкости при последующем облучении гамма-квантами.

**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: III и IV всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (Юрга, 2005-2006); V Международной научной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2006); девятой конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» «GaAs-2006» (Томск, 2006); Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Радиационная стойкость электронных систем (Стойкость – 2006, Стойкость – 2010)» (Москва, 2006, 2010); XVII международном совещании «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 2007); Десятой международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах (ФХП-10)» (Кемерово, 2007); 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2010).

**Публикации.** По содержанию работы и результатам исследований опубликовано 14 печатных работ в научных журналах, сборниках трудов российских и зарубежных конференций, в том числе три статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК и одна статья в центральном издании. Получено 7 патентов РФ на изобретение.

**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 введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 125 страниц, включая 48 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрены гетероструктуры AlGaAs, используемые для изготовления СД ИК-диапазона, и методы их выращивания. Описаны основные параметры СД ИК-диапазона, где показано, что одним из главных параметров СД является мощность излучения, которая напрямую связана с коэффициентом преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения –

внешним квантовым выходом.

На основании литературных данных представлен анализ процессов деградации оптических и электрофизических свойств гетероструктур AlGaAs при длительной наработке. Установлено, что образование дефектов темных пятен и дефектов темных линий в активном слое гетероструктур AlGaAs оказывает значительное влияние на их свойства и является основным механизмом деградации при длительной наработке СД, изготовленных на их основе. Кроме того, проведен анализ деградации оптических и электрофизических свойств при радиационном воздействии на гетероструктуры AlGaAs, а также СД, изготовленных на их основе. Показано, что воздействие различных радиационных факторов в большей или меньшей степени влияет на подвижность неосновных носителей заряда, изменение периода решетки слоев гетероструктур, но основным нежелательным радиационным эффектом является снижение светоотдачи СД, обусловленное радиационным повреждением активного слоя гетероструктуры. Кроме того, к настоящему времени отсутствует радиационная модель, которая бы описывала изменение свойств гетероструктур AlGaAs при облучении, что затрудняет выпуск и разработку СД с заданной радиационной стойкостью. Также показано, что практически отсутствуют работы по исследованию комбинированного действия радиационных факторов на гетероструктуры AlGaAs.

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

**Во второй главе** приведено описание объектов исследования, оборудования, а также методов исследования. В качестве объектов исследования использовались СД, изготовленные на основе трех типов двойных гетероструктур ЭСАГА-1, ЭСАГА-2, ЭСАГА-3 в условиях серийного производства, при этом толщины активных слоев гетероструктур были следующие: ЭСАГА-1 – 5 мкм; ЭСАГА-2 – 3 мкм; ЭСАГА-3 – 1 мкм. Электрофизические и оптические свойства исследуемых гетероструктур были практически идентичны.

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

- БАРС-4 – импульсный твердотопливный двухзонный ядерный реактор на быстрых нейтронах;
- «Электроника У-003» – линейный резонансный ускоритель электронов;
- ГУ-200 – мощный изотопный источник непрерывного гамма-излучения (изотоп излучателя –  $^{60}\text{Co}$ , средняя энергия гамма-квантов – 1,25 МэВ).

Использование указанного выше оборудования позволило выполнить исследования радиационной стойкости СД на основе ДГС AlGaAs для следующих диапазонов воздействий:

- быстрые нейтроны – флюенсы в интервале от  $3 \cdot 10^{11}$  до  $5 \cdot 10^{13} \cdot \text{см}^{-2}$ ;
- электроны – флюенсы в интервале от  $6 \cdot 10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{14} \cdot \text{см}^{-2}$ ;
- гамма-кванты  $^{60}\text{Co}$  – дозы в интервале от  $3 \cdot 10^6$  до  $9 \cdot 10^7$  Р.

Во всех случаях облучение СД проводили при нормальной температуре в

пассивном режиме питания, т.е. без наложения электрического поля. Степень воздействия характеризовали для быстрых нейтронов и электронов флюенсом частиц ( $\text{см}^{-2}$ ), а для гамма-квантов – поглощенной дозой (Р).

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».

Если для быстрых нейтронов и гамма-квантов потери энергии на линзе СД пренебрежимо малы, то в случае электронов эти потери необходимо учитывать. Потери энергии электронов в линзе СД были рассчитаны на основании известных данных о материале линзы и ее геометрических размерах. Энергия электронов на выходе ускорителя была выбрана таким образом, чтобы с учетом потерь на линзе электроны, падающие на кристалл СД, имели энергию 5 МэВ.

Для каждого СД до и после облучения измеряли прямую и обратную ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ), вольт-фарадную характеристику (ВФХ), а также ватт-амперную характеристику (далее ВтАХ) в непрерывном режиме питания, при этом мощность излучения регистрировали в шаре. Результаты измерений усреднялись для каждой партии СД. Количество СД в партии составляло 20 штук при исследовании радиационной стойкости для отдельных видов ионизирующего излучения. При комбинированном воздействии ионизирующего излучения количество СД в партии было не менее 10 штук. Разброс параметров СД внутри партии до облучения не превышал  $\pm 5\%$ , а после облучения –  $\pm 15\%$ , при этом каждому символу на графиках результатов исследований соответствует среднее значение для партии приборов. Спектр излучения измеряли выборочно для отдельных СД. Все вышеперечисленные параметры измеряли в соответствии со стандартными методиками контроля параметров СД.

На предварительном этапе исследований было установлено, что в результате многократных измерений характеристик СД после облучения обнаруживаются идентичные результаты, поэтому отжигом радиационных дефектов при проведении измерений диодов можно пренебречь. Этот вывод также подтверждается тем фактом, что закономерности, полученные в результате последовательного набора флюенса частиц с проведением промежуточных измерений на одной партии приборов, идентичны закономерностям, полученным на различных партиях приборов при однократном облучении. Кроме того, было установлено, что изменением оптической прозрачности линзы диодов в результате облучения также можно пренебречь и, тогда, все наблюдаемые изменения оптических свойств СД в результате облучения можно однозначно считать следствием изменения оптических свойств активных слоев гетероструктур.

**В третьей главе** представлены результаты исследований изменения параметров активных слоев исследуемых гетероструктур при облучении быстрыми нейтронами, электронами с энергией 5 МэВ и гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ , обоснован выбор критериальных параметров, определяющих радиационную



стойкость гетероструктур AlGaAs.

В результате выполненных исследований было установлено, что облучение СД на основе ЭСАГА-1, ЭСАГА-2 и ЭСАГА-3 быстрыми нейтронами, электронами 5 МэВ и гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ , так же как и их комбинированное действие, в диапазонах воздействий указанных ранее в Главе 2, не приводят к заметным изменениям в ВАХ и ВФХ. Небольшие изменения  $U_{np}$ , зарегистрированные при измерениях ВАХ СД после испытаний (в пределах  $\sim 4\%$ ) не превышают погрешностей измерений. Это позволяет сделать вывод о том, что снижение мощности излучения СД при облучении не связано с изменениями электрофизических характеристик активных слоев ДГС, используемых для их изготовления. Исследования также показали, что отсутствуют заметные изменения в спектре излучения диодов, т.е. нет сдвига длины волны максимума излучения, точно также как и нет изменений полуширины спектра излучения.

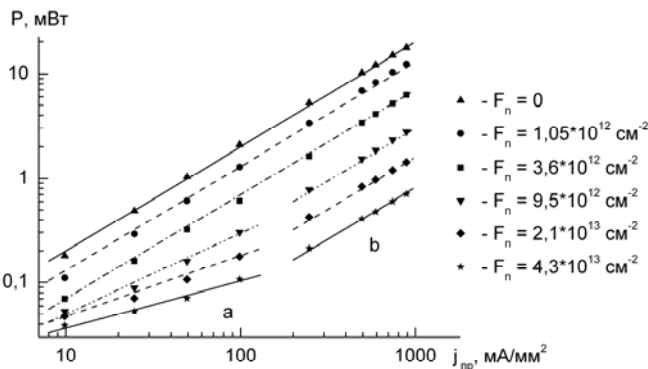
Но при этом наблюдается существенное изменение мощности излучения СД в результате облучения, сопровождаемое увеличением дефектов темных линий и дефектов темных пятен. Тогда можно утверждать, что снижение мощности излучения СД обусловлено только введением центров безизлучательной рекомбинации.

Поэтому, в качестве критериального параметра, определяющего радиационную стойкость СД, следует использовать мощность излучения СД, а точнее его ВтАХ, что позволит рассмотреть деградационные процессы при различных уровнях инжекции.

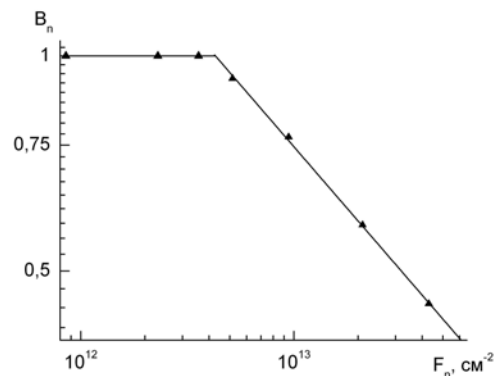
На рис. 1 представлена ВтАХ СД, изготовленных на основе ЭСАГА-1, облученных быстрыми нейтронами. Зависимость изменения мощности излучения  $P$  от плотности прямого тока  $j_{np}$  является линейной в координатах  $\lg(P) - \lg(I)$  и может быть описана следующим соотношением

$$P = C \cdot I_{np}^B \quad (1)$$

где  $P$  – мощность излучения;  $C$  – коэффициент пропорциональности;  $I_{np} = j_{np} \cdot S$  – рабочий ток,  $j_{np}$  – плотность рабочего тока,  $S$  – площадь активного слоя;  $B$  – показатель степенной функции (тангенс угла наклона ВтАХ в координатах  $\lg(P) - \lg(I)$ ).



**Рис.1.** Изменение ВтАХ СД на основе ЭСАГА-1 в области слабой (а) и сильной (б) инжекции при облучении быстрыми нейтронами



**Рис.2.** Изменение коэффициента  $B_n$  (соотношение 1) для СД на основе ЭСАГА-1 в области слабой инжекции при облучении быстрыми нейтронами

Коэффициент  $B$  в соотношении (1) зависит от типа используемой ЭСАГА и уровня инжекции электронов в активную область гетероструктуры.

Из результатов исследования изменения ВТАХ при облучении быстрыми нейтронами следует, что для области сильной инжекции электронов коэффициент  $B$  не зависит от флюенса быстрых нейтронов. С другой стороны для области слабой инжекции данный коэффициент зависит от флюенса нейтронов, как это показано на рис. 2. Изменение коэффициента  $B$  можно описать следующим соотношением

$$B = \begin{cases} 1, & \text{при } F \leq F_{кр} \\ \left(\frac{F_{кр}}{F}\right)^\alpha, & \text{при } F \geq F_{кр} \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_{кр}$  – критическое значение флюенса быстрых нейтронов, начиная с которого наблюдается изменение наклона ВТАХ в области слабой инжекции и, соответственно, происходит введение центров безизлучательной рекомбинации чисто радиационного происхождения;  $\alpha$  – показатель степени, величина которого не зависит от типа ЭСАГА.

Видно, что по мере роста флюенса быстрых нейтронов начиная с  $F_{кр}$  наблюдается снижение угла наклона ВТАХ, а это свидетельствует об изменении деградиационных процессов. Подобные результаты были получены и для СД на основе ЭСАГА-2. В тоже время для СД на основе ЭСАГА-3 изменение наклона ВТАХ начинается с момента регистрации снижения мощности излучения активного слоя гетероструктуры при облучении. Результаты, представленные на рис.1, позволяют сформулировать требования к плотности рабочего тока и обеспечить изготовление СД с максимальной стойкостью к облучению быстрыми нейтронами.

Таким образом, в результате исследований установлено, что при облучении быстрыми нейтронами деградиационные процессы в области сильной и слабой инжекции электронов в активную область ЭСАГА отличаются.

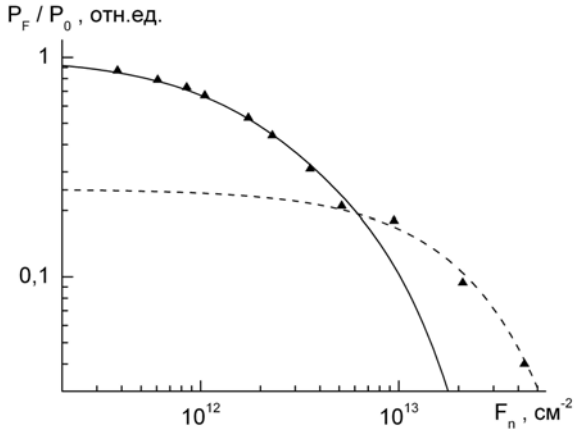
На рис.3 показано изменение мощности излучения СД в области сильной инжекции при облучении быстрыми нейтронами. Для области слабой инжекции наблюдаются идентичные результаты. Видно, что снижение мощности излучения СД при облучении быстрыми нейтронами происходит в два этапа:

- на первом этапе происходит радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры, что приводит к введению двух типов центров безизлучательной рекомбинации – дефектов темных пятен и дефектов темных линий;
- на втором этапе вводится центр безизлучательной рекомбинации чисто радиационного происхождения.

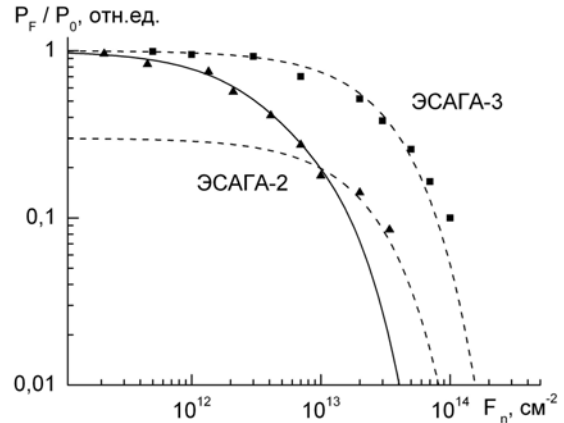
В данном случае снижение мощности излучения можно описать следующим соотношением

$$\frac{P_F}{P_0} = \begin{cases} 0,5 \cdot \exp(-K_1 \cdot F) + 0,5 \cdot \exp(-K_2 \cdot F) & \text{- I этап} \\ A \cdot \exp(-K_3 \cdot F) & \text{- II этап} \end{cases} \quad (3)$$

где  $P_F$ ,  $P_0$  – мощность излучения до и после облучения, соответственно;  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  – экспериментально установленные коэффициенты пропорциональности, которые характеризуют скорость введения центров безизлучательной рекомбинации на I и II этапах деградации;  $A$  – экспериментально установленный коэффициент пропорциональности, величина которого обратно пропорциональна исходной дефектности используемой ЭСАГА и характеризует нижний предел снижения мощности излучения на I этапе.

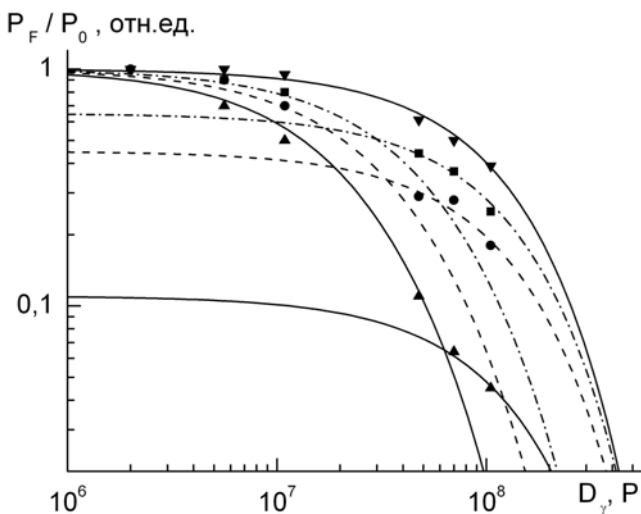


**Рис.3.** Изменение мощности излучения СД на основе ЭСАГА-1 в области сильной инжекции при облучении быстрыми нейтронами



**Рис.4.** Изменение мощности излучения СД на основе ЭСАГА-2 и ЭСАГА-3 в области сильной инжекции при облучении быстрыми нейтронами

Наличие двух этапов изменения мощности излучения активного слоя гетероструктур подтверждается тем, что снижение мощности на первом этапе происходит с насыщением при критическом флюенсе быстрых нейтронов  $F_{кр}$  (2). Подобные результаты для ЭСАГА-1 были получены при облучении электронами с энергией 5 МэВ и гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$ , но со своими значениями коэффициентов пропорциональности в соотношениях (2), (3).



**Рис.5.** Изменение мощности излучения СД при облучении гамма-квантами по данным [1]

При исследовании изменения мощности гетероструктур ЭСАГА-2 и ЭСАГА-3 при облучении быстрыми нейтронами, электронами с энергией 5 МэВ и гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  был получен результат, аналогичный изменениям мощности для ЭСАГА-1, но со своими значениями коэффициентов пропорциональности (в соотношениях (2), (3)), которые представлены в таблице 1.

Во всех рассматриваемых случаях, вклад первого этапа определяет общую радиационную стойкость СД и с уменьшением толщины активного слоя до  $\leq 1$  мкм

сходит на нет, что подтверждается исследованиями по облучению быстрыми нейтронами СД, изготовленных на ЭСАГА-2 и ЭСАГА-3 (см. рис. 4).

Совокупность изложенных выше результатов и полученных выводов составляет радиационную модель гетероструктур AlGaAs. Данная модель применима и для других полупроводниковых структур, используемых для изготовления светодиодов с различной длиной волны.

Разработанная радиационная модель гетероструктур AlGaAs хорошо согласуется с известными литературными данными для случая гамма-квантов [1], как это показано на рис. 5, а также при облучении гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами и электронами (см. таблицу 1).

Таблица 1

Коэффициенты пропорциональности для разных гетероструктур

Источник информации	Вид облучения	Тип структуры	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$A$
Данная работа	Нейтроны	ЭСАГА-1	$7,14 \cdot 10^{-13}$	$1,59 \cdot 10^{-13}$	$4,17 \cdot 10^{-14}$	0,18
	Электроны		$9,26 \cdot 10^{-14}$	$4,35 \cdot 10^{-14}$	$8,33 \cdot 10^{-15}$	0,10
	Гамма		$8,33 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-9}$	0,10
Данная работа	Нейтроны	ЭСАГА-2	$4,35 \cdot 10^{-13}$	$9,62 \cdot 10^{-14}$	$4,17 \cdot 10^{-14}$	0,30
	Электроны		$2,82 \cdot 10^{-14}$	$1,25 \cdot 10^{-14}$	$8,33 \cdot 10^{-15}$	0,63
	Гамма		$4,35 \cdot 10^{-8}$	$1,92 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-9}$	0,20
Данная работа	Нейтроны	ЭСАГА-3	–	–	$2,94 \cdot 10^{-14}$	1,00
	Электроны		–	–	$4,55 \cdot 10^{-15}$	1,00
	Гамма		–	–	$6,25 \cdot 10^{-9}$	1,00
[2]	Нейтроны	$Al_{0,06}Ga_{0,94}As$	$8,33 \cdot 10^{-14}$	$2,27 \cdot 10^{-14}$	$7,14 \cdot 10^{-15}$	0,35
		$Al_{0,2}Ga_{0,8}As$	$7,14 \cdot 10^{-14}$	$1,56 \cdot 10^{-14}$	$9,09 \cdot 10^{-15}$	0,70
		$Al_{0,05}Ga_{0,95}As$	–	–	$4,76 \cdot 10^{-15}$	1,00
[3]	Электроны	$Al_{0,33}Ga_{0,67}As$	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$1,11 \cdot 10^{-14}$	$1,75 \cdot 10^{-15}$	0,87
[1]	Гамма	$Al_{0,01}Ga_{0,99}As$	$7,69 \cdot 10^{-8}$	$3,33 \cdot 10^{-8}$	$8,33 \cdot 10^{-9}$	0,11
		$Al_{0,11}Ga_{0,89}As$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$8,33 \cdot 10^{-9}$	0,45
		$Al_{0,22}Ga_{0,78}As$	$3,33 \cdot 10^{-8}$	$1,48 \cdot 10^{-8}$	$8,33 \cdot 10^{-9}$	0,65
		$Al_{0,34}Ga_{0,66}As$	–	–	$9,09 \cdot 10^{-9}$	1,00

В заключении Главы 3 сформулированы основные выводы.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований радиационной стойкости гетероструктур AlGaAs при комбинированном облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами.

Предварительный анализ полученных экспериментальных данных по комбинированному облучению гетероструктур AlGaAs быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами показал, что по наблюдаемым результатам можно выделить две характерные группы.

В первую группу входят результаты исследований по предварительному облучению быстрыми нейтронами и последующему облучению электронами и

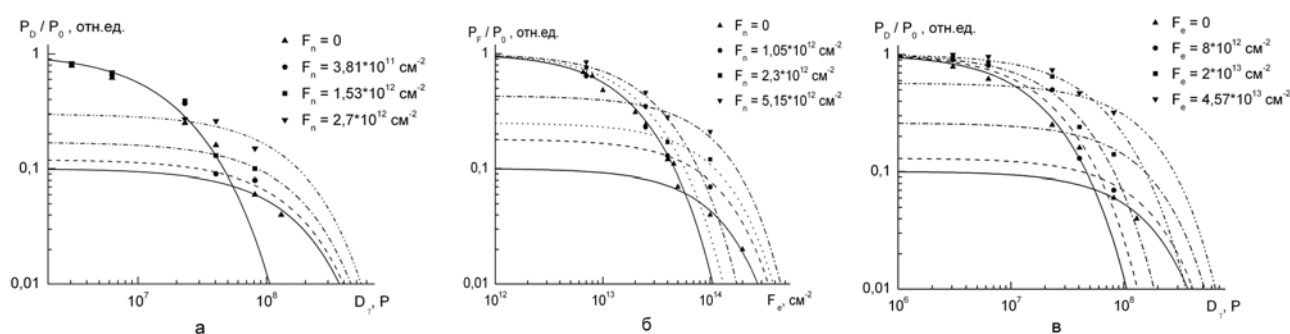
гамма-квантами, а также результаты по предварительному облучению электронами и последующему облучению гамма-квантами.

Во вторую группу входят результаты исследований по предварительному облучению гамма-квантами и последующему облучению быстрыми нейтронами и электронами, а также результаты по предварительному облучению электронами и последующему облучению быстрыми нейтронами.

Особо отметим, что рассматривая деградационные зависимости мощности излучения активных слоев гетероструктур при комбинированном воздействии, во всех случаях будем проводить нормирование мощности излучения на ее значение после предварительного облучения. Все исследования по комбинированному облучению, представленные в данном разделе, выполнены для СД на основе ЭСАГА-1. Разработанная радиационная модель гетероструктур AlGaAs (соотношения (1) – (3)) позволяет описать изменение мощности излучения и при комбинированном облучении.

#### *Результаты первой группы.*

На рис. 6 представлены результаты исследований, отнесенные к первой группе.



**Рис. 6.** Изменение мощности излучения в области сильной инжекции при облучении СД: а – гамма-квантами и б – электронами предварительно облученных быстрыми нейтронами, в – гамма-квантами, предварительно облученных электронами

Рассмотрим изменение коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  (соотношение 3) для следующих последовательностей при комбинированном облучении:

- быстрые нейтроны + гамма-кванты;
- быстрые нейтроны + электроны;
- электроны + гамма-кванты.

Из рис. 6а видно, что предварительное облучение быстрыми нейтронами не приводит к изменению коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  при последующем облучении гамма-квантами. Из рис. 6б следует, что коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  не зависят от предварительного облучения нейтронами вплоть до некоторого уровня  $F_n \approx 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а начиная с этого уровня коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  уменьшаются пропорционально  $F_n$ . Из рис. 6в, в свою очередь, следует, что коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  уменьшаются обратно пропорционально флюенсу электронов, который был использован при предварительном облучении. Сопоставляя представленные результаты следует вывод о том, что отношение коэффициентов  $K_1/K_2$  постоянно и не зависит от уровня предварительного облучения.

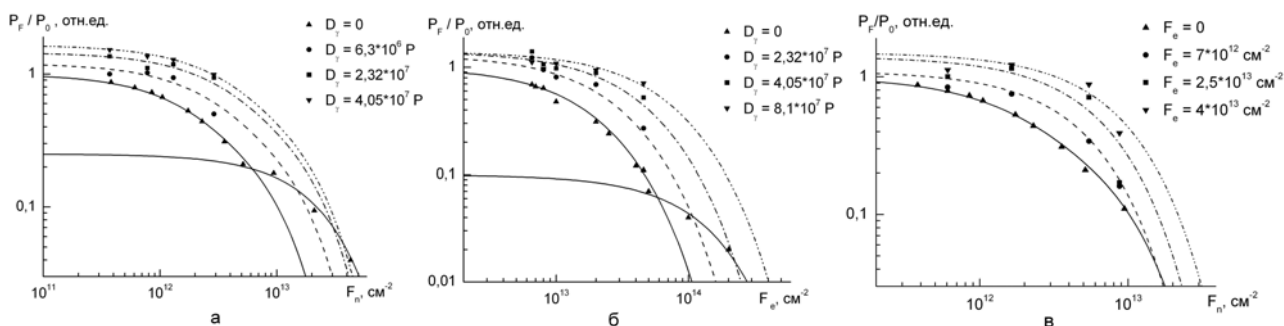
Представленные результаты на рис. 6 позволяют определить, что коэффициент  $K_3$  не зависит от уровня предварительного облучения.

Коэффициент же  $A$  во всех рассматриваемых случаях возрастает прямо пропорционально росту уровня предварительного облучения. Причем изменение  $A$  в зависимости от уровня последующего облучения гетероструктур гамма-квантами и электронами, при предварительном облучении быстрыми нейтронами, описывается одной и той же линейной зависимостью. Это свидетельствует об идентичности наблюдаемых процессов при таком комбинированном облучении.

Таким образом, предварительное облучение быстрыми нейтронами уменьшает вклад первого этапа снижения мощности излучения ЭСАГА-1, обусловленного радиационной перестройкой имеющейся дефектной структуры, в общую радиационную стойкость при последующем облучении гамма-квантами и электронами. При этом при последующем облучении электронами наблюдается замедление скорости введения центров безизлучательной рекомбинации на первом этапе. Это позволяет повысить радиационную стойкость гетероструктуры ЭСАГА-1 на первом этапе деградационного процесса при последующем облучении электронами. За счет увеличения коэффициента  $A$  (снижение вклада первого этапа, соответственно) наблюдается рост радиационной стойкости при последующем облучении гамма-квантами и электронами. Аналогичные результаты получены при предварительном облучении электронами и последующем облучении гамма-квантами. Следует отметить, что идентичные результаты были получены и для случая слабой инжекции электронов в активный слой гетероструктуры ЭСАГА-1.

#### *Результаты второй группы.*

На рис. 7 представлены результаты исследований, отнесенные нами ко второй группе



**Рис. 7.** Изменение мощности излучения в области сильной инжекции при облучении СД: а – быстрыми нейтронами и б – электронами предварительно облученных гамма-квантами, в – быстрыми нейтронами, предварительно облученных электронами

Рассмотрим изменение мощности излучения для следующих условий комбинированного облучения:

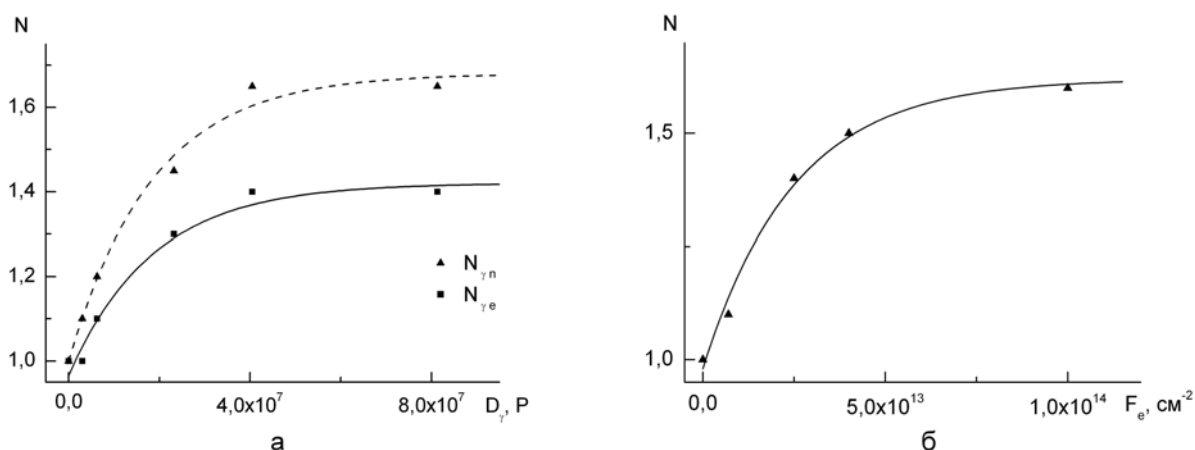
- гамма-кванты + быстрые нейтроны;
- гамма-кванты + электроны;
- электроны + быстрые нейтроны.

Во всех рассматриваемых случаях наблюдается восстановление мощности излучения на первом этапе деградационного процесса при последующем облучении, которое можно описать следующим соотношением, основанным на соотношении (3)

$$\frac{P_F}{P_0} = N \cdot (0,5 \cdot \exp(-K_1 \cdot F) + 0,5 \cdot \exp(-K_2 \cdot F)) \quad (4)$$

где  $N$  – степень восстановления мощности, при последующем облучении.

На рис. 8 показано изменение степени восстановления мощности излучения  $N$  в зависимости от уровня предварительного облучения для рассматриваемых последовательностей комбинированного облучения.



**Рис.8.** Степень восстановления мощности излучения в области сильной инжекции при облучении СД: а – быстрыми нейтронами и электронами предварительно облученных гамма-квантами, б – быстрыми нейтронами, предварительно облученных электронами

Для этих последовательностей были также установлены закономерности, описывающие изменение коэффициентов пропорциональности  $K_1$  и  $K_2$ . Следует отметить, что для данной группы результатов исследования влияния комбинированного облучения отношение коэффициентов  $K_1/K_2$  постоянно и не зависит от предварительного облучения, подобно тому как это наблюдалось ранее.

Таким образом, при комбинированном облучении ДГС AlGaAs, предназначенных для изготовления СД ИК-диапазона, быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами отсутствует аддитивность, поскольку результаты такого комбинированного воздействия зависят от последовательности действия факторов.

В заключении Главы 4 представлен комплекс мероприятий по повышению стойкости СД на основе гетероструктур AlGaAs, который включает следующие мероприятия:

- предъявление дополнительных требований к характеристикам активного слоя ДГС;
- оптимизация плотности рабочего тока;
- резервирование мощности излучения;
- радиационные технологии.

## ОСНОВНОЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что одним из важных и наиболее чувствительных к воздействию радиационных факторов является мощность излучения активного слоя гетероструктур AlGaAs, так как ее изменение наступает значительно раньше, чем изменение электрофизических характеристик.

2. Мощность излучения активного слоя исследуемых гетероструктур AlGaAs до облучения изменяется пропорционально величине рабочего тока в степени  $B$ , при этом величина коэффициента  $B$  зависит от типа используемой ЭСАГА и уровня инжекции электронов в активный слой.

3. Снижение мощности излучения активных слоев двойных гетероструктур AlGaAs при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами происходит вследствие введения центров безизлучательной рекомбинации и существенно отличается в области слабой и сильной инжекции электронов.

4. При облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами в области сильной инжекции электронов коэффициент  $B$  не зависит от уровня воздействия, в то время как для области слабой инжекции коэффициент  $B$  изменяется начиная с некоторого критического значения уровня воздействия.

5. Снижение мощности излучения активных слоев ЭСАГА при облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами происходит в два этапа:

- на первом этапе (относительно низкие уровни воздействия) происходит радиационная перестройка имеющейся дефектной структуры, что приводит к введению двух типов центров безизлучательной рекомбинации – дефектов темных пятен и дефектов темных линий;
- на втором этапе (более высокие уровни воздействия) вводится центр безизлучательной рекомбинации чисто радиационного происхождения.

6. Критическое значение уровня воздействия, начиная с которого изменяется коэффициент  $B$ , определяется моментом перехода от первого этапа деградиационного процесса ко второму, т.е. от низкого уровня воздействия к более высокому.

7. Совокупность изложенных выше выводов 3 – 6 составляет радиационную модель гетероструктур AlGaAs, которая применима для других полупроводниковых структур, используемых для изготовления светодиодов.

8. Предварительное облучение быстрыми нейтронами повышает радиационную стойкость ДГС AlGaAs к последующему облучению гамма-квантами и электронами в несколько раз вследствие того, что в результате предварительного облучения снижается эффективность проявления первого этапа, обусловленного перестройкой имеющейся дефектной структуры, при последующем облучении. Аналогичные результаты наблюдаются при предварительном облучении электронами и последующем облучении гамма-квантами.



9. Предварительное облучение гамма-квантами ДГС AlGaAs приводит к восстановлению мощности излучения и повышению стойкости при последующем облучении быстрыми нейтронами и электронами. Аналогичные результаты наблюдаются при предварительном облучении ДГС AlGaAs электронами и последующем облучении быстрыми нейтронами.

10. При комбинированном облучении ДГС AlGaAs, предназначенных для изготовления СД ИК-диапазона, быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами отсутствует аддитивность, поскольку результаты такого комбинированного воздействия зависят от последовательности действия факторов.

11. Результаты исследования радиационной стойкости ДГС при комбинированном облучении быстрыми нейтронами, электронами и гамма-квантами могут быть достаточно эффективно использованы в качестве радиационных технологий при производстве полупроводниковых приборов с заданными параметрами, а также для повышения их радиационной стойкости.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. R.A. Polimadei, S. Share and A.S. Epstein, "Performance of  $Ga_{1-x}Al_xAs$  light-emitting diodes in radiation environments," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 21, no. 6, pp. 96–102, December 1974.
2. C.E. Barnes, "Radiation effects on light sources and detectors," Proc. SPIE 541, 139 (1985).
3. Селезнев Д.В. Анализ влияния облучения на светоиндикаторы из  $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$  // В сб. «Моделирование и исследование сложных систем». М.: МГАПИ, 2004. С. 91 – 102.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Скакова И.М. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN при облучении гамма-квантами // Изв. вузов. Физика. – 2011. – №1/2. – С. 190-194.
2. Градобоев А.В., Рубанов П.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs при облучении электронами // Изв. вузов. Физика. – 2011. – №1/2. – С. 195-197.
3. Фигуров В.С., Байков В.В., Шелковников В.В., Градобоев А.В., Рубанов П.В., Авдюшкин С.А., Юрченков А.В. Исследование стойкости светодиодов 3Л139БМ ОСМ к эффектам смещения при воздействии протонного и электронного излучений космического пространства // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. Вып. 4. С.107-116.

#### Патенты:

1. Патент на изобретение РФ №2303314. МПК Н 01 L 21/18. Способ изготовления полупроводниковых приборов. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов,

А.В. Ащеулов. Заявл. 17.04.2006; Оpubл. 20.07.2007, Бюл. №20. - 6 с.

2. Патент на изобретение РФ №2303315. МПК Н 01 L 21/18. Способ изготовления полупроводниковых приборов. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов. Заявл. 17.04.2006; Оpubл. 20.07.2007, Бюл. №20. - 6 с.

3. Патент на изобретение РФ №2303316. МПК Н 01 L 21/18. Способ изготовления полупроводниковых приборов. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов, В.С. Матвеев. Заявл. 29.05.2006; Оpubл. 20.07.2007, Бюл. №20. - 6 с.

4. Патент на изобретение РФ №2304823. МПК Н 01 L 21/18. Способ повышения радиационной стойкости приборов на основе арсенида галлия. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов. Заявл. 17.04.2006; Оpubл. 20.08.2007, Бюл. №23. - 6 с.

5. Патент на изобретение РФ №2304824. МПК Н 01 L 21/18. Способ повышения радиационной стойкости приборов на основе арсенида галлия. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов. Заявл. 17.04.2006; Оpubл. 20.08.2007, Бюл. №23. - 6 с.

6. Патент на изобретение РФ №2318269. МПК Н 01 L 21/363. Способ изготовления полупроводниковых приборов. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов. Заявл. 10.07.2006; Оpubл. 27.02.2008, Бюл. №6. - 7 с.

7. Патент на изобретение РФ №2318270. МПК Н 01 L 21/363. Способ изготовления полупроводниковых приборов. / А.В. Градобоев, П.В. Рубанов, А.В. Ащеулов. Заявл. 10.07.2006; Оpubл. 27.02.2008, Бюл. №6. - 6 с.

#### **В других научных изданиях:**

1. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Расчетно-экспериментальный метод определения радиационной стойкости изделий электронной техники // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды III Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х т. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2005. – Т.2. – С. 137 – 139.

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

3. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Ащеулов А.В.. Радиационные технологии в производстве светоизлучающих диодов ИК-диапазона // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х т. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2006. – Т.2. – С. 95 – 96.

4. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Ащеулов А.В.. Влияние облучения гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  на параметры светодиодов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х т. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд. ТПУ, 2006. – Т.2. – С. 97 – 99.

5. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Влияние плотности тока на деградацию гетероструктур AlGaAs при облучении нейтронами, протонами и электронами // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических

материалах: Труды V Международной научной конференции. – Томск, 2006. – С. 292 – 295.

6. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Комбинированное облучение гетероструктур AlGaAs // Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (3-5 октября 2006 г., Томск, Россия) «GaAs-2006»: Материалы конференции. – Томск: Томский госуниверситет, 2006 – С. 389 – 392.

7. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Комбинированное облучение быстрыми нейтронами и электронами светодиодов на основе AlGaAs // Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Радиационная стойкость электронных систем (Стойкость – 2006)». – Москва, 2006. – С. 145 – 146.

8. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Применение радиационных технологий в производстве полупроводниковых приборов // Труды XVII международное совещание «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 9 – 14 июля 2007 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.. М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2007. – С. 553 – 556.

9. Градобоев А.В., Рубанов П.В.. Повышение радиационной стойкости приборов на основе арсенида галлия и его соединений // Физико-химические процессы в неорганических материалах (ФХП-10): доклады Десятой международной конференции, 10-12 октября 2007 года: в 2 т. / ГОУ ВПО «КемГУ». – Т. 1. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – С. 35 – 38.

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

11. Фигуров В.С., Байков В.В., Шелковников В.В., Градобоев А.В., Рубанов П.В., Авдюшкин С.А., Юрченков А.В. Исследование стойкости светодиодов 3Л139БМ ОСМ к эффектам смещения при воздействии протонного и электронного излучений космического пространства // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2010». – М: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 93 – 94.