



Черняков Антон Евгеньевич

Особенности развития деградации внешней квантовой эффективности мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур.

01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Шмидт Наталия Михайловна, ведущий научный
сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, Вывенко Олег Федорович,
Санкт-Петербургский государственный
университет
кандидат технических наук
Никифоров Сергей Григорьевич,
зав. лабораторией ООО «Архилайт»(г.Москва)


Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение, науки Институт физики
микроструктур Российской академии наук
(г. Нижний Новгород)

Защита состоится «19» июня 2014 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан «15» мая 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.205.02
доктор физико-математических наук, профессор

Л.М. Сорокин


ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Конец первого десятилетия 21-го века ознаменовался развитием в разных странах мира амбициозных программ по созданию твердотельного энергосберегающего освещения на основе мощных синих InGaN/GaN светодиодов с люминофорным покрытием. В настоящее время серийные светодиоды имеют светоотдачу 160-200 лм/Вт, а рекордные лабораторные образцы достигли 303 лм/Вт, что приближается к теоретическому пределу (350 лм/Вт) [1]. Таким образом, светодиоды в несколько раз превысили светоотдачу лучших ламп, однако заметно проигрывают последним по стоимости. Снижение стоимости упирается не только в решение технических задач, но и в фундаментальные физические проблемы такие как: падение внешней квантовой эффективности светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур при возрастании плотности тока более 10 А/см^2 , немонотонное изменение внешней квантовой эффективности (оптической мощности) в первые несколько тысяч часов старения светодиодов и катастрофический выход из строя за короткие времена части светодиодов, не отличающихся по основным параметрам, от остальных с большим, до 10^5 сроком службы. Эти эффекты значительно повышают стоимость генерируемого света (\$/лм), что может привести к нерентабельности перехода на твердотельное освещение. Природа этих явлений интенсивно изучается мировым научным сообществом на протяжении двух десятилетий, однако остается далеко не до конца выясненной, а общепринятые модели отсутствуют до сих пор. Более того, согласно данным, приведенным в обзоре [2] механизмы дефектообразования под действием инжекционного тока, приводящие к катастрофическому выходу из строя светодиодов, характер взаимосвязи деградации оптической мощности с изменением свойств дефектной системы остаются не выясненными. По-прежнему остается предметом дискуссий вопрос о том, какие дефекты генерируются в процессе старения и преимущественно в каких областях. Представляется, что одной из причин осложняющей понимание особенностей

развития деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ) InGaN/GaN структур, может быть сложный характер организации наноматериала, формирующийся в неравновесных условиях самоорганизации, приводящий к образованию локальных разно-размерных, от нескольких нанометров до микрон, неоднородностей состава твердого раствора, и системы протяженных дефектов, пронизывающей светоизлучающую структуру. Результаты исследований, приведенные в ряде работ [3] [4], свидетельствуют о фрактальной природе A^3N материалов и проявлениях нелинейных свойств. К началу выполнения данной работы роль этих особенностей в развитии деградации внешней квантовой эффективности при старении мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур практически не была изучена.

Основные цели и задачи данной работы:

- Разработка комплекса методов, позволяющего реализовать новый подход в изучение деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ), учитывающий сложный характер организации наноматериала мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур;
- Выяснение основных закономерностей снижения значений ВКЭ этих светодиодов при старении, и механизмов ответственных за этот процесс;
- Выяснение взаимосвязи деградации ВКЭ светодиодов с изменением свойств системы протяженных дефектов и разно-размерных неоднородностей состава твердого раствора по индию.

Научная новизна работы заключается в том, что предложен новый подход к изучению процесса деградации ВКЭ светодиодов, учитывающий сложный характер организации разно-размерных неоднородностей состава твердого раствора InGaN и присутствие квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов, т.е. фрактальную природу наноматериала.

Предложенный подход и количественная классификации разных форм организации наноматериала квантоворазмерных InGaN/GaN структур с помощью параметра, характеризующего степень разупорядоченности

наноматериала (Δ_p), позволил выяснить основные закономерности развития деградации ВКЭ этих светодиодов. Выяснено, что дефектообразование под действием инжекционного тока развивается, преимущественно, в двух каналах: в проводящих квазиомических шунтах, локализованных в системе протяженных дефектов, и в локальных областях с неравновесным составом твердого раствора с повышенным содержанием индия. Показано, что в этих каналах существуют все необходимые условия для реализации деградации ВКЭ по механизму Голда-Вайсберга: высокая плотность неравновесных носителей до $1000\text{A}/\text{cm}^2$, их многофононная рекомбинация на примесях, создающих глубокие уровни в запрещенной зоне (в InGaN/GaN структурах - слабо связанные атомы индия и галлия в отдельных протяженных дефектах), вызывающая локальные перегревы и рекомбинационно – стимулированную миграцию и диффузию индия и галлия. Эти процессы порождают немонотонное изменение значений ВКЭ на промежуточных временных стадиях старения и приводят к значительному снижению концентрации неравновесных носителей, участвующих в излучательной рекомбинации. Многообразие вариантов развития деградации ВКЭ синих светодиодов вызвано сложной комбинацией и чередованием процессов дефектообразования в этих двух каналах во времени. На финальной стадии деградации, на которой значения ВКЭ уменьшаются на 30% относительно исходных значений, как правило, оба канала действуют одновременно. Неоднозначная связь между излучательной и безызлучательной рекомбинацией в первые 5000 часов вызвана тем, что области, в которых происходят эти процессы, пространственно разнесены. Показано, что изучение в процессе старения эволюции прямой и обратной ветвей ВАХ при смещениях менее 2 В мощных синих светодиодов позволяет разделить вклад каждого из каналов в процесс дефектообразования. Катастрофические отказы светодиодов вызваны в первую очередь процессами дефектообразования в локальных областях с неравновесным по индию составом твердого раствора InGaN.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработан метод контроля распределения температуры по площади светодиода, позволяющий разделить вклад в формирование областей перегрева периферии светодиода, неоптимальной геометрии контактных площадок, дефектов сборки и локальных областей перегрева, связанных со свойствами наноматериала светоизлучающих структур; предложен комплекс методов, позволяющий выяснить вклад характера организации наноматериала светоизлучающих структур в скорость развития деградации ВКЭ светодиодов; показано, что для увеличения срока службы необходимо улучшать характер организации наноматериала, разработать режимы роста твердых растворов с минимальным содержанием локальных областей с существенно неравновесным (нерегулярным) составом твердого раствора, избегать галлий и индий обогащенных режимов роста; предложен метод выявления наиболее ненадежных, склонных к катастрофическим отказам, светодиодов, по уровню токов утечки и появлению локальных областей с пониженным барьером на прямой ветви ВАХ при смещениях менее 2 В. При этом наиболее ненадежные светодиоды по найденным критериям могут быть выявлены до проведения старения и сборки.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для всех светодиодов, независимо от фирмы изготовителя, дизайна активной области, а также характера организации наноматериала, снижение внешней квантовой эффективности на 30% и более, относительно исходных значений, в процессе старения (финальная стадия) вызвано ростом проводимости на порядки квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов.
2. На финальной стадии в квазиомических шунтах локальная плотность тока превышает 1000 А/см^2 , вызывая перегрев и усиление дефектообразования по механизму Голда-Вайсберга, сопровождающееся миграцией и диффузией индия и галлия вдоль протяженных дефектов.
3. Скорость развития процесса деградации внешней квантовой эффективности определяется индивидуальными свойствами InGaN/GaN

светодиодов. Развитие этого процесса, в течение нескольких часов, типично для светодиодов с высокой степенью разупорядоченности наноматериала.

4. Развитие процесса деградации внешней квантовой эффективности во временном интервале от 10 до нескольких тысяч часов, типично для светодиодов с хорошо упорядоченным наноматериалом, но с присутствием локальных областей с существенно неравновесным составом твердого раствора InGaN. При этом общая площадь таких локальных областей на несколько порядков меньше площади всего светодиода.

5. Контроль эволюции прямой и обратной ветвей вольтамперной характеристики светодиодов при смещениях менее 2В на разных временных стадиях старения позволяет разделить процессы дефектообразования, локализованные в системе протяженных дефектов и в разно-размерных неоднородностях твердого раствора, а также выявить наиболее ненадежные светодиоды без долговременных испытаний.

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на Российских и Международных конференциях:

VIAMS 2008, Toledo (Spain), June , 2008.

16 International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St.-Petersburg, December, 2008.

Всероссийская конференция по физике полупроводников «Полупроводники 2009», г. Томск, сентябрь 2009.

Международная конференция по дефектам, Санкт-Петербург, июль 2009.

2-ая Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях», Москва, май 2009.

7-ая Всероссийская конференция «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия-структуры и приборы», Москва, февраль, 2010.

8-ая Всероссийская конференция «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия-структуры и приборы», Санкт-Петербург, июнь 2011.

23rd European Symposium on the Reliability of electron devices, failure physics and analysis, Cagliari (Italy), October, 2012.

4 International Symposium on Growth of III-Nitrides, St.-Petersburg, Russia, July, 2012

9-ая Всероссийская конференция «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия-структуры и приборы», Санкт-Петербург, июнь 2013.

17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Warsaw (Poland), August, 2013.

14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2013.

22 International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St.-Petersburg, June, 2014.

15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2014.

Публикации Основные результаты работы опубликованы в 15 печатных работах, из них 12 научные статьи в реферируемых журналах и тезисы в материалах конференций – 3.

Структура и объем диссертации диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста. Диссертация включает также 49 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит анализ результатов деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ) мощных синих InGaN/GaN светодиодов (т.е. снижение значений ВКЭ на 30% при старении относительно исходного значения) и

закономерностей развития этого процесса, опубликованных к началу выполнения работы (до 2006 года) [5] [6]. Отмечается, что наряду с традиционным постепенным снижением излучаемой мощности, в первые, 1000–5000 часов работы InGaN/GaN светодиодов, наблюдается волнообразное изменение значений ВКЭ с катастрофическим падением ВКЭ, вплоть до нулевых значений на части светодиодов [1] [2]. В работах этих лет предложено несколько механизмов, отвечающих за деградацию ВКЭ при старении [5] [6]. Один из основных механизмов предложен в [5]. В основе механизма лежит подпороговое дефектообразование, при взаимодействии горячих электронов с атомами кристаллической решетки, и передачи им энергии $\sim 4\text{эВ}$, достаточной для разрыва связей Ga-N, а также комплексов Mg-H, как в области дислокаций, так и в области *p-n* перехода. Горячие носители заряда образуются в области разрыва краев зон гетероперехода, и в дрейфовом поле компенсированного слоя. Сложный характер развития деградации ВКЭ светодиодов объясняется участием конкурирующих процессов: активации магния и образования вакансий азота. В более поздней работе [6] рассмотрен вклад в деградацию ВКЭ увеличения плотности состояний на гетерогранице, локальных изменений барьера в области шунтирующего канала, электромиграции водорода и трансформации водородосодержащих комплексов на межфазных и межзеренных границах гетероструктуры. Все отмеченные механизмы могут вносить свою лепту в деградацию ВКЭ мощных синих светодиодов, однако, как показано в обзорной работе последних лет [2], до сих пор отсутствуют общепринятые модели, адекватно описывающие наблюдаемые особенности развития деградации ВКЭ. Кроме того, ни в одной из работ не обсуждалась роль сложного характера организации наноматериала светоизлучающих квантоворазмерных InGaN/GaN структур и локальных разно-размерных неоднородностей на нано- и мезоскопическом уровне твердого раствора, а также специфики протяженных дефектов, в развитии деградации ВКЭ светодиодов. Между тем, хорошо известно, что система протяженных дефектов, включающая отдельные дислокации, их скопления, дислокационные

стенки на границах доменов, дилатационные границы, v-дефекты, создает дополнительные флуктуации потенциала краев зоны проводимости и валентной зоны, кроме того эти протяженные области, пронизывающие всю структуру с деформированными связями атомов решетки, как правило, обогащены металлической фазой. В связи с этим в этой же главе кратко рассматриваются известные экспериментальные данные о структурных особенностях светоизлучающих квантоворазмерных InGaN/GaN структур. Сложный характер организации наноматериала, существование которого предопределяется неравновесными условиями роста в присутствии больших рассогласований параметров решетки растущих слоев с подложкой и необходимостью формирования переходного зародышевого слоя [7]. Эти особенности порождают многообразие форм существования этого наноматериала и его нелинейные свойства. Исходя из фрактальной природы наноматериалов светоизлучающих структур, был сформулирован подход к изучению механизмов деградации ВКЭ светодиодов, основные цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приведена характеристика исследованных в работе мощных синих светодиодов с длиной волны излучения 450-460 нм на основе светоизлучающих структур InGaN/GaN, выращенных отечественным производителем (ЗАО Светлана-Оптоэлектроника), фирмой Samsung, а также коммерческих светодиодов известных зарубежных фирм: Cree, SemiLEDs. Все светодиодные структуры выращены методом эпитаксии из металлоорганических соединений. Большая часть светодиодов собрана по технологии флип-чип монтажа без линз в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». Площадь светодиодов составляла 980x980 мкм. Все исследованные светодиоды без линз имели значения внешней квантовой эффективности 30 - 50 % , при токах 5 – 10 мА, что соответствует современному мировому уровню. Кроме того, в этой главе кратко описаны традиционные методики исследования электрических, оптических свойств светодиодов, вольтамперных характеристик (ВАХ),

зависимостей внешней квантовой эффективности от плотности тока, спектров электролюминесценции, а также методики старения светодиодов.

В третьей главе представлен комплекс методов, позволяющий реализовать новый подход в изучении деградации внешней квантовой эффективности, учитывающий сложный характер организации наноматериала светоизлучающих структур, т.е. проявления фрактальной природы АЗН наноматериалов. Этот комплекс включает: а) количественный контроль сложного характера организации наноматериала светоизлучающих структур с помощью мультифрактального параметра, характеризующего степень упорядоченности наноматериала [4][A1]; б) контроль неоднородности протекания тока и возникновения областей локального перегрева по результатам исследования зависимостей спектральной плотности низкочастотного шума и флуктуаций напряжения от плотности тока [A2,A3]; в) контроль распределения температуры по площади светодиодов с использованием как инфракрасной тепловизионной микроскопии, так и компьютерного моделирования тепловых полей [A4-A7]. Метод позволил контролировать локальные области перегрева, связанные с дефектами сборки, с неоптимальной геометрией контактов, с плохой защитой периферии светодиода и позволил убедиться в том, что максимальные перегревы наблюдаются в локальных областях светодиода. На Рис.1. [A4] приведено, экспериментально полученное распределение температур при протекании инжекционного тока плотностью $30\text{A}/\text{cm}^2$ по площади светодиода с незащищенной периферией светодиода, подвергнутого старению, с уменьшенной, в результате старения, до 25% внешней квантовой эффективностью. Перегрев незащищенной периферии *p-n* перехода может достигать 25°C относительно центра поверхности светодиода. Однако такие перегревы не приводят к катастрофическим отказам, но препятствуют достижению сроков службы более 50000 часов. Более значительные перегревы, до 70°C и более, выявляются в локальных микронных областях Рис.1. В этой же главе кратко приведена методика количественного определения степени разупорядоченности наноматериала (Δ_p)

светоизлучающих структур путем обработки математического множества, соответствующего изображению

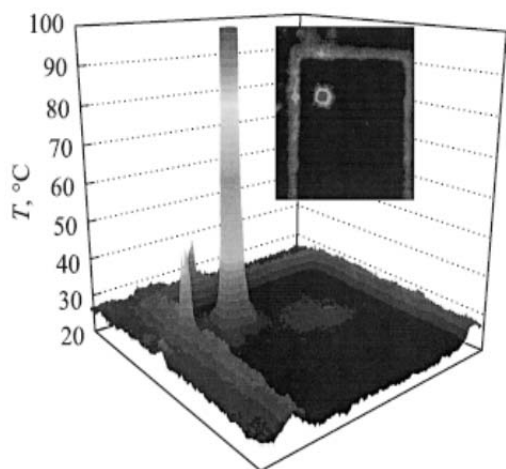


Рис. 1. Распределение температуры по поверхности светодиода при плотности тока 35 A/cm^2 с уменьшенной до 25% внешней квантовой эффективностью после старения.

поверхности, полученному с помощью атомно-силовой микроскопии, методами мультифрактального анализа [8]. Показано, что рост значений мультифрактального параметра Δ_p , отражающий ухудшение свойств системы протяженных дефектов, пронизывающей светодиодную структуру, коррелирует с увеличением на порядки токов утечки светодиодов при смещениях, менее 2В [А8]. При этом анализ прямой и обратной ветви при малых смещениях светодиодов с разным характером организации наноматериала указывает на формирование квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов [А1, А9–А12], а изучение зависимостей спектральной плотности низкочастотного шума от плотности тока выявило сложную динамику свойств шунтов с ростом концентрации неравновесных носителей [А3,А13]. Обнаруженная корреляция позволила контролировать характер организации наноматериала, не только по значениям степени упорядоченности светоизлучающих структур, но и по уровню токов утечки светодиодов, что обеспечило возможность классификации светодиодов, полученных на разных фирмах. Отмечено, что этот комплекс методов был использован, как при исследовании исходных InGaN/ GaN светодиодов, так и после каждой временной стадии процесса старения. Использование комплекса методов позволяет выделить явления, обусловленные в большей мере свойствами материала и выяснить роль фрактальной природы наноматериала

светоизлучающих структур в деградации внешней квантовой эффективности светодиодов.

В четвертой главе приведены результаты исследований, направленных на выяснение механизмов, приводящих к локальному развитию процесса деградации. Приведены результаты изучения эволюции ВАХ, зависимостей внешней квантовой эффективности, спектральной плотности низкочастотного шума, дифференциального сопротивления от плотности тока на нескольких группах светодиодов, классифицированных по характеру организации наноматериала (или значениям токов утечки при напряжениях менее 2В), на разных временных стадиях старения, в том числе на финальной стадии деградации ВКЭ светодиодов, когда значения ВКЭ снижены на 30% и более, относительно значений, до старения [А8-А15]. Старение проводилось в одном из общепринятых режимов: плотность тока 35 A/cm^2 , температура p - n перехода 100°C , длительность от 10 до нескольких тысяч часов, на части светодиодов более 10000 часов. Показано, что общим для всех светодиодов является немонокотное изменение значений ВКЭ при старении с типичным, известным по данным фирм [1] [9], небольшим повышением на несколько процентов значений ВКЭ, как правило, на начальной стадии старения, и небольшими волнообразными изменениями этих значений на последующих стадиях. При этом волнообразные изменения могут чередоваться на довольно больших временных периодах от сотен до нескольких тысяч часов с отсутствием существенных изменений ВКЭ. Причем даже в пределах одной группы светодиодов картина волнообразных изменений не повторяется. На большом количестве светодиодов от разных фирм производителей, с разным характером организации наноматериала (или разным уровнем токов утечки), выяснены общие закономерности финальной стадии старения. Они проиллюстрированы типичными примерами зависимостей ВКЭ от тока и ВАХ до и после деградации для двух типов светодиодов, отличающихся между собой по характеру организации наноматериала (уровню токов утечки) Рис.2. Для всех исследованных светодиодов, общим является рост проводимости

квазиомических шунтов на несколько порядков, что хорошо видно по нарастанию величины токов почти симметричных ветвей ВАХ при смещениях менее 2В Рис.2. а, б, (кривые 3,4). При этом, рост проводимости

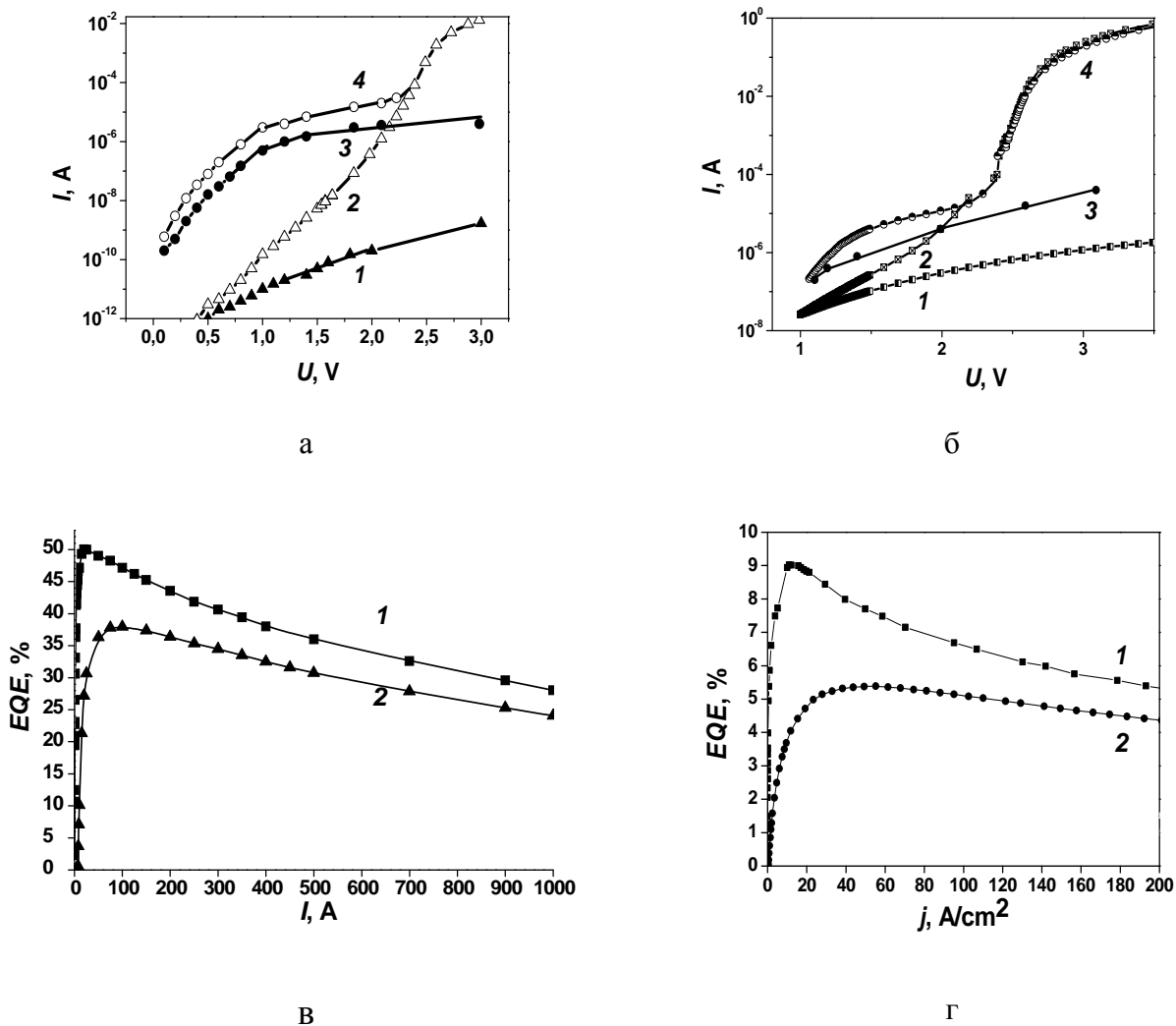


Рис.2. Типичные ВАХ (а,б) и зависимости внешней квантовой эффективности от тока (в,г) до и после деградации двух светодиодов с разной степенью упорядоченности наноматериала: 0.340 (а,в); 0.350 (б,г). Прямая и обратная ветви, изображены в одном квадранте.

квазиомических шунтов коррелирует со сдвигом максимума зависимостей ВКЭ от плотности тока в область больших значений токов Рис.2, в, г (кривые2), и выявляет уход части инжектируемых носителей в квазиомические шунты, сопровождающийся снижением значений ВКЭ во всем диапазоне плотностей тока [A12,A14]. Такое поведение наблюдали в [10] для AlGaIn/GaN светодиодов. Показано, что рост проводимости квазиомических шунтов

усиливает неоднородность протекания тока, что выявляется по отклонению зависимостей спектральной плотности флуктуаций напряжения от плотности тока на низких частотах, от зависимости $1/j$, типичной для однородного протекания тока [A3,A12]. Кроме того, усиление неоднородности протекания тока, с преимущественным протеканием по шунтам, выявляется на зависимости дифференциального сопротивления от плотности тока Рис.3. Общая площадь, занятая шунтами на 4-6 порядков меньше, площади светодиода, это означает, что плотность тока в

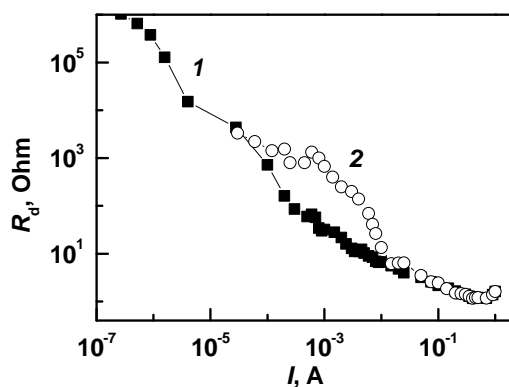


Рис.3. Типичные зависимости дифференциального сопротивления светодиода от плотности тока.

области шунтов превышает 10^3 А/см². Такие плотности тока должны приводить к локальным перегревам, что

и подтверждается при исследовании деградировавших светодиодов методами низкочастотного шума и ИК-микроскопии Рис.1 [A3, A4,A12]. При этом оценки плотности тока в областях перегрева, выявленных ИК-микроскопией, дают такие же значения. Показано, что такие плотности тока, специфика части протяженных дефектов, обогащенных слабо связанными атомами индия и галлия [11], создают условия для реализации многофононной рекомбинации на таких собственных дефектах [12] и их рекомбинационно-стимулированной миграции и диффузии по механизму Голда-Вайсберга [13] в квазиомических шунтах, локализованных в системе протяженных дефектов. Изучение поверхности светодиодов в сканирующем микроскопе до и после разных временных стадий старения, подтверждает, что заметная деградация ВКЭ сопровождается локальным выделением индия или галлия на поверхностях p и n –областей, при этом наблюдается локальное растворение металлизации [A3]. Эти наблюдения подтверждены в более поздней работе [14] методами просвечивающей микроскопии. Дефектообразование в этих локальных

областях приводит к расширению дислокационных трубок, росту проводимости в них и увеличению концентрации носителей заряда, не участвующих в излучательной рекомбинации. Показана сложная динамика модуляции проводимости шунтов, выявляющаяся на зависимостях спектральной плотности низкочастотного шума от тока [A14], а также при реанимации переставших светить синих светодиодов, под действием температуры, реабсорбции излучения, и импульсов тока. Пример реанимации двух синих светодиодов, при снятии температурной зависимости при фиксированных смещениях 1.4В и 3.0В приведен на Рис. 4. Подобные явления хорошо изучены на арсениде галлия в работах Стафеева В.И. [15]. Слабая температурная зависимость тока прямой ветви ВАХ до и после реанимации подтверждает, что реанимация светодиодов вызвана модуляцией

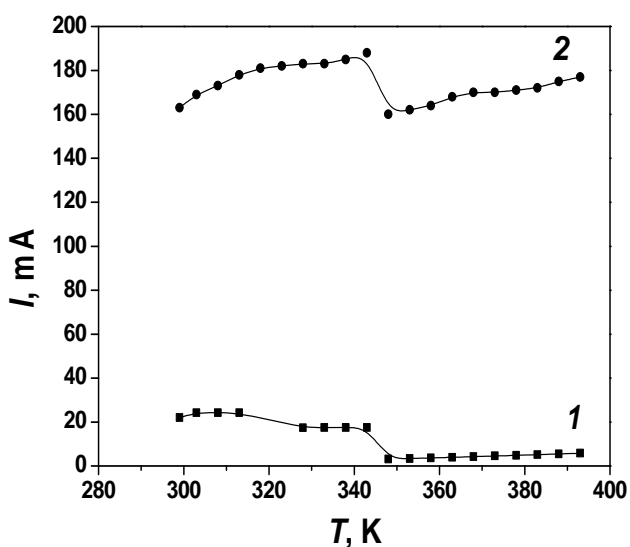


Рис.4. Температурные зависимости тока светодиодов при фиксированном напряжении: 1- 1.4В; 2-3В.

проводимости квазиомических шунтов. Однако, реанимация не возвращает светодиоды к исходным значениям ВКЭ и величине тока утечки при смещении менее 2В, и является временной, у таких светодиодов срок службы, как правило, низкий. Выяснено, что светодиоды, демонстрирующие общность свойств на финальной стадии, могут существенно отличаться по скорости развития деградации ВКЭ, которая, как показали исследования светодиодов, классифицированных по характеру организации наноматериала (или величине тока утечки), определяется индивидуальными свойствами светодиодов. Показано, что наиболее быстрое развитие этого процесса, в течение нескольких часов, типично для светодиодов с высокой степенью разупорядоченности наноматериала ($\Delta p > 0.350$, $\eta < 15\%$, $j > 5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ при смещении -1 В). При этом, чем хуже упорядоченность наноматериала светодиодов, тем более развита система

протяженных дефектов, тем выше проводимость квазиомических шунтов и обогащение протяженных дефектов плохо связанной металлической фазой на исходных светодиодах и тем быстрее нарастает проводимость в процессе старения. Причем выделения мелких капель галлия и индия на поверхности таких светоизлучающих структур происходят при нагреве до 100-150⁰ С, без протекания тока. Развитие этого процесса во временном интервале от 10 до нескольких тысяч часов, типично для светодиодов с хорошо упорядоченным наноматериалом ($\Delta p < 0.345$, $\eta = 40-50\%$, $j < 2 \times 10^{-8} \text{ А/см}^2$ при смещении -1 В), но с искаженной прямой ветвью ВАХ до старения Рис.5. а, (кривая 3), или возникающей на начальных стадиях старения Рис.5.б, (кривые 5 и 6). Такой вид прямой ветви ВАХ интерпретируют согласно [15], как параллельно включенные локальные области с пониженной высотой

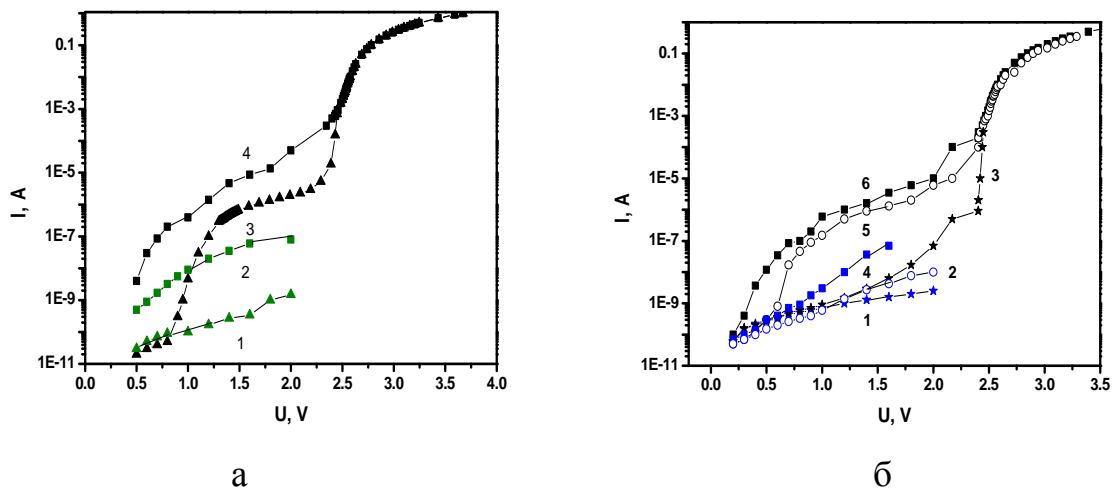


Рис. 5. Типичный вид ВАХ двух светодиодов: а- с искаженной прямой ветвью (3) и обратной (1) до старения и после 100 часов старения, (соответственно, 4 и 2); и б - с искажениями, возникающими в процессе старения (прямые ветви 5 – 80 часов, 6-100 часов; обратные ветви, соответственно 2,4), до старения (прямая ветвь-3, обратная -1).

барьера и с меньшей площадью, чем площадь всего светодиода. Локальные $p-n$ переходы с пониженными барьерами могут существовать из-за присутствия локальных областей твердого раствора, обогащенного индием, т.е. со значительным отклонением состава по индию от равновесного. Действительно, на части светодиодов с такими особенностями прямой ветви ВАХ, в спектрах электролюминесценции, при 300 К, наблюдается длинноволновая полоса до старения или в процессе старения [A13, A15]. Понижение барьера при старении сопровождается увеличением занимаемой им площади, интенсивности

длинноволновой полосы и проводимости шунтов [A15]. При этом, вместо ожидаемого снижения значений ВКЭ, наблюдается небольшое увеличение ВКЭ, на несколько процентов. Эти изменения развиваются на временных интервалах от 10 до 500 часов, а деградация ВКЭ наблюдается за времена от 10 до нескольких тысяч часов. Кроме того, для большей части светодиодов, с такими особенностями ВАХ, наблюдаются катастрофические отказы, т.е. без постепенного снижения значений ВКЭ, светодиоды перестают светить [A15].

Наблюдаемые изменения длинноволновой полосы свидетельствуют о перераспределении индия между локальными неоднородностями состава под действием протекающего тока. Из-за малой площади этих областей, в них могут возникать повышенные плотности тока, локальные перегревы по механизму Голда-Вайсберга, и миграция атомов индия и галлия. При этом миграция может приводить к более равновесному составу твердого раствора по индию, и росту излучательной рекомбинации [12]. Изучение особенностей низкочастотного шума таких светодиодов показало, что области перегрева появляются при плотностях тока на два порядка меньших, чем в квазиомических шунтах [A15]. Возможно, это связано с тем, что благодаря пониженным барьерам, наряду с миграцией индия и галлия происходит электромиграция заряженных дефектов, в соответствии с механизмом Лонжини. Процессы миграции индия и галлия в локальных областях твердого раствора и системы протяженных дефектов, приводят к неоднозначной связи ВКЭ с процессами дефектообразования. Процессы излучательной рекомбинации в первую очередь определяются свойствами достаточно совершенных областей вне протяженных дефектов. Интенсивное дефектообразование происходит в системе протяженных дефектов и в локальных областях твердого раствора с неравновесным составом по индию. При этом ВАХ отражает свойства областей с самым низким барьером и если их площадь мала, то заметных изменений ВКЭ не происходит. Показано, что ВАХ самый чуткий индикатор начала процесса дефектообразования. При этом, преимущественное изменение прямой или обратной ветви ВАХ светодиода,

при смещениях менее $2V$, позволяет разделить вклад процессов дефектообразования в системе протяженных дефектов и в локальных областях с неравновесным составом по индию и выявить наиболее ненадежные светодиоды без долговременных испытаний. Приведены результаты, показывающие, что эти два канала дефектообразования могут чередоваться и стабилизироваться на разных временных стадиях процесса старения. На финальной стадии деградации, как правило, оба канала действуют одновременно. При этом для светодиодов с хорошо упорядоченным наноматериалом, без выше отмеченных особенностей прямой ветви ВАХ, временные интервалы стабилизации могут достигать несколько тысяч часов, а изменения барьера меньше $0.2V$ и токов утечки в пределах 1 порядка, а сроки службы более 20000 часов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработан комплекс методов, позволяющий реализовать новый подход в изучение деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ), учитывающий сложный характер организации наноматериала мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур.
2. Показано, что рост значений мультифрактального параметра Δ_p , отражающий ухудшение характера организации наноматериала светоизлучающих структур и свойств системы протяженных дефектов, пронизывающей светодиодную структуру, коррелирует с увеличением на порядки токов утечки светодиодов при смещениях меньше $2V$. Обнаруженная корреляция позволила контролировать эти особенности по уровню токов утечки на коммерческих чипах светодиодов разных фирм, что значительно расширило число исследованных объектов.
3. Выяснено, что дефектообразование под действием инжекционного тока в первую очередь развивается в двух каналах: в проводящих квазиомических шунтах, локализованных в системе протяженных дефектов, и в локальных областях с неравновесным составом твердого раствора с повышенным содержанием индия. Захват неравновесных носителей этими каналами

сопровождается многофононной рекомбинацией, и рекомбинационно – стимулированной миграцией и диффузией индия и галлия, порождая немонотонное изменение значений ВКЭ на промежуточных временных стадиях старения. Локальное дефектообразование в этих каналах усиливает неоднородность протекания тока по мере увеличения времени старения и приводит к возникновению локальных областей перегрева, а также к значительному снижению концентрации неравновесных носителей, участвующих в излучательной рекомбинации.

4. Многообразие вариантов развития деградации ВКЭ синих светодиодов вызвано сложной комбинацией и чередованием процессов дефектообразования в этих двух каналах во времени. На финальной стадии деградации (при уменьшении значений ВКЭ на 30% относительно исходных), как правило, оба канала действуют одновременно. Неоднозначная связь между процессами дефектообразования и излучательной рекомбинацией, в первые, 5000 часов, вызвана тем, что области, в которых происходят эти процессы, пространственно разнесены. Таким образом, особенности деградации ВКЭ светодиодов во многом обусловлены фрактальной природой AlN наноматериала.
5. Катастрофические отказы светодиодов вызваны в первую очередь процессами дефектообразования в локальных областях с сильно неравновесным (нерегулярным) по индию составом твердого раствора InGaN, приводящими к миграции индия и галлия, и модуляции проводимости активной области.
6. Предложен метод выявления ненадежных светодиодов по контролю уровня тока прямой и обратной ветвей ВАХ, при смещениях менее 2В. При этом, наиболее ненадежные светодиоды с катастрофическим отказом могут быть выявлены на светоизлучающей пластине до проведения сборки. Светодиоды с укороченным сроком службы могут быть выявлены при временах старения менее 500 часов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

[A1] A.A. Greshnov, A.E. Chernyakov, B.Y. Ber, D.V. Davydov, A.P. Kovarskyi, N.M.Shmidt, F.M. Snegov, O.A. Soltanovich, P.S. Vergeles, E.B. Yakimov, A.L. Zakgeim «Comparative Study of Quantum Efficiency of Blue LED with Different Nanostructural Arrangement», *Phys.Status Solidi(c)*2007,v.4,# 8, P.2981-2985.

[A2] Аверкиев Н.С., Левинштейн М.Е., Петров П.В., А.Е. Черняков А.Е., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М. ,Особенности рекомбинационных процессов в светоизлучающих структурах на основе InGaN/GaN при больших плотностях инжекционных токов , Письма в ЖТФ **35**, 97-102 (2009).

[A3] Закгейм А.Л., Левинштейн М.Е., Петров В.П., Черняков. А.Е., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М., Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах, 2012, ФТП, т.46, 2,,: 219-223.

[A4] Закгейм А.Л., Курышев Г.Л., Мизеров М.Н., Половинкин В.Г., Рожанский И.В., Черняков А.Е., Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии, *Физика и техника полупроводников*, 2010, том 44, вып. 3.

[A5] Булашевич К.А., Закгейм А.Л., Карпов С.Ю., Черняков А.Е., Теоретический анализ и экспериментальное исследование электрооптических и тепловых характеристик мощных InGaN/GaN излучающих кристаллов флип-чип конструкции, Тезисы докладов 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» - СПб 2011. С.53-55

[A6] Chernyakov A.E., Bulashevich K. A., Karpov S. Yu., Zakgeim A. L., Experimental and theoretical study of electrical, thermal, and optical characteristics of InGaN/GaN high-power flip-chip LEDs, *Phys. Status Solidi A* 210, - 2013, No. 3, 466–469.

[A7] Zakgeim A.L., Chernyakov A.E., Vaskou A.S., Kononenko V.K., Niss V.S., Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types, 14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 2013, EuroSimE 2013, P.1-7

[A8] Б.Я. Бер, Е.В. Богданова, А.А. Грешнов, А.Л. Закгейм, Д.Ю. Казанцев, А.П. Карташова, А.С. Павлюченко, А.Е. Черняков , Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт, Е.Б. Якимов «Влияние уровня легирования кремнием и характера наноструктурной организации на падение с током внешней квантовой эффективности InGaN/GaN светодиодов». ФТП,45,№3,425-431(2011)

[A9] N.S. Averkiev, A.E. Chernyakov, N.M.Shmidt, Tho channels of non-radiative recombination in InGaN/GaN LEDs, *Physica B* 404(2009)4896-4898.

[A10] A.E. Chernyakov, M.M. Sobolev, V.V. Ratnikov, N.M.Shmidt, E.B. Yakimov Nonradiative recombination dynamics in InGaN/GaN LED defect system Superlattices and Microstructures 45(2009)301-307.

[A11] Давыдов Д.В., Закгейм А.Л., Снегов Ф.М., Соболев М.М., Черняков А.Е., Усиков А.С., Шмидт Н.М., Локализованные состояния в активной области голубых светодиодов, связанные с системой протяженных дефектов, Письма в ЖТФ, 2007, т.33, вып.2, С.11-18.

[A12] Shabunina E; Averkiev N; Chernyakov A; Levinshtein M; Petrov P; Shmidt N, Extended defect system as a main source of non-radiative recombination in InGaN/GaN LEDs, *Phys. Status Solidi C Curr. Top. Solid State Phys.*, v.10, 3, страницы: 335-337.

- [A13] Shmidt,N; Greshnov,A; Chernyakov,A; Levinshtein,M; Zakgeim,A; Shabunina,E ,Mechanisms behind efficiency droop and degradation in InGaN/GaN LEDs, Phys. Status Solidi C Curr. Top. Solid State Phys.,2013, v.10, 3, С. 332-334
- [A14] Shabunina E; Chernyakov A; Shmidt N., Multiphonon recombination of carriers in local regions of InGaN/GaN nanostructures, 22 International Symposium Nanostructures: Physics and Technology, St.-Petersburg, June, 2014, Proceedings, P.67.
- [A15] A.E. Chernyakov, M.E. Levinshtein, P.V. Petrov, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina, A.L. Zakgeim, Failure mechanisms in blue InGaN/GaN LEDs for high power operation, Microelectron. Reliab., 2012, v. 52, 9-10, pp. 2180-2183.

Список используемой литературы:

1. . — <http://www.cree.com/Lighting/Document-Library>.
2. Meneghesso G, Meneghini M, Zanoni E Recent results on the degradation of white LEDs for lighting // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2010. — Т. 43, 35. — С. 354007-354018.
3. Shmidt N M, Besyul'kin A N, Dunaevsky M S, Kolmakov A G, Sakharov A V, Usikov A S, Zavarin E E Mosaicity and electrical and optical properties of group III nitrides // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2002. — Т. 14, 48. — С. 13025-13030.
4. Kamanin A V, Kolmakov A G, Kop'ev P S, Onushkin G A, Sakharov A V, Shmidt N M, Sizov D S, Sitnikova A A, Zakgeim A L, Zolotareva R V, Usikov A S Degradation of blue LEDs related to structural disorder // Physica Status Solidi (c). — 2006. — Т. 3, 6. — С. 2129-2132.
5. Ковалев А Н, Маняхин Ф И, Кудряшов В Е, Туркин А Н, Юнович А Э Изменение люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN при длительной работе // Физика и техника полупроводников. — 1999. — Т. 33, 2. — С. 224-232.
6. Бочкарева Н И, Ефремов А А, Ребане Ю Т, Горбунов Р И, Клочков А В, Шретер Ю Г Неоднородность инжекции носителей заряда и деградации голубых светодиодов // ФТП. — 2006. — Т. 40, 1. — С. 122-128.
7. Шретер Юрий, Ребане Юрий, Зыков Валерий, Сидоров Валерий Широкозонные полупроводники. — Санкт-Петербург : Наука. Ленинградское отделение, 2001.
8. Встовский Г В, Колмаков А Г, Бунин И Ж Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 116 с.
9. . — <http://www.philipslumileds.com/support>.
10. Pinos A, Marcinkevičius S, Shur M S High current-induced degradation of AlGaN ultraviolet light emitting diodes // Journal of Applied Physics. — 2011. — Т. 109, 10. — С. 130108-10.
11. Шуберт Ф Е Светодиоды / Под ред. Юнович А Э. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 384 с.
12. Yassievich I N Recombination-induced defect heating and related phenomena // Semiconductor Science and Technology. — 1994. — Т. 9, 8. — С. 1433-1453.
13. Gold R D, Weisberg L R Permanent degradation of GaAs tunnel diodes // Solid-State Electronics. — 1964. — Т. 7, 11. — С. 811-821.
14. Leung K K, Fong W K, P.K.L.Chan, Surya C Physical mechanisms for hot-electron degradation in GaN light-emitting diodes // Journal of Applied Physics. — 2010. — Т. 107, 7. — С. 0731103.
15. Адирович Э И, Карагеоргий-Алкалаев П М, Лейдерман А Ю, Гальперин Е И Токи двойной инжекции в полупроводниках. — Москва : Сов. радио, 1978.