



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт физики микроструктур
Российской академии наук
(ИФМ РАН)

607680, Нижегородская область, Кстовский район,
д. Афонино, ул. Академическая, д.7
тел.: 831- 4179473, факс: 831- 4179464
почта: 603950 Н.Новгород ГСП-105
электронная почта: director@ipmras.ru
http://www.ipmras.ru
ОКПО 25565230, ОГРН 1025203015089
ИНН/КПП 5260035830/525001001

29.05.2014 №11249 – 231

На № _____

"УТВЕРЖДАЮ"

Зам. директора ИФМ РАН



В.И. Гавриленко

29 мая 2014 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Чернякова Антона Евгеньевича
**“Особенности развития деградации внешней квантовой эффективности мощных синих
светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур“**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10-физика полупроводников

В последние годы во многих странах мира успешно развивается индустрия мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур. Однако, реализация программ по переходу на твердотельное энергосберегающее освещение на основе этих светодиодов сдерживается рядом нерешенных проблем. Причем, часть из них носит фундаментальный характер, в том числе проблема деградации внешней квантовой эффективности (ВКЭ). Такие явления как немонотонное изменение ВКЭ и непредсказуемый отказ светодиодов в процессе старения не нашли адекватного объяснения. Механизмы дефектообразования под действием инжекционного тока и их роль в деградации ВКЭ при старении не выяснены в полной мере, что привело к отсутствию общепринятой модели этого процесса, несмотря на многолетние усилия мирового научного сообщества. Попытки применения моделей деградации ВКЭ, развитых для светодиодов на основе традиционных A^3B^5 , не увенчались успехом, т.к. механизм мультипликации дислокаций и образования дислокационной сетки в активной области в процессе старения, в синих светодиодах не наблюдается. Эти проблемы порождают такие реальные трудности для практики, как ненадежность светодиодов, затратные долговременные испытания, увеличение себестоимости светодиодов. В связи с этим работа А.Е.Чернякова, посвященная исследованию особенностей деградации внешней квантовой эффективности мощных синих

светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур, несомненно, является актуальной и находится в русле развития физики полупроводниковых наноструктур.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, основные задачи работы, научная новизна и приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен подробный аналитический обзор литературных данных по проблеме деградации внешней квантовой эффективности мощных синих InGaN/GaN светодиодов, что позволило автору четко сформулировать задачи исследования.

Во второй главе кратко описаны традиционные методики исследования вольтамперных характеристик (ВАХ), оптических свойств, зависимостей внешней квантовой эффективности от плотности тока, спектров электролюминесценции, а также методики старения светодиодов. 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»). Для сравнения исследовались чипы мощных светодиодов мировых фирм-производителей: *Cree*, *SemiLED*, а также фирмы *Samsung*, собранных в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» методом флип-чип монтажа. Исследование процесса деградации и прогнозирование срока службы синих мощных светодиодов проводилось в режимах, предложенных зарубежными фирмами. Все исследованные светодиоды без линз имели значения внешней квантовой эффективности 30 - 50 % при токах 5 – 10 мА, что соответствует современному мировому уровню.

В третьей главе представлен комплекс методов, позволяющий реализовать новый подход в изучении деградации внешней квантовой эффективности, учитывающий сложный характер организации светоизлучающих структур, проявления фрактальной природы A^3N материала. Разработанный автором комплекс включает количественный контроль наноматериала светоизлучающих структур с помощью мультифрактального параметра, характеризующего степень упорядоченности наноматериала, контроль неоднородности протекания тока и возникновения областей локального перегрева, а также определение распределения температуры по площади светодиодов с использованием как инфракрасной тепловизионной микроскопии, так и компьютерного моделирования тепловых полей.

В четвертой главе на основе предложенного автором подхода к изучению процесса деградации ВКЭ светодиодов, учитывающего сложный характер организации разно-размерных неоднородностей состава твердого раствора InGaN и присутствие квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов, исследованы основные закономерности развития деградации ВКЭ этих светодиодов. Приведены результаты изучения эволюции ВАХ,

зависимостей внешней квантовой эффективности, спектральной плотности низкочастотного шума, дифференциального сопротивления от плотности тока на нескольких группах светодиодов, различающихся по характеру организации наноматериала (или значениям токов утечки при малых напряжениях, до появления заметной электролюминесценции), на разных временных стадиях старения.

Диссертационная работа содержит важные в научном и практическом отношении результаты, среди которых наиболее интересными на наш взгляд представляются следующие:

1. Выявлена определяющая роль сложного характера организации наноматериала светодиодов в развитии дефектообразования и деградации их внешней квантовой эффективности в процессе старения.
2. Установлено, что дефектообразование под действием инжекционного тока развивается, преимущественно, в двух каналах: в проводящих квазиомических шунтах, локализованных в системе протяженных дефектов, и в локальных областях InGaN с неравновесным составом твердого раствора.
3. Показано, что в этих каналах существуют все необходимые условия для реализации деградации ВКЭ по механизму Голда-Вайсберга: высокая плотность неравновесных носителей, их многофононная рекомбинация на слабо связанных атомах индия и галлия в отдельных протяженных дефектах, вызывающая локальные перегревы и рекомбинационно – стимулированную миграцию индия и галлия, перераспределение индия между локальными областями твердого раствора.
4. Установлено, что многообразие вариантов развития деградации ВКЭ синих светодиодов вызвано сложной комбинацией 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 рекомбинацией и дефектообразованием в первые 5000 часов старения вызвана тем, что области, в которых происходят эти процессы, пространственно разнесены.

Новизна полученных результатов определяется использованием автором нового подхода к изучению процесса деградации ВКЭ светодиодов, учитывающего сложный характер организации наноматериала, вызванный присутствием разно-размерных неоднородностей состава твердого раствора InGaN и квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается их воспроизводимостью, комплексным использованием современных экспериментальных методов исследования, методически продуманной и последовательной постановкой экспериментов, корректным построением теоретических моделей.

Практическое значение имеет использованный автором новый подход в изучении деградации внешней квантовой эффективности, учитывающий сложный характер организации наноматериала мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур и позволяющий выяснить вклад эволюции свойств наноматериала в процессе старения в деградацию внешней квантовой эффективности светодиодов. Важное значение для практики имеют методы выявления наиболее ненадежных, склонных к катастрофическим отказам светодиодов по уровню токов утечки и появлению локальных областей с пониженным барьером на прямой ветви ВАХ. При этом наиболее ненадежные светодиоды могут быть выявлены по особенностям ВАХ до проведения старения и сборки, что позволяет оперативно оптимизировать процессы роста.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке оптоэлектронных приборов на основе наноматериалов A^3N в организациях активно работающих в этом направлении: ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», ЗАО «ЭЛМА-Малахит», МИСИС (г. Москва), МГУ им. М.В. Ломоносова, ИПФ СО РАН и Санкт-Петербургском Государственном Электротехническом университете.

Замечания по диссертационной работе.

Работа имеет недостатки. Необходимо указать следующие.

1. Пункт 2 основных результатов диссертации (автореферат, стр.19) сформулирован так:

«Показано, что рост значений мультифрактального параметра Δ_r , 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 $2V$ ». Результат перекликается со вторым положением, выносимым на защиту в диссертации 2010 г. Карташовой А.П. (рук. Н.М. Шмидт) *«Особенности излучательной и безызлучательной рекомбинации в квантоворазмерных структурах InGaN/GaN, GaAsN/GaN, связанные с характером организации наноматериала»:*

«Величина токов утечки квантоворазмерных структур при смещениях меньше $2V$ интегрально отражает свойства локального канала безызлучательной рекомбинации, локализованного в системе протяженных дефектов, коррелирует со степенью упорядоченности наноматериала светоизлучающих структур Δ_r ».

2. В пункте 3 основных результатов диссертации указано: «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*» (автореферат, стр.19). Следует пояснить, почему области с повышенным содержанием индия подвержены ускоренному дефектообразованию. Данное утверждение противоречит результатам исследований В. Сушкова и С. Никифорова: «Поскольку деградация величины светового потока

экспоненциально зависит от плотности тока, то в большей степени деградации подвержены области структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с малыми значениями $x = 0.15 \dots 0.17$, через которые протекают токи с большой плотностью» (Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN . Полупроводниковая светотехника, №3, 2011).

3. В качестве замечаний по оформлению можно указать на опечатки, присутствующие в тексте диссертации: на стр.69 «при смещении меньших $2B$ »; опечатка в степени в зависимости вида $S(j) \sim 1/j^2$ на стр.71; на стр. 98 в тексте вместо прямых зависимостей $S(j)$ приведены обратные.

Приведенные замечания не являются принципиальными и не снижают ценность диссертации. В целом диссертация Чернякова А.Е. - актуальное, законченное, выполненное на высоком научном уровне исследование, в основе которого заложено выяснение роли фрактальной природы наноматериала светоизлучающих структур в особенностях развития деградации внешней квантовой эффективности мощных синих светодиодов. Основные результаты являются новыми и достоверными. Они своевременно опубликованы в ведущих международных и отечественных журналах, представлены на международных и российских конференциях, хорошо известны как российской, так и зарубежной научной общественности. Автореферат соответствует содержанию диссертации и опубликованных работ. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций.

Изложенное выше показывает, что диссертация Чернякова А.Е. «Особенности развития деградации внешней квантовой эффективности мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур» полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Черняков Антон Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доклад по материалам диссертации был заслушан и отзыв обсужден на семинаре № 14 (269) ИФМ РАН по физике полупроводников 27 мая 2014 года.

Председатель семинара

Зам. директора ИФМ РАН, д.ф.-м.н.

В.И. Шашкин

Секретарь семинара

С.н.с., к.ф.м.н.

Е.В. Демидов

Подписи заверяю

Ученый секретарь ИФМ РАН, к.ф.-м.н.



Д.А. Рыжов