

На правах рукописи



Шабунина Евгения Игоревна

Низкочастотный шум в светодиодах на основе квантоворазмерных InGaN/GaN  
структур

01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, с.н.с.  
Шмидт Наталия Михайловна,  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Сидоров Валерий Георгиевич,  
СПбГПУ  
доктор физико-математических наук, с.н.с.  
Лебедев Александр Александрович,  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный  
Электротехнический Университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова-Ленина

Защита состоится «24» ноября 2011 г. в 10 часов 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 Учреждения Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «20» октября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор

  
Л.М. Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Исследование низкочастотного шума является эффективным методом изучения неоднородностей и дефектов в полупроводниковых структурах, а также методом диагностики надежности полупроводниковых приборов, в том числе и светодиодов [1]. Проблемы надежности мощных синих InGaN/GaN светодиодов в последние несколько лет встали наиболее остро в связи с развитием программ по разработке твердотельного энергосберегающего освещения на их основе. В ходе выполнения этих программ исследователи столкнулись с такими проблемами как падение внешней квантовой эффективности светодиодов уже при плотностях тока порядка  $10 \text{ А/см}^2$  и неоднозначным течением деградационного процесса с непредсказуемым выходом части светодиодов из строя. Эти явления ставят под угрозу рентабельность перехода на твердотельное освещение, носят фундаментальный характер и, несмотря на многолетние исследования, их природа до сих пор не установлена [2,3]. Связь этих явлений с особенностями безызлучательной рекомбинации в InGaN/GaN светодиодах не вызывает сомнений, поэтому, неудивительно, что значительное число публикаций посвящено изучению безызлучательной рекомбинации. Однако к началу выполнения настоящей работы механизмы рекомбинации в синих InGaN/GaN светодиодах были не выяснены, а выводы разных авторов о вкладе точечных и структурных дефектов в этот процесс были противоречивыми. Представляется, что противоречия во многом, вызваны сложной структурной организацией и многообразием форм существования этих материалов от плохо сросшихся нанодоменов, до квазиэпитаксиального материала со следами дислокационных и дилатационных границ сросшихся нанодоменов. В результате типичной структурной особенностью является система протяженных дефектов, пронизывающая активную область светоизлучающих структур, и включающая высокую плотность дислокаций до  $10^9 \text{ см}^{-2}$ , их скоплений и дислокационных стенок [5]. Свойства системы протяженных дефектов при повышенных плотностях тока, соответствующих развитию упомянутых выше явлений, мало изучены, т.к. традиционные методы изучения дефектов, в основном, применимы лишь при малых плотностях тока. В связи с этим в публикациях

последних лет [6] отмечается, что характер взаимосвязи деградации оптической мощности (внешней квантовой эффективности) с изменением свойств дефектной системы остается не выясненным. Кроме того, по-прежнему остается предметом дискуссий вопрос о том, какие дефекты и преимущественно в каких областях генерируются в процессе деградации, а также, роль системы протяженных дефектов в этом процессе. Результаты по исследованию спектральной плотности низкочастотного шума в мощных синих InGaN/GaN светодиодах, представленные в немногочисленных публикациях [1,7], продемонстрировали возможность изучения свойств дефектной системы этих материалов в широком диапазоне плотностей тока, в том числе и при плотностях тока, превышающих  $1 \text{ А/см}^2$ , а, следовательно, и целесообразность применения этого метода для изучения процессов деградации и падения внешней квантовой эффективности мощных синих InGaN/GaN светодиодов. Это и определило цели и задачи данной работы.

**Основные цели и задачи** данной работы заключаются в изучении низкочастотного шума мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур в частотном диапазоне 10 Гц – 10 кГц, при плотностях тока  $10^{-3} - 50 \text{ А/см}^2$ , применении этого метода диагностики для исследования безызлучательной рекомбинации и выяснения причин падения внешней квантовой эффективности при плотностях тока больше  $10 \text{ А/см}^2$ , а также причин неоднозначного развития деградационного процесса в этих светодиодах.

**Научная новизна работы** заключается в том, что выяснены особенности низкочастотного шума мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур, обусловленные суммарным вкладом в безызлучательную рекомбинацию единичных дефектов Шокли-Рида-Холла и каналов, локализованных в системе протяженных дефектов. Выявлены изменения свойств этих каналов с изменением плотности тока. Обнаружено подавление безызлучательной рекомбинации, проявляющееся в уменьшении и стабилизации уровня шума при плотностях тока соответствующих началу излучательной рекомбинации. Выявлено усиление безызлучательной рекомбинации в системе протяженных дефектов за счет перестройки центров прилипания в центры безызлучательной рекомбинации при плотностях тока,

превышающих  $10 \text{ A/cm}^2$ . Такая перестройка приводит к падению внешней квантовой эффективности. Обнаружено усиление неоднородности протекания тока по мере старения светодиодов. Постепенное нарастание неоднородности в процессе старения приводит к формированию квазиомических шунтов и возникновению локальных областей перегрева, способствующих миграции In и Ga в системе протяженных дефектов и между латеральными областями с разным по индию составом твердого раствора InGaN. Показано, что именно эти механизмы, а также эффект подавления безызлучательной рекомбинации приводят к неоднозначному развитию деградационного процесса в InGaN/GaN светодиодах, и осложняют прогнозирование срока службы и моделирование процесса деградации.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что показана перспективность применения низкочастотной шумовой спектроскопии в диагностике свойств InGaN/GaN светодиодов. Продемонстрировано, что низкочастотный шум несет информацию о состоянии дефектной системы в InGaN/GaN структурах в том числе и при плотностях тока, превышающих  $1 \text{ A/cm}^2$ . Предложены методы, позволяющие существенно снизить с 50 % до 10 % падение внешней квантовой эффективности при плотностях тока меньше  $50 \text{ A/cm}^2$ . Использование низкочастотного шума позволило установить критерий ненадежности мощных светодиодов с пониженным сроком службы при использовании сравнительно малых (10-100 часов) временных испытаний. Критерий основан на том, что превышение значений спектральной плотности низкочастотного шума InGaN/GaN светодиодов в первые, 10-100 часов старения, более чем на два порядка относительно исходных значений, при плотностях тока соответствующих максимуму внешней квантовой эффективности, отражает необратимое изменение свойств дефектной системы, приводящее к усилению безызлучательной рекомбинации в системе протяженных дефектов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Избыточный шум  $1/f$  вплоть до частот 50 кГц, появление падающих участков на зависимости спектральной плотности токового шума от плотности тока  $S_I(j)$ , характерные для мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур, связаны с участием в

2. Появление участков зависимости  $S_1(j) \sim j^3$  при  $j > 10$  А/см<sup>2</sup> обусловлено усилением безызлучательной рекомбинации в системе протяженных дефектов, и сопровождается падением внешней квантовой эффективности InGaN/GaN светодиодов.
3. Отклонение зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения от плотности тока  $S_v(j)$  от классического вида, характеризуемого соотношением  $S_v \sim 1/j$ , отражает типичное для этих светодиодов неоднородное протекание тока, в первую очередь по системе протяженных дефектов.
4. Усиление неоднородности протекания тока в процессе старения светодиодов приводит к формированию шунтов и областей локального перегрева и диагностируется по появлению на зависимости спектральной плотности флуктуаций тока от плотности тока  $S_1(j)$  участков  $S_1(j) \sim j^4$  при  $j > 10$  А/см<sup>2</sup>. Причем, для светодиодов деградировавших по значениям внешней квантовой эффективности более чем на 20 % относительно исходных значений, формирование областей локального перегрева наблюдается при крайне малых значениях  $j \sim 10^{-2} - 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>.
5. Превышение значений спектральной плотности низкочастотного шума InGaN/GaN светодиодов, в первые 10-100 часов старения, более чем на два порядка относительно исходных значений, при плотностях тока, соответствующих максимуму внешней квантовой эффективности, указывает на ненадежность мощных синих InGaN/GaN светодиодов и пониженный срок службы.

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

X Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, Санкт-Петербург, 1 – 5 декабря 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.

**Публикации** Основные результаты работы опубликованы в 16 печатных работах, из них научных статей в реферируемых журналах – 4; тезисов в материалах конференций – 12.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 177 страницах машинописного текста. Диссертация включает также 64 рисунка и список литературы из 126 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит обзор литературы по особенностям низкочастотного шума в полупроводниковых структурах. Кратко рассмотрены некоторые известные модели  $1/f$  [8] и генерационно-рекомбинационного шума [9,10], а также приведены результаты исследования низкочастотного шума в эпитаксиальных слоях GaN [11] и светоизлучающих структурах на основе твердых растворов [1,7,10,12,14]. Рассматриваются структурные особенности светоизлучающих структур на основе нитридов III-группы. Проанализированы экспериментальные результаты по особенностям формирования мозаичной (доменной) структуры, а также системы протяженных дефектов, пронизывающих активную область светоизлучающих структур [5]. Приведен краткий обзор основных экспериментальных и теоретических исследований рекомбинации в светодиодах на основе InGaN/GaN и эффекта падения внешней квантовой эффективности [4], известных, на начало 2011 года. Рассмотрены особенности деградационного процесса в светодиодах на основе InGaN/GaN. Отмечены известные к настоящему времени причины деградации оптической мощности InGaN/GaN светодиодов [1-3,6]. В конце главы сформулированы основные выводы и определены основные цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** кратко рассмотрены особенности технологии выращивания светоизлучающих структур методами газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) на сапфировых подложках с ориентацией (0001). Приведена характеристика исследованных в работе синих светодиодов на основе светоизлучающих структур InGaN/GaN, выращенных отечественными производителями (ЗАО Светлана-оптоэлектроника), а также коммерческих светодиодов известных зарубежных фирм Cree, SemiLed, Samsung. Большая часть светодиодов собрана по технологии флип-чип монтажа без линз (для удобства проведения исследований) в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». Площадь светодиодов составляла 300x300, 300x400 и 900x900 мкм. Все исследованные светодиоды с линзами имели значения внешней квантовой эффективности 30 – 45 %, при токах 5 – 10 мА, что соответствует современному мировому уровню. Описываются методики, использованные в работе для исследования, электрических и оптических свойств структур: измерение вольтамперных характеристик (ВАХ), внешней квантовой эффективности, спектров электролюминесценции и низкочастотного шума. Описывается используемое измерительное оборудование. В разделе, посвященном исследованию шумовых процессов, кроме описания измерительной установки, используемой в эксперименте, приводятся определения основных характеристик, описывающих шумовой процесс. Обсуждаются следующие характеристики шума: среднее значение случайного процесса  $\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x w_1(x) dx$ , дисперсия, называемая также интенсивностью или мощностью шума  $\sigma^2 = \langle (x(t) - \langle x \rangle)^2 \rangle$ , характеризующая средний размах флуктуаций около среднего значения; спектральное представление  $\sigma_f^2 = S(f) df$   $df \rightarrow 0$ , используемое для описания динамических свойств шума, где функция частоты  $S(f)$  называется спектральной плотностью шума и характеризует распределение интенсивности флуктуаций по частоте, а также автокорреляционная функция  $K(\tau)$ , отражающая связь между значениями случайного процесса в два момента времени, разделенные некоторым интервалом  $\tau$   $K(\tau) = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 w_2(x_1, t; x_2, t+\tau) dx_1 dx_2$  [14]. Оценка спектральной плотности мощности или спектральной плотности шума выполняется с помощью процедур, использующих преобразование Фурье [15]. В исследованиях обычно используются зависимости спектральной плотности

токавого шума ( $S_I$ ) от частоты ( $f$ ), от плотности тока ( $j$ ), зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения ( $S_V$ ) от плотности тока.

**В третьей главе** приведены результаты исследования зависимостей  $S_I(f)$ ,  $S_I(j)$ ,  $S_V(j)$ , для мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур. Типичные значения внешней квантовой эффективности в полной сборке для всех светодиодов 30 – 45 % с максимумом излучения в диапазоне длин волн 450 – 460 нм [A1,A2]. Кроме того, для сравнения, приведены результаты исследования тех же характеристик коммерческих красных светодиодов на основе AlGaAs/GaAs. Выяснены типичные особенности низкочастотного шума и безызлучательной рекомбинации в синих InGaN/GaN светодиодах [A1-A9], принципиально отличающиеся от тех же характеристик для красных светодиодов [A10].

Для синих InGaN/GaN светодиодов избыточный  $1/f$  шум наблюдается вплоть до частот 50 кГц (Рис. 1а, кривые 2, 4) [A1,A7,A9], в то время как для красных светодиодов, на частотах, превышающих 1 кГц, частотная зависимость отсутствует (Рис. 1а, кривые 1, 3). На зависимости  $S_I(j)$  в красных AlGaAs/GaAs светодиодах при малых плотностях тока  $10^{-3} - 6 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, присутствует участок зависимости вида  $S_I(j) \sim j^2$  (Рис. 1б, кривая 1) [A10], что согласно

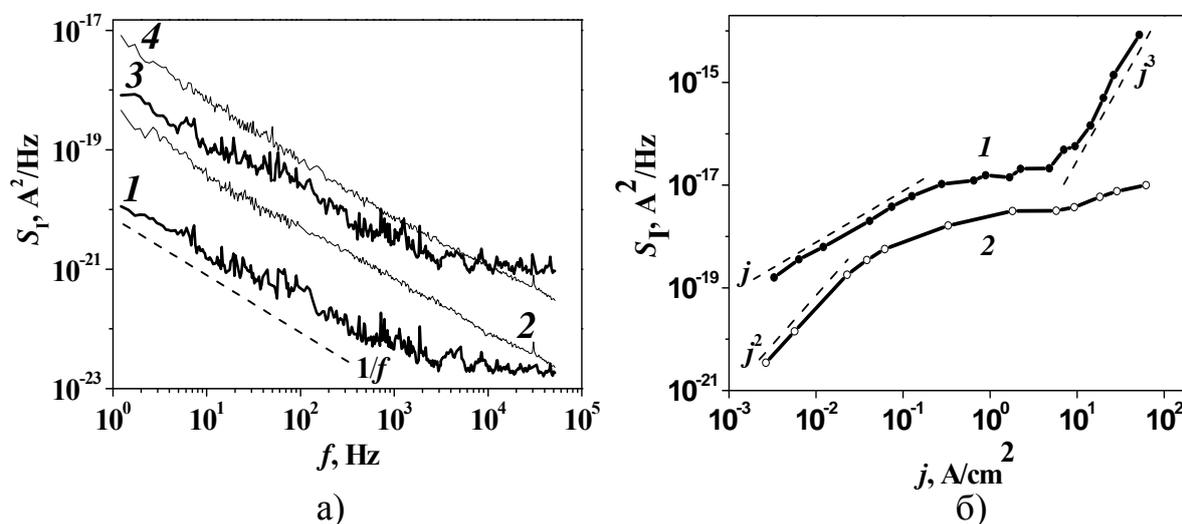


Рис. 1. а) Частотные зависимости спектральной плотности шума для красных AlGaAs/GaAs (кривые 1, 3) и синих InGaN/GaN (кривые 2, 4) светодиодов при нескольких Плотностях тока  $j$  (А/см<sup>2</sup>): 1 –  $5.4 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>, 2 –  $5.9 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>, 3 –  $6.75 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>, 4 –  $8.17 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>. б) Зависимости спектральной плотности шума от плотности тока красных светодиодов (кривая 1) и синих светодиодов (кривая 2).

теоретическим представлениям и результатам экспериментальных исследований на других полупроводниках [9], свидетельствуют о вкладе в шум генерационно-рекомбинационных процессов, обусловленных присутствием в обедненной области центров Шокли-Рида-Холла.

Для синих светодиодов при малых плотностях тока чаще всего наблюдается зависимость  $S_I(j)$ , вида  $S_I(j) \sim j$  (Рис. 1б, кривая 2) [A1,A7,A9]. Такая зависимость в сочетании с частотной зависимостью типа  $1/f$ , вплоть до 50 кГц, отражает, согласно теоретическим представлениям [10], вклад в безызлучательную рекомбинацию локальных центров Шокли-Рида-Холла, и флуктуаторов, обусловленных присутствием в активной области близко расположенных уровней [11]. Корреляция роста уровня низкочастотного шума светодиодов Рис. 2а, с ростом токов туннельной безызлучательной рекомбинации при смещениях меньше 2.5 В (Рис. 2б), позволяет предположить связь наблюдаемых особенностей низкочастотного шума InGaN/GaN светодиодов с безызлучательной рекомбинацией, локализованной в системе протяженных дефектов, пронизывающей активную область [A1,A9]. Предположение основано на том, что в работе [5] была показана связь роста токов туннельной безызлучательной рекомбинации с ухудшением свойств системы протяженных дефектов, пронизывающей активную область [A11,A12].

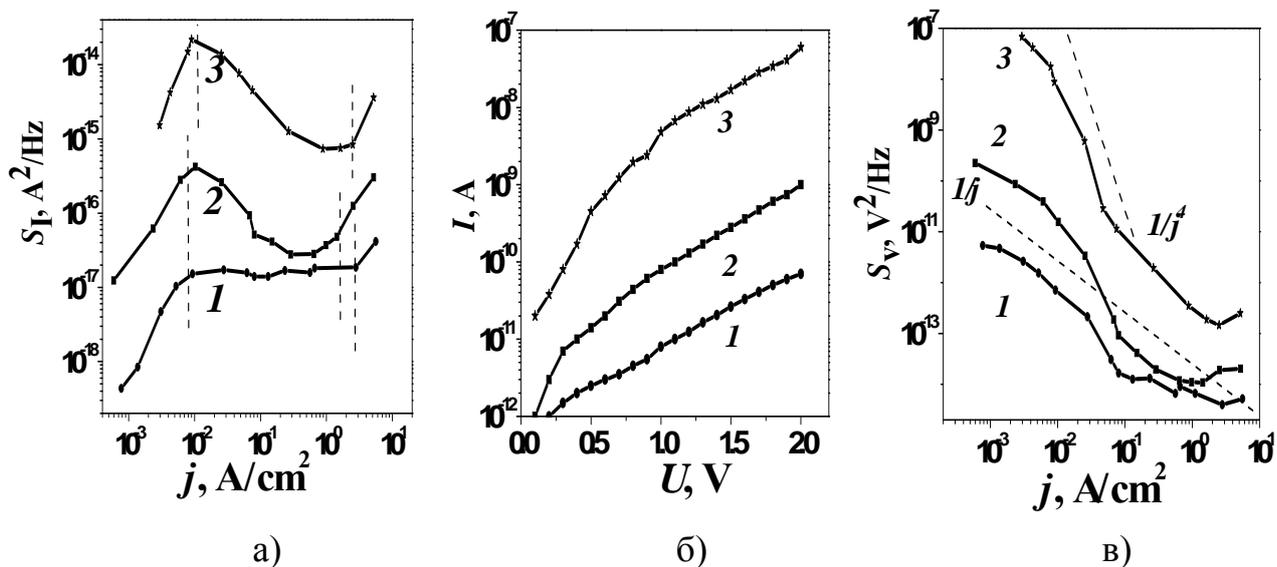


Рис. 2. Типичные характеристики светодиодов с отличающимися токами утечки: а) зависимости спектральной плотности шума от плотности тока; б) обратные ветви ВАХ в) зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения от плотности тока, частота измерений – 1.22 Гц.

Следует отметить, что для p-n переходов на основе традиционных материалов, спектральная плотность шума пропорциональна концентрации центров Шокли-Рида-Холла в области объемного заряда. В этом случае для InGaN/GaN светодиодов (Рис. 2а, кривая 3), концентрация центров растет на 2 порядка, что согласно проведенным в диссертационной работе оценкам, должно приводить к катастрофическому падению внешней квантовой эффективности ( $\eta$ ). Однако  $\eta$  снижается на 10 %, т.к. усиление безызлучательной рекомбинации происходит не во всей активной области, а локально в системе протяженных дефектов. Этот вывод хорошо согласуется со сдвигом максимума внешней квантовой эффективности в область больших плотностей тока, наблюдаемым для светодиодов с избыточными токами утечки [А8]. Кроме того, в пользу участия этого канала в безызлучательной рекомбинации свидетельствуют наблюдаемые зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения от плотности тока светодиодов (Рис. 2в), демонстрирующие неоднородный характер протекания тока. Неоднородность протекания тока диагностируется по отклонению зависимостей  $S_v(j)$  от классической зависимости вида  $S_v(j) \sim 1/j$  характерной для p-n переходов и светодиодов с однородным протеканием тока [16]. По мере увеличения тока утечки, т.е. ухудшения свойств системы протяженных дефектов, отклонения от зависимости вида  $S_v(j) \sim 1/j$  резко возрастают (Рис. 2в) [А10]. Такое поведение вполне закономерно, т.к. известно, что ухудшение свойств системы протяженных дефектов вызвано увеличением скоплений дислокаций, протяженности дислокационных стенок и неоднородности их распределения [5,6].

Для светодиодов с минимальными токами утечки (Рис. 2б, кривая 1), так же как для красных светодиодов (Рис. 1б, кривая 1), начиная с плотностей тока, соответствующих началу излучательной рекомбинации ( $j_n$ ), на зависимости  $S_I(j)$  наблюдается участок стабилизации шума (Рис. 2а кривая 1), отражающий преобладание излучательной рекомбинации над безызлучательной [10]. Показано, что для светодиодов с избыточными токами (Рис. 2б, кривые 2, 3), участок стабилизации плотности шума появляется только при плотностях тока, соответствующих максимуму внешней квантовой эффективности ( $j_{max}$ ) (Рис. 2а, кривые 2,3). При плотностях тока в интервале  $j_n < j < j_{max}$  наблюдаются падающие зависимости  $S_I(j)$  с разными наклонами [А13], не типичные для случая, когда шум обусловлен точечными дефектами Шокли-Рида-Холла [16]. Таким образом, обнаружен эффект подавления безызлучательной

рекомбинации [A2], проявляющийся начиная с плотностей инжекционного тока, соответствующих началу излучательной рекомбинации (отмечено на Рис. 2а вертикальной пунктирной линией), и усиливающийся по мере роста инжекционного тока (Рис. 2а, кривые 2,3). Именно поэтому светодиоды, отличающиеся по токам утечки на 1-2 порядка, не отличаются заметно по значениям максимальной внешней квантовой эффективности. В случае значительного (более 3-х порядков) превышения токов утечки (Рис. 2а, кривая 3) эффект подавления также наблюдается, однако уровень шума не возвращается к уровню типичному для светодиодов с малыми токами утечки (Рис. 2а, кривая 1), и для таких светодиодов значения  $\eta$  в максимуме оказываются ниже на 10 % и более. Эффект подавления связан с заполнением уровней прилипания в системе протяженных дефектов и явлением реабсорбции рекомбинационного излучения и нуждается в более подробном изучении.

В отличие от красных светодиодов, для которых участок преобладания излучательной рекомбинации простирается до плотностей тока более 50 А/см<sup>2</sup> (Рис. 1б, кривая 1), для синих InGaN/GaN светодиодов этот участок наблюдается до плотностей тока, меньших ~ 10 А/см<sup>2</sup> (Рис. 1б, кривая 2), [A10]. При  $j > 10$  А/см<sup>2</sup> наблюдается рост плотности шума по закону  $S \sim I^3$  (Рис. 1б, кривая 2), [A3]. Причем, этот участок начинается с плотностей тока, соответствующих началу падения внешней квантовой эффективности. Появление этого участка типично практически для всех светодиодов, с той только разницей, что для светодиодов с избыточными токами величина плотности шума выше. Это, по-видимому, связано со свойствами системы протяженных дефектов, т.е. с характером организации наноматериала [A11,A12].

Рассмотрены некоторые другие причины, приводящие к падению внешней квантовой эффективности. Предложены меры позволяющие снизить резкое падение внешней квантовой эффективности с 50 % до 10 %, относительно максимальных значений, при  $j < 50$  А/см<sup>2</sup> [A14].

Приведены оценки параметра качества  $\beta = \frac{S_l}{I^2} f n \frac{\tau}{q} I$  [12] (где  $f$  – частота,  $n$  – количество последовательно соединенных чипов,  $q$  – заряд электрона,  $\tau$  – время излучательной рекомбинации), являющегося аналогом параметра Хоуге [1] для светоизлучающих структур. Величина  $\beta$  для синих светодиодов во всем диапазоне токов больше, чем у красных. Наблюдается значительный разброс

значений  $\beta$ , что отражает существенно более высокую степень разупорядоченности InGaN/GaN структур.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования особенностей низкочастотного шума в светодиодах на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур, подвергнутых старению. Светодиоды с близкими значениями  $\eta \sim 35 \pm 2 \%$  подвергались старению при плотности тока  $35 \text{ А/см}^2$  и температуре  $p$ - $n$  перехода  $100^\circ\text{C}$  в течение времени от 100 до нескольких тысяч часов. Выявлены основные закономерности развития деградационного процесса [А8-А10,А13,А15,А16], приводящие к снижению значений  $\eta$ . Наиболее чувствительным параметром к процессу старения является ВАХ в области смещений, меньших 2.5 В. Рост токов безызлучательной рекомбинации начинается раньше, чем изменение значений  $\eta$ , и усиливается по мере развития деградационного процесса [А10,А13]. Увеличение токов безызлучательной рекомбинации в процессе старения (Рис. 3а), коррелирует с ростом уровня шума (Рис. 3б) при  $j < 10^{-1} \text{ А/см}^2$ . Так же, как для светодиодов с избыточными токами (Рис. 2а) в интервале  $j_n < j < j_{\text{max}}$  наблюдаются падающие зависимости  $S_I(j)$  с разными наклонами [А10] (Рис. 3б), не типичные для поведения центров Шокли-Рида-Холла. Эффект подавления безызлучательной рекомбинации,

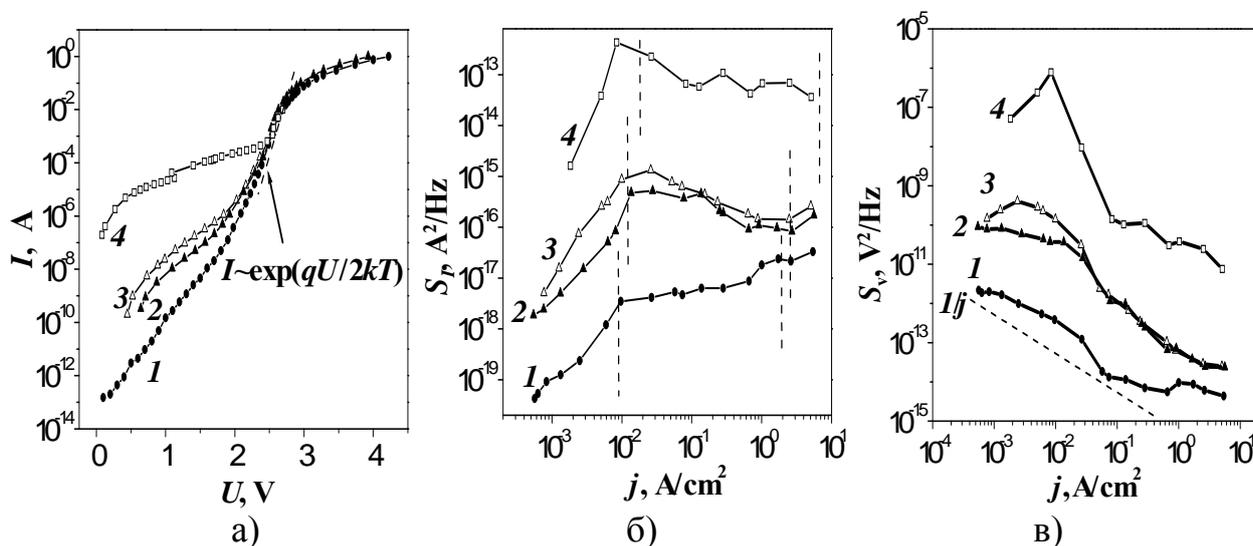


Рис. 3. (а) Прямые ветви ВАХ светодиодов (а): 1 – до деградации ( $\eta_{\text{max}} - 40 \%$ ) и после разных стадий процесса старения 2 – ( $\eta_{\text{max}} - 40 \%$ ), 3 – ( $\eta_{\text{max}} - 35 \%$ ), 4 – ( $\eta_{\text{max}} - 25 \%$ ). Зависимость спектральной плотности шума от плотности тока (б) для тех же светодиодов. Зависимость плотности флуктуаций напряжения от плотности тока (в) этих же светодиодов.

проявляется, начиная с плотностей инжекционного тока, соответствующих началу излучательной рекомбинации (отмечено на Рис. 3б вертикальной пунктирной линией), и усиливается по мере роста инжекционного тока (Рис. 3б, кривые 2,3). Эти результаты позволяют предполагать, что деградационный процесс развивается в первую очередь локально в системе протяженных дефектов. Выяснено, что для светодиодов, имеющих, после первых 10-100 часов старения, значения  $S_I$  при  $j_{\max}$  более чем на два порядка выше (Рис. 3б, кривая 4), исходных значений (Рис. 3б, кривая 1), наблюдается значительное, в несколько раз, снижение срока службы, по сравнению со светодиодами с малым изменением уровня шума относительно исходных значений (Рис. 3б, кривые 2,3). Показано, что по мере развития деградационного процесса (снижение значений  $\eta$  с увеличением времени старения) усиливается неоднородность протекания тока, диагностируемая по отклонению зависимостей  $S_v(j)$  от классической зависимости вида  $S_v(j) \sim 1/j$ , (Рис. 3в). Неоднородное протекание тока по наноразмерным каналам, образованным системой протяженных дефектов, усиливается по мере старения. При этом при снижении значений  $\eta$  более чем на 20 % относительно исходных образуются квазиомические шунты, выявляющиеся на ВАХ (Рис. 3а, кривая 3) и на зависимости дифференциального сопротивления от тока [A10]. При дальнейшей деградации формируются области локального перегрева [17], диагностируемые по появлению участков зависимости  $S_I \propto I^4$  (Рис. 4а, кривая 2), а также с помощью прямых измерений областей перегрева на инфракрасном

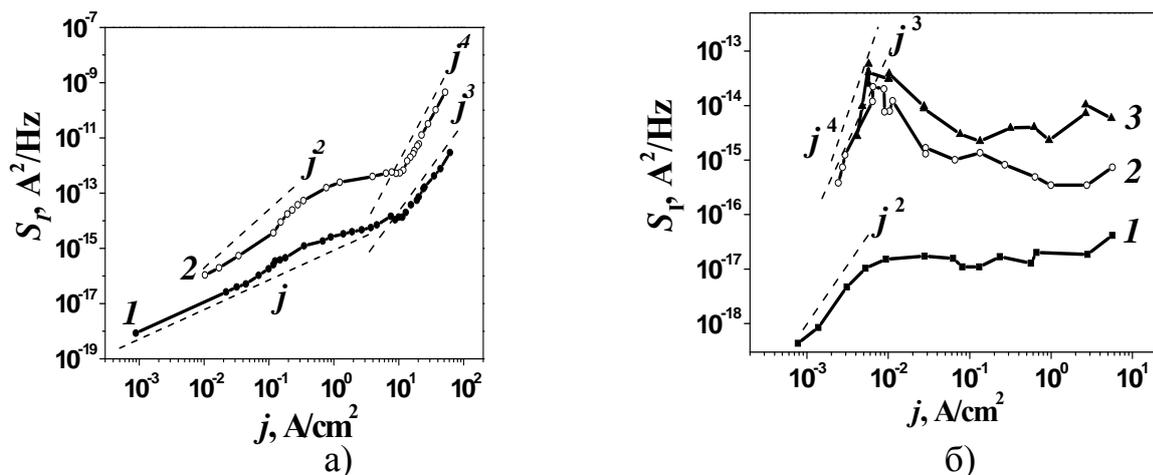


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности токового шума от плотности тока при разной степени деградации светодиодов в процессе старения.

тепловизоре [A10,A13]. Появление таких участков наблюдается уже при  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> (Рис. 4б, кривые 2 и 3) на светодиодах, испытавших электростатический пробой на стадии сборки [A8]. Локальные перегревы могут приводить к образованию неравновесных металлических фаз индия и галлия и их миграции по системе протяженных дефектов. Эти процессы наблюдались другими методами, в том числе методом инфракрасной спектроскопии [18] и просвечивающей микроскопии [19].

Был выявлен еще один механизм развития деградационного процесса, связанный изменением состава твердого раствора в локальных областях. Этот механизм характерен для светодиодов с резким, в 1.5-2 раза, снижением  $\eta$  при малых временах старения (10-100 часов). В спектрах электролюминесценции таких светодиодов при смещениях меньше 2.5 В появляется длинноволновая полоса, интенсивность которой растет по мере увеличения времени старения [A16], что может быть вызвано перераспределением индия между локальными неоднородностями состава твердого раствора. Такой процесс может сопровождаться не только снижением, но и небольшим увеличением  $\eta$  в том случае, если перераспределение индия приводит к более равному составу твердого раствора.

Выявленные закономерности развития деградационного процесса такие как неоднородное протекание инжекционного тока, эффект подавления безызлучательной рекомбинации, локальные перегревы, приводящие к миграции In и Ga, как в системе протяженных дефектов, так и между латеральными неоднородностями состава InGaN – причины неоднозначного развития деградационного процесса InGaN/GaN светодиодов, осложняющие прогнозирование срока службы и моделирование этого процесса [A10,A16].

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Обнаружен эффект подавления безызлучательной рекомбинации, проявляющийся начиная с плотностей инжекционного тока, соответствующих началу излучательной рекомбинации и усиливающийся по мере роста инжекционного тока
2. Показано, что неоднородное протекание инжекционного тока, эффект подавления безызлучательной рекомбинации, локальные перегревы, приводящие к миграции In и Ga, как в системе протяженных дефектов, так и между латеральными неоднородностями состава InGaN – причины

3. Выяснено, что быстрое развитие деградационного процесса в первые 10 – 100 часов характерное для небольшой части светодиодов связано с появлением длинноволновой полосы в спектрах электролюминесценции при плотностях тока  $\sim 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> при комнатной температуре. Причем интенсивность этой полосы растет с увеличением длительности процесса старения, что позволяет предполагать миграцию In в латеральных неоднородностях состава InGaN.
4. Показано, что резкое падение внешней квантовой эффективности может быть уменьшено с 50 % до 10 % ,относительно максимальных значений, при  $j < 50$  А/см<sup>2</sup> путем снижения уровня легирования n<sup>+</sup>-слоя до  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, кремниевого фона в p<sup>+</sup>-области ниже  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, и магниевого фона в активной области.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- A1. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт, Петров П.В., Черняков А.Е. Особенности рекомбинационных процессов в светодиодах на основе InGaN/GaN при больших плотностях тока. Письма в ЖТФ, **35(19)**, 97-102 (2009).
- A2. А.Л. Закгейм, Петров П.В., Черняков А.Е., Е.И. Шабунина. Тезисы конференции по физике и астрономии для молодых ученых (Санкт-Петербург, 29-30 октября 2010 г), с. 78.
- A3. Е.И. Шабунина, Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Петров П.В., Черняков А.Е. Н.М. Шмидт. Низкочастотный шум светодиодов на основе квантоворазмерных структур InGaN/GaN, Тезисы международного семинара по опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 27 октября 2008, с. 30.
- A4. Е.И. Шабунина. Низкочастотный шум светодиодов на основе квантоворазмерных структур InGaN/GaN. Тезисы 10-ой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 1-5 декабря 2008, с.112.
- A5. N.S. Averkiev, A.E.Chernyakov, M.E. Levinshtein, P.V. Petrov, E.V.Yakimov, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina. Two channels of non-radiative recombination in InGaN/GaN LEDs. Thesis of 25<sup>th</sup> international conference on defects in semiconductors ICDS-25, St-Petersburg, july 20-24, 2009.
- A6. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Петров П.В., Черняков А.Е., Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. Особенности безызлучательной рекомбинации в MQW InGaN/GaN. Тезисы докладов Всероссийская конференция по физике

полупроводников «Полупроводники 2009», г. Новосибирск, г. Томск, сентябрь 2009, с. 241.

A7. N.S. Averkiev, A.E.Chernyakov, M.E. Levinshtein, P.V. Petrov, E.V.Yakimov, N.M. Shmidt, E.I. Shabunina. Two channels of non-radiative recombination in InGaN/GaN LEDs. *Physica B*, **404**, 4896-4898 (2009).

A8. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Петров П.В., Черняков А.Е., Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. Низкочастотный шум в светодиодах, на основе InGaN/GaN. Материалы докладов международного семинара флуктуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах, г. Москва, 9-10 Ноября 2009.

A9. Е.И.Шабунина. Безызлучательная рекомбинация в светоизлучающих структурах на основе MQW InGaN/GaN. *Окно в микромир*, **11**, 33-38 (2010).

A10. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Е.И. Шабунина, Шмидт Н.М. Низкочастотный шум в подвергнутых деградации InGaN/GaN светодиодах. Тезисы докладов 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 26-28 мая 2011 г.) С. 27.

A11. Е.И. Баранов, Левинштейн, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт, Мультифрактальный анализ в диагностике полупроводниковых наногетероструктур. Тезисы 2-ой всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях», Москва, май 2009, с.440-441.

A12. А.А. Грешнов, А.Л.Закгейм, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. «Многообразие форм организации наноматериала - источник проблем в понимании физики приборов на основе нитридов». Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» Москва (2010) с.39-40.

A13. Н.С. Аверкиев, А.Л.Закгейм, М.Е. Левинштейн, Петров П.В., Черняков А.Е., Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. Тезисы 2-го российского симпозиума «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». (Санкт-Петербург, 10-12 ноября 2010 г), с. 75.

A14. Б.Я. Бер, А.А. Грешнов, 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)**, с. 329-336 (2011).

A15. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Е.И. Шабунина, Н.М. Шмидт. Низкочастотный шум в светоизлучающих структурах на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур. Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы». Москва, 2010 с.179-140.

A16. Н.С. Аверкиев, М.Е. Левинштейн, Е.И. Шабунина, Шмидт Н.М. Причины неоднозначного развития деградационного процесса в синих InGaN/GaN светодиодах. Тезисы докладов 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 26-28 мая 2011 г.) С. 109-110.

## Цитируемая литература

- [1] S. Bychikhin, D. Poganya, L.K.J. Vandamme, G. Meneghesso and E. Zanoni. *Journal of Appl. Phys* **97**, 123714 (2005).
- [2] M. S. Shur, A. Zukauskas. *Proc. of IEEE Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination*. (2005), v. 93, p. 1691-1702.
- [3] А.Э. Юнович, П.С. Копьев. *Тез. докл. международного форума по нанотехнологиям*. (Москва, Россия, 2008), т. 1, с. 119-120.
- [4] X. Ni, X. Li, J. Lee, S. Liu, V. Avrutin, Ü. Özgür, H. Morkoç and A. Matulionis. *J. Appl. Phys.*, **108**, 033112 (2010).
- [5] A.V. Ankudinov, A.I. Besyulkin, A.G. Kolmakov, W.V. Lundin, A.N. Titkov, A.S. Usikov, E.B. Yakimov, E.E. Zavarin, R.V. Zolotareva, N.M. Schmidt. *Physica B* **340-342**, 462-465 (2003).
- [6] G. Meneghesso, M. Meneghiniand, E.Zanoni. Recent results on the degradation of white LEDs for lighting *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 354007 (2010).
- [7] Z.L. Li, S. Tripathy, P.T. Lai. *J. of Appl. Phys*, **106**, 094507 (2009).
- [8] Н. В. Дьяконова, М. Е. Левинштейн, С. Л. Румянцев, ФТП, 12 (1991).
- [9] S.L. Romyantsev, M.S. Shur, M.E. Levinshtein, A.D. Dmitriev, D. Veksler, J. W. Palmour, M.K. Das, B.A. Hull. *J. of Appl. Phys.* **100**, 064505 (2006).
- [10] S. Sawyer, S.L. Romyantsev, M.S. Shur, N. Pala, Yu. Bilenko, J. P. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, and R. Gaska. *J. of Appl. Phys.* **100**, 034504 (2006).
- [11] Н. В. Дьяконова, М. Е. Левинштейн, S. Contreras, W. Кнар, В. Beaumont, P.Gibart. ФТП, **32(3)**, 285 – 289 (1998).
- [12] S. Sawyer, S.L. Romyantsev, M.S. Shur, N. Pala, Yu. Bilenko, J. P. Zhang, X. Hu, A. Lunev, J. Deng, and R. Gaska. *J. of Appl. Phys.* **97**, 123107 (2005).
- [13] S.L. Romyantsev, C. Wetzel, M.S. Shur. *Proc. of SPIE Vol. 6600 66000I-1* (2007).
- [14] А.В. Степанов: *Электрические шумы*. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва (2003).
- [15] В.И. Кривошеев: *Современные методы цифровой обработки сигналов (цифровой спектральный анализ)*. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород (2006).
- [16] T.G.M. Kleinpenning. *Physica* 98B, p.293, (1980)
- [17] Жигальский Г.П. Неравновесный  $1/f^\gamma$  – шум в проводящих пленках и контактах. УФН. **173** (5), 465 (2003).
- [18] А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Н. Мизеров, В.Г. Половинкин, И.В. Рожанский, А.Е. Черняков. ФТП, **41 (3)**, 390-396 (2010).
- [19] A.V. Kamanin, A.G. Kolmakov, P.S. Kopev, N.M. Schmidt, R.V. Zolotareva, A.S. Usikov. *Phys. stat. sol. (c)* **3(6)**, 2129-2132 (2006).