

официального оппонента на диссертацию 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.

### **Актуальность темы**

Деградация внешней квантовой эффективности источников излучения – явление определяющее срок службы и надежность функционирования приборов, т.е. фактически возможность их практического применения. Появление в конце XX века светодиодов и лазеров на основе  $A^3N$  соединений показало, что представлений о механизмах и природе деградационных процессов, развитых для источников излучения на основе традиционных  $A^3B^5$ , оказалось недостаточно. Более того, для источников на основе  $A^3N$  наноматериалов, как правило, не наблюдается генерации и мультипликации дислокаций, приводящих к полной деградации эффективности светодиодов на основе традиционных  $A^3B^5$ . В тоже время низкие сроки службы и катастрофические выходы из строя светодиодов и лазеров на основе  $A^3N$  наноматериалов не позволяют в полной мере реализовать огромные потенциальные возможности этих материалов. В последние годы на мощных синих InGaN/GaN светодиодах удалось получить сроки службы более 50000 часов, но только на отдельных фирмах производителях, и это сдерживает полный переход на твердотельное энергосберегающее освещение. При этом, эти достижения не внесли ясность в понимание природы катастрофических отказов, особенностей развития деградации эффективности, механизмов, ответственных за эти особенности, роли сложной внутренней структуры, типичной для  $A^3N$  наноматериалов. Таким образом, направление исследований, выбранное Черняковым А.Е., нацеленное на выяснение роли сложной внутренней структуры мощных синих InGaN/GaN светодиодов в развитии деградации внешней квантовой эффективности, является актуальным.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения и 4-х глав. Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу имеющихся наработок в области исследования деградиционных явлений в мощных синих светодиодах на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур, опубликованных к началу выполнения работы. Отмечено, что все предложенные механизмы могут приводить к деградациии внешней квантовой эффективности ( ВКЭ), однако не объясняют в полной мере природу катастрофических отказов и многообразии наблюдаемых особенностей развития этого процесса. При этом обзорные работы последних лет не вносят понимания в наблюдаемые явления. Автор обращает внимание на то, что в большинстве работ не учитывается сложный характер организации наноматериала, типичный для InGaN/GaN светоизлучающих структур. Исходя из этого, автором сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе кратко описаны объекты исследования - светодиодные квантоворазмерные InGaN/GaN структуры и светодиоды отечественных и зарубежных фирм, а также традиционные методы исследования электрических, оптических характеристик и параметров светодиодов.

В третьей главе представлен комплекс методов, позволяющий реализовать новый подход в изучении деградациии внешней квантовой эффективности, учитывающий сложный характер организации наноматериала, вызванный присутствием системы протяженных дефектов, пронизывающей активную область, и разно-размерных локальных областей с неоднородным составом твердого раствора. Один из разработанных методов позволяет контролировать количественно изменения свойств системы протяженных дефектов светодиодов от разных фирм производителей, а также на разных временных стадиях процесса старения. В основе метода лежит обнаруженная автором корреляция уровня токов утечки при смещениях менее 2В светодиодов, сформированных на светоизлучающих пластинах, классифицированных по степени упорядоченности наноматериала ( $\Delta_p$ ), со значениями этого мультифрактального параметра. При этом показано, что по мере ухудшения упорядоченности, т.е. роста значений  $\Delta_p$ , на порядки растут токи утечки светодиодов, а также проводимость квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов. Вторым методом, входящим в комплекс, разработанный на основе изучения тепловых свойств светодиодов с применением компьютерного моделирования тепловых полей и инфракрасной тепловизионной микроскопии, позволил контролировать локальные области перегрева, вызванные как дефектами сборки, неоптимальной геометрией контактов, плохой защитой периферии, так и свойствами наноматериала. На стадии разработки этого метода автором показано, что локальные области микронных размеров с максимальной температурой перегрева возникают при старении и связаны с локальными

каналами утечки , локализованными в системе протяженных дефектов, т.е. со свойствами наноматериала светодиодов.

В четвертой главе приведены результаты комплексных исследований, направленных на выяснение взаимосвязи особенностей деградации ВКЭ светодиодов с изменением свойств системы протяженных дефектов и разно-размерных неоднородностей состава твердого раствора по индию, а также механизмов ответственных за этот процесс. Показано, что процесс дефектообразования развивается в первую очередь в системе протяженных дефектов и в разно-размерных неоднородностях состава твердого раствора по индию. Приведенные в этой главе результаты изучения вольтамперных характеристик (ВАХ) светодиодов при смещении менее 2В на разных временных стадиях старения, опровергли сложившиеся представления о том, что эволюция ВАХ при  $U < 2В$  никак не связана с процессами, происходящими в светодиодах при рабочих токах. Напротив, во многих случаях это наиболее чувствительный индикатор процессов дефектообразования, позволяющий разделить процессы, развивающиеся в системе протяженных дефектов и в локальных областях твердого раствора, обогащенного индием. Совпадение прямой и обратной ветви ВАХ, построенных в одном квадранте ( $|V|$  и  $|I|$ ) при этих смещениях отражает присутствие квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов, а искажения только прямой ветви до, или в процессе старения отражают присутствие локальных областей с пониженным барьером. Исследование ВАХ и зависимостей внешней квантовой эффективности светодиодов от разных фирм производителей с разным характером организации наноматериала позволили сделать автору важные выводы о том, что снижение значений ВКЭ на 30%, относительно исходных вызвано ростом проводимости квазиомических шунтов. При этом изменение свойств квазиомических шунтов вызвано дефектообразованием по механизму Голда-Вайсберга в системе протяженных дефектов. Представленные в этой главе экспериментальные результаты подтвердили эффективность, развиваемого автором подхода, в изучении развития деградации ВКЭ светодиодов и выявили определяющую роль процессов происходящих, по терминологии автора, в двух каналах дефектообразования, в немонотонном развитии деградации и в катастрофических отказах светодиодов. Следует отметить, что описанные в работе методы могут служить основой для совершенствования технологий, применяемых во всём цикле производства светодиодов, в особенности, излучающих в наиболее коротковолновой части видимого диапазона и ближнем UV-диапазоне. и способствовать повышению срока службы этих светодиодов, который особенно мал для UV-светодиодов (2000 часов).

## Основные результаты и их новизна

- 1) Впервые выяснено, что снижение внешней квантовой эффективности светодиодов при старении на 30%, относительно исходных значений, вызвано ростом на порядки проводимости квазиомических шунтов, локализованных в системе протяженных дефектов.
- 2) Впервые показано, что рост проводимости квазиомических шунтов на финальной стадии старения светодиодов вызван дефектообразованием по механизму Голда-Вайсберга в системе протяженных дефектов и в локальных областях твердого раствора с существенно неравновесным составом по индию. При этом в дефектах упаковки и в V-дефектах развитие этого механизма облегчено, в силу обогащения этих дефектов слабосвязанными атомами галлия и индия.
- 3) Впервые показано, что перераспределение индия в локальных областях с существенно неравновесным составом твердого раствора, приводящее к модуляции проводимости активной области, и присутствие квазиомических шунтов ответственны за катастрофические отказы, реанимацию и немонотонное развитие деградации ВКЭ светодиодов.

### Научная и практическая значимость работы

Применённый в диссертационной работе подход к изучению деградации ВКЭ синих светодиодов, учитывающий фрактальную природу наноматериала излучающих структур вполне может быть спроецирован на структуры на основе  $A^3N$  наноматериалов, излучающие в других спектральных диапазонах, что может служить предпосылкой утверждения об универсальности описанного метода изучения ВКЭ. Для решения производственных задач контроля качества светодиодной продукции, данные методы особенно актуальны по причине возможности выявления наиболее ненадежных светодиодов без долговременных испытаний. Это позволит существенно расширить применение светодиодов и повысить срок службы светотехнических изделий. В силу вышесказанного результаты, полученные в диссертационной работе, представляют несомненный научный и практический интерес.

### Достоверность результатов и обоснованность выводов

Исследования светодиодов (не только отечественных, но и от ведущих фирм производителей) по различным комплексам характеристик, на разных временных стадиях процесса старения с привлечением разработанных и

современных методов диагностики, таких как атомно-силовая, просвечивающая электронная и ИК-микроскопии, а также взаимная согласованность большого количества экспериментальных данных и их сопоставление с данными других исследователей подтверждают достоверность и надежность полученных результатов и выводов. Сделанные выводы не противоречат представлениям современного материаловедения и физики полупроводников. Основные результаты работы опубликованы в реферируемых отечественных и зарубежных научных изданиях и прошли апробацию на Всероссийских и Международных научных конференциях.

### **Замечания по диссертационной работе**

- 1) Хорошо известно, что фирмы - производители используют различные материалы для омических контактов, по этой причине, излучательная способность структур и кристаллов может значительно различаться. Из приведенного в Главе 3 примера не ясно, как может быть получена высокая точность измерения распределения температуры по площади р-п перехода у излучающих кристаллов от разных фирм, в том числе, когда материал контактов неизвестен.
- 2) В работе показана эффективность контроля ВАХ при смещениях менее 2В для выявления ненадежных светодиодов. Выводы могли бы быть еще убедительнее и имели бы большую практическую ценность, если бы были приведены критерии по уровню токов, приемлемые для применения в массовом производстве.
- 3) В третьей главе представлено точное количество исследованных светоизлучающих пластин, однако, точное количество исследованных светодиодов не указано.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертации и не снижают общую положительную оценку работы в целом.

### **Об оформлении диссертации**

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, однако содержит опечатки и описки. Например, на стр.129 на Рис. 43а перепутано обозначение осей. В автореферате на стр. 14, в подписях к Рис.2. не внесены номера кривых, соответствующих данным «до» и «после» старения. Допущенные опечатки не препятствуют пониманию представленных результатов.

### **Оценка работы**

Диссертация Чернякова А.Е. является завершенным научным исследованием, выполненным автором на высоком экспериментальном и

научном уровне. Цели и задачи, поставленные в работе, полностью осуществлены. Автореферат и публикации полно и правильно отражают содержание диссертации, а также основные положения и выводы.

Таким образом, по объему, научно-практическому значению, новизне и достоверности полученных научных результатов, диссертационная работа Чернякова Антона Евгеньевича «Особенности развития деградации внешней квантовой эффективности мощных синих светодиодов на основе квантоворазмерных InGaN/GaN структур» полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным 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 присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Кандидат технических наук,  
руководитель лаборатории ООО «АРХИЛАЙТ»



Никифоров С.Г.

115114, г. Москва, Павелецкая наб., д. 2.

т. +7(495)773-11-57

E-mail: sgnikiforov@arhlight.ru

30 мая. 2014г.

Подпись Никифорова С.Г. удостоверяю:

Генеральный директор ООО «АРХИЛАЙТ»



Романов М.В.