

**Московский Государственный Университет  
имени М.В.Ломоносова  
Физический факультет**

---

На правах рукописи

**БАДГУТДИНОВ Мансур Лябибович**

**ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ  
РЕКОМБИНАЦИИ В p-n-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  
InGaN/AlGaIn/GaN С МНОЖЕСТВЕННЫМИ  
КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ И СВЕТОДИОДАХ  
НА ИХ ОСНОВЕ**

/ 01.04.10 – Физика полупроводников /

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**МОСКВА  
2007**

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников  
физического факультета  
Московского Государственного Университета им.М.В.Ломоносова

**Научный руководитель:**

профессор, доктор физико-математических наук  
**А.Э.Юнович**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
**А.Н.Ковалев**  
доктор технических наук  
**А.Е.Атаев**

**Ведущая организация:**

Санкт-Петербургский Государственный  
Электротехнический Университет "ЛЭТИ"

Защита состоится «11» октября 2007 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.70 в МГУ им.М.В.Ломоносова по адресу:  
119992, ГСП, г.Москва, Воробьевы горы, МГУ им.М.В.Ломоносова,  
криогенный корпус, ауд.2-05а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета  
МГУ им.М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» сентября 2007 года

Ученый секретарь  
Специализированного Совета Д 501.001.70  
в МГУ им. М.В.Ломоносова  
доктор физико-математических наук  
профессор

**Г.С.Плотников**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 1.1. Актуальность темы.

Исследования и разработки светодиодов на основе гетероструктур нитрида галлия и его твердых растворов ведутся в последние годы интенсивными темпами [1, 2]. Высокий интерес к светодиодам на основе GaN обусловлен, главным образом, перспективой их применения в качестве высокоэффективных, экологичных и долговечных источников освещения. В настоящее время синие светодиоды (СД) различных изготовителей достигли эффективности 63% [3], а светоотдача белых СД на их основе с люминофорным покрытием – 131 лм/Вт и 150 лм/Вт, что превосходит эффективность не только ламп накаливания, но и люминесцентных ламп.

Однако эти рекордные значения эффективности достигнуты на приборах с кристаллами малых размеров (для увеличения вывода света), при малых яркостях (для минимизации потерь) или с низким качеством цветопередачи (повышенное содержание желтого и зеленого излучения, к которому глаз наиболее чувствителен) [4]. Кроме того, неизбежны потери при преобразовании синего излучения в белое с использованием люминофора – к примеру, светоотдача 150 лм/Вт, полученная с использованием синего светодиода с эффективностью 63%, соответствует конечной эффективности примерно в 40%. При этом, эффективность светодиода определяется произведением его внутреннего  $\eta_i$  и внешнего  $\eta_e$  квантового выхода. Величина  $\eta_i$  имеет максимум в зависимости от тока. Ее падение при больших токах определяется инжекцией неосновных носителей за пределы активной области с квантовыми ямами, неоднородностью растекания тока вблизи контактов и увеличением температуры диода. Внешний квантовый выход излучения  $\eta_e$ , зависит от оптической конструкции – геометрии кристалла и контактов, показателя преломления и формы фокусирующей линзы. Сегодня нам недоступно светодиодное освещение, которое будет одновременно недорогим, высокоэффективным и с высокой цветопередачей; эти ограничения препятствуют широкому распространению светодиодного освещения.

Современные мировые проблемы разработок светодиодов заключаются в одновременном увеличении мощности излучения единичного прибора, увеличении внутреннего и внешнего квантового выхода светодиода, увеличении тока при котором эффективность диода достигает максимума, увеличении эффективности люминофора и уменьшении стоимости готового прибора.

Разработки эффективных светодиодов активно и на высоком уровне ведутся в российских промышленных организациях (ЗАО “Светлана–Оптоэлектроника”, НПЦ ОЭП “Оптэл”, ЗАО “Кавер Лайт” и др.). Так, материалы настоящей работы вошли в научно-технические отчеты по совместным договорам с фирмами ЗАО “Светлана–Оптоэлектроника” и “ACOL-Technologies”, в работы по гранту Московского Комитета по Науке и Технологям.

**Актуальность темы** обусловлена тем, что p-n-гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами являются основой для разработок эффективных полупроводниковых светодиодов. Исследование особенностей механизмов рекомбинации в этих структурах позволяет найти пути повышения эффективности и мощности излучения светодиодов, представляющих большой интерес для различных практических применений, в частности, для общего освещения.

## **1.2. Основные цели работы.**

Важнейшей целью исследований гетероструктур типа InGaN/AlGaN/GaN с квантовыми ямами является научное обоснование разработок эффективных светодиодов в видимой области спектра как основы освещения будущего. В рамках этой общей проблемы в настоящей работе была поставлена цель определить особенности излучательной рекомбинации в p-n- гетероструктурах InGaN/AlGaN/GaN, а также спектральные и электрические характеристики светодиодов на их основе, созданных в различных технологических условиях и имевших различные конструкции.

Для достижения этой цели были поставлены следующие конкретные задачи:

1. Усовершенствовать и наладить экспериментальные установки для изучения спектров и эффективности светодиодов в видимой и ближней УФ области спектра, разработать программное обеспечение для автоматизации измерений и теоретической обработки спектров.
2. Охарактеризовать физические параметры гетероструктур, выращенных в разных технологических условиях, исходя из результатов исследований люминесцентных и электрических свойств светодиодов синего свечения в широком диапазоне токов.
3. Разработать модель количественного описания формы спектров электролюминесценции СД на основе нитрида галлия; учесть особенности вывода излучения из структуры, проанализировать выбор параметров для этого описания. Провести анализ спектров исследованных светодиодов с помощью этой модели.

4. Определить спектральные характеристики и эффективность диодов белого свечения, созданных на основе синих светодиодов, с люминофорными покрытиями. Исследовать цветовые характеристики светодиодов и светодиодных модулей и дать рекомендации об их возможных применениях для источников общего освещения.

### **1.3. Научная новизна результатов, полученных в диссертации:**

Модель двумерной комбинированной плотности состояний с учетом флуктуаций потенциала дополнена учетом изменения температуры активной области с током и интерференционной модуляции излучения в плоской геометрии кристаллов. Это позволило количественно описать спектры электролюминесценции многослойных p-n-гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.

Установлено, что часть излучения (до 10% по интенсивности) синих светодиодов на основе p-n-гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами обусловлена рекомбинацией в широкозонных слоях структуры.

Показано, что полоса в спектрах электроотражения p-n-гетероструктур типа InGaN/AlGaN/GaN соответствует эффективной ширине запрещенной зоны в активной области InGaN/GaN, определенной из спектров электролюминесценции светодиодов.

Показано, что анализ интерференционной структуры в спектрах электролюминесценции и электроотражения светодиодов позволяет определять толщину разных слоев выращенных структур.

Показано, что максимум коэффициента полезного действия светодиодов изменяется в пределах от 12 до 28% и коррелирует с легированием донорами в буферной сверхрешетке структуры, модулированным легированием барьеров, составом барьерного слоя, ограничивающего инжекцию электронов в p-область.

### **1.4. Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Форма спектров электролюминесценции светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами описывается моделью излучательной рекомбинации в хвостах двумерной плотности состояний с учетом особенностей вывода излучения из структуры и температуры активной области.
2. Показано, что барьерный слой p-AlGaN в этих гетероструктурах существенно влияет на величину флуктуаций потенциала, определяющих длинноволновый спад спектров электролюминесценции светодиодов.

3. Исследования, проведенные в диссертации, показали, что вариации технологии изготовления светодиодных гетероструктур на основе GaN, выращенных на сапфировых подложках, (увеличение уровня легирования буферной сверхрешетки и модулированного легирования барьеров в активной области структуры, подбор толщины барьера p-AlGaN) позволяют достичь максимальной мощности излучения синих СД до 46 мВт при токе 100 мА, и максимального значения КПД – до 28% при токе  $J = 2$  мА.
4. Полоса в спектрах электроотражения p-n- гетероструктур типа InGaN/AlGaN/GaN вблизи 2.76 эВ соответствует эффективной ширине запрещенной зоны в активной области InGaN/GaN, определенной из спектров электролюминесценции светодиодов.
5. Спектры излучения синих СД на основе p-n- гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на подложках из SiC, существенно не отличаются от спектров СД на основе структур на подложках из сапфира. Показано, что КПД исследованных СД на подложках SiC достигает значений  $\eta_p = 16-22\%$  при токах 100-350 мА.
6. Координаты цветности белых светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на подложках из SiC и имеющих светоотдачу до 40 лм/Вт, а световой поток – до 50 лм при токе 350 мА., соответствуют области белого свечения с индексами цветопередачи, достаточными для их применений в освещении.
7. Коррелированную цветовую температуру модуля с белыми и желтым светодиодами можно изменять в пределах от 3340 до 9920 К путем изменения тока через желтый светодиод. Аналитическое моделирование спектров трехцветных светодиодных модулей позволяет достигнуть координат цветности в заданных точках на цветовых диаграммах.

### **1.5. Научная и практическая ценность.**

Модернизирован спектральный измерительный комплекс, позволяющий исследовать люминесцентные и электрические свойства светодиодов на основе нитрида галлия в широком динамическом диапазоне токов возбуждения (от  $10^{-7}$  до 2 А) и интенсивностей излучения (5 порядков) с высоким разрешением (до  $\approx 0.1 \text{ \AA}$ ). Экспериментальные установки совместно с разработанным программным обеспечением теоретической обработки спектров позволяют проводить комплексный анализ

люминесцентных и электрических свойств светодиодов. Установки были использованы и могут быть использованы в дальнейшем для контроля технологии создания светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.

Результаты исследований позволили выявить особенности излучательной рекомбинации в светодиодных гетероструктурах на основе GaN с множественными квантовыми ямами. Показано, что основная полоса в спектре излучения синих светодиодов определяется механизмом излучательной рекомбинации в двумерных структурах с хвостами плотности состояний, обусловленными флуктуациями потенциала, с учетом нагрева и особенностей вывода излучения из структуры.

Результаты исследований позволяют оценить влияние технологии изготовления светодиодных гетероструктур на основе GaN на люминесцентные свойства светодиодов в видимой и ближней УФ области спектра и позволили сформулировать рекомендации технологическим группам по изготовлению гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами и светодиодов на их основе.

Результаты исследований цветовых характеристик различных светодиодных модулей продемонстрировали их возможности для решения различных задач целей освещения и индикации и отображения информации.

Это определило практическую ценность работы.

Результаты диссертации были использованы в Научно-техническом отчете по договору N 170/05-К от 20.08.2005 с Московским Комитетом по Науке и Технологиям (МКНТ ГА-159/05), в котором даны рекомендации по применению белых светодиодов в освещении и разработке среднесрочной целевой Программы г. Москвы «Энергосберегающее освещение на базе светодиодных технологий».

Результаты диссертации были использованы в Научно-техническом отчете по договору N 104/05-К от 23.05.2005 с ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», в котором даны рекомендации по технологии выращивания p-n- гетероструктур для создания эффективных светодиодов синего и белого свечения.

**1.6. Достоверность результатов** обеспечена комплексным характером исследований спектров люминесценции, электрических и структурных свойств светодиодов, подтверждением результатов экспериментальных измерений теоретическими расчетами.

### **1.7. Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы доложены на 5 Российских и 4 Международных научных конференциях и обсуждались на семинарах кафедры физики полупроводников физического факультета МГУ:

1. 4-я и 5-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», г. С.-Петербург 2005, Москва 2007.
2. 7-я Российская Конференция по физике полупроводников, Звенигород, 2005г.
3. VII и VIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 2005, 2006.
4. VIII Международная конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2006.
5. Научно-техническая конференция «Молодые светотехники России». Москва, 2005.
6. 12 Междун. Конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика», Москва, МЭИ, 2006 г.
7. VI Международный Светотехнический Конгресс «Свет без границ». Калининград, Светлогорск, 2006.
8. MRS Fall Meeting 2006. Boston, 2006.
9. Тринадцатая Междун.науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: МЭИ, 2007.
10. Ломоносовские чтения, секция физики, Москва, 2007.

### **1.8. Структура и объем диссертации.**

Диссертация содержит 8 глав – введение, литературный обзор, теоретический обзор механизмов излучательной рекомбинации в квантовых ямах, методику экспериментов, описание экспериментальных результатов, обсуждение результатов, выводы, список литературы. Работа представлена на 110 страницах, включает в себя 51 рисунок и 7 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **2. Литературный обзор.**

Во второй главе рассматриваются гетероструктуры AlGa<sub>n</sub>/InGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> с квантовыми ямами и технологии их роста, методы легирования и активации примесей. Освещаются такие характеристики нитридных гетероструктур, как наличие в них пьезоэлектрической поляризации и квантово-размерного эффекта Штарка, а также их влияние на вид спектров излучения.



Часть обзора посвящена механизмам рекомбинации в гетероструктурах InGaN/AlGaIn/GaN, в частности, механизму рекомбинации в хвостах плотности состояний. Отмечается влияние на вид спектров особенностей вывода излучения из структуры, делается вывод, что спектры могут быть описаны в рамках довольно простой модели и отмечается необходимость теоретического анализа для выявления пределов применимости модели и ее возможностей для количественного описания спектров.

В следующей части литературного обзора приведены сведения о спектроскопии фото- и электроотражения гетероструктур и методики ее проведения. Рассмотрены принципы конструирования светодиодов и отмечается уникальная возможность исследований р-n- гетероструктур с квантовыми ямами методами модуляционной спектроскопии для структур, смонтированных р-областью к теплоотводу.

Далее проводится обзор литературных данных по белым светодиодам различных конструкций и их цветовым характеристикам. Обращается внимание на гибкие возможности, предоставляемые светодиодными источниками для целей освещения, индикации и обеспечения светового комфорта при индивидуальном освещении.

### 3. Модель двумерной комбинированной плотности состояний.

В третьей главе диссертации рассматривается модель двумерной комбинированной плотности состояний, на основе которой проводится анализ спектров излучения исследованных светодиодов и обсуждение полученных результатов. Двумерный характер структуры описывается функцией двумерной комбинированной плотности состояний  $N^{2D}(\hbar\omega, E_g^*, E_0)$ , в которой влияние различных флуктуаций потенциала в активной области было учитывается экспоненциальным спадом с параметром  $E_0$ , а эффективная ширина запрещенной зоны  $E_g^*$  предполагается зависящей от флуктуаций потенциала и от уровней размерного квантования в квантовых ямах:

$$N^{2D}(\hbar\omega, E_g^*, E_0) = \frac{N_0^{2D}}{1 + \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g^*}{E_0}\right)} \quad (1)$$

В условиях не слишком больших уровней возбуждения и малой концентрации носителей тока их распределение не вырождено, тогда произведение функции заполнения электронных состояний вблизи дна зоны проводимости  $f_c(E_c^*, F_n, kT)$  и дырочных состояний вблизи потолка валентной зоны  $[1 - f_v(E_v^*, F_p, kT)]$  можно записать в виде:

$$f_c[1-f_v] = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{(\hbar\omega - E_g^*) - \Delta F}{kT}\right)} \equiv f_F(E_g^*, \Delta F, kT) \quad (2)$$

где

$$\Delta F = -(E_g^* - eU) = (\Delta F_n + \Delta F_p) < 0. \quad (3)$$

Количественное описание спектров зависит и от функции интерференционной модуляции  $f_{if}$ :

$$I(\hbar\omega) = A_0 * N^{2D} (\hbar\omega, E_g^*, E_0) f_c(1-f_v) f_{if}, \quad (4)$$

где постоянный множитель  $A_0^*$  зависит от интенсивности и нормировки спектров.

Если амплитуда интерференционной модуляции существенна, величина  $\hbar\omega_{\max}$  и интенсивность в максимуме  $A_0$  должны зависеть от параметров функции интерференционной модуляции  $f_{if}$ . Поэтому максимум гладкой функции  $\hbar\omega_{\max}$  целесообразно искать из сравнения модельного и экспериментального спектров, вводя функцию  $f_{if}$  по формуле:

$$f_{if}(a, \Delta E, E_\phi) = \frac{1}{1 - a \cdot \cos\left(\frac{2\pi(\hbar\omega - E_\phi)}{\Delta E}\right)}; \quad (5)$$

где  $a$  – глубина модуляции,  $\Delta E$  – период интерференции,  $E_\phi$  – фаза модуляции (вблизи максимума  $\hbar\omega_{\max}$ ). Конечная формула для описания формы спектров, таким образом, имеет вид:

$$I(\hbar\omega) = A_0 N^{2D} f_F f_{if}. \quad (6)$$

#### 4. Методика эксперимента

В четвертой главе описана методика эксперимента и автоматизированные экспериментальные установки. Установка на базе монохроматора МДР-12 обеспечивала точность измерений до  $1 \text{ \AA}$ , что соответствовало точности определения энергии квантов  $0,3\text{--}0,4 \text{ мэВ}$  при измерениях в синей и зеленой областях спектра ( $450\text{--}550 \text{ нм}$ ). Температурные измерения проводились с использованием элемента Пельтье, который охлаждал или нагревал радиатор с закрепленным в нем СД. Температура корпуса СД регулируется за счет тока, протекающего через элемент Пельтье, и варьируется в интервале  $-10\text{--}+55^\circ\text{C}$ . Измерения вольтамперных характеристик и относительной

интегральной интенсивности излучения от тока проводились на автоматизированной установке с использованием кремниевого фотоэлемента и цифровых приборов с погрешностью не более 0.2%. Также приводится краткое описание методик, результаты которых были использованы в работе: исследование светодиодов в растровом электронном микроскопе и спектроскопия электроотражения светодиодных гетероструктур.

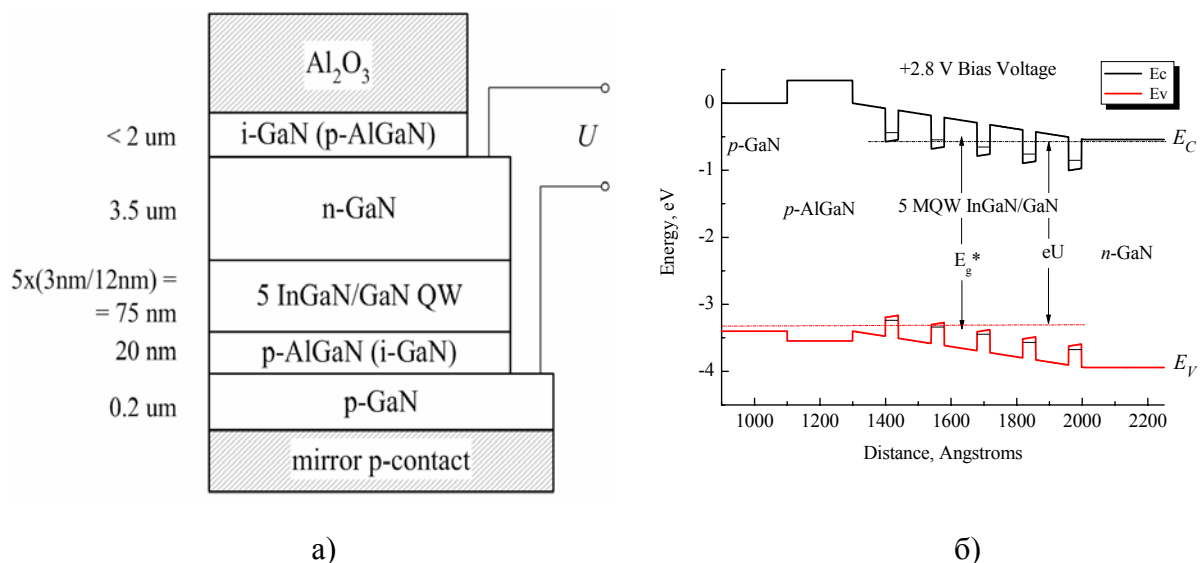
В работе исследованы и проанализированы характеристики около 100 образцов синих и белых СД на основе различных структур с разными конструкциями, разработанных в отечественных лабораториях («ACOL Technologies», НПЦ ОЭП «Оптэл», ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника»).

Светодиоды одной группы были созданы на импортных кристаллах на карбид кремниевых и кремниевых подложках (НПЦ ОЭП «Оптэл»), смонтированных прямым монтажом со стороны выращенной структуры и с выводом излучения через прозрачную подложку из SiC. Площадь кристалла составляла  $S = 0.8 \text{ мм}^2$  (площадь p-n- перехода), что позволяло пропускать большие токи (до 350 мА).

Светодиодные структуры на сапфировых подложках (ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника») были выращены методом металлоорганической эпитаксии на установке D-180 фирмы VEECO. В процессе выращивания варьировались легирование n-области, модулированное легирование барьеров в МКЯ донорами. На p- области создавалось металлическое зеркало; «чипы» площадью  $0,144 \text{ мм}^2$  были смонтированы методом «flip-chip» p-областью к теплоотводящему корпусу (рис. 1(а)). Свет выводился из кристалла через сапфировую подложку. Зеркало со стороны p- области обуславливает большее влияние интерференции, вызванное многократным отражением излучения от границ раздела GaN-сапфир и зеркала.

На рис. 1(б) показана энергетическая диаграмма, рассчитанная аналогично [5], но с качественным учетом влияния пьезоэлектрических полей в МКЯ. Диаграмма показана при прямом смещении в предположении, что в области МКЯ разность квазиуровней Ферми постоянна и равна падению потенциала на этой области:  $eU = F_n - F_p$ .

СД белого свечения получали смешением синего излучения кристалла с излучением желто-зеленого люминофора. Количество люминофора варьировалось, что позволяло изменять спектры и цветовые характеристики СД. Также приводится описание осветительных модулей с регулируемой цветовой температурой и полноцветных светодиодов, исследованных в работе.



**Рис. 1.** Схема расположения слоев р-п- гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN (а) и ее энергетическая диаграмма в прямом смещении (б).

## 5. Экспериментальные результаты.

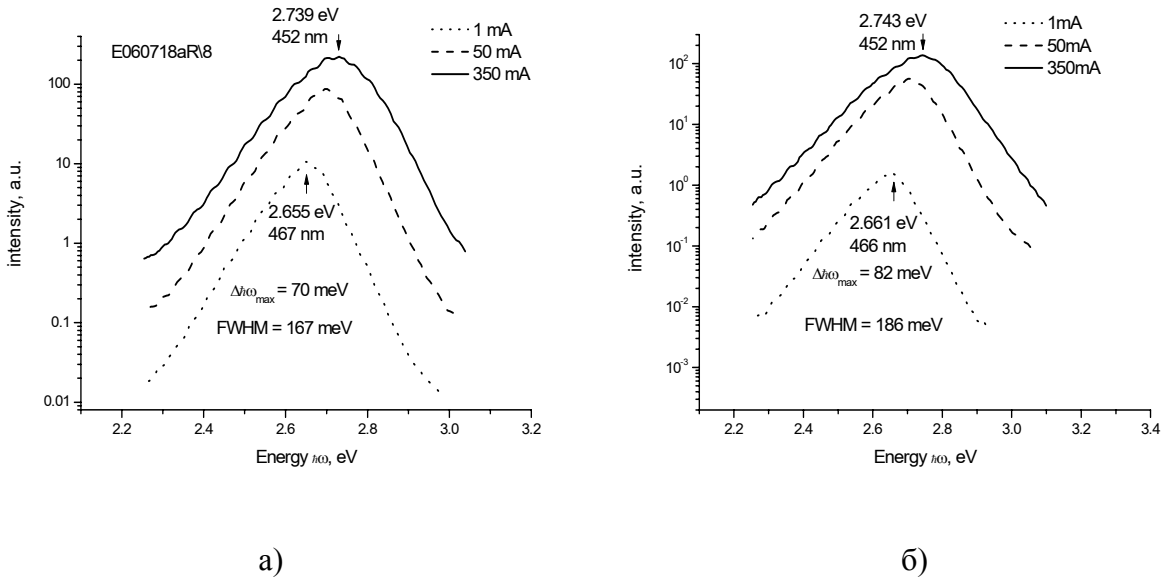
Описываются основные экспериментальные результаты работы. Исследовались спектры излучения, вольтамперные характеристики и эффективность синих и белых светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подложках; цветовые характеристики белых светодиодов.

Максимумы в спектрах излучения синих светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на SiC подложках, изменяются в пределах длин волн  $\lambda_{\max} \approx 455 \div 450$  нм ( $\hbar\omega_{\max} = 2.729 \div 2.755$  эВ) при изменении тока от 10 до 350 Из периода интерференционной модуляции спектров  $\Delta\lambda = (17 \pm 1)$  нм была оценена общая толщина слоя GaN и активной области структур  $d \cong 2.3$  мкм. Зависимость излучения и коэффициента полезного действия синего диода от тока имеет пологий максимум вблизи токов  $J = 300 \div 350$  мА (плотности токов  $j = 38 \div 44$  А/см<sup>2</sup>). При увеличении тока до 350 мА мощность излучения синих СД с полимерным корпусом достигала 200-270 мВт, что соответствовало КПД  $\eta_p \cong 21$ -28%.

Светоотдача (соответствующий световой поток) белых СД в зависимости от содержания люминофора изменялась от 26 до 40 лм/Вт (30–50 лм), а их коррелированная цветовая температура – от 4500 до 11600 К.

На рис. 2 представлены спектры излучения характерных образцов синих СД, на основе гетероструктур, выращенных на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подложках, из двух серий, которые

отличались тем, что гетероструктура образцов первой серии (а) в качестве барьера, ограничивающего инжекцию электронов в р- область, содержала слой i-GaN, а гетероструктура образцов второй серии (б) в качестве такого барьера содержала слой p-AlGaN.

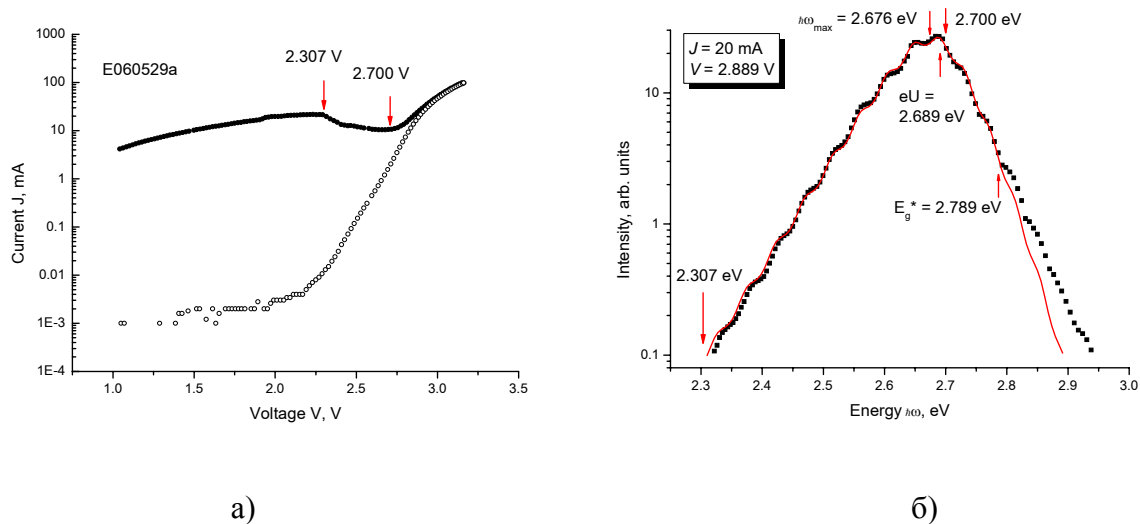


**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции синих светодиодов при изменении тока от 1 до 350 мА и комнатной температуре с барьерным слоем i-GaN (а) и p-AlGaN (б).

Характерным для спектров образцов всех серий является положение максимума интенсивности в синей области спектра:  $\hbar\omega_{\max} \approx 2,70\text{--}2,78$  эВ ( $\lambda_{\max} \approx 445\text{--}460$  нм) при токах 100–350 мА, а также сдвиг максимума в коротковолновую область с ростом тока. Толщина слоя GaN, определенная из периода интерференции, составила  $D = 5.3 \div 6.0$  мкм.

Существенное отличие среднего значения энергии флуктуаций потенциала для серии с барьером i-GaN (серия 1) и серии с барьером p-AlGaN (серия 7)  $E_0 = 56$  и 75 мэВ, соответственно, объясняется большим разрывом зон на гетерограницах AlGaN/InGaN и, следовательно, большими флуктуациями потенциала. Описывается и обсуждается влияние вариации технологии на вид спектров и их поведение с изменением тока.

На вольтамперных характеристиках некоторых образцов с высоким уровнем легирования слоев в n-области или в барьерах активной области МКЯ наблюдается туннельная компонента тока. На ВАХ образцов, не содержащих барьерного слоя p-AlGaN, в некоторых случаях наблюдался участок с отрицательным наклоном в области напряжений, приблизительно соответствующих началу инжекции (рис. 3).

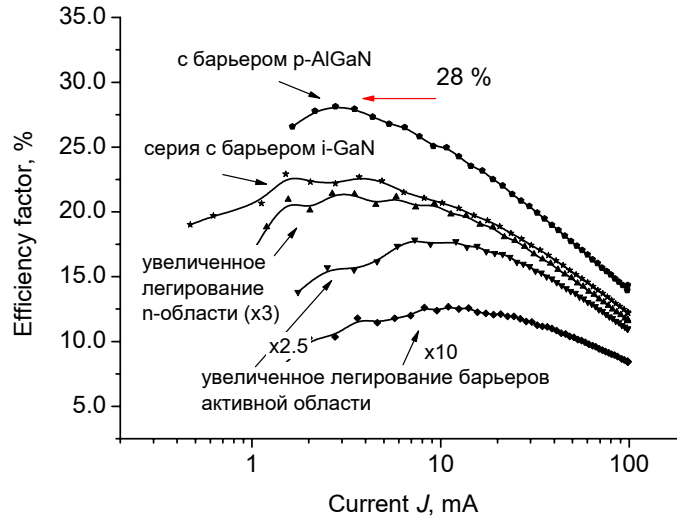


**Рис. 3.** Вольтамперная характеристика и спектр излучения СД серии с высоким уровнем легирования n-области (серия 7). Стрелками отмечены начало и конец участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением (а) (открытыми точками представлена ВАХ образца с низкой туннельной составляющей тока из той же серии). Эти же напряжения отмечены на спектре образца из той же серии с обозначением положения максимума, падения напряжения на активной области и эффективной ширины запрещенной зоны (б).

Наличие такого участка отрицательного дифференциального сопротивления связывается с появлением шунтирующих туннельных каналов, пронизывающих активную область тех образцов, которые отличаются малым квантовым выходом.

Зависимости КПД от тока наиболее эффективных образцов синих светодиодов из серий, различающихся уровнями легирования структуры с барьером i-GaN, а также в структурах с барьером p-AlGaIn, приведены на рис. 4.

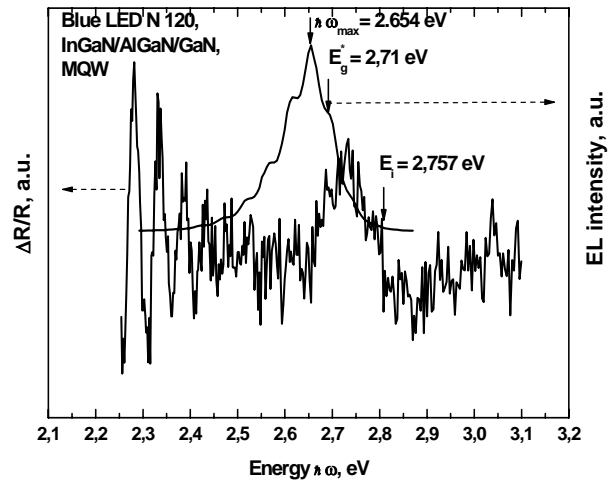
Зависимость эффективности излучения светодиода от тока имеет максимум в области токов  $J \approx 1\text{--}20$  мА и спадает при более высоких токах (примерно в 2,5 раза при токе 100 мА). Наибольшие значения максимума КПД достигаются при меньших значениях токов. Максимальная мощность излучения синих СД достигнута при использовании структур с барьерным слоем AlGaIn и составила 46 мВт при токе 100 мА. Максимальное значение КПД таких образцов достигает 28% при токе  $J = 2$  мА и 17% при токе 100 мА.



**Рис. 4.** Зависимости КПД от тока СД различных серий.

Эффективные ширины запрещенной зоны в области МКЯ InGaN/GaN, определенные из аппроксимации экспериментальных спектров электроотражения (рис. 5) формулой Аспнеса, соответствующей низкополевому случаю электроотражения [6], составили 2.74 – 2.86 эВ. На рис. 5 для сравнения приведены спектры электроотражения и электролюминесценции одного из СД. В области энергий, соответствующей коротковолновому спаду полосы электролюминесценции, наблюдается линия в спектре электроотражения.

Сравнение спектров электролюминесценции и электроотражения показали, что значения эффективной ширины запрещенной зоны в области множественных квантовых ям, полученные из спектров электроотражения ( $E_i$ ), больше аналогичных величин ( $E_g^*$ ), полученных из спектров электролюминесценции. Это связывается с различием условий измерений для указанных спектров: в открытом (электролюминесценция) и закрытом (электроотражение) р-п- переходе разное направление внешнего (модулирующего) электрического поля. Разные направления внешнего электрического поля приводят к разному изгибу зон в активной области р-п- перехода и, следовательно, к различным величинам эффективной ширины запрещенной зоны.



**Рис. 5.** Спектры электроотражения и электролюминесценции светодиода №120. Стрелками отмечены максимум и эффективная ширина запрещенной зоны  $E_g^*$  в спектре электролюминесценции и эффективная ширина запрещенной зоны  $E_i$ , определенная из аппроксимации спектра электроотражения формулой Аспнеса [6].

В завершающем разделе пятой главы приводятся результаты исследования полноцветных (RGB) СД и осветительных модулей на основе белых и желтых СД. Проводится аналитическое моделирование спектров полноцветных модулей, позволяющее определить токи, при которых их координаты цветности достигают заданных значений. Исследованы цветовые характеристики осветительного модуля, цветовая температура которого может изменяться от 3350 до 9900 К изменением тока через светодиоды белого и желтого свечения.

## 6. Обсуждение результатов

В шестой главе обсуждаются полученные результаты. Отмечается, что толщина слоя GaN с активной областью гетероструктур, выращенного на SiC подложках, (2.3 мкм), определенная из интерференционной модуляции спектров, заметно меньше толщин слоев в структурах, выращенных на сапфире (4.2–6.0 мкм). Это позволяет предположить, что в процессе эпитаксиального роста на SiC- подложках удастся вырастить слои, для которых концентрация дислокаций в активной области сравнительно мала, несмотря на малое расстояние области от границы с подложкой.



Цветовые характеристики и максимальные значения светового потока  $L \cong 46 - 50$  лм и светоотдачи  $\eta_L \cong 37-40$  лм/Вт удовлетворяют условиям для создания источников освещения. Важно, что подбором люминофора достигнуты нужные для тех или иных применений координаты цветности.

Соответствие формы спектральной полосы модели Аспнеса показывает, что наблюдаемый эффект электроотражения обусловлен эффектом Франца-Келдыша в двумерной структуре и дает возможность определения эффективной ширины запрещенной зоны  $E_g^*$  в активной области. Величина  $E_g^*$  увеличивается при увеличении среднего электрического поля р-п-перехода  $E$ , что объясняется сильным влиянием пьезоэлектрических эффектов в гетероструктурах типа InGaN/AlGaN/GaN. Электрическое поле в квантовых ямах InGaN, обусловленное спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией, направлено противоположно полю р-п- перехода. Пьезоэлектрические поля в ямах InGaN могут достигать значений  $E \cong 6 \cdot 10^5$  В/см и при увеличении обратного смещения поля в ямах должны уменьшаться; это может объяснить увеличение эффективной ширины запрещенной зоны, полученное в экспериментах по электроотражению.

## **7. Выводы**

В заключении диссертации сформулированы выводы:

- 7.1. Усовершенствованные и налаженные экспериментальные установки для изучения спектров и эффективности светодиодов в видимой и ближней УФ области спектра, разработанное программное обеспечение для автоматизации измерений и теоретической обработки спектров позволяют проводить комплексный анализ люминесцентных и электрических свойств диодов. Они были использованы и могут быть использованы в дальнейшем для контроля технологии создания светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.
- 7.2. Разработана модель количественного описания формы спектров электролюминесценции СД на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами, учитывающая особенности вывода излучения из структуры и температуру активной области. Проанализирован выбор параметров для этого описания и показана применимость такой модели к описанию спектров сложных гетероструктур.

- 7.3. Исследовано влияние вариаций технологии изготовления светодиодных гетероструктур на основе GaN, выращенных на сапфировых подложках на люминесцентные и электрические свойства светодиодов синего свечения. Показано, что наиболее благоприятно на эффективности СД сказывается увеличение уровня легирования n-области до  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а также подбор толщины барьера p-AlGaIn. Максимальная мощность излучения синих СД достигла значения 46 мВт при токе 100 мА, а максимальное значение КПД – до 28% при токе  $J = 2 \text{ мА}$ .
- 7.4. Спектры излучения синих СД на основе p-n- гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на подложках из SiC, существенно не отличаются от спектров СД на основе структур на подложках из сапфира. КПД исследованных СД достигает значений  $\eta_p = 16\text{-}22\%$  при токах 100-350 мА. Показано, что технология позволяет выращивать более тонкие слои GaN на подложках из карбида кремния по сравнению со структурами на подложках из сапфира.
- 7.5. Изучены спектры электроотражения p-n- гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN исследованных светодиодов. Показано соответствие полосы в спектрах электроотражения p-n- гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN эффективной ширине запрещенной зоны в активной области, определенной из спектров электролюминесценции светодиодов.
- 7.6. Исследованы свойства белых светодиодов, полученных покрытием исследованных синих добавлением люминофоров на основе алюмоиттриевых гранатов. Максимальная светоотдача белых светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на подложках из SiC, достигает 40 лм/Вт, а их световой поток – 50 лм при токе 350 мА. Показано, что белые светодиоды имеют координаты цветности в области белого свечения и индексы цветопередачи, достаточные для их применений в освещении.
- 7.7. Показано, что цветовая температура светодиодных модулей на основе светодиодов белого и желтого свечения может варьироваться в пределах от 3350 до 9900 К соответствующим изменением тока через них. Аналитическое моделирование спектров трехцветных светодиодных модулей позволяет получить координаты цветности в области белого цвета ( $x = 0,27\text{-}0,48$ ;  $y = 0,21\text{-}0,37$ ) на цветовых диаграммах МКО-1931.

## 8. Публикации

Основные результаты диссертации вошли в следующие печатные работы:

1. М.Л.Бадгутдинов, Е.В.Коробов, Ф.А.Лукьянов, А.Э.Юнович, Л.М.Коган, Н.А.Гальчина, И.Т.Рассохин Н.П.Сощин. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п- гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами. ФТП, 2006, том 40, вып. 6, с. 758-763.
2. М.Л.Бадгутдинов, Н.А.Гальчина, Л.М.Коган, И.Т.Рассохин Н.П.Сощин, А.Э.Юнович. Мощные светодиоды белого свечения для освещения. Светотехника, 2006, N3, с. 36-40.
3. Л.П.Авакянц, М.Л.Бадгутдинов, П.Ю.Боков, А.В.Червяков, С.С.Широков, А.Э.Юнович, А.А.Богданов, Е.Д.Васильева, Д.А.Николаев, А.В.Феопентов. Спектры электроотражения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN. ФТП, 2007, том 41, N 9, стр.1078–1084.
4. A.E.Yunovich, L.Avakyants, M.Badgutdinov, P.Bokov, A.Chervyakov, S.Shirokov, E.Vasileva, A.Feopentov, F.Snegov, D.Bauman, and B.Yavich. Electroreflectance Spectra of InGaN/AlGaIn/GaN p-n-Heterostructures. MRS Symp. Proc. V.955. Paper 0955-115-36.
5. Бадгутдинов М.Л., Гальчина Н.А., Коробов Е.В., Коган Л.М., Лукьянов Ф.А., Рассохин И.Т., Сощин Н.П., Юнович А.Э.. Спектры, цветовые характеристики и светоотдача белых светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами. 4-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», г. С.-Петербург, 2005, Тезисы докладов, с.140.
6. Бадгутдинов М.Л., Гальчина Н.А., Коробов Е.В., Коган Л.М., Лукьянов Ф.А., Рассохин И.Т., Сощин Н.П., А.Э.Юнович. Спектры и цветовые характеристики мощных светодиодов белого свечения на основе гетероструктур с квантовыми ямами InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами. 7-я Российская Конференция по физике полупроводников, Звенигород, 2005 г., тез. докладов, с.105.
7. М.Л.Бадгутдинов, С.С.Широков, Д.А.Николаев. Конструкция и физические характеристики светодиодов белого свечения на основе нитрида галлия. Тезисы докладов VII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике, Санкт-Петербург, 2005, стр. 98.
8. М.Л.Бадгутдинов, Л.П.Авакянц, П.Ю.Боков, А.В.Червяков, С.С.Широков, А.Э.Юнович, А.А.Богданов, Е.Д.Васильева, Д.А.Николаев, А.В.Феопентов. Спектры электроотражения гетероструктур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN. Труды

- VIII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы». Ульяновск, 2006. стр.172.
9. М.Л.Бадгутдинов, С.С.Широков, А.Э.Юнович, А.А.Богданов, Е.Д.Васильева, Д.А.Николаев, А.В.Феопентов. Спектры люминесценции и эффективность синих и белых светодиодов на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN. Труды VIII международной конференции «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы. Ульяновск, 2006. стр.200.
  10. М.Л.Бадгутдинов, Д.В.Милютин. Исследования трехцветных светодиодов. Тезисы докладов научно-технической конференции «Молодые светотехники России». Москва, 2005. С.23.
  11. М.Л.Бадгутдинов, Д.В.Милютин, А.Э.Юнович, Э.М.Гутцайт. Измерения полноцветных светодиодов. 12 Междун. Конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика», Москва, МЭИ, 2006 г., тез.докл.. том 1. с.209-210.
  12. М.Л.Бадгутдинов, Ф.А.Лукьянов, А.Э.Юнович, Э.М.Гутцайт, Л.М.Коган. Исследования цветовых параметров светодиодных модулей. VI Международный Светотехнический Конгресс «Свет без границ». Тезисы докладов, Калининград, Светлогорск, 2006, с. 50-51.
  13. A.E.Yunovich, L.P.Avakyants, M.L.Badgutdinov, P.Yu.Bokov, A.V.Chervyakov, S.S.Shirokov, E.D.Vasileva, A.V.Feopentov, F.M. Snegov, D.A.Bauman, and B.S.Yavich. Electoreflectance spectra of InGaN/AlGaIn/GaN p-n-heterostructures. MRS Fall Meeting 2006, Boston, 2006, Abstr. I 15.36.
  14. М.Л.Бадгутдинов, А.Э.Юнович. Анализ спектров излучения светодиодов и определение параметров р-п- гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN. Восьмая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПб. 2006; Тез. докл., с. 101.
  15. М.Л.Бадгутдинов, С.С.Широков, А.Э.Юнович, М.Г.Агапов, Д.В.Давыдов, Д.А.Лавринович, Ф.М.Снегов. Анализ спектров излучения и эффективность синих светодиодов на основе р-п-гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN. 5-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», Москва, 2007, Тезисы докладов, с.89.
  16. Л.П.Авакянц, М.Л.Бадгутдинов, П.Ю.Боков, А.В.Червяков, С.С.Широков, А.Э.Юнович. Электроотражение в р-п-гетероструктурах с квантовыми ямами на основе

InGaN/AlGaIn/GaN. 5-я Всероссийская Конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», Москва, 2007, Тезисы докладов, с.105.

17. Бадгутдинов М.Л., Корнева Т.М., Милютин Д.В., Пасекова Л.М. (рук-ли: Юнович А.Э., Гутцайт Э.М. Спектры светодиодов белого свечения с высокими индексами цветопередачи. Радиотехника, электроника и энергетика // Тринадцатая Междунар.науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл.- М.: МЭИ, 2007. Т.1. С.171,172.
18. М.Л.Бадгутдинов, А.Э.Юнович. Спектры люминесценции и эффективность синих светодиодов на основе p-n- гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN. Ломоносовские чтения, секция физики, Москва, 2007, Тезисы докладов, с.55.

### **Литература**

1. E.F.Schubert. Light Emitting Diodes. Second edition. – Cambridge University Press, 2006. ([www.LightEmittingDiodes.org](http://www.LightEmittingDiodes.org)).
2. А.Э.Юнович. Светодиоды как основа освещения будущего // Светотехника. – 2003. № 3. – С. 2-7.
3. Y.Narukawa, J.Narita, T.Sakamoto, K.Deguchi, T.Yamada and T.Mukai. Ultra-High Efficiency White Light Emitting Diodes // Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. V. 45, N 41. – P. L1084–L1086.
4. C.Wetzel. Basic research needs for solid-state lighting. Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Solid-State Lighting. – U.S. Department of Energy, 2006. ([http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SSL\\_rpt.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SSL_rpt.pdf)).
5. Yunovich A.E., Kudryashov V.E. Energy Diagram and Recombination Mechanisms in Heterostructures InGaN/AlGaIn/GaN with Quantum Wells // Phys. Stat. Solidi (b). – 2001. V. 228, N 1. P. 141-145.
6. D.E.Aspnes. Third-derivative modulation spectroscopy with low field electroreflectance // Surf. Science. – 1973. V. 37. – P. 418.