

ФЛИП-ЧИП СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaInN , ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКАХ SiC

*Е.М. Аракчеева**, *И.П. Смирнова*, *Л.К. Марков*, *Д.А. Закгейм*, *М.М. Кулагина*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, РАН, Россия, Санкт-Петербург,
194021 Политехническая ул., д.26.

тел. +7(812)2927369, *e-mail: kathy.quantum@mail.ioffe.ru;

Применение подложек SiC для создания высокоэффективных светодиодных кристаллов вполне обосновано по нескольким причинам. Одной из них считается высокая по сравнению с сапфиром теплопроводность материала, что обеспечивает эффективный отвод тепла из активной области кристалла при работе на высоких плотностях тока накачки. Другой является хорошее соответствие коэффициентов преломления материала подложки и структуры GaN . В результате свет практически свободно распространяется в подложку, не испытывая эффекта полного внутреннего отражения на границе подложка-гетероструктура. В случае применения сапфировых подложек, характеризующихся значительно меньшим коэффициентом преломления, этот фактор существенно ограничивает вывод света из кристалла.

Эффективным способом решения проблемы ограничения вывода света является создание поверхностей, рассеивающих свет. Наиболее перспективным методом создания таких поверхностей можно считать реактивное ионное травление. Нами уже была продемонстрирована возможность повышения квантового выхода светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN с помощью создания рассеивающего свет микрорельефа на поверхности слоя n-GaN , после удаления сапфировой подложки [1]. Настоящая работа посвящена исследованию способов увеличения квантового выхода светодиодных кристаллов, выращенных на SiC подложках за счет травления последних методом реактивного ионного травления.

В работе исследовались светодиодные структуры с 5-ю квантовыми ямами InGaN , выращенные на подложках SiC методом MOCVD. Реактивное ионное травление SiC обычно проводится в хлорсодержащих и фторсодержащих газах, например, в Cl_2 , SF_6 и CCl_2F_2 . Нами использовались смеси на основе $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$ и SF_6 . Проводилось исследование влияния режимов реактивного ионного травления обратной стороны подложки SiC в плазме на характер микрорельефа поверхности.

Использовались несколько режимов травления в смеси $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$: при мощности разряда 40 Вт и 60 Вт, а также различные соотношения газовых потоков Cl_2 и BCl_3 . Было обнаружено, что в хлорсодержащей плазме благодаря небольшой летучести продуктов травления SiCl_4 травление карбида кремния происходит только за счет бомбардировки ионами поверхности образца, т.н. «физическое» распыление материала, что приводит к низкой скорости травления SiC . Поэтому в дальнейших экспериментах была использована газовая смесь на основе SF_6 . В этом случае за счет химических реакций на поверхности образуется летучее соединение SiF_4 , что приводит к комбинации физического и химического механизмов травления материала. Скорость травления SiC возрастает как при увеличении мощности разряда, так и при увеличении процентного содержания газа SF_6 в смеси SF_6/Ar .

В работе исследовались 2 типа рельефов. Регулярный рельеф на лицевой поверхности SiC был создан с помощью реактивного ионного травления через фоторезистивный рисунок при мощности разряда 40 Вт. Он представлял собой периодическую решетку вытравленных цилиндров диаметром 1,5 мкм с периодом 4,5 мкм.

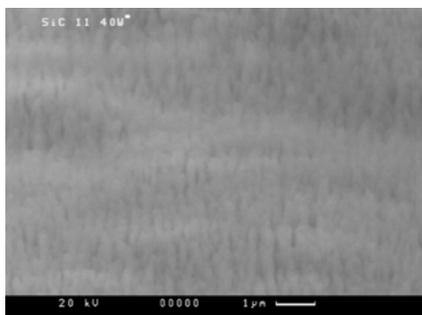
Для создания нерегулярного микрорельефа на обратную поверхность подложки SiC наносился сплошной тонкий фоторезист толщиной ~ 1 мкм, задубленный при температурах 90°C, 110°C и 150°C. Далее проводилось одновременное стравливание резиста и травление подложки в различных процессах. Варьировались мощность разряда, давление газового потока, а также время травления. Наблюдалось 2 типа наиболее характерного микрорельефа: так называемый “тонкий” (частые столбики шириной ~ 150 нм и высотой 400 нм) и пирамидки (основание ~ 800 нм, высота 1 мкм). “Тонкий” микрорельеф наблюдался при травлении резиста, задубленного при 110°C и 150°C, в режиме травления: мощность 40 Вт, давление 1 Па, поток SF_6 - 20 sccm и время процесса 20 минут. Пирамидки получались у образцов с резистом, задубленным при 110°C и 150°C, в режиме: мощность 25 Вт, давление 1 Па, поток SF_6 - 20 sccm и время травления 80 минут.

Рассеивающая способность образцов исследовалась на установке с гониометрической приставкой. Образцы подложек, обработанных различными способами, облучались гелий-неоновым лазером с лицевой стороны, предназначенной для выращивания структуры, и снимались угловые диаграммы рассеяния после прохождения света через подложку. Сравнивались образцы: необработанный, шлифованные порошками 28 и 40 микрон и травленный через тонкий резист.

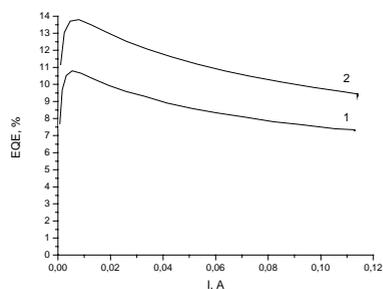
Рассеяние света на последнем образце оказалось наиболее эффективным. Образец с регулярным рельефом на поверхности при облучении гелий-неоновым лазером на отражении показывал дифракционную картину с четко выраженными максимумами.

Для оценки влияния микрорельефа, полученного на обратной стороне подложки SiC были изготовлены флип-чип светодиоды по стандартной технологии [2], затем на обратную сторону одного образца был нанесен тонкий фоторезист, задубленный при 150°C, и протравлен в следующем режиме: мощность 40 Вт, давление 1 Па, поток SF₆ - 20 sccm и время процесса 20 минут. На рис. 1а представлен снимок поверхности SiC, травленной в таком режиме. Как видно из рис.1б, внешняя эффективность светодиода с микрорельефом по сравнению с исходным образцом возрастает более чем на 25%.

Таким образом, предложенная методика получения рассеивающего свет микрорельефа на обратной стороне подложки SiC позволяет существенно увеличить внешнюю квантовую эффективность светодиодов.



(a)



(b)

Рис.1. (а) Характерный микрорельеф (“тонкий”) на обратной стороне подложки SiC; (б) Зависимость квантовой эффективности кристалла от тока накачки: 1-исходный кристалл; 2-реактивное ионное травление обратной стороны подложки SiC через тонкий резист в плазме SF₆.

[1] И.П.Смирнова, Л.К.Марков, Д.А.Закгейм, Е.М.Аракчеева, М.Р.Рымалис. ФТП **40**, 11, 1397 (2006)

[2] Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, С.А.Гуревич и др. ФТП **39**, 7, 885 (2005)

FLIP-CHIP AlGaInN-BASED LEDs GROWN ON SiC SUBSTRATES

*E.M. Arakcheeva**, *I.P. Smirnova*, *L.K. Markov*, *D.A. Zakheim*, *M.M. Kulagina*
Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St.Petersburg

*e-mail: kathy.quantum@mail.ioffe.ru

In this work, we study ways of an increase in the external quantum efficiency of flip-chip AlGaInN-based LEDs grown on SiC substrates using the reactive ion etching method. It is shown that the most effective SiC etching can be produced in SF₆ plasma. We demonstrate that a choice of resist treatment regimes and the reactive ion etching parameters, such as discharge power, SF₆ gas flow pressure and etching time, allowed us to obtain 2 different types of the submicron relief: “thin” relief and pyramidal relief. The LEDs chip with the submicron relief on the back surface of SiC substrate showed an increase in the external quantum efficiency more than 25%.

ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОГО ВЫХОДА СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ AlGaInN ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА В НЕРАЗОГРЕВАЮЩЕМ РЕЖИМЕ

А.Л. Архипов, С.Г. Никифоров*

ООО «Л.И.С.Т. – Лаборатория Исследований Световых Технологий». 125581, Москва, 1-ый Котляковский пр., д.4. тел. +7(495)7395864, e-mail: Sashamkt991@yandex.ru ; aarkhipov@list-lab.ru.

Теоретическая эффективность преобразования электрической энергии в световой поток для полупроводниковой структуры одна из самых высоких среди источников света. Основная задача производителя светодиодной гетероструктуры - увеличить квантовую эффективность за счет уменьшения процесса безызлучательной рекомбинации носителей заряда в активной области. Были проведены исследования зависимости квантового выхода от плотности тока (J) у зелёных и синих светодиодов на основе гетероструктур InGaN и у красных и жёлтых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP в импульсном режиме, исключающем нагрев активной области кристалла. Описываемое исследование было проведено в отношении большинства типов самых популярных конструкций излучающих кристаллов, квантовый выход которых при сходном спектральном распределении излучения должен быть одинаков, независимо от материалов подложки, на которой выращена или на которую перенесена гетероструктура. Различие в значениях квантового выхода может быть обусловлено лишь степенью неидеальности самой структуры, потому что тепловое воздействие тока не учитывается и, соответственно, конструкция кристалла не влияет на энергетические показатели излучения. Из чего можно сделать вывод, что результаты исследования зависимости квантового выхода AlGaInN и AlGaInP светодиодов от плотности тока в импульсном режиме питания могут служить качественным показателем исследуемых излучающих кристаллов.

Расчетные значения температуры p-n перехода в конце импульса ΔT_{j-a} и квантовый выход

Чипы		S p-n, 10 ⁴ cm ²	подложка	Акт.область: P-наверху, N-п-внизу	ΔT_{j-a} разница между температурой активной области кристаллов (T _j) и температурой окружающей среды (T _a), К		Отношение квантового выхода при 200 mA/cm ² и 20 mA/cm ²
Производитель	Цвет				1мкс (ток в импульсе, mA)	10мкс(ток в импульсе, mA)	
Cree C460MB290-E1000	Blue	5,8	SiC	UP	-	-	0,62
Cree C460XT290-O119-A	Blue	6,2	SiC	Flip	1(500mA)	-	0,65
Cree C-470XB900	Blue	62	SiC	Flip	0,15(1400mA)	1,5(1400mA)	0,71
Cree C-460EZR260	Blue	12	SiC	Flip	0,9(1000mA)	2,3(1000mA)	0,63
Shinghai	Blue	10,6	Al ₂ O ₃	UP	12,3(1000mA)	-	0,48
BridgeLux BKO2424C455-1	Blue	49	Al ₂ O ₃	UP	1,4(1400mA)	2,7(1400mA)	0,51
Epistar ES-CEBLV40A-M	Blue	51	Si	UP	1,2(1400mA)	2,3(1400mA)	0,68
Epistar ES-CEBH915	Blue	11,6	Si	UP	3,6(500mA)	-	0,6
Cree C527XT290-S0100-A	Green	6,2	SiC	Flip	1(500mA)	-	0,56
Cree C527MB290-E1000	Green	5,8	SiC	UP	-	-	0,48
Cree C-527XB900	Green	62	SiC	Flip	0,15(1400mA)	1,5(1400mA)	0,6
BridgeLux BKO2424C530-3	Green	49	Al ₂ O ₃	UP	1,8(1400mA)	3,2(1400mA)	0,63
Epistar ES-CEGH915	Green	11,6	Si	UP	3,6(500mA)	-	0,47
Epistar ES-CEGH912	Green	9	Si	UP	-	-	0,5
Epistar ES-SAHR840	Red	65	Si	UP	3,4(1000mA)	4,7(1000mA)	0,99
Epistar ES-SAYL840	Yellow	65	Si	UP	3,4(1000mA)	4,7(1000mA)	1,08

В таблице приведены расчетные значения температуры перегрева активной области в конце импульса длительностью 1 мкс и 10 мкс. Измерения проводились при T_a = 25°C в диапазоне плотностей тока J=10-250 A/cm². Также в таблице указаны значения квантового выхода относительно плотности тока J= 20 A/cm², что соответствует прямому току 160 mA через кристалл Cree C-470XB900 и 15 mA через кристалл C460MB290 - E1000, эффективности которых при таком режиме близки к максимальным. Представленные на рисунке 1 линии зависимости описываются степенной функцией. Видно, что у зелёных светодиодов имеет место большее уменьшение квантового выхода с увеличением J, чем у синих СД.

Отсутствие разогрева активной области увеличивает эффект коротковолнового сдвига спектра излучения, но это не приводит к пропорциональному увеличению оптической мощности из-за неравномерной концентрации индия в структуре. У светодиодов на основе гетероструктур, выращенных на подложках SiC (Cree) и на основе гетероструктур, выращенных на подложках Al₂O₃ (Epistar, Bridgelux) наблюдается вышеуказанная тенденция. При этом у гетероструктур на подложках Al₂O₃ уменьшение квантового выхода с увеличением J на 15-20% больше, чем у на подложках SiC.

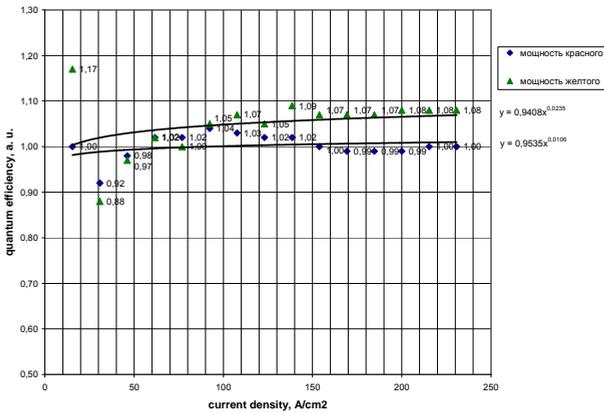
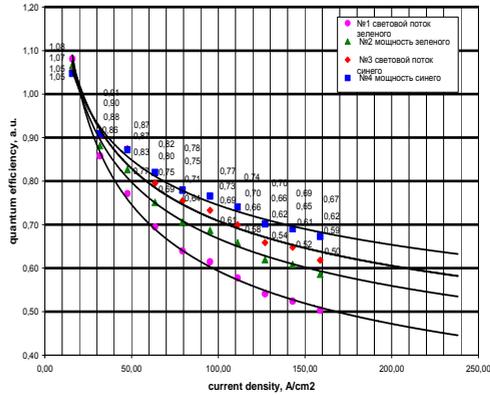


Рис. 1. Зависимости относительных значений квантовой эффективности от плотности тока для зелёных и синих, красных и желтых светодиодов.

У красных и жёлтых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInP изменение квантового выхода с увеличением J в диапазоне 10-250 A/cm² отсутствует (рис. 1). Представленные на рисунке 1 линии тренда, описываются степенной функцией. Видно, что у красных СД имеет место большее уменьшение квантового выхода с увеличением J , чем у желтых СД. У Желтых СД наблюдается слабое увеличение квантового выхода в диапазоне плотностей тока 10-250 A/cm². Данный факт говорит, что структура AlGaInP имеет запас по эффективности, уменьшение которой не было достигнуто в данном исследовании даже при плотности тока в импульсе 300 A/cm².

Полученные в ходе исследования значения квантового выхода показывают, насколько совершенна полупроводниковая гетероструктура, и какие максимальные значения эффективности достижимы. Насколько хороший теплоотвод и насколько можно повысить эффективность светодиода, посредством оптимизации тепловой модели прибора, понижая перегрев p-n перехода.

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF InGaN AND AlGaInP LEDs QUANTUM EFFICIENCY ON CURRENT DENSITY IN MODE EXCLUDING SUFFICIENT HEAT GENERATION

A.L. Arkhipov, S.G. Nikiforov*

LIST- Laboratory of Investigations of Light Technologies[®] Ltd. 125581, Moscow, 1-st Kotlyakovski p.,4. phone. +7(495)7395864, e-mail: Sashamkt991@yandex.ru ; aarkhipov@list-lab.ru.

Experimental measurements have been conducted in pulse mode at $\tau=1*10^{-6}$ s and $\tau=10*10^{-6}$ s. Investigations of radiation power (P) and luminous flux (L) dependencies on current density for green and blue LEDs on the basis of InGaN heterostructures, red and yellow LEDs on the basis of AlGaInP heterostructures have been conducted in pulse mode. Radiation power measurements are completed during pulse time τ . Heating of LED's active region was excluded.

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА ОАО «НИИПП»

А.П. Абрамовский, Н.Н. Бакин, А.А. Вилисов, Д.Д. Каримбаев, Т.И. Коханенко,
А.А. Пономарёв, П.Н. Тымчишин, Э.Ф. Яук*

ОАО «НИИПП», ул. Красноармейская, 99-а, 634034, г. Томск
тел. +7(3822) 488135, 488206, e-mail: vilisovaa@mail.ru;

В настоящее время полупроводники интенсивно занимают очередную нишу – светотехнику. В ОАО «НИИПП» с 1996г. ведутся разработки и осуществляется промышленное производство и поставки потребителям полупроводниковых ламп (преимущественно специального назначения) на основе низкоразмерных гетероэпитаксиальных структур InGaN и InGaAlN по следующим основным направлениям:

- индикаторная и сигнальная техника;
- навигационные лампы и заградительные огни;
- подсветка приборных шкал и малых архитектурных форм;
- локальное, аварийное и ориентирующее освещение и др.

Все разрабатываемые полупроводниковые источники света по параметрам соответствуют действующим в светотехнике стандартам. Конструктивно лампы разрабатываются в виде базовых интегральныхборок кристаллов на теплоотводящем основании, оформляемых затем в корпусе лампы, соответствующей запросам потребителей. Учитывая многообразие применений, базовые световые модули дополняются встроенным стабилизированным источником питания на напряжения: 2,6; 6,3; 12; 24; 28; 36; 54; 110; 220 В.

В процессе разработок и организации серийного производства полупроводниковых ламп неизбежно пришлось решать много принципиальных проблем, основные из которых:

- повышение эффективности светоотдачи модулей и ламп;
- выбор конструкционных материалов для обеспечения удовлетворительного теплоотвода от светоизлучающих кристаллов;
- оптимизация номенклатуры кристаллов по параметру «эффективность-цена»;
- разработка драйверов, обеспечивающих электропитание световых модулей в температурном диапазоне от минус 60°С до плюс 85°С;
- разработка всепогодных фотоавтоматов для навигационных и заградительных систем с режимом работы «поставил и забыл».

На предприятии сформированы производственные линии по всему технологическому циклу изготовления полупроводниковых ламп – от изготовления кристалла до квалификационных испытаний источников света.

За последние 10-12 лет поставлено потребителям более 70 тысяч полупроводниковых ламп для обустройства навигационных огней водных путей, более 5 тысяч фонарей и систем для светоограждения высотных сооружений. Эксплуатация ламп в течение длительного времени показала их высокую надёжность и экономичность.

Основная направленность разработок ОАО «НИИПП» в настоящее время – замена ламп накаливания типа СМ, МН, СМН, СГ и других с выходным световым потоком до 300 лм (в ближайшей перспективе до 1000 лм и более).

THE SEMICONDUCTORS LIGHTTECHNIQUE IN THE OSR “ RISD”

A.P. Abramovskiy, N.N. Bakin, A.A. Vilisov, D.D. Karimbaev, T.I. Kochanenko,
A.A. Ponomarev, P.N. Timchichin, E.F. Yauk*

OSR “ RISD”, 634034, st. Krasnoarmeyskay, 99-a, Tomsk,
t. +7(3822) 488135, 488206, e-mail: vilisovaa@mail.ru;

Developments and mass production of semiconductor-based lamps at OSR “ RISD” takes place since 1996. Parameters of lamps under production as well as problems of these devices will be discussed.

р-n ПЕРЕХОДЫ НА ОСНОВЕ InGaN КАК ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ

Птащенко А. А.¹, Птащенко Ф. А.², Блажнова О. А.^{*,1}

¹ Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова. Ул. Дворянская, 2, 65026, г. Одесса.

² Одесская национальная морская академия. Ул. Дидрихсона, 8, 65029, г. Одесса.

Исследовано влияние паров аммиака в окружающей атмосфере на стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) прямого и обратного токов в р-n переходах на основе InGaN. Измерения проводились на р-n структурах, оптимизированных для изготовления светоизлучающих диодов (СИД). Ширина запрещенной зоны тройного соединения в р-n структурах составляла 2,46 эВ (для зелено-голубых СИД), 2,64 эВ (для синих СИД) и 3,1 эВ (для фиолетовых СИД). Парциальное давление паров аммиака изменялось изменением концентрации NH₃ в его водном растворе, над которым находился р-n переход.

В области токов 10 нА – 1 мА ВАХ прямого тока р-n переходов, измеренные в сухом воздухе, соответствовали выражению

$$I(V) = I_0 \exp(qV/nkT), \quad (1)$$

где I_0 – постоянная; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура; $n \approx 2$ – коэффициент неидеальности.

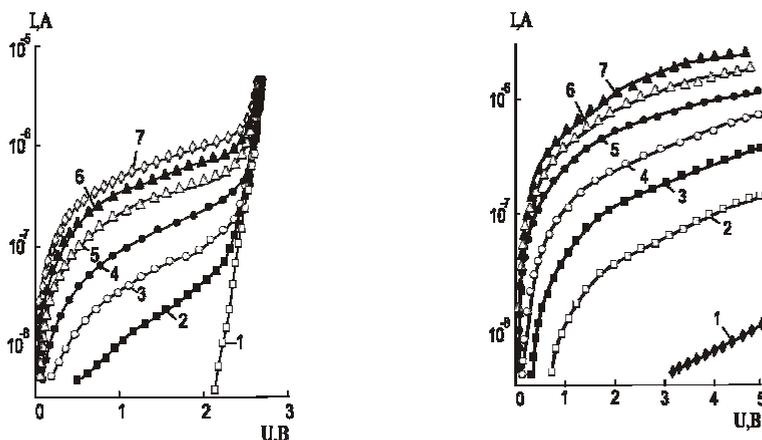


Рис. 1. ВАХ прямого (а) и обратного (б) токов р-n перехода, измеренные в воздухе (1) и в парах аммиака при давлении NH₃: 2–100Па, 3–200Па, 4–500Па, 5–1000Па, 6–2000Па, 7–4000Па

ВАХ такого вида соответствуют рекомбинации на глубоких уровнях. Адсорбция молекул NH₃ существенно повышала прямой ток при низких напряжениях смещения ($V < 2$ В), а также обратный ток. ВАХ дополнительного тока, обусловленного адсорбцией молекул NH₃, были линейны, что иллюстрирует рис. 2. Поэтому влияние паров аммиака на ВАХ р-n структур на основе InGaN можно объяснить формированием поверхностного проводящего канала, который закорачивает р-n переход, как схематически показано на рис. 3. Дополнительный ток линейно зависел от парциального давления паров аммиака.

При напряжениях $V > 2$ В дополнительный прямой ток уменьшался, что можно объяснить разрушением поверхностного канала инжектированными в этот канал электронами и дырками. Данный эффект наблюдался, когда концентрация носителей заряда, инжектированных в канал, превышала концентрацию электронов, обусловленную действием электрического поля адсорбированных ионов. При повышении ширины запрещенной зоны InGaN протяженность линейного участка ВАХ и напряжение, которое соответствует максимуму прямого дополнительного тока, возрастали, что совпадает с выводами модельных расчетов.

Дополнительный обратный ток, обусловленный адсорбцией молекул NH₃, монотонно увеличивался при повышении парциального давления паров аммиака в окружающей атмосфере.

Изменения прямого и обратного токов в p-n переходах на основе InGaN под действием паров NH₃ были обратимы, что свидетельствует о физическом (а не химическом) механизме адсорбции молекул аммиака, а также о возможности использовать данные структуры в качестве газовых сенсоров.

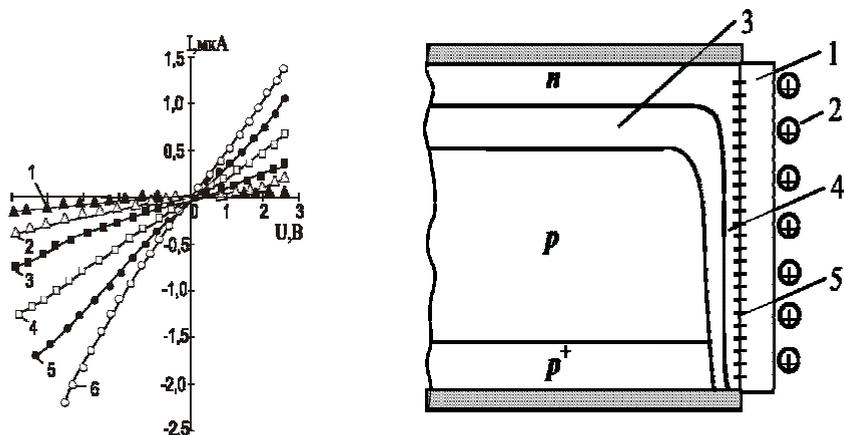


Рис.2. ВАХ дополнительного тока при различных значениях парциального давления паров аммиака: 1-100Па, 2-200Па, 3-500Па, 4- 1000Па, 5-2000Па, 6-4000Па

Рис.3. Схема p-n структуры, помещенной в пары аммиака: 1 – слой естественного оксида, 2 – положительные ионы аммиака, 3 – обедненный слой, 4 – поверхностный слой пространственного заряда, 5 – поверхностные состояния

Закономерности влияния паров аммиака на характеристики p-n переходов на основе InGaN подобны тем, что наблюдались на полупроводниках A³B⁵ с меньшей шириной запрещенной зоны. Преимущества p-n переходов на основе InGaN как сенсоров паров аммиака связаны с более высокой чувствительностью, низким фоновым током и большей протяженностью линейного участка ВАХ.

InGaN p-n JUNCTIONS AS GAS SENSORS

Ptashchenko A.A.¹, Ptashchenko F.A.², Blazhnova O.A.^{2,1}

¹ Odessa I.I. Mechnikov's National University, Dvoryanskaya St., 2, 65026, Odessa

² Odessa National Maritime Academy, Didrikhsona St., 8, 65029, Odessa

The influence of ammonia vapors in the ambient atmosphere on I-V characteristics of the forward and reverse currents in InGaN p-n junctions is studied. The characteristics of the additional surface current, due to NH₃ ions adsorption, are explained by the model taking into account formation of a surface conductive channel in the electric field of these ions. The advantages of InGaN p-n junctions as ammonia vapors sensors are a high sensitivity, low background current, and extended linear section of the I-V characteristic.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРООТРАЖЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР ТИПА GaN/AlGaN/InGaN

Л.П. Авакянц¹, М.В. Агапов², П.Ю. Бокков¹, А.В. Червяков¹, А.Э. Юнович¹, Б.С. Явич²

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Ленинские горы 1 стр. 2, 119992
тел. +7(495)939-23-88, e-mail: pavel_bokov@rambler.ru

² ЗАО «Светлана Оптоэлектроника», Санкт-Петербург, а/я. 78, 194156

Методы модуляционной спектроскопии широко применяются для исследования полупроводниковых гетероструктур на основе соединений GaN: для исследования электронно-дырочных переходов в квантовых ямах светодиодов [1], двумерного электронного газа в канале полевых транзисторов [2], интерференционных эффектов [3].

В работе [3] было показано, что спектр электроотражения гетероструктур с множественным квантовыми ямами на основе GaN/InGaN состоит из линии, связанной с электронно-дырочными переходами в активной области p-n- перехода, и модуляционной интерференционной картины. Однако, дальнейшие исследования показали, что наличие указанных особенностей в модуляционных спектрах сильно зависит как от технологии изготовления гетероструктуры светодиода, так и от строения этой гетероструктуры. В настоящей работе приводится сопоставление технологических особенностей изготовления гетероструктуры и ее спектров электроотражения.

Исследуемые образцы представляли собой светодиоды синего свечения. Кристаллы с np гетеропереходом на основе 5 квантовых ям InGaN выращивались методом MOCVD на сапфировой подложке и монтировались к теплоотводу методом «flip-chip». На подложке последовательно выращивались буферный слой i-GaN (толщина 500 нм), слой n-GaN (толщина 3.5 мкм), 5 квантовых ям InGaN/GaN (активная область), слой i-GaN (толщина 20 нм) или p-AlGaN (для предотвращения поперечного транспорта носителей, толщина 20 нм), слой p-GaN (толщина 110 нм). Со стороны p-области создавалось отражающее зеркало. Часть образцов, в которой не было слоя p-AlGaN, содержала в себе буферную сверхрешетку InGaN/GaN. Исследуемые светодиоды были изготовлены на ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», г. Санкт-Петербург.

Для регистрации спектров электроотражения к контактам np перехода подавалось переменное запирающее напряжение, кристалл (площадь 0.4 мм²) освещался через прозрачную подложку. Записывались спектры электроотражения при модуляции напряжения импульсами с разной амплитудой (0 – 9 В), разным постоянным смещением (+2 В ... – 7 В) и частотой (100 – 1000 Гц.).

Обнаружены следующие особенности спектров электроотражения.

1. При увеличении обратного смещения p-n- перехода наблюдается увеличение интенсивности и уменьшение ширины линии, связанной с электронно-дырочными переходами в активной области гетероструктуры. Наблюдаемый в спектрах электроотражения сигнал от активной области представляет собой суперпозицию сигналов от нескольких квантовых ям. Уменьшение ширины линии и увеличение ее интенсивности можно связывать с тем, что обратное смещение приводит к частичной компенсации встроенных пьезоэлектрических полей в квантовых ямах.
2. Большею интенсивностью и меньшей шириной обладают линии в спектрах электроотражения образцов со слоем p-AlGaN, блокирующим поперечный транспорт электронов.
3. Увеличение концентрации легирующей примеси в барьерах GaN буферной сверхрешетки приводит к увеличению амплитуды линии в спектрах электроотражения. Т.е. при определенных условиях легирование аналогично наличию в гетероструктуре слоя p-AlGaN, блокирующего поперечный транспорт электронов.
4. На возможность наблюдения линии электроотражения от активной области гетероструктуры с 5 квантовыми ямами существенное влияние оказывает положение квантовых ям в области встроенного электрического поля p-n- перехода. Если область квантовых ям попадает в область неоднородности электрического поля p-n- перехода, величины электрических полей в каждой квантовой яме (шириной 3 нм) различаются. Это приводит к сдвигам энергетических уровней электронов и дырок и размытию соответствующей линии в спектре электроотражения.
5. Максимальная интенсивность линий электроотражения, связанных с активной областью светодиода, наблюдается в том случае, когда активная область попадает в область пучности резонатора.
6. Наличие в спектрах электроотражения интерференционной картины обусловлено периодическим изменением коэффициента отражения от активной области гетероструктуры, связанное с модуляцией в ней встроенных электрических полей. Характерный период интерференционных полос свидетельствует о том, что интерференция происходит в области p-GaN, т.е. наблюдается интерференция волн, отраженных от слоя p-GaN и от активной области.

7. На возможность наблюдения интерференционных полос в спектрах электроотражения оказывает влияние положение квантовых ям относительно активной области гетероструктуры. Как и в случае с сигналом от активной области, амплитуда интерференционных полос уменьшается, если, по-видимому, электрическое поле в квантовых ямах различно.
8. Создание в структуре светодиодов диффузно-рассеивающих слоев приводит к подавлению как интерференционного сигнала, так и сигнала от активной области гетероструктуры.

По характеру изменений параметров линии электроотражения, связанной с активной областью гетероструктуры, а также, параметров интерференционных полос можно делать выводы об особенностях конструкции светодиодов.

[1] C. Wetzel, T. Taekuchi, H. Amano, I. Akasaki. J. Appl. Phys., **85**(7), 3786 (1999)

[2] A. Drabinska, K. Pakula, J.M. Baranowski, I. Frymark. Physica Status Solidi A, 202(7), 1308 (2005)

[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. ФТП, 41(9), 1078 (2007)

THE PECULIARITIES OF ELECTROREFLECTANCE SPECTRA OF GaN/InGaN/AlGaN HETEROSTRUCTURES

L.P. Avakyants¹, M.V. Agapov², P.Yu. Bokov¹, A.V. Chervyakov¹, A.E. Yunovich¹, B.S. Yavich²

¹ M. V. Lomonosov Moscow State University, physics department, Leninskie gory 1 building 2, Moscow, Russia, 119992,

phone. +7(495)9392388, e-mail: pavel_bokov@rambler.ru

² JSC «Svetlana Optoelektronika», postbox 78, Saint-Petersburg, Russia, 194156

The electroreflectance spectra of «flip-chip» mounted InGaN/GaN/AlGaN blue LEDs have been studied. The Aspnes-like line and the interference fringes have been observed in the electroreflectance spectra. The peculiarities of the electroreflectance spectra of blue LEDs connected with the different technological parameters have been discussed.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО И ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

К.А. Булашевич^{1,2}, М.С. Рамм², С.Ю. Карпов²*

¹ ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ул. Политехническая 26, 194021, С.-Петербург

² ООО «Софт-Импакт», а/я 83, пр.Энгельса 27, 194156, С.-Петербург
тел. +7(812)5544570, e-mail: kirill@softimpact.ru;

В лазерных гетероструктурах ближнего УФ диапазона на основе нитридов III группы обычно используется раздельное электронное и оптическое ограничение, при котором длина волны излучения определяется составом и толщиной InGaAlN квантовых ям, где преимущественно рекомбинируют электроны и дырки, а оптический волновод формируется в окружающих AlGaIn слоях различного состава. Из-за малой разницы показателя преломления у нитридов III группы, асимметрии лазерных структур, вытекающей из технологических трудностей выращивания толстых слоёв *p*-типа, и распада на фазы в объёмном InGaAlN достижение хорошего оптического ограничения является проблематичным. В данной работе этот вопрос исследован теоретически на примере гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн 360-380 нм. В частности показано, что изменение длины волны генерации в этом узком интервале существенно влияет на фактор оптического ограничения волноводных мод и утечку электронов в *p*-область лазерной структуры, что приводит к значительному изменению пороговой плотности тока. Рассмотрены возможные пути оптимизации лазерных гетероструктур.

С помощью моделирования детально изучены формирование волноводных мод ТЕ- и ТМ-поляризации с учётом двулучепреломления, присущего нитридам III группы, и механизмы инжекции неравновесных носителей, а также их влияние на пороговые характеристики лазерных структур, предложенных в [1]. Активная область таких структур состояла из пяти InGaIn квантовых ям, разделённых AlInGaIn барьерами и заключённых между двумя Al_{0.06}Ga_{0.94}N волноводными слоями толщиной 100 нм. Оптическое ограничение в гетероструктурах обеспечивалось за счёт короткопериодных сверхрешеток *n*- и *p*-типа со средней концентрацией алюминия ~12%, расположенных снаружи от волноводных слоёв. Все структуры выращивались на сапфировых подложках, а длина волны излучения варьировалась в пределах 363-380 нм за счет изменения содержания индия в активной области от нуля до 4%.

Распределение показателя преломления и интенсивности электромагнитного поля для некоторых типичных ТЕ-мод показано на Рис.1а. Видно, что практически каждая из мод заметно проникает в *n*-GaIn контактный слой толщиной 4 мкм. Это означает, что волноводное ограничение возникает не в волноводных слоях, а во всей гетероструктуре, ограниченной сапфировой подложкой с одной стороны и металлическим *p*-электродом с другой. Лишь для одной из мод высшего порядка предсказывается максимум интенсивности поля в активной области и, тем самым, максимальное оптическое усиление. Степень проникновения мод в GaIn контактный слой определяется согласованием фаз электромагнитного поля в волноводе и в контактном слое. В частности, фактор оптического ограничения моды с максимальным усилением может изменяться примерно в 2 раза только за счет варьирования толщины контактного слоя. Спектральная дисперсия показателя преломления также существенно влияет на фазовое согласование поля в волноводе и GaIn контактном слое, приводя к сильной зависимости фактора оптического ограничения от длины волны излучения (Рис.1б). Таким образом, в рассматриваемых структурах оптимизация волновода должна проводиться для конкретной длины волны излучения и обязательно с учетом дисперсии показателя преломления.

В рамках дрейфо-диффузионной модели проведен анализ инжекции и рекомбинации носителей в гетероструктуре. Показано, что эффективность инжекции носителей лимитируется утечкой электронов из активных слоёв в *p*-область и составляет ~10-25% в зависимости от концентрации индия в активной области (Рис.1в). Уменьшение эффективности инжекции в более мелких квантовых ямах является ещё одним важным фактором, определяющим зависимость порогового тока лазерных диодов от длины волны излучения.

На Рис.1г приведена зависимость пороговой плотности тока от длины волны. Согласно расчетам, максимальная эффективность инжекции достигается при длине волны излучения 370 нм. Резкий рост пороговой плотности тока при меньших длинах волн объясняется одновременным уменьшением эффективности инжекции и фактора оптического ограничения. Напротив, слабая зависимость порогового тока при больших длинах волн связана со взаимной компенсацией влияния роста эффективности инжекции и падения фактора оптического ограничения. Хорошее согласие

результатов расчетов и экспериментальных данных подтверждает вывод о том, что у нитридных лазеров ближнего УФ диапазона пороговая плотность тока определяется как уткой электронов, так и слабым оптическим ограничением в гетероструктуре. Характеристики лазерных диодов могут быть заметно улучшены за счёт оптимизации их волноводных свойств.

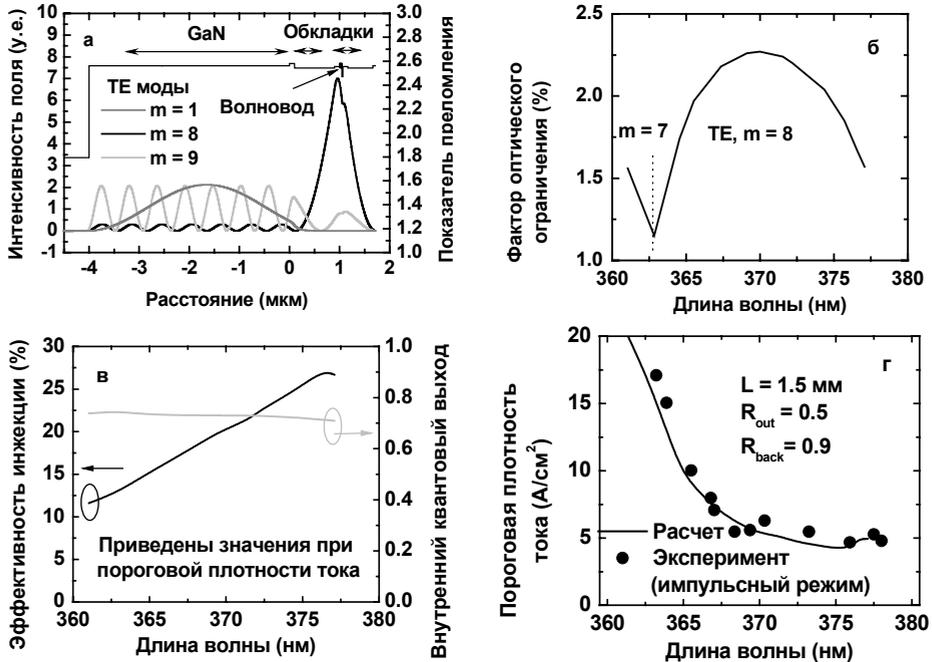


Рис.1. Распределение обыкновенного показателя преломления и интенсивности электромагнитного поля в лазерной структуре (а). Зависимость фактора оптического ограничения (б), эффективности инжекции носителей (в) и пороговой плотности тока (г) от длины волны излучения лазерных диодов. Линии – результаты расчёта, кружки – данные из работы [1].

[1] M. Kneissl, D. W. Treat, M. Teep, N. Miyashita, and N. M. Johnson, Appl. Phys. Lett. **82**, 2386 (2003).

EFFECT OF ELECTRON AND OPTICAL CONFINEMENT ON PERFORMANCE OF ULTRA-VIOLET LASER DIODES

K.A. Bulashevich^{1,2}, M.S. Ramm¹, and S.Yu. Karpov²*

¹ A.F.Ioffe Physico-Technical Institute RAS, 26 Politekhnikeskaja str., 194021, St.Petersburg
phone. +7(821)5544570, e-mail: kirill@softimpact.ru;

² Soft-Impact, Ltd., P.O.Box 83, 27 Engels ave., 194156, St.Petersburg

Using simulations accounting for birefringence of III-nitride materials, we investigated into the laser diodes (LDs) emitting light at 360-380 nm that was controlled by varying the InGaN composition in the multiple-quantum well active region. We have found out that both electron and optical confinement in the LD heterostructures are strongly dependent on the InGaN composition and affect remarkably the threshold current and differential quantum efficiency of the diodes. In particular, the electron leakage from the active region becomes considerable at a low InN content in the quantum wells. Spectral dispersion of the refractive indexes of In-free waveguide and cladding layers results in remarkable variations of the optical confinement factor with the emission wavelength and switching between different lateral waveguide modes. The above effects provide explanation of the observed three-fold increase in the threshold current density of the LDs with shorter wavelength. The theoretical predictions agree quantitatively well with available data.

ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОСАДКИ КРИСТАЛЛОВ СВЕТОДИОДОВ

Ю.А. Бумай¹, О.С. Васыков¹, Д.С. Доманевский¹, С.А. Манего², Ю.В. Трофимов²

¹Белорусский национальный технический университет, Проспект Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, Тел: +375 017 2921079, e-mail: bumai@tut.by;

²ГНУ Институт физики НАН Б, Логойский тракт, 22, 220090, г. Минск, Беларусь;

Помимо экономичности, важнейшим достоинством светонизлучающих диодов (СИД) является их долговечность. Основной причиной преждевременной деградации в большинстве случаев является перегрев кристалла, обусловленный несоблюдением теплового режима эксплуатации СИД при отсутствии необходимого контроля тепловых параметров. Для мощных (>1 Вт) СИД отвод тепла из чипов представляет сложную задачу и в значительной степени определяется качеством посадки кристалла на теплоотводящее основание.

В данной работе для определения качества контактного слоя используется метод анализа временной зависимости температуры перегрева активной области СИД на основе исследований переходных электрических процессов при разогреве собственным током (при подаче на СИД импульса тока в виде ступеньки). Данный метод позволяет получить структуру внутреннего теплового сопротивления [1]. Температура перегрева активной области СИД ΔT в каждый момент времени t (временное разрешение 2 мкс) рассчитывалась из изменения напряжения на СИД с использованием температурного коэффициента напряжения. На рис.1 показана зависимость $\Delta T(t)$ для одноваттного СИД фирмы Lumileds (1) и двух СИД, изготовленных с использованием кристаллов данной фирмы, припаянного (2) и приклеенного (3) к плате МСРСВ. Исходя из аналогии протекания тепловых и электрических процессов, динамика распространения тепла может быть проанализирована из зависимости $\Delta T(t)$ в рамках эквивалентной схемы в виде RC цепочек (модели Фостера и Кауера), где R является тепловым сопротивлением, а C – теплоемкостью элементов конструкции СИД и внешнего теплоотвода (рис.2). В рамках разработанного метода на основе зависимости $\Delta T(t)$ производится построение специальной функции $R^*(\tau^*)$ (спектра тепловых сопротивлений), экстремумы которой позволяют определить тепловое сопротивление отдельных элементов конструкции СИД R_i и соответствующие тепловые постоянные времени $\tau_i = R_i C_i$ [1].

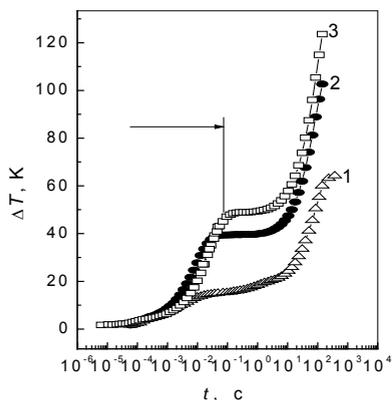


Рис.1. Временная зависимость температуры перегрева активной области одноваттного СИД Lumileds.

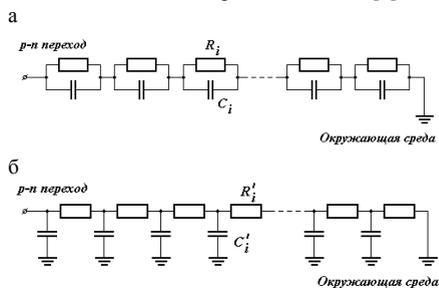


Рис. 2. Эквивалентная динамическая тепловая модель СИД. Модели Фостера (а), Кауера (б).

На рис.3 приведены соответствующие временные спектры тепловых сопротивлений $R^*(\tau^*)$ СИД Lumileds (1,2,3) и указаны участки спектра, соответствующие внутренним элементам структуры (для временного интервала, отмеченного на рис.1). Из рисунка видно влияние на тепловое сопротивление качества посадки кристалла. В то время как для фирменного СИД 1 внутреннее тепловое сопротивление составляет 15 К/Вт (контактный слой дает вклад ~ 7 К/Вт), для СИД 2 и 3 оно составляет соответственно ~ 40 К/Вт (вклад контактного слоя $\sim 25-30$ К/Вт).

На рис.4. представлены временные спектры тепловых сопротивлений $R^*(\tau^*)$ маломощных СИД, изготовленных с использованием кристаллов фирмы EPIGAP, соответствующие различным

способам соединения с корпусом (1,2 – припой Pb-Sn-Ag, 3- клей Ag). Из участков относящихся к внутреннему тепловому сопротивлению структуры (от чипа до корпуса включительно), которое принимает значение в интервале от 307 К/Вт для СИД 1 до 482 К/Вт для СИД 3, наибольший вклад вносит сопротивление контактного слоя (припоя или клея). Оно лежит в интервале от ~200 К/Вт для СИД 1 до ~400 К/Вт для СИД 3, в то время как сопротивление остальных частей различается незначительно и составляет ~100 К/Вт.

Для данных типов СИД измерены также тепловые сопротивления контактных слоев на основе припоя различной толщины (50-70 мкм). Показано, что тепловое сопротивление контактного слоя слабо зависит от его толщины и при экстраполяции ее к нулю сохраняет высокое значение. Это свидетельствует об определяющем вкладе в тепловое сопротивление данного слоя его интерфейсных границ.

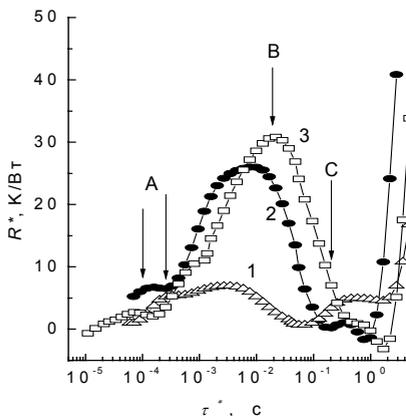


Рис.3. Временной спектр тепловых сопротивлений одноваттного СИД Lumileds (А - кристалл, В - контактный слой, С - основание).

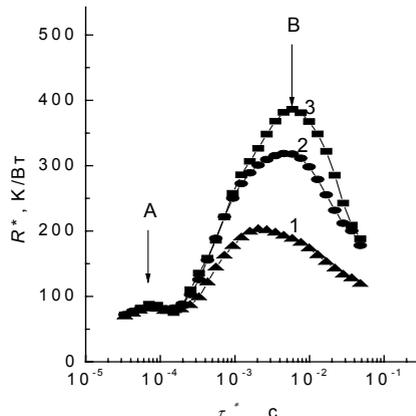


Рис.4. Временной спектр тепловых сопротивлений СИД фирмы EPIGAP (А - кристалл, В - контактный слой).

[1] Бумай Ю.А., Васьков О.С., Доманевский Д.С. Сб. стат. 6 Белорусско - Российского семи-нара "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе" (Минск, 4-8 июня 2007) с.108.

STRUCTURE OF INTERNAL THERMAL RESISTANCE OF InGaN/GaN LIGHT-EMITTING DIODES (ANALYSIS OF DIE ATTACH)

Y.A. Bumai^{1}, O.S. Vaskov¹, D.S. Domanevskii¹, S.A. Manego², U.V. Trophimov²,*

¹Belarussian National Technical University, Independence Ave., 65, 220013 Minsk, Belarus,

Tel: +375 017 2921079, e-mail: bumai@tut.by;

²SSO Institute of Physics NAS B, Logoickii tract, 22, 220090, Minsk, Belarus;

Using transient electrical and thermal processes under self heating by direct current the internal structure of thermal resistance of high and low power light-emitting InGaN/GaN diodes have been studied. The main role of die attachment in thermal resistance of LEDs was shown. The dominant contribution of interface boundaries of die attach layer to the thermal resistance has been established.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОДИОДОВ REBEL

*А.В. Данильчик**, *Е.В. Луценко*, *Н.В. Ржеуцкий*, *В.З. Зубелевич*, *В.Н. Павловский*,
Г.П. Яблонский

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск,
Беларусь, тел. +375172949025, e-mail: *a.danilchik@ifanbel.bas-net.by

Ведущие мировые производители полупроводниковых светоизлучающих диодов (СД), такие как Lumileds, Nichia, Cree и др. за последние несколько лет представили на рынке устройства с эффективностью излучения до 100 люмен на ватт. Для светодиодов со значительной электрической мощностью ~ 2-5 Вт представляет интерес исследование влияния на излучательную эффективность режима работы, времени, внутреннего разогрева и температуры окружающей среды.

В данной работе были исследованы фототоки, спектры электролюминесценции, вольт-амперные (ВАХ) и люкс-амперные характеристики мощных светодиодов Rebel LXML-PB01-0023 и LXML-PM01-0080 фирмы Lumileds (длины волн излучения ~ 465 нм и 530 нм соответственно), с квантовыми ямами InGaN/GaN в качестве активной области. Вольт-амперные характеристики измерялись до заявленного производителем номинального тока 700 мА. Фототоки и ВАХ исследовались при изменении внешней температуры от 295 до 393 К. Возбуждение фототока производилось излучением линии ксеноновой лампы, выделенной при помощи перестраиваемого монохроматора МДР-12.

На рисунке 1 представлены зависимости вольт-амперных характеристик и температуры подложки от длительности проводимых измерений синего светодиода LXML-PB01-0023. Шаг измерений оставался постоянным и составлял 0.05 В. Время, на которое стабилизировалось напряжение, изменялось с шагом 1, 3, 10, 30, 100, 300, 500, 1000 (время шага 50 мс задавалось минимальным временем измерения АЦП-ЦАП). Соответствующее полное время измерений варьировалось от нескольких секунд до почти часа. Значение тока регистрировалось непосредственно перед переходом к следующему значению напряжения. В результате измерений показано, что с увеличением времени работы происходит рост температуры подложки с 21 до 45°C. При этом существенные изменения формы ВАХ происходят при напряжениях более 3 В и соответствующей подаваемой электрической мощности более 300 мВт.

На рисунке 2 показаны спектры электролюминесценции (ЭЛ) для светодиода LXML-PM01-0080, измеренные при токах 20, 100, 350 и 700 мА в зависимости от температуры нагрева. Температура нагрева изменялась от 21 до 100°C. При увеличении тока происходит смещение положения максимума спектров ЭЛ в коротковолновую область. При этом с увеличением температуры интенсивность спектров падает и происходит их смещение в сторону меньших энергий, обусловленное температурным сужением запрещенной зоны.

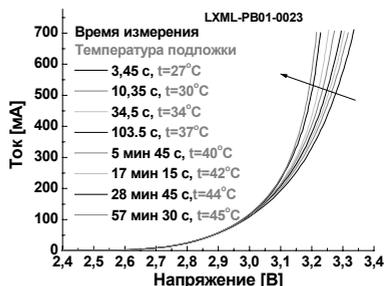


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики и температура подложки светодиода LXML-PB01-0023 в зависимости от времени измерений.

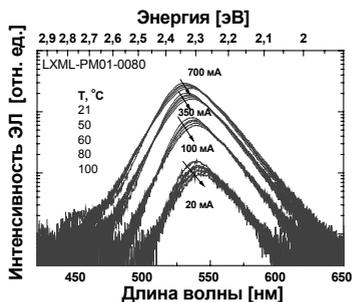


Рис. 2. Спектры ЭЛ для светодиода LXML-PM01-0080 в зависимости от температуры при значениях тока: 20, 100, 350 и 700 мА.

На основании результатов измерения оптической мощности СД и учета индикатрисы излучения получены зависимости к.п.д и внешней квантовой эффективности светодиодов в зависимости от температуры и времени работы. Измерения оптической мощности излучения светодиодов LXML-PB01-0023 и LXML-PM01-0080 происходили одновременно с измерениями вольт-амперных характеристик. У “синего” СД LXML-PB01-0023 внешняя квантовая эффективность достигала максимума при 3 В. Повышение тока до номинального значения (700 мА) приводило к уменьшению

эффективности на 16 %. При увеличении времени измерений от 3.45 с до 57 мин. 30 с произошло дальнейшее падение эффективности при токе 700 мА еще на 7 %. Теоретические оценки показали, что в исследуемом временном интервале процесс теплообмена светодиодного кристалла с подложкой можно считать стационарным и, следовательно, эффективность излучательной рекомбинации будет определяться температурой (кристалла) светодиодной подложки при заданном токе инжекции.

На рисунке 3 представлены внешняя квантовая эффективность, в относительных единицах в зависимости от напряжения при различных температурах нагрева “зеленого” светодиода LXML-PM01-0080 (быстрые измерения для минимизации дополнительного перегрева активной области). Из рисунка видно, что максимальная квантовая эффективность уменьшается на 30% с ростом температуры до 100°C, причем с нагревом происходит значительное уменьшение напряжения в максимуме эффективности СД. На рисунке 4 представлена внешняя квантовая эффективность в зависимости от падения напряжения на *p-n* переходе при увеличении температуры нагрева от 21 до 100°C. Напряжение на *p-n* переходе определялось исключением вклада последовательного сопротивления светодиода. Температурные зависимости напряжения на *p-n* переходе, при котором достигается максимум квантовой эффективности, и порога подвижности $E_g(T)$ совпадают с точностью до 3 кТ. Порог подвижности носителей $E_g(T)$ определялся по низкоэнергетическому краю спектров фототока СД [1] при температурах от 21 до 100°C. По-видимому, падение эффективности происходит при инжекции носителей, максимум распределения по энергиям которых удалён от края подвижности на величину меньшую 3кТ, т.е. когда заметная часть (более 5 %) инжектируемых носителей имеет энергию достаточную для преодоления порога подвижности и, соответственно, может быть захвачена безызлучательными центрами рекомбинации.

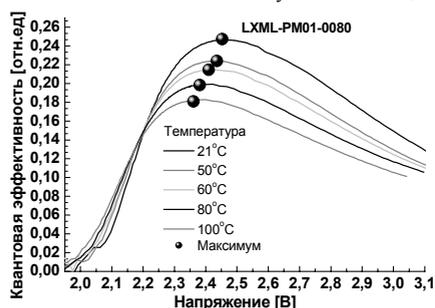


Рис. 3. Внешняя квантовая эффективность для светодиода LXML-PM01-0080 в зависимости от напряжения при различных температурах.

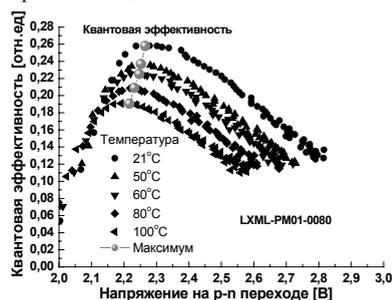


Рис. 4. Внешняя квантовая эффективность для светодиода LXML-PM01-0080 в зависимости от напряжения на *p-n* переходе при различных температурах.

[1] Н.И.Бочкарева, Д.В.Тархин, Ю.Т.Ребане, Р.И.Горбунов, Ю.С.Леликов, И.А.Мартынов, Ю.Г.Шрегер, ФТП, 41 (1), 88 (2007)

TEMPERATURE INFLUENCE ON REBEL LEDs EFFICIENCY

E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk*, M. V. Rzhetski, V. Z. Zubialevich, V. N. Pavlovskii, G. P. Yablonskii.
 Stepanov Institute of Physics of NASB, Independence Ave. 68, 220072 Minsk, Belarus
 phone.: +375 17 2949025, e-mail: a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by

Electroluminescence, optical power, bias voltage as functions of time and housing temperature of powerful light emitting diodes with the InGaN active region were investigated. The reductions of value and low-voltage shift of the efficiency maximum of light emitting diodes were demonstrated with both housing temperature increase and time. The values of InGaN effective band gap depending on temperature are determined using the efficiency maximum and current-voltage characteristic correlation. An influence of temperature change of the active region band gap on the quantum efficiency kinetics and on the temperature shift of the efficiency maximum is discussed.

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ InGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР, ВЫРАЩЕННЫХ НА НЕПОЛЯРНЫХ ПОДЛОЖКАХ LiAlO₂

Е. В. Луценко¹, А. В. Данильчик^{1}, Н. В. Ржеуцкий¹, В. Н. Павловский¹, Г. П. Яблонский¹, М Хойкен², Б. Шинеллер², И. Дикме², Х. Бембур², Х. Калиш³, Р. Х. Янсен³, Т. С. Вен³*

¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
Пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь, *a.danilchuk@ifanbel.bas-net.by

² АО АИКСТРОН, Аахен, ФРГ

³ Институт теоретической электротехники RWTH, Аахен, ФРГ

Одним из направлений развития нитридной оптоэлектроники является создание эффективных источников поляризованного излучения, которые перспективны для подсветки жидкокристаллических матриц современных мониторов и телевизоров. Степень поляризации излучения InGaN/GaN гетероструктур, выращенных на неполярных типах подложек, может достигать 58 % [1]. Перспективной подложкой неполярного типа для роста нитрида галлия является γ -LiAlO₂. Одним из преимуществ таких подложек является малое рассогласования постоянных решетки с GaN, составляющее 1,7 % и 0,3 % для направлений [11-20] и [0001] соответственно [2]. Поэтому исследование электролюминесцентных свойств гетероструктур, выращенных на подложках γ -LiAlO₂, представляет значительный интерес

Электролюминесцентные тестовые (ЭЛТ) InGaN/GaN гетероструктуры с множественными квантовыми ямами были выращены на неполярных подложках LiAlO₂ методом MOCVD. Они имели следующий дизайн: GaN:Mg⁺(5 nm)\GaN:Mg(150 nm)\GaN(14 nm)\5*\{InGaN:Mg\GaN (1 nm\14 nm)\}\GaN:Si(500 nm)\LT GaN(5 nm)\GaN:Si(200 nm)\AlIn(150 nm)\InGaN:Mg(25 nm)\LiAlO₂. Толщины слоев оценивались из параметров процесса роста. Для исследования электролюминесценции гетероструктур InGaN/GaN на р- и n- области были нанесены омические контакты. Были исследованы фотолюминесцентные, электролюминесцентные, вольтамперные, люкс-амперные характеристики, а также фототок при комнатной температуре. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась излучением HeCd лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм). При измерениях степени поляризации излучение электролюминесценции (ЭЛ) пропускалось через пленочный поляризатор. Возбуждение фототока производилось излучением Хе лампы, селективируемым монохроматором МДР-12.

На рисунке 1 представлены спектры ЭЛ в зависимости от тока инжекции. Спектры электролюминесценции исследуемых структур расположены в синей области спектра с максимумом около 470 нм ($h\nu = 2.638$ эВ). Максимум электролюминесценции смещается в коротковолновую область при увеличении тока от 5 до 90 мА на 10 нм, при этом полуширина спектра увеличивается на 4 нм, что согласуется с литературными данными [3].

Регистрация электролюминесценции производилась для 2-х различных поляризаций излучения. На рисунке 2 приведена зависимость от тока инжекции степени поляризации излучения InGaN/GaN ЭЛТ гетероструктур, выращенных на подложках LiAlO₂. Значение степени поляризации незначительно изменялось в зависимости от тока, и в среднем составило величину ~ 0.35 .

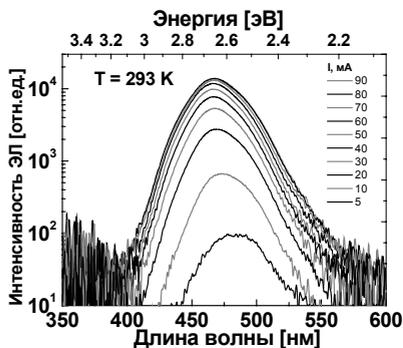


Рис. 1. Спектры ЭЛ InGaN/GaN гетероструктур с МКЯ, выращенных на подложках LiAlO₂

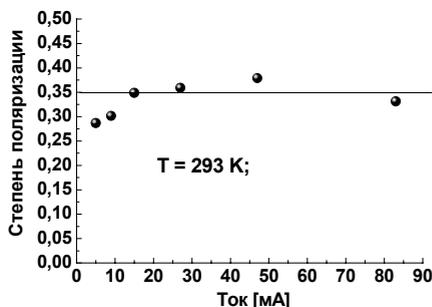


Рис. 2. Степень поляризации излучения InGaN/GaN/LiAlO₂ гетероструктур в зависимости от тока инжекции.

В результате измерений оптической мощности для тестовых структур были получены зависимости внешней квантовой эффективности (ВКЭ) в относительных единицах от тока инжекции. Из рисунка 3 видно, что максимум квантовой эффективности достигается при токе 60 мА. Как видно из рисунка 2, именно при максимальной эффективности рекомбинации наблюдается максимальная поляризация излучения. В литературе уменьшение эффективности с ростом тока у структур, выращенных на неполярных подложках, связывают с уменьшением эффективности излучательной рекомбинации и нагревом устройства [3].

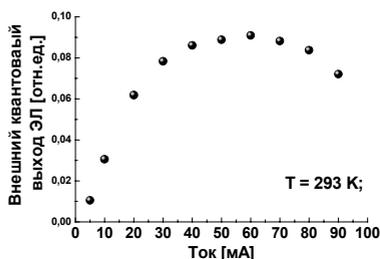


Рис. 3. Внешний квантовый выход ЭЛ в зависимости от тока инжекции InGaN/GaN/LiAlO₂ гетероструктур с МКЯ.

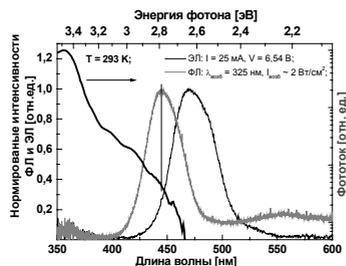


Рис. 4. Спектры ЭЛ, ФЛ и фототока InGaN/GaN гетероструктур с МКЯ, выращенных на подложках LiAlO₂.

На рисунке 4 представлены спектры фототока, ФЛ и ЭЛ исследуемых InGaN/GaN гетероструктур (спектр ЭЛ измерен при токе 25 мА). Спектр ФЛ получен при возбуждении излучением HeCd лазера с плотностью мощности ~ 2 Вт/см². Из спектра фототока видно, что InGaN имеет мягкий край поглощения, при этом значение ширины запрещенной зоны InGaN квантовых ям можно оценить как $E_g \sim 2.8$ эВ. Как видно из рисунка, положение спектра фотолюминесценции примерно соответствует положению ширины запрещенной зоны InGaN. Более длинноволновое положение спектров электролюминесценции по сравнению со спектром фотолюминесценции и E_g по-видимому обусловлено с одной стороны значительно меньшей плотностью возбуждения, что при мягком крае поглощения приводит к сильной зависимости положения полосы люминесценции от плотности мощности возбуждения, а с другой стороны, различной неоднородностью возбуждения при фото и электровозбуждении.

- [1] T. Koyama, T. Onuma, H. Masui, A. Chakraborty, B. A. Haskell, S. Keller, U. K. Mishra, J. S. Speck, S. Nakamura, S. P. DenBaars, Тез. докладов 5-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, МГУ, 31 Января – 2 Февраля 2007) с. 8.
 [2] Y. J. Sun, O. Brandt, U. Jahn, T. Y Liu, A. Trampert, S. Cronenberg, S. Dhar, K. H. Ploog. J. Appl. Phys. 92, 5714 (2002).
 [3] A. Chakraborty, B. A. Haskell, S. Keller, J. S. Speck, S. P. Denbaars, S. Nakamura and U. K. Mishra Jpn. J. Appl. Phys. 44, 173 (2005).

ELECTROLUMINESCENCE OF InGaN/GaN HETEROSTRUCTURES GROWN ON NONPOLAR LiAlO₂ SUBSTRATES

E. V. Lutsenko¹, A. V. Danilchik^{1}, M. V. Rzheutski¹, V. N. Pavlovskii¹, G. P. Yablonskii¹, M. Heuken², B. Schineller², Y. Dikme², H. Behmenburg², H. Kalisch³, R. A. Jansen³, T. C. Wen³*

¹ Stepanov Institute of Physics of NASB, Independence Ave. 68, 220072 Minsk, Belarus
 phone +375 17 2949025. e-mail: a.danilchik@ifanbel.bas-net.by
² AIXTRON AG · Kackertstrasse 15-17, 52072 Aachen Germany
³ RWTH Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen Germany

We have demonstrated blue electroluminescence of test structure (ELT) grown on γ -LiAlO₂ by metal organic chemical vapor deposition method. An electroluminescence emission was observed with peak position at ~ 470 nm. Maximal external quantum efficiency was obtained at 60 mA at DC excitation. Polarization degree of the electroluminescence reached ~ 35 %. From the soft edge of photocurrent, band gap value was estimated to be about 2.8 eV which correlates with photoluminescence peak position.

QUANTUM EFFICIENCY STUDY FOR HIGH POWER NITRIDE LED

D. Lee, D. Byrne, F. Lu and W. Quinn

VEECO TurboDisc Operations, 394 Elizabeth Avenue, Somerset NJ, USA, e-mail: dlee@veeco.com

Nitride LED performance has been improved greatly in recent years and the application of LEDs can be extended further. The LED application expansion depends on efficiency, reliability and overall cost, especially for the areas requiring high brightness LEDs such as television displays and general lighting. Most high power LEDs have relatively good quantum efficiencies at low current operations, but not in high current operations. This is well known as “LED efficacy droop.”

Better efficiency in high current operation requires special structures and high quality active layers using a proper growth mode. We have studied quantum efficiencies in high power LEDs. Our study reveals a way to examine the possible structures and the nitride material quality for the high power operation of LEDs. We have investigated different structures and growth conditions in active layers using temperature dependent PL and EL for internal quantum efficiency (IQE) and external quantum efficiency (EQE). We have also investigated the PL efficiency (PLE). The comparison of IQE, EQE, and PLE with brightness indicates the importance of quantum efficiencies at high carrier density. The result at above room temperature (320K) ensures the efficiency of high current operation, and the low temperature data allows us to check the nature of excitonic transitions. Our recent study of junction placement indicates the importance of abrupt interfaces.

LED samples have different active layers, but identical p-side and n-side layers and all samples have blue emission around 460 nm. Sample SQW has a single QW only, MQW has 4 QWs with a growth temperature change in well and barrier, and X2542 and X2549 have additional InGaN/GaN SL.

Samples have been measured for PLE, IQE, EQE, and brightness at different temperatures (10k to 320k). The PLE experiment uses variable pump power density at room temperature that is applicable to a production test to screen samples. IQE evaluation comes from temperature dependent PL measurements. EQEs have been interpreted by the slope of electroluminescence (EL) intensity from low current (20mA) to high current (100mA) at different temperatures (10k to 320k). Samples have been fabricated and checked for their brightness. MQW with SL structure have shown relatively high brightness for high power operation. However, SQW LEDs have very high efficiency in high current operation.

We have compared the same structured samples with different growth parameters to have the optimum conditions. X2542 with normal active layer growth has the highest IQE (~35%) with reasonable PLE and EQE with linear temperature dependence. X2549 was grown with a slow growth rate and has the lowest IQE (~20%), but the highest PLE and EQE values. Figure 1 shows the importance of growth rate in the active layers. The slower growth rate of QWs results in a “S” shape of peak lambda profile in temperature dependent EL, which represents excitonic nature (localized states). This transition results in various shift of the peak wavelength with temperature, but very stable for different current operation. X2549 has higher EQE at most temperatures compared to X2542 which has a higher EQE only at the lowest temperatures. Figure 2 shows PLE for these LEDs. The SL MQW LED with slower growth rate shows higher efficiency like QE based on EL. All PL for PLE measurements use tunable femto-second pulse laser (around 400nm), which ensure to excite only active QWs with sufficient carrier density, similar to the high current operation of high power LEDs.

We have compared LEDs with different structures and growth conditions using temperature dependent quantum efficiency measurements in order to check the capability of high current operation. SL MQW LEDs have been used to show the importance of growth rate and the variety of quantum efficiency measurements. The simple IQE measurements by temperature dependent PL usually gives so many variables, and IQE by EL also has limit of low current operation. However, PLE measurement with short pulse laser excite active layer only with sufficient carrier density without the dependency of p-n junction. This would be used as a handy development tool and as a simple non-destructive test at room temperature.

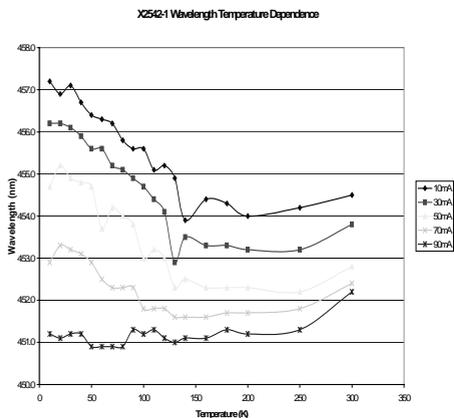


Fig.1a: Temperature dependent EL for X2542.

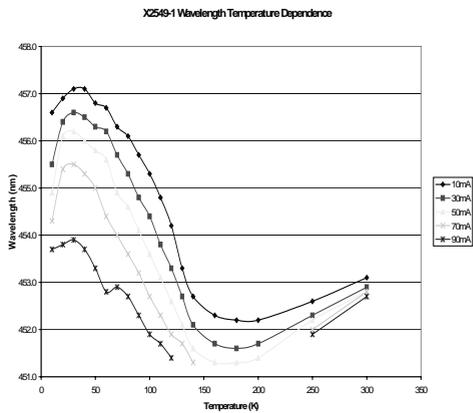


Fig.1b: Temperature Dependent EL for X2549.

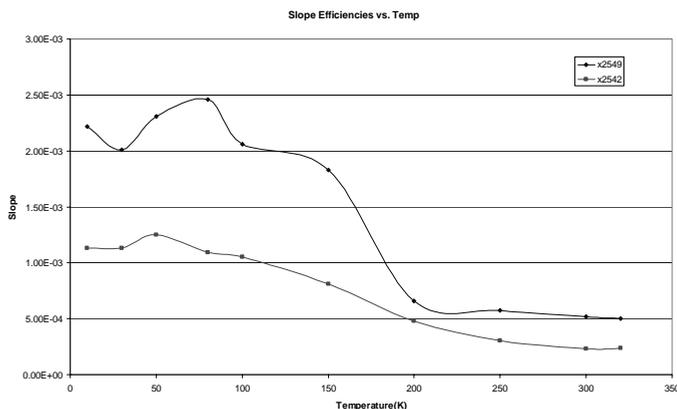


Fig. 2: Temperature dependent PLE for X2542 and X2549.

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЩНЫХ НИТРИДНЫХ СВЕТОДИОДОВ.

D. Lee, D. Byrne, F. Lu and W. Quinn

VEECO TurboDisc Operations, 394 Elizabeth Avenue, Somerset NJ, USA, e-mail: dlee@veeco.com

Расширение области использования светодиодов зависит от улучшения их параметров. Современные нитридные светодиоды имеют относительно высокую эффективность при малых токах, но заметно меньшую при больших плотностях тока. Данная работа посвящена исследованию данного негативного явления, взаимосвязи его проявления с рядом других свойств выращенных структур, их дизайна и режимов выращивания.

ЛЮМИНОФОРНЫЙ СЛОЙ В ФОРМЕ КАПЛИ В БЕЛЫХ СВЕТОДИОДАХ

*А.А. Богданов, Л.М.Втюрина, А.В. Феопентов**

ЗАО Светлана-Оптоэлектроника. Пр. Энгельса, д.27, 194156, Санкт-Петербург,
тел. +7(812)7030426, e-mail: A.Feopentov@gmail.com;

В настоящее время во многих типах белых светодиодов, в том числе и мощных, применяется такой конструктивный элемент как отражатель. В объеме отражателя размещается светоизлучающий чип и люминофорная смесь. Одной из основных функций отражателя является удержание люминофорной смеси. Преимущества конструкции светодиода без отражателя состоят в повышении надежности сборки и уменьшении размера источника белого света.

Задача данной работы состоит в том, чтобы создать вариант конструктивного исполнения мощного белого светодиода без отражателя с конформным люминофорным слоем (conformal phosphor coating, слой с мало зависящей от угла радиальной толщиной) и эффективностью не меньшей, чем у светодиода с люминофорным слоем в отражателе.

Эксперименты по созданию нового люминофорного слоя проводились на мощном белом светодиоде ИРС-50, разработанном и выпускаемом ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», характеристики которого подробно описаны в статье [1]. Люминофорный слой был изготовлен в форме полусферической капли, расположенной на подкристалльной плате (см. рис.1). В люминофорной смеси и при заполнении лунки пластиковой линзы использовались силиконовые компаунды. В люминофорной смеси был использован компаунд, относящийся к категории оптических эластомеров (elastomer), а для создания оптического контакта между люминофорным слоем и линзой – компаунд из категории оптических гелей (gel).

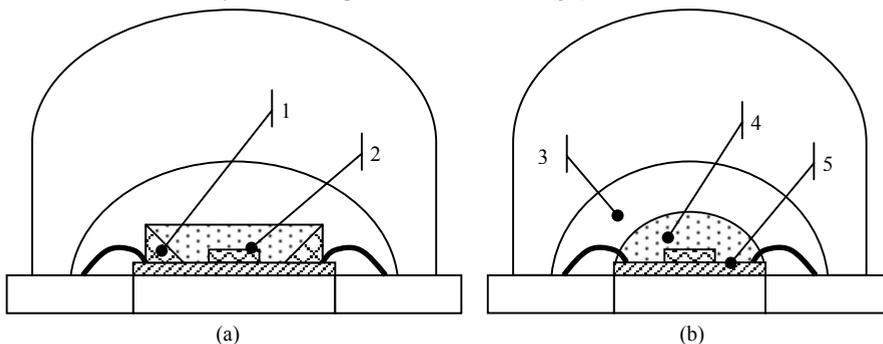


Рис.1. Люминофорный слой в отражателе (а); люминофорный слой в форме капли (б).

1 – отражатель; 2 – чип; 3 – лунка линзы, заполненная компаундом;

4 – люминофорная смесь; 5 – подкристалльная плата

Использование двух компаундов с разными свойствами – принципиальная, отраженная в патентной заявке [2], особенность реализованной в производстве мощных белых светодиодов технологии «пластик-гель». Сохранение цветности излучения светодиода со временем обеспечивается тем, что твердость компаунда люминофорной смеси достаточно высока (около 50 ед. класса А по Шору). Как показали предварительные эксперименты, при использовании компаунда с недостаточной твердостью частицы люминофора со временем отдаляются от поверхности чипа, за счет чего цвет излучения смещается к синей области.

Для создания оптического контакта между люминофорным слоем и линзой применяется компаунд, имеющий заметно меньшую твердость, чем компаунд люминофорной смеси. В таком случае при установке пластиковой линзы объем компаунда в лунке линзы деформируется люминофорным слоем, а не наоборот. Отсутствие деформации люминофорного слоя при установке линзы позволяет выполнять операцию ее монтажа с большей технологичностью по сравнению с процессом, включающим установку линзы на светодиод с последующими заполнением лунки компаундом и отверждением компаунда.

Для сопоставления эффективности светодиоды с люминофорным слоем в форме капли сравнивались со светодиодами стандартного исполнения, люминофорный слой в которых располагается в отражателе, изготовленном из пластика белого цвета. Чипы для всех светодиодов подбирались таким образом, чтобы их мощность излучения лежала в диапазоне 130–140 мВт (при токе 350 мА). В последующей обработке полученных данных использовались параметры только тех

светодиодов, цветность излучения которых попала в диапазон, заданный по координате цветности x диаграммы МКО1931 от 0,360 до 0,370. Основные параметры светодиодов полученной выборки (200 шт.) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – основные параметры светодиодов при токе 350 мА

Вариант исполнения люминофорного слоя	Мощность излучения, мВт	Световой поток, лм	Световая эффективность, лм/Вт	Световая отдача, лм/Вт
в отражателе	116 ± 7	35 ± 2	303 ± 3	33 ± 3
в форме капли (без отражателя)	110 ± 3	33 ± 1	300 ± 5	31 ± 1

При оценке эффективности использовался метод, изложенный в работе [3], в котором эффективность преобразования энергии в белом светодиоде определяется как отношение мощности излучения белого светодиода к мощности излучения синего светодиода при условии, что белый светодиод конструктивно отличается от синего только наличием зерен люминофора. Эффективность преобразования в белом светодиоде с отражателем составила $0,58 \pm 0,03$, а в светодиоде без отражателя – $0,55 \pm 0,02$. Предельное значение эффективности преобразования белого светодиода в конструктиве ИРС-50 для данного диапазона цветности излучения, с люминофором с квантовой эффективностью 90 %, коэффициентом отражения 9 %, и с чипом МК-24, составляет $0,69$. Таким образом, разница между предельной и достигнутой в эксперименте эффективностью преобразования составила для светодиода с отражателем около $0,11$, а для светодиода без отражателя – около $0,13$. То есть энергетически вариант конструктивного исполнения с отражателем оказался более эффективным.

При близких значениях световой эффективности (см. таблицу 1), обусловленных схожими спектрами излучения и цветностью излучения, это приводит к тому, что светодиоды с отражателем опережают светодиоды с люминофорным слоем в форме капли по световому потоку на 2 лм и по световой отдаче на 2 лм/Вт при номинальном рабочем токе 350 мА.

По итогам работы сделаны следующие выводы. Создан вариант белого светодиода, в котором люминофорный слой не требует наличия отражателя. Исключение из конструкции отражателя, несомненно, повышает технологичность при массовой сборке светодиодов. Также выяснилось, что переход к конформному люминофорному слою повышает угловую однородность цветности излучения светодиода (color spatial uniformity). Последний вопрос подлежит более подробному изучению в ходе последующих работ. Тем не менее, следует отметить, что в рассмотренном варианте улучшение технологичности и, возможно, цветовой однородности излучения достигнуто за счет некоторой потери по световому потоку относительно белого светодиода с отражателем.

[1] Богданов А.А., Васильева Е.Д., Зайцев А.К. Светотехника, №3, с. 12-19 (2007).

[2] Патентная заявка №2007129018/28(031598). Светодиод с двухслойной композитной областью/
Богданов А.А., Нахимович М.В. Феопентов А.В.– Приоритет от 24.07.2007.

[3] Богданов А.А., Феопентов А.В. Светотехника, №4, с. 32-34 (2007).

THE DROP-SHAPED PHOSPHOR LAYER IN THE WHITE LEDs

A.A. Bogdanov, A.V. Feopentov, L.M. Vtyurina*

Svetlana-Optoelectronics JSC. Pr. Engelsa, 27, 194156, Saint-Petersburg, Russia
tel. +7(812)7030426, e-mail: A.Feopentov@gmail.com

At present time in many types of LEDs (Light-Emitting Diodes) such element as the reflector cup is used. One of the main functions of the reflector is to hold the phosphor mix. The elimination of the reflector can give some advantages: improved reliability of the package technology, reduced size of the white light source, improved color spatial uniformity.

The objective of this work was to create power white LED package without the reflector cup but with the conformal phosphor coating instead. As a result of work, such package with the phosphor layer in the form of a hemispherical drop was created. The effectiveness of the package technology was improved but in exchange for the little loss of the luminous flux. The color spatial uniformity of LED with drop-shaped phosphor layer is a matter for further research.

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ ВО ВНЕШНИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЯХ

Э.М. Гутцайт^{1}, Л.М. Козан², И.Т. Рассохин², А.М. Сидоров³*

¹ Московский энергетический институт (Технический университет),
Красноказарменная ул., 13, 111250, Москва, тел. +7(495)4337551, e-mail: edgt@migmail.ru;

² ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ», Щербаковская ул., 53, 105187, Москва;

³ ФГУП «НПП ВНИИЭМ», Москва.

Представлены результаты измерений и расчётов кривых сил света (КСС), изокандел и распределений освещённости (РО) от светильников, содержащих цилиндрические (ЦО) и параболоцилиндрические отражатели (ПЦО) с двумя светодиодами кругового действия (СКД) типа У-360 Бл, которые были разработаны и выпускаются в НПЦ «ОПТЭЛ» [1,2]. На рис.1 приведен эскиз экспериментального макета ЦО, а на рис.2 показана измеренная КСС У-360 Бл. Как видно из рис.1, плоские боковые стенки ЦО, где расположены СКД, наклонены под углом около 45° для того, чтобы максимальное излучение каждого СКД было направлено перпендикулярно оси ЦО.

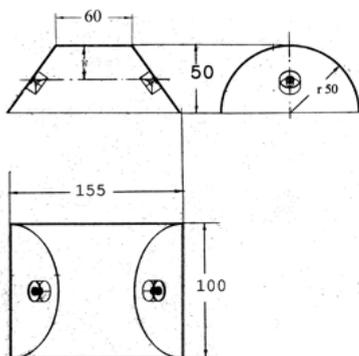


Рис. 1. Эскиз цилиндрического отражателя с двумя СКД типа У-360 Бл.

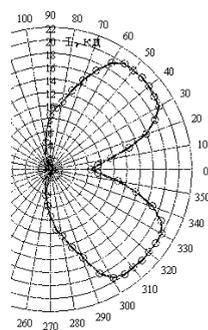


Рис. 2. КСС СКД типа У-360 Бл.

В процессе исследований изменяли размер w , показанный на рис.1, и на рис.3 и 4 приведены измеренные РО на расстоянии 0,5 м от ЦО для различных положений СКД. Как видно из этих рисунков, смещение СКД вглубь отражателя ($w = 17$ мм) от его середины ($w = 25$ мм) приводит к увеличению максимальной освещённости от 220 до 260 лк. Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследованный ЦО обеспечивает высокую равномерность РО на площадке $30 \times 25 \text{ см}^2$ и может быть использован для местного освещения.

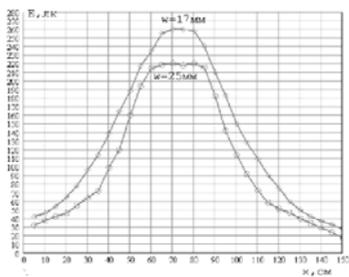


Рис. 3. Освещённости в продольном направлении.

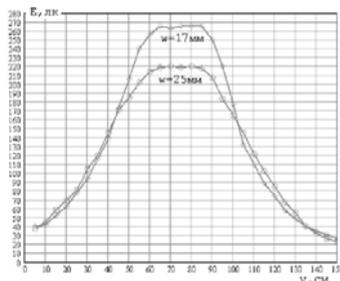


Рис. 4. Освещённости в поперечном направлении.

Заметим, что в экспериментальном макете были использованы СКД со световыми отдачами около 40 лм/Вт. При изготовлении СКД с современными чипами освещённость должна увеличиться вдвое. Ещё более высокие значения освещённостей с несколько худшим РО в поперечном направлении могут быть получены от ПЦО, параметрическая модель которого показана на рис.5. Это подтверждают расчёты, выполненные в системе TracePro [3] с получением от ПЦО изокандел (рис. 6,а), на основании которых по программе Краснополяского и Гутцайта [4], составленной в Матлабе с использованием сглаживающих сплайнов, были рассчитаны РО вдоль и поперёк ПЦО на расстоянии 1 м (рис.6,б). Графики на рис.6 соответствуют случаю, когда центры СКД находятся в фокальных точках параболического профиля.

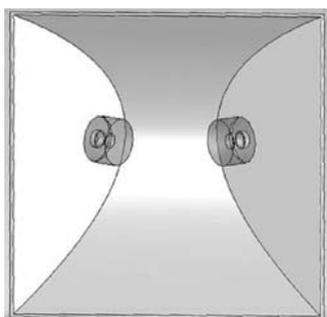


Рис. 5. Модель парабоцилиндрического отражателя с СКД.

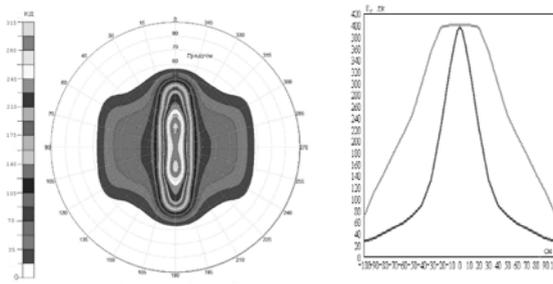


Рис. 6. Изоканделы (а) и РО (б) от ПЦО.

В докладе будут приведены цветные иллюстрации изокандел, где каждый участок силы света представлен соответствующим цветовым оттенком и существенно отличается по качеству от чёрно-белого изображения, показанного здесь на рис.6,а.

Кроме того, будут представлены результаты расчётов изокандел и РО для различных размеров ЦО и ПЦО, углов наклона боковых поверхностей и расположений на них СКД.

[1] www.optelcenter.com

[2] Коган Л.М., Рассохин И.Т., Гофштейн-Гардт А.Л., Флегонтов Б.К. Полупроводниковый излучатель для круговых навигационных огней // Свидетельство на полезную модель № 22653 от 05.10.2001.

[3] Гутцайт Э.М., Милютин Д.В., Сидоров А.М., Коган Л.М., Рассохин И.Т. Расчёты и измерения КСС светодиодов кругового действия // VI МСК «Свет без границ!», Тезисы докладов.- Калининград, Светлогорск. 19-21 сент. 2006.- С.81,82.

[4] Гутцайт Э.М., Краснополяский А.Е., Милютин Д.В. Расчёты светодиодных модулей для местного освещения // Светотехника, 2007. № 4. С.52 - 56.

RESEARCHES OF LIGHT-EMITTING DIODES OF CIRCULAR ACTION IN EXTERNAL CYLINDRICAL AND PARABOLA WITH CYLINDER REFLECTORS

E.M.Gutzeit^{1}, L.M.Kogan², I.T.Rassohin², A.M.Sidorov³*

¹ Moscow power institute (Technical university),

Street Krasnokazarmennaja, 13, 111250, Moscow, ph. +7 (495) 4337551, e-mail: edgut@migmail.ru;

² Open Companies «NPC OED «OPTEL», street Shcherbakovskaja, 53, 105187, Moscow;

³ FGUP «NPP VNIEM», Moscow.

Results of measurements and calculations isocandels and illuminations from the offered light device containing cylindrical reflectors with two light-emitting diodes with circular action, located on inclined lateral walls are presented. The considered light device can be used for local illumination.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦВЕТНОЙ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В РЭМ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ InGaN/AlGaN/GaN

П.В. Иванников^{1}, А.И. Габельченко¹, П.А. Мирошников¹, М.В. Чукичев¹,
А.Э. Юнович¹, М.А. Агапов², Е.Д. Васильева², Б.С. Явич²*

¹ МГУ им. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы, дом 1, строение 2, 119991, Москва, тел. +7(495)9394829, e-mail: petr@ccl.msu.su;

² ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». а/я 78, 194156, г. Санкт-Петербург;

Исследования светодиодных гетероструктур на основе InGaN/AlGaN/GaN методами цветной катодолюминесценции (ЦКЛ) и цветной катодолюминесценции с высоким спектральным разрешением (ЦКЛ-ВСП) в РЭМ проведены с целью выявления и локализации ростовых дефектов в структурах и определения их влияния на свойства светодиодов. Исследования проводились с помощью РЭМ «СТЕРЕОСКАН МК ПА», оснащенного трехканальной приставкой для получения КЛ изображений в режиме реальных цветов, сопряженной с компьютером и дополнительным интегрирующим предусилителем для сигнала наведенного тока.

Для спектрального анализа КЛ излучения в реальных цветах использовались широкополосные перекрывающиеся светофильтры, имеющие максимумы пропускания на длинах волн 450 нм – В, 540 нм – G и 670 нм – R, аналогичные по своим характеристикам, применяемым в цветном телевидении. Для спектрального анализа (ЦКЛ-ВСП) использовался дополнительный набор из 11 светофильтров с полосой пропускания ~ 30нм и 40нм, с максимумами полос пропускания на длинах волн 420, 450, 480, 510, 540, 570, 600, 640, 680, 720, 760 нм.

Метод композитного контраста цветной катодолюминесценции и вторичной электронной эмиссии (ЦКЛ+ВЭ) позволяет на одном изображении установить пространственную корреляцию между топографией поверхности и распределением центров люминесценции.

Исследованы серии светодиодных структур, выращенных в лаборатории фирмы «Светлана-Оптоэлектроника». Каждая серия отличалась от других параметрами роста: количеством периодов буферной сверхрешетки, относительной степенью легирования сверхрешетки, степенью легирования n- и p- областей и числом квантовых ям в активном слое.

Во всех образцах обнаружена желтая полоса катодолюминесценции GaN, которая насыщается при больших плотностях возбуждения и, наоборот, увеличивает свою интенсивность относительно синей полосы при расфокусировке пучка (уменьшении плотности возбуждения). Желтая линия была обнаружена как в буферной, так и в активной области, причем в некоторых образцах ее интенсивность в обеих областях была практически одинакова, что свидетельствует о дефектах в буферном слое, которые проникают в активную область в процессе роста.

Исследования зависимости ЦКЛ-сигнала от ускоряющего напряжения выявили существенную пространственную неоднородность диффузионной длины в p-области. Неоднородность диффузионной длины, может быть связана как со структурными дефектами, так и неоднородностью легирования.

Во всех образцах в режиме ЦКЛ и ЦКЛ-ВСП обнаружена пространственная неоднородность интенсивности КЛ-излучения в активной области. В некоторых структурах с помощью метода ЦКЛ-ВСП удалось обнаружить и оценить количественно пространственную неоднородность положения максимума основной полосы излучения в активной области, что, по-видимому, связано с флуктуациями содержания индия в квантовых ямах вдоль плоскости гетероструктуры (Рис.1.). Характерные размеры этих неоднородностей 2-10 мкм.

При сравнительном исследовании эпитаксиальных структур с квантовыми ямами, выращенных на 2-х различных установках, в режиме ЦКЛ удалось установить различия в интенсивности катодолюминесценции. В режиме ЦКЛ-ВСП также удалось выявить спектральную неоднородность КЛ-излучения.

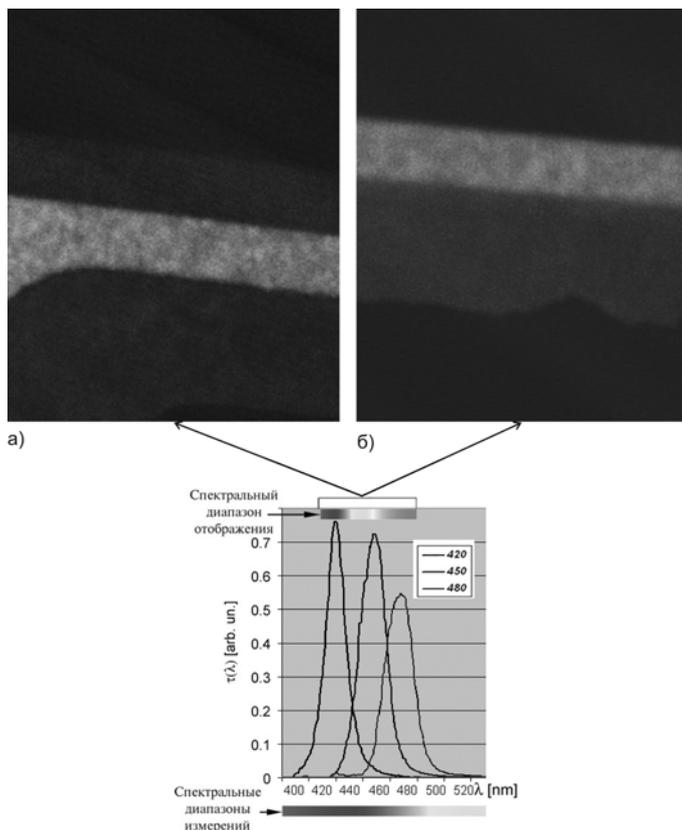


Рис.1. Изображения участков двух различных структур полученных в режиме ЦКЛ-ВСП и спектральные характеристики примененных узкополосных светофильтров. Ширина изображений а),б) - $50 \mu\text{m}$.

APPLICATION OF NARROW-BAND COLOR CATHODOLUMINESCENCE SEM-MODE TO THE STUDY OF DEFECTS IN InGaN/AlGaIn/GaN-HETEROSTRUCTURES.

P.V. Ivannikov^{1}, A.I. Gabelchenko¹, P.A. Miroshnikov¹, M.V. Chukichev¹, A.E. Yunovich¹, M.A. Agapov², E.D. Vasileva², B.S. Yavich²*

¹ Moscow State University, Physics Department, Leninskie Gory, 119992 Moscow, Russia, phone: +7(495)9394829, e-mail: petr@ccl.msu.su;

² JSC "Svetlana-Optoelectronica", 194156, St.-Petersburg, Russia;

One of the effective method for GaN structure characterization is use the SEM in the color cathodoluminescence (CCL) mode. The CCL system can operate with a standard RGB-set of optical filters for obtaining true color image. To improve spectral resolution we used a set of narrow band filters that have overlapped spectral characteristics with the maximal transparencies at the wavelengths: 420, 450, 480, 510, 540, 570, 600, 640, 680, 720, 760 nm.

This method was applied to study defects in InGaN/AlGaIn/GaN LED structures grown by MOCVD-technique. A new method allowed visualizing spectral non-homogeneity of luminescence in quantum wells in some LEDs structures. For all specimens non-homogeneity of quantum efficiency was discovered, with the typical size of non-homogeneous field of 2-10 microns. Considerable spatial non-homogeneities of diffusion length in p-area were discovered by variation of beam acceleration voltage.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В AlGaN ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ, ВЫРАЩЕННЫХ ДИСКРЕТНОЙ СУБМОНОСЛОЙНОЙ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

В.Н. Жмерик^{1}, А.М. Мизеров¹, Т.В.Шубина¹, А.В.Сахаров¹, К.Г. Беляев¹, М.В.Заморянская¹, А.А.Ситникова¹, П.С.Копьев¹, Е.В.Луценко², А.В.Данильчик², Н.В.Рясеуцкий², Г.П.Яблонский², С.В. Иванов¹*

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул., 26, 194021, Санкт-Петербург, тел. +7(812)2927124, e-mail: jmerik@pls.ioffe.ru

² Институт общей физики им.Б.Я.Степанова, пр.Независимости, 68, 220072, Минск, Белоруссия

Значительный прогресс различных технологий роста гетероструктур на основе $Al_xGa_{1-x}N$ с высоким $x>0.3$ уже позволил наладить опытное производство светоизлучающих диодных источников ультрафиолетового излучения (УФ СИД) в диапазоне длин волн (λ) от 245 до 365 нм [1]. Однако относительно небольшая эффективность излучательной рекомбинации в квантоворазмерных AlGaN гетероструктурах, сложности их р- и n-легирования обуславливают недостаточно высокие значения выходной мощности УФ СИД (~1 мВт) при эффективности менее 1% (при $\lambda<300$ нм) и ограниченном сроке службы на уровне нескольких сотен часов. Наряду с газофазными технологиями для эпитаксиального роста AlGaN гетероструктур интенсивно развиваются технологии молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с использованием аммиака или плазменно-активированного азота, с помощью которых уже получены первые УФ СИД [2,3]. Основным достоинством технологий МПЭ являются уникальные возможности прецизионного контроля гетероструктур на атомарном уровне благодаря хорошо развитым методам диагностики процесса роста и способности относительно легко и быстро изменять ростовые параметры, в т.ч. обеспечивать дискретную (импульсную) подачу атомарных пучков III группы и активированного азота в зону эпитаксиального роста. В докладе рассматриваются особенности роста слоев $Al_xGa_{1-x}N$ ($x=0-1$) и гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на их основе с использованием дискретной субмонослойной эпитаксии (ДСЭ) в процессе МПЭ с плазменной активацией (ПА). Анализируются различные стехиометрические условия роста с целью повышения эффективности излучательной рекомбинации структур в спектральном диапазоне 280-320 нм.

Слои AlGaN ($x=0-1$) с типичной толщиной ~1 мкм были выращены на установке МПЭ ПА Compact21T (RIBER) на подложках $c-Al_2O_3$ с использованием различных значений отношения потоков атомов III группы к потоку активированного азота $F_{III}/F_{N^*}=0.8-1.7$ и варьированием температуры подложки от 650 до 740°C, что обеспечивало широкий диапазон стехиометрических условий - от азот- до металлообогащенных. При росте КЯ использовался режим ДСЭ, т.е. каждая КЯ представляла собой сверхрешетку $5 \times (GaN/Al_{0.55}Ga_{0.45}N)$ с номинальной толщиной GaN вставок менее ~1 монослоя, что легко обеспечивало варьирование среднего содержания Al в КЯ до 0.3 при неизменных всех остальных параметрах роста. Структурные свойства образцов характеризовались с помощью растровой и просвечивающей электронной микроскопии (РЭМ и ПЭМ), в т.ч. и с высоким разрешением. Измерения состава слоев проводились с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Край фундаментального поглощения слоев измерялся с помощью спектров оптического пропускания, а для измерений спектров фотолюминесценции (ФЛ) в качестве источника возбуждения использовалась 5 гармоника АИГ:Nd лазера ($\lambda=213$ нм).

Характеризация слоев в полном диапазоне составов, показала, что для зависимости ширины запрещенной зоны $E_g(x)=x \cdot E_g^{AlN} + (1-x) \cdot E_g^{GaN} - b \cdot x(1-x)$ наилучшая аппроксимация во всем диапазоне x достигается при значениях $E_g^{GaN}=3.42 \pm 0.02$ эВ, $E_g^{AlN}=6.08 \pm 0.02$ эВ и $b=1.1 \pm 0.1$ эВ, как показано на рис.1а. Спектры ФЛ слоев $Al_xGa_{1-x}N$ имели, как правило, одиночный пик, положение которого в первую очередь определялось содержанием Al. Минимальная измеренная при 300К длина волны ФЛ для слоя $Al_{0.93}Ga_{0.07}N$ составила 230 нм. Спектры ФЛ слоев продемонстрировали заметный стоксов сдвиг основного одиночного пика ФЛ относительно края фундаментального поглощения, составившего для слоев с $x=0.4-0.7$ примерно 150-200 мэВ. Причем для слоев, выращенных в N-обогащенных условиях, этот сдвиг был несколько выше и, кроме того, для них в несколько раз возрастала интенсивность ФЛ по сравнению со слоями, полученными в металл-обогащенных условиях. Эти результаты подтверждают данные работы [3], где наблюдались аналогичное поведение спектров, что связывалось с образованием локализованных состояний в объемных слоях AlGaN, выращенных в N-обогащенных условиях.

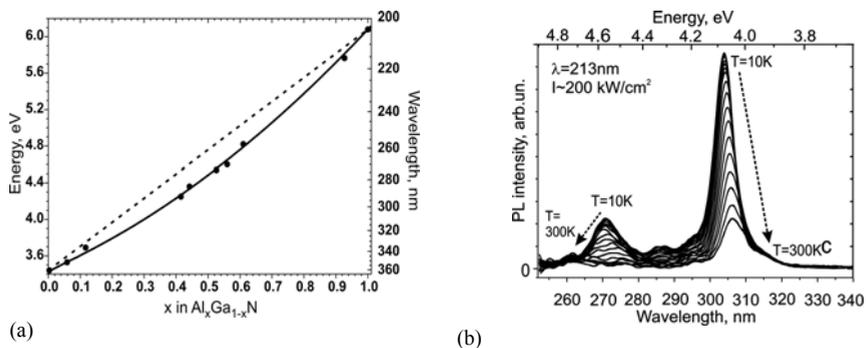


Рис.1. *a*-Зависимость ширины запрещенной зоны объемных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (E_g) от содержания Al (x). Точки соответствуют измерениям состава с помощью РСМА, а кривая- расчетной кривой; *b*- Температурная зависимость спектров ФЛ структуры $3\times\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$.

Новым результатом работы является наблюдение в структуре $3\times\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{N}/\text{Al}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{N}$, выращенной в Ga-обогащенных условиях, относительно интенсивной ФЛ, которая сопоставима с интенсивностью ФЛ объемных слоев близких составов, выращенных в N-обогащенных условиях. Для этой структуры основной пик ФЛ, соответствующий люминесценции из КЯ, сдвинут на ~600 мЭВ относительно края поглощения, определяемого материалом барьерных слоев. Данная интерпретация спектра подтверждается существенно меньшим стоксовым сдвигом одиночных пиков в спектрах ФЛ объемных слоев с тем же содержанием Al, что барьерные слои и КЯ гетероструктуры. Кроме того, при низких температурах в спектрах этой структуры наблюдается дополнительный коротковолновый пик, соответствующий ФЛ объемного слоя $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ (рис. 1b). С увеличением температуры этот пик быстро исчезает, что связано с быстрым уменьшением концентрации неравновесных носителей в барьерных и буферных слоях за счет улучшения транспорта неравновесных носителей заряда в КЯ из-за возрастания их подвижности. С использованием Ga-обогащенных условий также была выращена гетероструктура примерно с тем же содержанием Al в барьерных слоях и КЯ, которая продемонстрировала электролюминесценцию с основным пиком с $\lambda\sim 320$ нм.

Таким образом, исследованы свойства слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x=0-1$), выращенных при различных стехиометрических условиях, которые продемонстрировали ФЛ в диапазоне длин волн от 230 нм. Впервые продемонстрирована возможность получения AlGaN-гетероструктур с КЯ методом дискретной субмонослойной эпитаксии с использованием металл-обогащенных условий МПЭ ПА, которые демонстрируют ФЛ и электролюминесценцию в диапазоне $\lambda=280$ до 320 нм.

- [1] J. Deng et al., Jap. J. Appl. Phys., **46**, L263 (2007).
 [2] S. Nikishin, M. Holtz, H. Temkin, Jpn.J.Appl.Phys., **44**, 7221 (2005).
 [3] A. V. Sampath et al., J. Electronic Materials **35**, 641 (2006).

INCREASING EFFICIENCY OF RADIATIVE RECOMBINATION IN AlGaN HETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM WELLS GROWN BY DISCRETE SUBMONOLAYER MOLECULAR BEAM EPITAXY

V.N. Jmerik^{1*}, *A.M. Mizero*¹, *T.V. Shubina*¹, *A.V. Sakharov*¹, *K.G. Belyaev*¹, *M.V. Zamoryanskaya*¹,
*A.A. Sitnikova*¹, *P.S. Kop'ev*¹, *E.V. Lutsenko*², *A.V. Danilchuk*², *N.V. Rzhetski*², *G.P. Yablonski*²,
*S.V. Ivanov*¹

¹ Ioffe Physico-Technical Institute of RAS, Polytekhnicheskaya, 26, 194021, Saint-Petersburg,
 phone. +7(812)2927124, e-mail: jmerik@pls.ioffe.ru;

² Stepanov Institute of Physics of NAS Belarus, Independence Ave. 68, Minsk 220072, Belarus

The paper reports on growth of AlGaN-layers in a full range of composition under different stoichiometric conditions. The successful application of the discrete (digital) submonolayer plasma-assisted molecular beam epitaxy under group-III rich conditions for the growth of AlGaN-based quantum-well hetero-structures exhibiting photo- and electroluminescence within range of $\lambda=280-320$ nm has been reported.

АНАЛИЗ НЕТЕРМИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПАДЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НИТРИДНЫХ СВЕТОДИОДОВ

С.Ю.Карпов^{1}, К.А.Булашевич^{1,2}, В.Ф.Мырнин¹*

¹ ООО «Софт-Импакт», пр.Энгельса 27, 194156, С.-Петербург
тел. +7(812)5544570, e-mail: karpov@softimpact.ru;

² ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ул.Политехническая 26, 194021, С.-Петербург

Падение эффективности излучения нитридных светодиодов (СД) при высоких плотностях тока является основным фактором, сдерживающим массовое применение этих приборов в устройствах твердотельного освещения. Пик эффективности у СД зеленого, синего и фиолетового спектральных диапазонов обычно достигается при плотностях тока от 1 до 30 А/см², а затем эффективность падает в 1.5-2.5 раза при плотностях тока более, чем 300 А/см². Такое поведение наблюдается как в режиме непрерывного излучения, так и при импульсной накачке, исключая влияние тепловых эффектов на квантовый выход излучения.

В данной работе сообщается о результатах теоретического анализа нетермических механизмов, способных привести к падению эффективности нитридных СД при большом уровне накачки. В качестве наиболее существенных механизмов рассмотрены (а) утечка электронов в *p*-область гетероструктуры, (б) влияние локализации электронов и дырок в In-обогащённых кластерах, образованных за счёт флуктуаций состава InGaN активных областей, на скорость безызлучательной рекомбинации носителей на проникающих дислокациях и (в) Оже-рекомбинация.

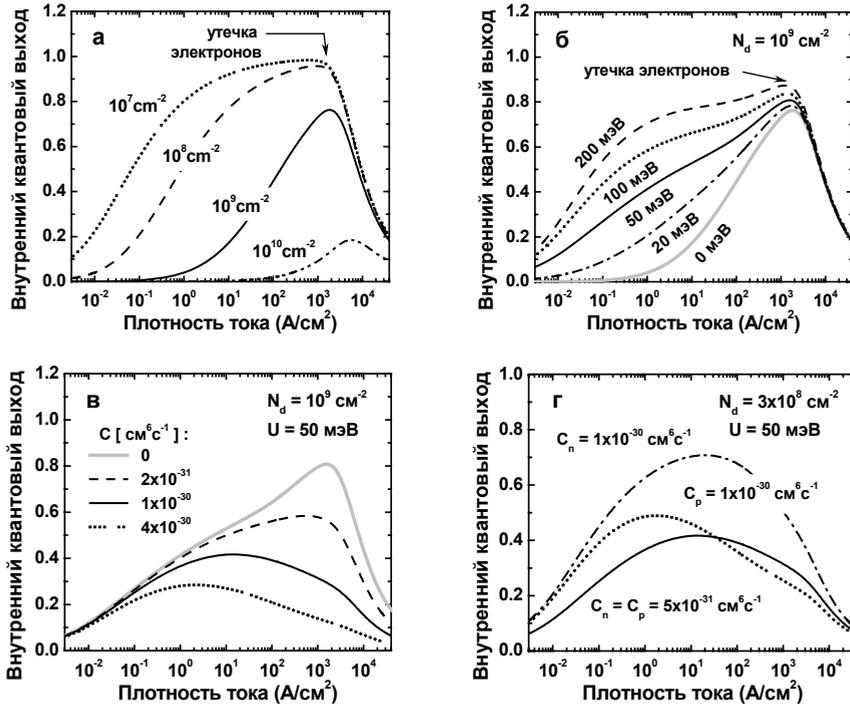


Рис.1. Влияние плотности проникающих дислокаций (а), хвостов плотности состояний, характеризуемых энергией U (б), а также Оже-рекомбинации (в) на внутренний квантовый выход излучения нитридной гетероструктуры с одиночной квантовой ямой. Влияние различных механизмов Оже-рекомбинации на квантовый выход (г).

Моделирование работы СД гетероструктуры с одиночной квантовой ямой (КЯ) показало, что утечка электронов в *p*-области гетероструктуры становится существенной лишь при плотностях тока больших, чем $\sim 1-3$ кА/см² (Рис.1а); этот вывод в равной степени относится и к структурам с

множественными КЯ. Локализация носителей, уменьшающая темп их безызлучательной рекомбинации на проникающих дислокациях, приводит к росту квантового выхода, но в основном при малых плотностях тока (Рис.1б), когда основная часть носителей находится в хвостах плотности состояний. При характерной протяжённости хвостов $U \sim 50-60$ мэВ этот эффект не приводит к сдвигу пика внутренней эффективности в диапазон плотностей тока $1-30$ А/см². В то же время, учёт Оже-рекомбинации при использовании эмпирически оцененных коэффициентов $C_n = C_p = C/2$ даёт поведение квантового выхода как функции плотности тока (Рис.1в), хорошо коррелирующее с наблюдаемым экспериментально (Рис.2).

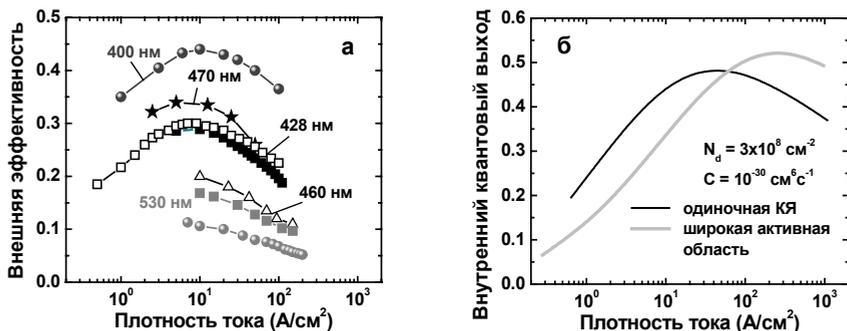


Рис.2. Внешняя квантовая эффективность, измеренная для СД различных спектральных диапазонов (а) и рассчитанная теоретически внутренняя квантовая эффективность голубого СД с одиночной КЯ и с широкой активной областью (б).

Результаты проведённого теоретического анализа сопоставляются с литературными данными измерений интенсивности резонансной фотолуминесценции в объёмных InGaN слоях [1] и характеристизации новой СД структуры со сравнительно широкой InGaN активной областью [2] (см. также Рис.2б). Обсуждается выбор достоверной величины Оже-коэффициента, возможное влияние различных микроскопических каналов Оже-рекомбинации на квантовый выход излучения (Рис.1г), а также открытые на сегодняшний день вопросы.

- [1] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 141101.
 [2] N. F. Gardner, G. O. Müller, Y. C. Shen, G. Chen, S. Watanabe, W. Götz, and M. R. Krames, Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 243506.

ANALYSIS OF NON-THERMAL MECHANISMS RESPONSIBLE FOR EFFICIENCY DROOP IN III-NITRIDE LIGHT-EMITTING DIODES

S.Yu.Karpov^{1}, K.A.Bulashevich^{1,2}, and V.F.Mymrin¹*

¹ Soft-Impact, Ltd., 27 Engels ave., 194156, St.Petersburg
 phone. +7(821)5544570, e-mail: karpov@softimpact.ru;

² A.F.Ioffe Physico-Technical Institute RAS, 26 Politekhnikeskaja str., 194021, St.Petersburg

Most of III-nitride light-emitting diodes (LEDs) suffer from the emission droop typically observed at the current densities greater than $\sim 1-30$ А/см², which limits the high-current device performance. Using simulation, we have examined various non-thermal mechanisms tentatively responsible for this effect: the electron leakage into the LED *p*-layers, the carrier delocalization from the In-rich regions formed in InGaN active layers due to compositional fluctuations, and the Auger recombination in the active layers. The electron leakage and carrier delocalization can be ruled out, as they become valuable at either much higher or much lower current densities, respectively. The Auger recombination is found to be the most probable non-thermal mechanism producing the efficiency droop at high current densities. The theoretical predictions are compared with recent literature data.

МОЩНЫЕ СВЕТОДИОДЫ С УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ И ЗЕЛЕНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Н.А. Гальчина¹, Л.М. Козан^{1*}, Ю.А. Портнягин²,
И.Т. Рассохин¹, Н.П. Социн³

¹ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ», 105187, г. Москва, Щербаковская ул., д. 53

²ФГУП «ВНИИОФИ», 119361, г. Москва, Озерная ул., д. 46

³ФГУП НИИ «Платан», 141191, г. Фрязино

С использованием импортных кристаллов на основе р-п-гетероструктур типа InGaN / AlGaIn / GaN и разработанного люминофора получены образцы мощных светодиодов с ультрафиолетовым и зеленым излучением. Конструкция светодиодов содержит теплоотводящий кристаллодержатель, отражатель бокового излучения кристаллов и полимерный полусферический купол диаметром 20 мм с показателем преломления $n=1,56$ [1].

Спектр излучения светодиода с УФ излучением представлен на рис. 1, а зависимость мощности излучения (P_e) от прямого тока – на рис. 2. Как следует из рисунков, $\lambda_{\text{max}} \approx 411$ нм, полуширина полосы $\Delta\lambda \approx 17$ нм, причем в диапазоне токов 20 – 350 мА величины λ_{max} и $\Delta\lambda$ практически не изменяются. Зависимость мощности излучения от тока близка к линейной, при токе 350 мА мощность излучения находится в диапазоне 240 – 260 мВт, при токе 500 мА – 330 – 350 мВт. Внешний квантовый выход излучения при токе 350 мА составил $\eta_{\text{вн}} = 24,5\%$, прямое напряжение $U_{\text{пр}} \approx 3,5 - 3,7$ В, угол излучения $2\theta_{0,5} = 43 \pm 3$ град.

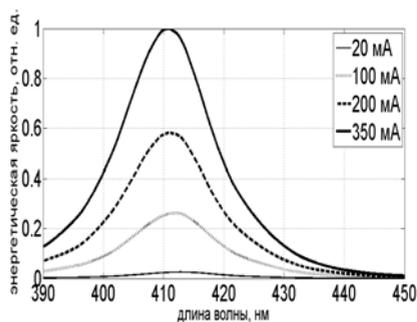


Рис. 1. Спектры излучения светодиода с УФ излучением при различных токах.

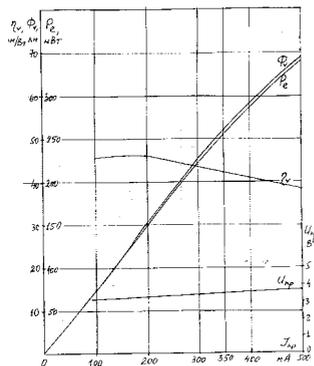


Рис. 2. Зависимости P_e , Φ_v , η_v и $U_{\text{пр}}$ от прямого тока.

Для получения зеленого свечения на кристалл с ультрафиолетовым излучением наносится разработанный силикатный люминофор на основе ортосиликата стронция-бария, активированного Eu и другими элементами.

Спектр излучения светодиодов с зеленым свечением представлен на рис. 3, а зависимость светового потока (Φ_v) и световой отдачи (η_v) от прямого тока – на рис. 2. Как следует из рисунков, спектр содержит 2 полосы: ультрафиолетовую и зеленую.

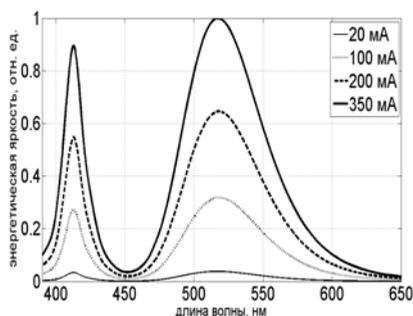


Рис. 3. Спектры излучения светодиода с зеленым свечением при различных токах.

УФ полоса характеризуется $\lambda_{\max} \approx 413$ нм и полушириной $\Delta\lambda \approx 18$ нм, зеленая полоса - $\lambda_{\max} \approx 517$ нм и $\Delta\lambda \approx 65$ нм, причем длинноволновая часть зеленой полосы более протяженная, чем коротковолновая. Незначительное увеличение λ_{\max} и $\Delta\lambda$ УФ – полосы по сравнению с излучением УФ – светодиода объясняется, по-видимому, наложением излучения люминофора. В диапазоне токов 20-350 мА величины λ_{\max} и $\Delta\lambda$ практически не изменяются. Отметим, что в диоде с люминофором большая часть УФ излучения поглощается люминофором и для наблюдаемого видимого света роль УФ полосы незначительна. Зависимость светового потока излучения от прямого тока близка к линейной, при токе 350 мА, $\Phi_v \approx 51$ -53 лм, при токе 500 мА $\Phi_v \approx 67$ -72 лм. Световая отдача при токе 350 мА составила $\eta \approx 42$ лм/Вт. Это значение несколько превышает η_v обычных СД с зеленым свечением. Сила света при токе 350 мА составила 33 кд при угле излучения $2\theta_{0,5} \approx 65$ град., прямое напряжение $U_{пр} - 3,5$ -3,7 В. Люмен-эквивалент спектра излучения составил 450 лм/Вт.

[1] Патент на полезную модель № 48673 «Мощный светодиод» от 25.10.04
 Авторы: Коган Л.М., Рассохин И.Т., Гальчина Н.А.

POWERFUL LIGHT-EMITTING DIODES WITH ULTRA-VIOLET AND GREEN EMISSION

N.A. Galchina¹, L.M. Kogan^{1}, Y.A. Portnyagin², I.T. Rassohin¹, N.P. Soshcin³.*

¹Open Company "NPC OED "OPTEL", Shcherbakovskaya str., 53, 105187, Moscow

²FSUE "VNIIOFI", Ozernaya str., 46, 119361, Moscow

³FSUE SRI "Platan", 141190, Fryazino

It is reported on development of powerful light-emitting diodes with ultra-violet and green radiation on the basis of import p-n-heterostructure as InGaN/AlGaIn/GaN and new phosphor. UV-light-emitting diodes have capacity of radiation up to 350 mW, external quantum output of radiation up to 24,5 % at length of a wave of radiation of 411 nm. The light-emitting diode with green radiation has a light stream up to 72 lm, a light output up to 42,5 lm/W at length of a wave of radiation of 517 nm and half-width 65 nm.

НОВЫЕ СВЕТОДИОДНЫЕ ОСВЕТИТЕЛИ

*Л.М. Козан *, И.Т.Рассохин*

ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ», 105187, г. Москва, Щербаковская ул., д. 53

E-mail: Levkogan @ mail.ru.

Помимо ранее разработанных и выпускаемых светодиодных модулей и линеек [1,2] в последнее время разработаны и производятся следующие светодиодные осветители белого свечения на основе мощных светодиодов ООО «НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»:

1. Светодиодный светильник для освещения в ЖКХ, на транспорте, в промышленных и общественных зданиях типа ЛБО64-СД (рис.1). Содержит 6 3-х- ваттных светодиодов типа У-342Бл. Светильник обеспечивает световой поток 600-700 лм при потребляемой электрической мощности 18 Вт. Входное напряжение 24 В. Угол излучения вдоль оси светильника $2\theta_{0,5}=80$ град., поперек оси – 120 град. Габаритные размеры: 380x156x70 мм.

2. Светодиодный прожектор для архитектурного освещения типа ОПТ-7Бл (рис. 2). Содержит 18 светодиодов типа У-345Бл-Э. Обеспечивает силу света 10 000 кд при потребляемой электрической мощности 18 Вт. Входное напряжение 24 В. Угол излучения $2\theta_{0,5}=10\pm 5$ град.

3. Светодиодный светильник на гибком держателе типа СОГ-2Бл (рис. 3) для местного освещения на пультах управления. Содержит светодиод типа У-342Бл-1, гибкий держатель длиной 160 мм и узел крепления. Входное напряжение 12 В. Обеспечивает световой поток 140-160 лм при потребляемой электрической мощности 3,6 Вт. Сила света 55-65 кд при угле излучения 70 ± 10 град.

4. С аналогичными параметрами изготавливается светодиодная лампа типа СЛ-12-3,6-140 содержащая ламповый цоколь Е-14 или Е-27 (рис. 4). Может быть использована со стандартным ламповым патроном. Предназначена для широкого круга применения.

Белый свет всех светильников характеризуется цветовой температурой в диапазоне 4500-6000 К. Возможно получение цветовой температуры в диапазоне 3000-4000 К.

5. Разработаны мощные светодиоды с потребляемой электрической мощностью 5 и 7 Вт. Световой поток составляет, соответственно, 250 – 260 и 300 – 340 лм, сила света 95 – 105 и 130 – 140 кд при угле излучения 80 град, световая отдача 55 – 60 и 50 – 55 лм/Вт. Светодиоды стабильно работают при плотности тока до 53 А/см².

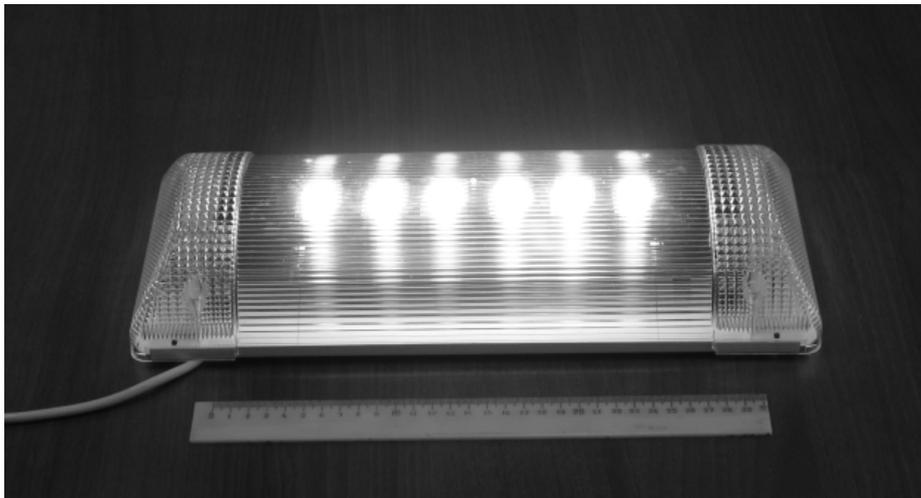


Рис. 1



Рис. 2

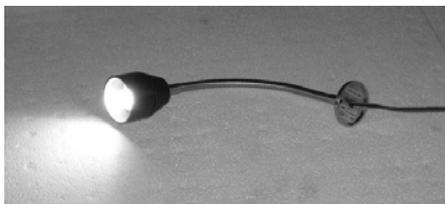


Рис. 3



Рис. 4

- [1] Коган Л.М., Рассохин И.Т. Тез. докл. 4-й Всеросс. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (СПб. 2005) с.142.
[2] Коган Л.М., Рассохин И.Т. и др. Тез. докл. 5-й Всеросс. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 2007).

NEW LIGHT-EMITTING DIODE FIXTURES

L.M. Kogan*, I.T. Rassohin

Open Company “NPC OED OPTEL”, street Cherbakovskaja, 53, 105187, Moscow

The new developed and released light-emitting diode fixtures of a white luminescence are submitted on basis of powerful light-emitting diodes “NPC OED OPTEL”: the fixture for illumination in housing services, on transport for, ect., a projector for architectural illumination, the fixture on the flexible holder and a light-emitting diodes lamp. Light and electric parameters will be presented.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ СВЕТОДИОДЫ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА ПОДЛОЖКАХ AlN

В.В.Лундин^{1}, Е.Е.Заварин¹, М.А.Синицын¹, А.Е.Николаев¹, А.В.Сахаров¹, А.Ф.Цацульников¹
Т.Ю.Чемякова², Е.Н.Мохов², О.В.Авдеев², С.С.Нагалюк², Ю.Н.Макаров²*

¹ Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, *e-mail: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru
² ООО «Нитридные кристаллы», пр. Энгельса, 27, 194156 Санкт-Петербург тел.+7(812)7031397,

Отсутствие доступных объемных III-N подложек многие годы вызывало необходимость использования инородных подложек и определяло развитие технологии III-N соединений. Эпитаксиальные слои III-N, выращенные на сапфировых и SiC подложках, имеют высокую плотность дислокаций. В отличие от светодиодов сине-зеленого диапазона, для УФ светодиодов высокая плотность дислокаций катастрофически снижает эффективность приборов, что приводит к крайней необходимости применения подложек AlN.

В данной работе приводятся первые результаты выращивания и исследования AlGaIn/GaN светодиодных гетероструктур, выращенных методом МОГФЭ на подложках AlN.

Подложки AlN ориентации (0001) вырезались из объемных кристаллов AlN, выращенных методом сублимации [1]. Эпитаксиальные процессы проводились на глубоко модернизированной установке Epiquip VP-50 RP.

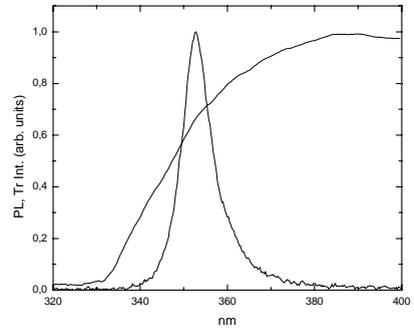
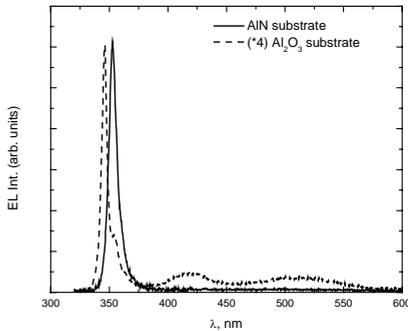
Эпитаксиальные структуры имели активную область на основе 5 квантовых ям GaN/AlGaIn, обеспечивающих длину волны излучения 340-350нм. Эмиттерные слои AlGaIn n- и p-типа проводимости имели достаточно высокое содержание алюминия для обеспечения отсутствия поглощения на длине волны излучения активной области.

Предварительная оптимизация структуры производилась с использованием сапфировых подложек. Перенос технологии на подложки AlN привел к необходимости модификации начальной стадии роста, что вызвано как рассогласованием параметров решетки AlN и AlGaIn эмиттеров, так и неидеальным на данный момент качеством поверхности подложки. При измерении выращенных структур с использованием индиевых контактов в непрерывном режиме получены следующие параметры излучения:

- спектр – одиночный пик с максимумом около 352 нм,
- ширина спектра на полувысоте (FWHM) 8 нм,
- интенсивность излучения примерно в 2-4 раза выше, чем для аналогичных структур на сапфировых подложках.

Следует отметить что использованные подложки AlN не являются полностью прозрачными в рабочем диапазоне спектра, что существенно (в разы) снижает эффективность вывода света. Сапфировые подложки в рабочем диапазоне полностью прозрачны. Таким образом, можно утверждать, что реальная эффективность гетероструктуры на AlN подложке во много раз выше, чем на сапфировой, а достижение прозрачности AlN подложек является одной из важнейших задач.

[1] Т.Ю.Чемякова, О.В. Авдеев, С.С. Нагалюк, А.С. Сегаль, Е.Н. Мохов, Ю.Н. Макаров, 6-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», (данный сборник)



Слева – спектры электролюминесценции GaN/AlGaIn MQW LED на AlN и сапфировых подложках при токе 20 мА.

Справа – сравнение спектра люминесценции исследованных светодиодных структур и спектра пропускания AlN подложек.

ULTRA-VIOLET LEDs GROWN ON AlN SUBSTRATES

W.V.Lundin^{}, E.E.Zavarin, M.A.Sinitsyn, A.E.Nikolaev, A.V.Sakharov, A.F.Tsatsulnikov, T.Yu. Chemekova², E.N. Mokhov², O.V. Avdeev², S.S. Nagalyuk², Yu.N. Makarov².*

1 Ioffe Physico-technical institute of the RAS, St-Petersburg, Russia, *lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

2 Nitride-Crystals Ltd, P.O. Box 13, 194156, St. Petersburg, Russia

AlN substrates are very attractive for UV-LEDs applications. A set of experiments on GaN/AlGaIn LEDs growth was carried out using AlN and sapphire wafers. Structures were grown in laboratory-scale MOVPE reactor. The active region of grown LEDs was composed of 5 GaN QW with AlGaIn barriers. QW thickness was chosen to reach maximum EL intensity in 340-350 nm range. The active region was sandwiched between AlGaIn of n- and p-type conductivity. EL properties investigations was carried out using In contacts. The following results were reached using AlN substrates: Spectrum with one maximum at 352 nm, WFHM – 8 nm, EL intensity of 2-4 times higher comparing to structures on sapphire substrates. Taking into account that supplied AlN substrates are not totally transparent in the range of EL of LED it may be concluded that internal efficiency of structures on AlN substrates is many times higher than on sapphire substrates, and reduction of absorption in AlN wafers is one of the most important task.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ InGaN/GaN ЛАЗЕРОВ ДЛЯ НАКАЧКИ "ЗЕЛЕННЫХ" ЛАЗЕРОВ НА ZnCdSe МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ВСТАВКАХ

Е.В. Луценко^{1}, А.Г. Войнилович¹, А.В. Данильчик¹, В.Н. Павловский¹, Н.П. Тарасюк¹,
Г.П. Яблонский¹, С.В. Сорокин², И.В. Седова², С.В. Гронин², С.В. Иванов²*

¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь. тел. +(375) 17 2840419, e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by;

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук, Политехническая ул. 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Актуальность создания миниатюрных “зеленых” лазеров возрастает в связи с увеличивающейся потребностью в них как для нужд лазерной техники (накачка пико- и фемтосекундных лазеров на $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$), так и массового применения в проекционном лазерном и 3D телевидении, а также в голографии. Несмотря на значительный прогресс в этой области, существующие технологии получения “зеленого” лазерного излучения, основанные как на накачке активной среды инфракрасными инжекционными лазерами с последующим удвоением частоты (DPSS), так и на непосредственном удвоении частоты инфракрасных инжекционных DFB лазеров ($\lambda \sim 1063$ нм) не обеспечивают достаточной стабильности излучения, малых габаритных размеров и низкой стоимости. Кроме того, многостадийное преобразование излучения в DPSS лазерах не позволяет получить большой КПД. В то же время, несмотря на значительные затраченные усилия, до сих пор не созданы инжекционные InGaN/GaN лазеры, излучающие в зеленой области спектра. В связи с этим, актуальными становятся альтернативные подходы к созданию “зеленых” лазеров.

Как было показано ранее, возможно создание высокоэффективных низкопороговых (2.5 кВт/см²) оптически накачиваемых “зеленых” лазеров с активной областью с двойной вставкой из ZnCdSe квантовых точек с внешней квантовой эффективностью более 42% [1]. При этом возбуждение таких лазеров излучением InGaN/GaN оптически накачиваемых лазеров, выращенных на кремнии, позволило добиться коэффициента преобразования около 14% при импульсной оптической мощности “зеленого” излучения 3 Вт [2].

В данной работе исследовалась возможность накачки таких лазеров с помощью гомозитаксиального InGaN/GaN лазерного диода с импульсной мощностью до 2 Вт, излучающего на длине волны ~ 417 нм, с целью создания макета полупроводникового микрочип лазера. Излучение InGaN/GaN лазерного диода коллимировалось асферической линзой и фокусировалось в возбуждающую полосу короткофокусной цилиндрической линзой. Использование гетероструктуры, описанной в [1], позволило получить генерацию только с небольшим превышением над порогом (рис. 1а). Как видно из рисунка и вставки рисунка 1а, генерация развивается уже при мощности накачки более 1.3 Вт, однако порог генерации можно оценить только как 1.58 Вт, что обусловлено неоднородностью пучка гомозитаксиального лазера.

Для дальнейшего повышения эффективности преобразования излучения InGaN/GaN лазерного диода и оптимизации лазерного конвертора было проведено численное моделирование пороговой мощности накачки в зависимости от длины резонатора ZnCdSe лазера. Для моделирования использовались внутренние лазерные параметры, определенные в [3]. Вычисления показали, что минимальная мощность накачки в пороге генерации ZnCdSe лазера достигается при длине резонатора порядка 200 мкм. Такие малые длины резонатора позволяют не только уменьшить мощность накачки, но и увеличить внешнюю квантовую эффективность ZnCdSe лазера. С другой стороны, были предприняты попытки по дальнейшему уменьшению порога генерации ZnCdSe лазера за счет увеличения фактора оптического ограничения. Для этого было проведено математическое моделирование влияния количества CdSe вставок, разделенных тонкими ZnSe/ZnSse/ZnSe барьерами (обеспечивающими туннелирование неравновесных носителей заряда между вставками с целью обеспечения равномерной прокачки активной области), и толщин волноводных слоев, состоящих из ZnSe/ZnSse сверхрешеток (обеспечивающих также эффективный транспорт неравновесных носителей заряда) на фактор оптического ограничения. На основе расчетов были предложены и выращены гетероструктуры с пятью квантовыми вставками CdSe.

Использование лазеров с длиной резонатора 250 мкм, изготовленных из гетероструктур с пятью квантовыми вставками CdSe, позволило существенно понизить порог и получить устойчивую “зеленую” генерацию с измеряемыми параметрами. На рисунке 1б представлена фотография макета микрочип лазера (на экране четко видно пятно генерации ZnCdSe лазера). Как видно из рисунка 1с, порог генерации понизился до 0.8 Вт, а мощность излучения возросла до 8 мВт при накачке 1.5 Вт. При этом, максимальная внешняя квантовая эффективность преобразования фиолетового излучения

InGaN лазерного диода в зеленое когерентное излучение лазера с активной областью из 5 квантовых вставок ZnCdSe составила ~ 1%. Дальнейшее повышение мощности и улучшение качества пучка накачки, уменьшение порога лазера с активной областью из множественных квантовых вставок ZnCdSe, позволят значительно увеличить коэффициент преобразования и мощность излучения.

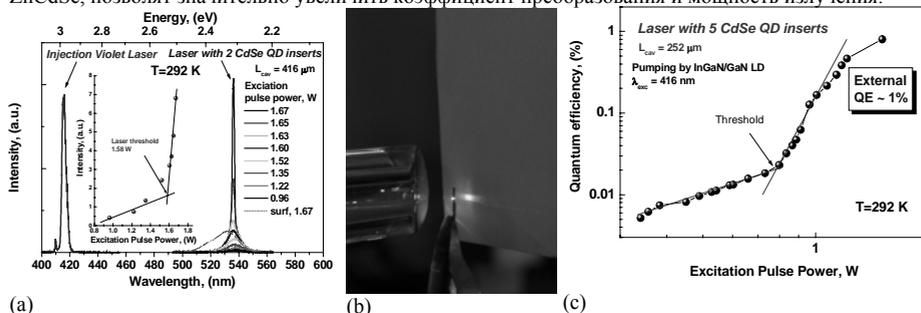


Рис.1. Спектры излучения InGaN/GaN лазерного диода и “зеленого” ZnCdSe лазера (вставка - интенсивность) в зависимости от мощности возбуждения (а), фотография действующего макета (б), квантовая эффективность “зеленой” генерации в зависимости от мощности “фиолетовой” накачки.

Вызывает особый интерес использование в качестве накачки излучения светодиодов, что позволило бы резко снизить стоимость таких лазеров. Однако использование обыкновенных светодиодов, как предложено в [4], не позволяет создать необходимой плотности мощности (1-10 кВт/см²) для накачки полупроводниковых сред со временем жизни порядка наносекунд. Поэтому для осуществления накачки необходимы специальные светодиодные источники излучения, обладающие повышенной плотностью излучения. Обсуждаются пути повышения эффективности и характеристики лазерных и светодиодных источников возбуждения, излучающих в видимой области спектра, перспективных для оптически накачиваемых активных лазерных сред.

[1] S.V. Ivanov, O. Lublinskaya, I. Sedova, S. Sorokin, A. Sitnikova, A. Toropov, P. Kop'ev, E. Lutsenko, A. Voinilovich, A. Gurskii, G. Yablonskii, Phys. Stat. Sol. (a) **204**, 251 (2007).
 [2] S.V. Sorokin, I.V. Sedova, A.A. Toropov, G.P. Yablonskii, E.V. Lutsenko, A.G. Voinilovich, A.V. Danilchik, Y. Dikme, H. Kalisch, B. Schineller, M. Heuken and S.V. Ivanov. Elect. Lett. **43**, 162 (2007).
 [3] E.V. Lutsenko, A.L. Gurskii, V.N. Pavlovskii, V.Z. Zubialevich, G.P. Yablonskii I.V. Sedova, S.V. Sorokin, A.A. Toropov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, Phys. Stat. Sol. (c). **3**, 895 (2006).
 [4] United States Patent 7136408 [http://www.freepatentsonline.com/7136408.html].

USE OF InGaN/GaN LDs FOR PUMPING OF “GREEN” LASERS BASED ON ZnCdSe MULTIPLE QUANTUM-DIMENSIONAL INSERTIONS

E.V. Lutsenko^{1*}, *A.G. Vainilovich*¹, *A.V. Danilchik*¹, *V.N. Pavlovskii*¹, *N.P. Tarasuk*¹, and *G.P. Yablonskii*¹, *S.V. Sorokin*², *I.V. Sedova*², *S.V. Gronin*², and *S.V. Ivanov*²

¹ Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Independence Ave, 68, Minsk 220072, Belarus, phone: +(375) 17 2840419, e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by;

² Ioffe Physico-Technical Institute of RAS, Polytekhnicheskaya 26, St. Petersburg 194021, Russia.

Prototype of fully semiconductor laser converter based on “violet” ($\lambda \sim 417$ nm) pumping InGaN/GaN LD and “green” optically pumped laser with an active region consisting of 5 ZnCdSe quantum-dimensional insertions has been created and investigated. Pulsed optical power of the converter equal to 8 mW has been obtained. Conversion quantum efficiency from violet to green emission was about 1%. Ways of the efficiency enhancement and characteristics of laser and light emitting diode excitation sources emitting in the visible spectral region being promising for optically pumped active laser media are discussed.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ИЗЛУЧАЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ InGaN С ПОМОЩЬЮ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СВЕТОВОГО ПОТОКА.

С.Г. Никифоров^{1}, А.Л. Архипов¹.*

¹ООО «Л.И.С.Т. – Лаборатория Исследований Световых Технологий». 125581, Москва, 1-ый Котляковский пр., д.4. тел. +7(495)7395864, e-mail: sergnik71@mail.ru; snikiforov@list-lab.ru.

Характеристики излучения, являющегося результатом процессов излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области широкозонных гетероструктур, являются не только показателем работы структуры, но и обладают информацией о некоторых физических механизмах, приводящих к изменению излучающих свойств со временем наработки. Излучение в видимой области характеризуется световым потоком. Именно световой поток является наиболее корректной величиной с точки зрения физики работы излучающей структуры, и, тем самым, позволяет сделать изучение причин деградации более частным и способным дифференцировать эти причины. Исследование изменений в диаграммах пространственного распределения плотности светового потока излучающих кристаллов на основе указанных гетероструктур, измеренных в различное время, при различных условиях или режимах наработки, позволяет делать выводы об изменениях в работе самой структуры, причины которых могут быть объяснены на уровне физики работы структуры. По результатам измерений диаграмм углового распределения силы света излучающих кристаллов был рассчитан световой поток и его значения в различных областях диаграммы. Эти значения, собранные вместе по принципу зависимости от времени, в характеристики, позволили получить картину перераспределения светового потока по объёму диаграммы излучения в процессе наработки, а также предположить, что подобное перераспределение центров излучательной рекомбинации существует и внутри излучающего кристалла, в его активной области. Предложенный метод выявил большие перспективы его использования при изучении потенциальной степени деградации параметров светодиодов на производстве относительно измерения силы света в одной точке (например, осевой). Деградация силы света не только отличается от деградации светового потока величиной, но и может иметь другой закон изменения, наклон или градиент. Степень такого отличия от поведения характеристики светового потока тем больше, чем больше градиент изменения суммарного светового потока (рисунок 1).

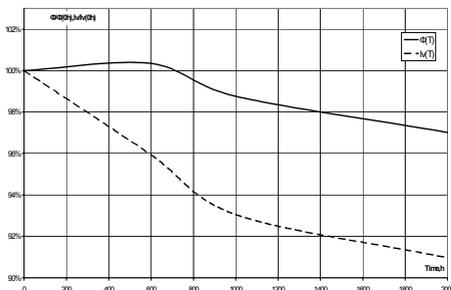


Рис.1. Деградационные характеристики светового потока $\Phi(T)$ и осевой силы света $I_v(T)$

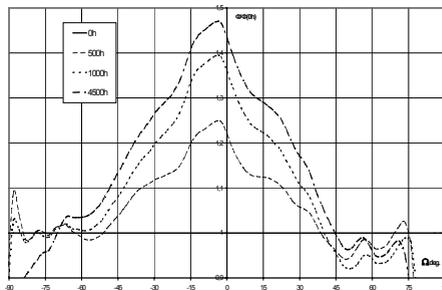


Рис.2. Перераспределение светового потока со временем наработки (0, 500, 1000, 4500 ч.)

Очевидно, что изменение осевой силы света не учитывает изменения значений силы света по всей диаграмме пространственного распределения. Поэтому разница градиентов изменения может быть следствием только одного явления: перераспределения светового потока по объёму диаграммы направленности излучения (возможно даже, без изменения значения суммарного потока), которое вызвано изменением параметров излучения различных сегментов активной области гетероструктуры (рис. 2). Практика исследования деградационных явлений в гетероструктурах на основе InGaN показала, что наибольшей деградации светового потока будет соответствовать наибольшая степень его перераспределения по объёму диаграммы пространственного распределения в процессе наработки.

Представляемый метод исследования деградации параметров излучения был применён при изучении влияния ультразвука (УЗ) на гетероструктуру при производственной операции приварки контактных проводников к омическим контактам излучающих кристаллов. Выявлено, что данная операция приводит к потере до 50% светового потока уже после 10-15 тыс. часов наработки

структуры в то время как отказ от её применения может обеспечить практически теоретическую деградационную характеристику светового потока, как у приборов с посадкой «flip-chip» (Рис.4,5).

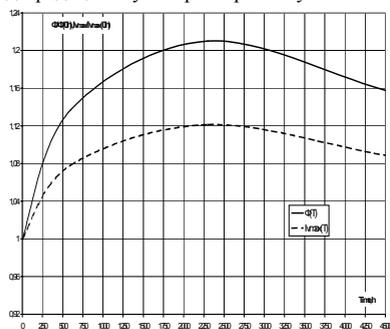


Рис.4. Деградационные характеристики светового потока кристалла на подложке SiC без применения УЗ сварки

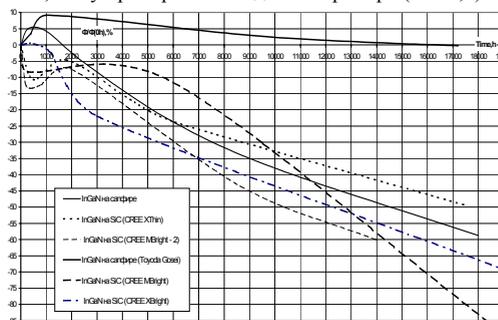


Рис.5. Деградационные характеристики светового потока светодиодов на основе кристаллов AlInGaN различных конструкций

Воздействие УЗ катализирует и потенцирует появление безызлучательной рекомбинации вследствие пьезоэффекта, результат которого – появление каналов утечки, как следствия уравнивания (пробоя) потенциалов возникающих сильных электрических полей. Если рассматривать структуру как параллельное соединение площадок с различным содержанием индия в активном слое гетероструктур твёрдых растворов $In_xGa_{1-x}N$, то различие в механических свойствах и степени проявления пьезоэффекта у различных секторов с разным x , будет определять степень появления шунтирующих элементов среди них и поэтому изменение доли их излучения в интегральном составе структуры. Это проявляется как изменение спектрального состава излучения и сдвига его в длинноволновую область после воздействия УЗ. Очевидно, что наибольшему разрушению подвержены элементы с низким содержанием индия, генерирующие самое коротковолновое излучение. Рост длинноволновых составляющих приводит к увеличению эффективности излучения тех частей структуры, которые их излучают, что, однако не пропорционально существенной деградации излучения секторов с центральными длинами волн, и поэтому суммарный интегральный световой поток уменьшается. Эти явления сочетаются со спонтанной поляризацией в квантовых ямах гетероструктур с образованием встроенных электрических полей, формирующих заряженные центры, существенно влияющие на процессы излучательной рекомбинации.

С помощью описанного метода исследования, выявлено, что в излучающих кристаллах светодиодов имеет место деградация параметров гетероструктур на основе InGaN при воздействии УЗ; у кристаллов различных конструкций физические механизмы деградации схожи, независимо от материала подложки. Степень влияния эффекта воздействия УЗ определяется с учётом резонансных пьезо - свойств материала кристалла и степенью рассогласования периодов кристаллических решёток подложек и выращенных на них гетероструктур.

METHOD OF AlGaInN-BASED MATERIALS RADIATING PROPERTIES DEGRADATION RESEARCH BY MEANS OF PRECISION MEASUREMENTS OF THE LUMINOUS FLUX

S.G.Nikiforov¹, A.L. Arkhipov¹*

¹LIST- Laboratory of Investigations of Light Technologies” Ltd. 125581, Moscow, 1-st Kotlyakovski p.,4. phone. +7(495)7395864, e-mail: sergnik71@mail.ru; snikiforov@list-lab.ru;

According to the results of measurements of the diagrams of angular distribution of luminous intensity luminous flux and its value in different parts of a diagram was calculated. These values, combined together into characteristics by the principle of their dependence from time, allowed to get a picture of luminous flux redistribution of luminous flux by radiation pattern volume, and gave the possibility to assume that such redistribution of radiating recombination intensity has place inside the emitting die too, in its active part where there are quantum wells. By means of this method it is established, that application thermoultrasonic welding contacts by manufacture LEDs leads to degradation of 50 % of the luminous flux for 10-15 thousand hours (fig 5).

ЧАСТИЧНАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ Ш-НИТРИДОВ

В.И. Осинский, Е.И. Новиков, А.В. Раков.*

Институт Микроприборов НАН Украины, г. Киев, ул. Северо-Сырцевская, 3, 04136
тел. +38(044)4347655, e-mail: osinsky@imd.org.ua

В последние годы светодиоды находят всё более широкое применение, однако, до настоящего времени не уделялось должного внимания когерентным свойствам их излучения.

Необходимость таких исследований обусловлена рядом причин. Частичная когерентность светодиодного излучения в определенных условиях способствует образованию интерференционных максимумов, позволяя более уверенно регистрировать слабые световые сигналы. При рассмотрении восприятия визуальной информации человеком заслуживает внимания существующее несоответствие реального объема регистрируемой информации о трехмерных объектах ($\sim 10^{13}$ бит) с традиционной последовательной моделью ($\sim 10^{10}$ бит) (Красильников Н.Н., 1986). Одно из возможных объяснений этого связано с предположением о том, что характер регистрации информации в слое родопсина зрительного аппарата человека подобен голографическому процессу [1]. Наличие в излучении светодиодов заметной когерентной составляющей может способствовать реализации такого механизма человеческого зрения при сравнительно малых уровнях твердотельного освещения на основе RGB-светодиодных излучателей с микропроцессорным управлением [2].

Частичная когерентность излучения проявляется в ряде приложений светодиодов. В частности, следует обращать внимание на возможность образования в некоторых случаях характерной "спектральной структуры" при отражении от шероховатых поверхностей, учитывать интерференцию в тонких слоистых структурах, нарушающую равномерность освещения. Твердотельные излучатели используются в терапевтических целях в медицине наряду с лазерами. Единого мнения о связи терапевтического эффекта с когерентностью излучения до настоящего времени пока не сформировалось. Суперлюминесцентные светодиоды, характеризующиеся сравнительно высокой пространственной и низкой временной когерентностью излучения, нашли применение в измерительной технике, например, в когерентной оптической томографии, специализированных интерферометрах, для контроля разнообразных волоконно-оптических датчиков [3]. Длина когерентности излучения является важным параметром во многих интерферометрических устройствах.

Затронутые аспекты использования светодиодов иллюстрируют актуальность изучения частичной когерентности светодиодного излучения. В настоящей работе исследовались одноваттные полупроводниковые чипы и отдельные излучатели собранных на их основе светодиодных матриц с линзами из полистирола и полиметилметакрилата. Экспериментальные исследования временной когерентности излучения светодиодов проводились с использованием простой интерференционной схемы, в которой наблюдалась интерференция световых волн, полученных при отражении коллимированного светового пучка от двух поверхностей стеклянных пластин, образующих воздушный клин. Зависимость степени когерентности от разности хода определялась измерением видности интерференционных полос в отраженном свете широкополосным фотоприемником с щелевой диафрагмой. Полученные экспериментальные зависимости нормировались с учетом равенства степени когерентности единице при нулевой разности хода.

При наличии быстродействующего спектрометра и необходимого программного обеспечения когерентные свойства излучения могут быть достаточно быстро рассчитаны по измеренным спектрам. При отсутствии такой аппаратуры описанная интерференционная схема может рассматриваться как альтернативный метод простого и наглядного определения в реальном времени длины когерентности излучения светодиода L и оценки ширины спектра $\Delta\nu \approx c/L$ или $\Delta\lambda \approx \lambda^2/L$.

Для сравнения полученных экспериментальных результатов с расчетными измерялись спектры излучения светодиодных чипов с помощью модернизированного монохроматора МДР-23. Спектральные распределения для фиолетового, синего и зеленого чипов на основе InGaP, а также красного и желтого на основе AlInGaP регистрировались при токе 350 мА. На основе полученных данных по известной методике [4] рассчитывались зависимости степени когерентности γ от разности хода l интерферирующих волн. Результаты расчетов $\gamma(l)$ наряду с экспериментальными данными для зеленого и желтого чипов приведены на рис. 1. Там же показаны кривые для степени когерентности в случае гауссовых и лоренцевых спектральных распределений с такой же шириной. Полученные расчетные зависимости $\gamma(l)$, найденные по измеренным спектрам, занимают

промежуточное положение между функциями вида $\exp(-al^2)$ и $\exp(-bl)$, характерными для спектров, которые описываются распределениями Гаусса и Лоренца. Если известна ширина спектра по уровню $0,5 \Delta\lambda$, то можно принять длину когерентности равной $L = \lambda^2 / \Delta\lambda$. Однако, при этом следует учитывать, что величина L зависит от формы спектра. При постоянном токе 350 мА получены следующие значения длины когерентности (мкм): зеленый чип – 6,2, синий – 9,0, фиолетовый – 11,8, желтый – 22,4, красный – 22.

Исследована зависимость длины когерентности L от тока накачки для светодиодных чипов на основе InGaN и AlInGaP. При росте тока от 25 до 350 мА величина L уменьшается приблизительно на 25 % в первом случае и на 5 % во втором. Тот факт, что длина когерентности в большей степени уменьшается для чипов на основе InGaN, чем для AlInGaP, согласуется с тем, что с ростом тока ширина спектра растет для обеих указанных структур, а максимум спектра смещается в коротковолновую область в первом случае и в длинноволновую – во втором.

Проведенный анализ показывает необходимость учета когерентных свойств излучения в ряде приложений твердотельных источников света. В частности, следует учитывать влияние частичной когерентности светодиодного освещения на восприятие визуальной информации человеком. Проведенные исследования полезны для оптимизации RGB-светодиодных излучателей с микропроцессорным управлением. Описанная методика оперативного контроля длины когерентности излучения и оценки ширины его спектра может быть использована для получения информации о качестве полупроводниковых гетероструктур.

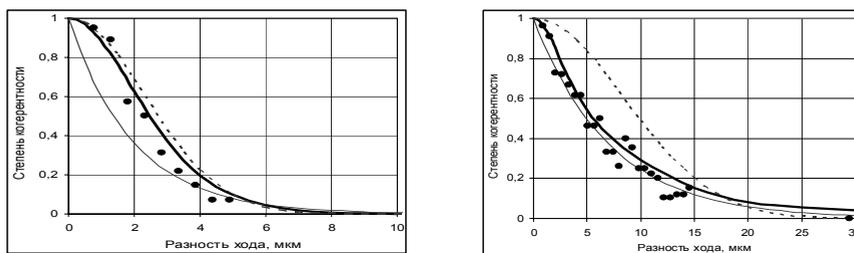


Рис.1. Зависимость степени когерентности от оптической разности хода световых волн для зеленого InGaN (а) и желтого AlInGaP (б) чипов

- [1] V.I. Osinsky. *Semicon. Phys., Quant. El. & Optoe.*, **10**, №3, 30 (2007).
- [2] В. И. Осинский, А. И. Радкевич, А.Н. Рубанчук и др. 3-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». М., МГУ, июнь 2004, с. 177.
- [3] V. R. Shidlovski, J. Wei. *Proc. SPIE*, **4648**, 139 (2002).
- [4] М. Борн, Э Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1973), с.296.

PARTIAL COHERENCE OF EMISSION OF POWER LEDs, BASED ON III-NITRIDES

V. I. Osinsky, E. I. Novikov., A. V. Rakov*

Institute of Microdevices NAS of Ukraine, Kiev, Severo-Syretskaya st, 3, 04136
phone +38(044)4347655, e-mail: osinsky@imd.org.ua

Coherent emission abilities of LEDs are manifested in a number of their applications. In particular, influence of semi-coherent LED light on information perceiving by human eyes should be considered. Emission coherence of 1-watt LEDs was researched with usage of simple interference scheme with two glass panels, creating air wedge. Results of measurements show, that coherence length of emission is about 10 microns for InGaN-based LEDs and is about 25 microns for AlInGaP-based LEDs. Emission spectrums of LEDs of different types were measured and dependencies of coherence degree on path differences of interfering waves were calculated. Calculated and experimental data are in a good agreement with each other. Dependencies of emission coherence wavelength of semiconductor chips' on pumping currents were researched. As it is get, with growth of current from 25 to 350 mA coherence length for InGaN-based chips drops down greater (on 25%), than for GaAlInP-based structures (on 5%). Results taken allow to consider coherent properties of LEDs' emission during the development of LED-based devices. Researches made are useful for RGB-based LED light emitters optimization and their control microprocessors' programming. Described methodic of operational control for emission coherence length and estimation of spectrums width can be used for getting information about quality of semiconductor heterostructures.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕКЦИИ В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ AlInGaN

А.С. Павлюченко^{1,2}, И.В. Рожанский¹, Д.А. Закгейм².*

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Политехническая ул, 26, 194021, СПб,

тел. +7(812)2927369, e-mail: alexeyr@school.ioffe.ru;

²СПбГПУ. Политехническая ул., 29, 195251, СПб;

Для всех современных светодиодов на основе AlInGaN характерна немонотонная зависимость эффективности электролюминесценции от плотности тока накачки. В области малых плотностей токов наблюдается рост эффективности электролюминесценции, который принято связывать с конкуренцией процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации. Максимальное значение внешней квантовой эффективности достигается, как правило, при характерной плотности тока накачки ~ 10 А/см². При дальнейшем увеличении плотности тока накачки наблюдается падение квантовой эффективности. Тем не менее, несмотря на универсальность характера токовой зависимости квантовой эффективности, в настоящее время не существует общепринятого объяснения такого поведения.

Существующие объяснения связывают падение квантового выхода либо с заполнением локализованных состояний в активной области, либо с конкуренцией излучательной рекомбинации и Оже-процессов, либо с уменьшением коэффициента инжекции при росте тока накачки. Тем не менее, однозначных экспериментальных данных свидетельствующих в пользу того или иного механизма не существует.

В работе [1] с помощью численного моделирования процессов зарядового транспорта в светодиодной гетероструктуре было показано, что при большой плотности тока накачки происходит снижение эффективности инжекции носителей в активную область. Причиной уменьшения коэффициента инжекции является низкая эффективность токоограничивающего широкозонного слоя, обусловленная встроенным пьезоэлектрическим полем.

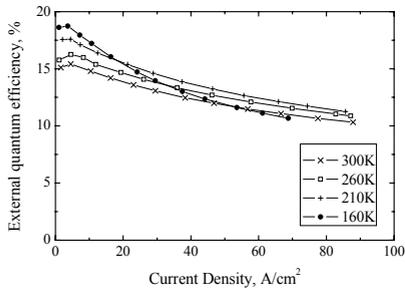


Рис.1. Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока накачки при различных температурах в стандартной структуре

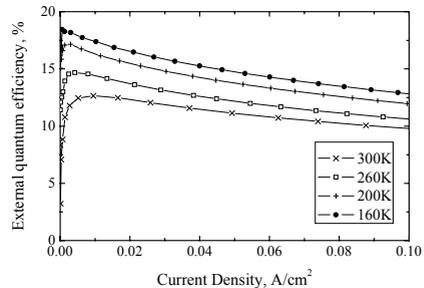


Рис.2. Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока накачки при различных температурах в инверсной структуре

В данной работе для экспериментальной проверки вклада инжекционного механизма исследовались температурные зависимости ватт-амперных характеристик светодиодов. На Рис. 1. приведены зависимости квантовой эффективности электролюминесценции от плотности тока накачки при различных температурах. Видно, что зависимость квантового выхода от температуры при фиксированном токе накачки носит немонотонный характер. Именно такое поведение ожидается в случае инжекционного механизма падения квантового выхода и находится в согласии с результатами численного моделирования, проведенного на основе модели [1]. При понижении температуры снижается темп безызлучательной рекомбинации в активной области, что приводит к росту внешнего квантового выхода в области малых токов, с другой стороны, при этом уменьшается коэффициент инжекции в активную область, что приводит к снижению внешнего квантового

выхода в области больших токов. Конкуренция этих двух процессов приводит к немонотонной температурной зависимости квантового выхода.

В работах [1,2] предложен дизайн «инверсной» светодиодной гетероструктуры, в которой активная область расположена в p-слое, а токоограничивающий слой – в n-слое. Результаты моделирования показывают, что в такой структуре токоограничивающий слой работает более эффективно и падения коэффициента инжекции в активную область с ростом плотности тока накачки не происходит. На Рис. 2. приведены зависимости коэффициента инжекции от плотности тока накачки в инверсной светодиодной гетероструктуре при различных температурах. В инверсных гетероструктурах, температурная зависимость квантовой эффективности остается монотонной. Таким образом, полученные экспериментально температурные зависимости подтверждают наличие инжекционного механизма падения квантовой эффективности в стандартных светодиодных гетероструктурах и отсутствие его в инверсных гетероструктурах. Тем не менее, для исследованных в этой работе инверсных гетероструктур наблюдается падение квантового выхода, что, по-видимому, связано с другими механизмами.

[1] И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм. ФТП, 40 (7), 867 (2006)

[2] I.V. Rozhansky, D.A. Zakheim, Phys. Status Solidi (a), 204, 227 (2007)

TEMPERATURE DEPENDENCE OF INJECTION EFFICIENCY IN GaN-BASED LEDs

A.S. Pavluchenko^{1,2}, I.V. Rozhansky¹, D.A. Zakheim¹*

¹A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, RAS, 194021, St. Petersburg,
e-mail: alexey@school.ioffe.ru;

² St. Petersburg State Polytechnical University, 195251, St. Petersburg.

The temperature dependence of external quantum efficiency in GaN-based light emitting diodes is investigated. Measurements show that in standard heterostructure the efficiency decreases with temperature only at low current densities. At higher current densities temperature dependence of external quantum efficiency is non-monotonous. However, in inverse heterostructures, the efficiency decreases with temperature at a whole range of current densities. The experimental results support previously suggested mechanism of efficiency droop due to injection efficiency decrease at higher current densities.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК НА МОЩНЫЕ СВЕТОДИОДЫ

А.Г. Полищук¹, А.Н. Туркин^{1,2}, В.М. Харитонов¹*

¹ПРОСОФТ, Профсоюзная ул., 108, 117437, Москва,
тел. +7(495)2321652, e-mail: turkin@xlight.ru;

² МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет,
119899, Москва;

Проведено исследование работы мощных светодиодных структур при питании импульсным током. Целью исследования было определение граничных режимов работы контактной системы, не приводящих к выходу ее из строя. Обнаружена четкая зависимость критического значения амплитуды прямого тока от скорости его нарастания (di/dt) и длительности импульса. Также обнаружен эффект слабой зависимости устойчивости контактной системы от скважности импульсов при работе в граничном режиме.

Проведен анализ процессов, происходящих в контактной системе и светодиодной структуре при воздействии коротких импульсов тока с высоким значением di/dt . Предложена математическая модель, описывающая тепловые процессы в проволоке и точках ее приваривания к контактным площадкам светодиодной структуры. На основании результатов исследования предложена методика определения качества сборки светодиодов из одной партии (выборки) с помощью воздействия на светодиод импульсных токов с переменной длительностью и скважностью.

INVESTIGATION OF PULSE CURRENT OVERLOAD INFLUENCE ON POWER LIGHT EMITTING DIODES

A.G. Polishuk¹, A.N. Turkin^{1,2}, V.M. Kharitonov²*

¹PROSOFT, Profsoyuznaya Str., 108, 117437, Moscow,
phone. +7(495)2321652, e-mail: turkin@xlight.ru;

² M.V.Lomonosov Moscow State University, Department of Physics. Leninskiye Gory, MSU, Dept. of
Physics, 119899, Moscow

An investigation of power light-emitting diode structures operating at pulse current regime has been made. The contact system limiting regimes testing without its braking has been a goal of these experiments. The critical current value dependence versus its rate of rise and pulse length has been detected. The mathematical model describing the heating processes in a wire and wire-bonding structure points has been evaluated. Basing on investigation results the light-emitting diodes from one part (sorting) assembly quality estimation method by means of variable current pulse length and filling factor impact on light-emitting diode has been proposed

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА КВАНТОВ НА ЛЮМЕН-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ p-n*-n-ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФОСФИДА И НИТРИДА ГАЛЛИЯ АЛЮМИНИЯ

И.В. Рыжиков, В.С. Виноградов, А.С. Фирсов*

Московский государственный университет приборостроения и информатики,
Стромынка, 20, Москва, 107966, тел. (495) 269-46-88, e-mail: info@mgupri.ru

Исследовано воздействие нейтронов (2,65 МэВ) и гамма квантов (1,25 МэВ) на люмен-амперные и люмен-вольтовые характеристики p-n*-n-гетероструктур на основе AlInGaP и AlInGaN, излучающих в красной (R), желтой (Y), зеленой (G1 и G2) и синей (B) областях спектра с одной квантовой ямой, расположенной в высокоомной компенсированной p*-области и четырьмя квантовыми ямами в модулированной по составу и проводимости оптически активной n-области (G2).

Люмен-амперные характеристики R, G1, G2 и B гетероструктур приведены на графиках рис. 1 [1], [2]. Их можно аппроксимировать степенной зависимостью: $I_V = bI^m$.

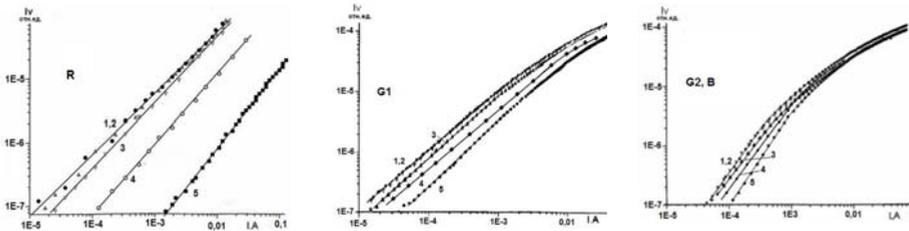


Рис. 1. Зависимость силы света от тока, флуенса нейтронного и дозы гамма облучения R, G1, G2 и B гетероструктур. Φ , н/см²; D, рад: 1 – $\Phi = 10^{12}$, D = 0; 2 – $\Phi = 10^{12}$, D = 10^6 ; 3 – D = 10^7 ; 4 – $\Phi = 10^{14}$; 5 – $\Phi = 10^{15}$

У гетероструктур с красным цветом свечения линейная зависимость силы света от тока сохранялась в широком интервале токов, флуенсов и доз облучения, а у желтых показатель степени m люмен-амперной характеристики $m \geq 1$ на экспоненциальном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) и $m \rightarrow 0,5$ на степенном участке ВАХ.

Люмен-амперные характеристики гетероструктур с зеленым (G1, G2) и синим (B) цветом свечения на экспоненциальном участке ВАХ были близки к линейным, а на степенном $m \rightarrow 0,5$. Люмен-вольтовые характеристики последних состояли из экспоненциального и степенного участков с фактором «неидеальности» первого $\beta = 1,95-2,2$ и показателем степени второго $n \approx 1,0$.

Экспериментальные вольт-люмен-амперные характеристики гетероструктур могут быть проанализированы на основе модели, предполагающей диффузионный и дрейфовый перенос носителей в компенсированном слое, преобладание безызлучательной рекомбинации носителей в этом слое и излучательной – в квантовых ямах [1].

Согласно этой модели сила света (I_V) на экспоненциальном и степенном участках ВАХ в случае линейной излучательной и безызлучательной рекомбинации имеет следующий вид:

$$I_V = \frac{\gamma_p W \tau_p}{2e \tau_p d} j; \quad I_V = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\gamma_n W}{\tau_R} \sqrt{\frac{(n_0 - p_0) \tau_p}{e(b+1)d}} \sqrt{j}, \quad (1)$$

где τ_R , τ_p – излучательное и безызлучательное время жизни носителей в квантовой яме шириной W и компенсированном слое шириной d ; γ_p , γ_n – отношение концентрации дырок и электронов в квантовой яме и компенсированном слое; n_0 и p_0 – концентрация носителей в компенсированном слое.

Экспериментальные люмен-амперные характеристики согласуются с расчетными, по крайней мере, качественно, т.к. при токах $10^{-7}-10^{-3}$ А, отвечающих холловской модели ВАХ, $I_V \sim \tau_p I$, а при токах $10^{-3}-10^{-1}$ А, отвечающих степенным участкам ВАХ, $I_V \sim \sqrt{\tau_p} \sqrt{I}$.

Полагая

$$\tau_{0p}/\tau_p = 1 + \tau_0 K_\tau \Phi, \quad (2)$$

используя экспериментальные данные и расчетные соотношения (1) и (2) нетрудно оценить величину произведения $(\tau_{0p} K_\tau)$ у красных, желтых, зеленых и синих гетероструктур: $1,2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$ (R), $2,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$ (Y), $4,0 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$ (G1), $1,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2}$ (G2) и $5,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$ (B).

Радиационная стойкость растет по мере увеличения ширины запрещенной зоны, пропорциональной энергии связи, и уровня легирования оптически активной области. Радиационная стойкость гетероструктур примерно на порядок выше стойкости светодиодов.

- [1] В.С. Абрамов, И.В. Рыжиков, Д.В. Селезнев, В.Н. Щербаков, Математическая модель светоизлучающих гетероструктур на основе твердых растворов фосфида и нитрида галлия индия алюминия, облученных нейтронами и гамма квантами// В сб. «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М.: МГАПИ.2005. Т.2. С.67-78.
- [2] В.С. Абрамов, И.В. Рыжиков, Д.В. Селезнев, В.Н. Щербаков, Исследование воздействия нейтронного и гамма облучения на вольт-люмен-амперные характеристики и параметры активной области мощных сверхярких $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ гетероструктур с красным и желтым цветом свечения// В сб. «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М.: МГАПИ.2005. Т.3. С.42-56.
- [3] В.С. Абрамов, И.В. Рыжиков, Д.В. Селезнев, В.Н. Щербаков, Воздействие нейтронного и гамма облучения на сверхяркие гетероструктуры на основе нитрида галлия индия алюминия зеленого и синего цвета свечения// В сб. «Информационные технологии в науке, технике и образовании». М.: МГАПИ.2005. Т.3. С.57-73.

THE INVESTIGATION OF NEUTRON AND GAMMA IRRADIATION ON LUMEN-AMPER CHARACTERISTICS p-n*-n-HETEROSTRUCTURES ON THE BASE OF PHOSPHIDE AND NITRIDE GALLIUM, INDIUM, ALUMINIUM

I.V. Rizhikov, V.S. Vinogradov, A.S. Firsov*

The Moscow state university of instrument making and computer science,
Stromynka, 20, Moscow, 107966, phone (495) 269-46-88, e-mail: info@mgupi.ru

The lumen-ampere and lumen-volt characteristics AlInGaP and AlInGaN heterojunctions emitting light in red (R), yellow (Y), green (G) and blue (B) region spectra were studied before and after 2,65 MeV neutron and gamma quants (1,25 MeV) irradiation.

The experimental result may be interpreted in terms of a model of light emitting heterojunction, containing a high-ohmic compensated layer and one or some quantum wells in this layer or in resistively modulated optically active region.

Decrease in light intensities under irradiation occurred, predominantly, due on life time degradation in the compensated region.

On base of experimental results and mathematical model p-n*-n-structure were estimated life damage constants $(K_\tau \tau_{0p})$: $1,2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{n}$ for R, $2,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{n}$ for Y, $4,0 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{H}$ for G1, $1,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2/\text{H}$ for G2 and $5,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{H}$ for B structures.

ВЫСОКАЯ КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИНИХ СВЕТОДИОДОВ - СЛАГАЕМЫЕ УСПЕХА

Н.М. Шмидт¹, М.Г. Агапов², Е.В. Богданова¹, А.А. Грешинов¹, А.Л. Закгейм¹, Д.А. Лавринович², В.В. Ратников¹, О.А. Солтанович³, А.Е. Черняков¹, В.А. Уелин², Е.Б. Якимов³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, Политехническая ул., 26, 194021 Санкт-Петербург, тел.2927193, natalia.shmidt@mail.ioffe.ru

² ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника», Россия, 194156 Санкт-Петербург, а/я 78

³ Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, 142432 Черноголовка

Начиная с 2003г., предложенный фирмой OSRAM новый подход в технологии сборки (thin GaN-technology) светодиодов (СД) обеспечил эффективность вывода света до 75% и позволил ведущим фирмам за эти несколько лет достигнуть на чипах коммерческих светодиодов значений внешней квантовой эффективности (ВКЭ) до 40% и мощности излучения 1 Вт. Является ли этот новый подход единственным фактором определяющим успех решения проблемы получения мощных источников белого света на основе синих светодиодов? Для ответа на этот вопрос были проведены экспериментальные исследования С-V, I-V характеристик и зависимостей внешней квантовой эффективности (ВКЭ) от тока коммерческих СД разных фирм в том числе СД фирмы Cree, а также отечественных СД, произведенных ЗАО «Светлана». Все СД были получены методом эпитаксии из металлоорганических соединений на основе квантовых ям (КЯ) InGaN/GaN на длину волны 450-460 нм.

Проведенные исследования показали, что типичным для всех СД, кроме СД фирмы Cree, является то, что при нулевом смещения только часть КЯ оказывается в области объемного заряда. В результате на части СД уже при смещении 2 В в прямом направлении все ямы лежат вне области объемного заряда. На таких СД наблюдаются минимальные значения ВКЭ 14% (без линз) и слабая зависимость от плотности тока вплоть до 100 А/см² (Рис.1, кривая 1). Для СД, имеющих при этих смещениях хотя бы 1 КЯ, расположенную в области объемного заряда, как правило, наблюдается максимум ВКЭ 20-22% без линз (до 30% с линзами при традиционной сборке по технологии flip-chip) с последующим падением ВКЭ с ростом плотности тока (Рис.1, кривая3). При этом наиболее сильное падение ВКЭ при плотностях тока меньших 50 А/см² наблюдается на СД с повышенным динамическим сопротивлением (причины будут обсуждаться в докладе) и перелегированными p⁺ областями (Рис.1, кривая 2). Максимальные значения ВКЭ 36-40% без линз, но с применением новой технологии сборки, получены при плотностях тока меньших 50 А/см² на коммерческих СД фирмы Cree (Рис.1, кривая 4) и слабое падение значений ВКЭ около 10% с ростом тока. Результаты исследования С-V характеристик и профиля распределения носителей на этих СД при T = 77-300K (Рис.2) показали, что фирмой Cree использована не только новая технология сборки, но и новый дизайн активной области. Размеры КЯ активной области не превышают 10 нм, ямы являются туннельно-связанными, а профиль легирования области, прилегающей к ямам обеспечивает расположение ям в области объемного заряда при рабочих напряжениях. Можно было бы ожидать, что решение проблемы мощных СД найдено. Однако, начиная с плотностей тока 80 А/см² падение значений ВКЭ увеличивается и при плотностях 200А/см² достигает почти 50% в статике и 39% на импульсах (Рис.1, кривая 4). В серии работ, представленных фирмой Lumileds, падение ВКЭ при плотностях тока выше 100 А/см² связывают с Оже-процессом в ямах и экспериментально показывают, что использование двойной гетероструктуры с толщиной твердого раствора 8-10 нм в сочетании с новой технологией сборки позволяет избежать падения ВКЭ при больших плотностях тока и получить при плотности тока 250 А/см² значения ВКЭ 40% и излучаемую мощность 2.3 Вт в импульсном режиме. В работе Nakamura слабое падение ВКЭ (максимальное значение ВКЭ - 37%) получено на СД, выращенных на сапфире и имеющих 5 ям, правда с нестандартным соотношением толщин ям и барьеров 8/18 нм. Автор объясняет свои рекорды использованием m-плоскости сапфира. Однако, и в той и другой работе все рекорды получены при использовании твердых растворов малого состава на длины волн 432 нм (Lumileds), и 407 нм (Nakamura). Переход к более широкозонным твердым растворам и их толщинам более 7 нм представляется вполне логичным. Согласно теоретическим и экспериментальным работам наших соотечественников (Зегря Г.Г., Ясневич И.Н., Халфин В.П., Соколова З.Н.), выполненных на более узкозонных твердых растворах Al³B⁵ переход к более широкозонным твердым раствором во многих случаях изменяет на порядок значения коэффициентов Оже-рекомбинации, а увеличение толщины КЯ более 7 нм позволяет избежать развития беспорогового Оже-процесса, вероятность протекания которого велика в КЯ с размерами меньше 5 нм. Кроме того, авторами работ с рекордными результатами и в проспектах фирмы Cree отмечается улучшенное качество материала СД. Действительно, исследование I-V

характеристик СД фирмы Cree в диапазоне напряжений 0.1 – 4 В показали, что значения токов утечки этих СД на несколько порядков ниже, чем у коммерческих СД других фирм. Ранее было показано и докладывалось на 4 и 5-ой Всероссийских конференциях по нитридам о том, что этот параметр тесно связан с совершенством наноструктурной организации материала, которое во многом определяет эффективность излучательной рекомбинации СД. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют предполагать, что важными слагаемыми успеха в получении высоко эффективных мощных СД для белых источников света наряду с использованием новой технология сборки, являются улучшение упорядоченности наноматериала СД, использование нового дизайна активной области, обеспечивающего расположение MQW в обедненной области при рабочих напряжениях, использование более широко зонных твердых растворов InGaN с толщиной более 7 нм, позволяющее снизить потери на Оже-рекомбинацию.

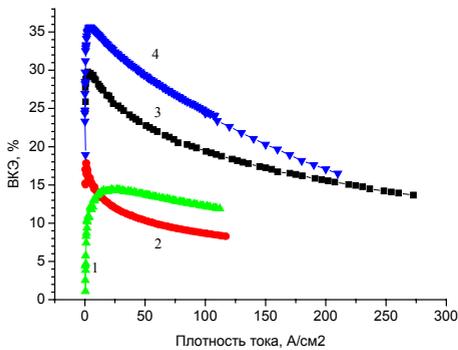


Рис.1. Зависимость ВКЭ СД от тока:
 1 - СД без линз ЗАО «Светлана»;
 2 - СД «Емсоге» без линз;
 3 - СД с линзами ЗАО «Светлана»;
 4 - СД «Срее» без линз

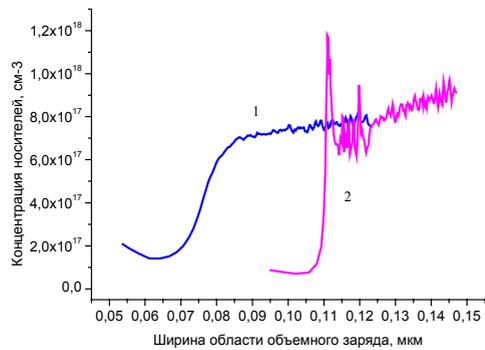


Рис.2 Профиль распределения носителей заряда в СД «Срее» при разных температурах:
 1- 300К, 2- 77К

THE COMPONENTS DETERMINANT PROGRESS IN CREATION BLUE LEDs WITH HIGH EXTERNAL QUANTUM EFFICIENCY

N.M. Schmidt¹, M.G. Agapov², E.V. Bogdanova¹, A.A. Greshnov¹, A.E. Chernyakov¹, D.A. Lavrinovich², A.L. Zakgeim¹, V.V. Ratnikov¹, O.A. Soltanovich³, V.V. Uelin², E.B. Yakimov³

¹ A.F.Ioffe Physico-Technical Institute RAS, 26 Politechnicheskaya str., 194021 St.-Petersburg, Russia, natalia.shmidt@mail.ioffe.ru

² Svetlana-Optoelectronics, P.B. 78, 194156 St.-Petersburg, Russia

³ Institute of Microelectronics Technology RAS, Chernogolovka, Russia

C-V, I-V and quantum efficiency -current dependences of InGaN/GaN light-emitting diodes (LEDs) from different firms including Cree and Svetlana optoelectronic have been investigated.

The results obtained allow to conclude that progress in creation LEDs with high external efficiency 40% is determined not only new package technology (thin GaN technology), but also new design of active region with narrow barriers and more wide gap of solid solution InGaN with thickness 8-10 nm. Both last components allow decrease Auger recombination intensity in active region and in result to avoid the drop of external quantum efficiency (QE) values under high current density 200A/cm². New design of active region secures the MQW deposition at depletion region at operating voltage and allows to obtain high QE values.

ФЛИП-ЧИП СВЕТОДИОДЫ AlGaInN С *p*-КОНТАКТОМ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ITO

И.П. Смирнова, Л.К. Марков, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина, А.С. Павлюченко*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург

*e-mail: irina@quantum.ioffe.ru

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области повышения эффективности светодиодов на основе AlGaInN, увеличение внешней квантовой эффективности остается основной задачей при разработке светодиодов большой мощности, предназначенных для использования в качестве источников белого света. В светодиодах на основе гетероструктур AlGaInN, чаще всего выращенных на подложках из сапфира, эффективность вывода излучения ограничена эффектом полного внутреннего отражения генерируемого света на границах полупроводника с воздухом и с подложкой. Действенными способами повышения эффективности вывода генерируемого излучения являются создание отражающих контактов и применение обращенной (флип-чип) конструкции [1,2], а также формирование оптических неоднородностей в структуре прибора, в частности, рассеивающего свет микрорельефа на поверхности светодиодного кристалла.

Как неоднократно отмечалось [3,4], необходимость получения высокой оптической мощности и эффективности накладывает серьезные требования не только на качество эпитаксиальной структуры AlGaInN и конструкцию светодиодного кристалла, но и на качество и оптимизацию всех технологических этапов изготовления эффективных светодиодов, в частности, на омический контакт к слою *p*-GaN. Для полупрозрачных *p*-контактов в ряде случаев применяются пленки оксидов индия и олова (Indium Tin Oxide, или ITO), обладающие более высоким коэффициентом пропускания по сравнению с тонкими металлическими слоями. В настоящей работе исследовались оптические и электрические свойства пленок ITO с целью их использования для отражающего *p*-контакта в светодиодах флип-чип конструкции. Отдельное внимание было уделено созданию на поверхности пленок ITO рассеивающего свет микрорельефа. Ранее нами были представлены результаты по созданию рассеивающего свет микрорельефа непосредственно на поверхности слоя *p*-GaN [5]. Но из-за малой толщины *p*-слоя в светодиодных гетероструктурах AlGaInN и, как следствие, из-за возникающих утечек, использование разработанной методики весьма ограничено. Поэтому, применение пленок ITO в качестве контакта к слою *p*-GaN представляется перспективным с точки зрения возможности создания на поверхности пленок рассеивающего микрорельефа.

Для нанесения пленок ITO применялся метод электронно-лучевого испарения, использовались два типа исходных гранул: стандартные (желтые, ITOyellow) и синтерированные в вакууме (черные, ITOblack).

Для оценки отражательной способности контактов и определения оптимальных толщин слоев на стандартные покровные стекла толщиной 0,17 мм наносились слои ITO различной толщины: 2, 5, 10 и 70 нм, которые сверху закрывались слоем серебра толщиной 220 нм. Отражательная способность покрытий определялась путем сравнения с отражением от тестового образца. Тестовый образец представлял собой слой серебра толщиной 220 нм, нанесенный на стекло без пленки ITO. Излучение синего светодиода с длиной волны 470 нм фокусировалось на образце, и после отражения от него регистрировалось фотоприемником. Результаты экспериментов сравнивались с отражением от стандартной комбинации металлов, используемой нами для изготовления отражающего контакта к слою *p*-GaN [3,4]: 1.5 нм никеля и 220 нм серебра. Было установлено, что отражательная способность контакта Ni(1.5нм)/Ag(220нм) приблизительно соответствует отражательной способности комбинации ITO (10нм)/Ag (220нм). Таким образом, используя контакты с меньшими толщинами пленок ITO, можно получить выигрыш в отражении и, соответственно, увеличение внешней квантовой эффективности светодиода. Для изготовления отражающих контактов была выбрана комбинация ITO (5нм)/Ag (220нм).

Были изготовлены светодиодные кристаллы, площадью 350x470 мкм², со следующими отражающими *p*-контактами: ITOyellow (5нм)/Ag (220нм), ITOblack (5нм)/Ag (220нм) и Ni (1.5нм)/Ag (220нм). В качестве *n*-контакта использовалась система Ti/Ag. Было проведено сравнение оптических и электрических характеристик изготовленных кристаллов. Измерения проводились до разделения пластины на отдельные чипы. На Рис. 1 приведены зависимости внешней квантовой эффективности кристаллов от тока накачки. Из рисунка видно, что применение пленок ITO в качестве первого слоя в двухслойной системе *p*-контакта позволяет существенно (~15%) увеличить значение внешней эффективности светодиодов. Сравнение вольт-амперных характеристик (ВАХ) показало, что прямые падения напряжения для контакта ITOyellow (5нм)/Ag (220нм) меньше аналогичных величин для кристаллов со стандартным

контактом Ni/Ag и составляют менее 2.9 В при токе $I = 20$ мА. ВАХ для кристаллов с p -контактом ITOblack(5нм)/Ag(220нм) были несколько хуже.

В качестве первого подхода для создания рассеивающего свет микрорельефа было применено ионное травление пленок ITO в аргоновой плазме при различных значениях мощности разряда, давления газа и времени травления. Показано, что, изменяя параметры ионного травления, можно получать пленки с различным микрорельефом на поверхности (Рис. 2). В дальнейшем мы планируем исследовать светодиодные кристаллы, в которых используются слои ITO с различным характерным микрорельефом, и оценить влияние параметров этого микрорельефа на величину внешней квантовой эффективности светодиодов.

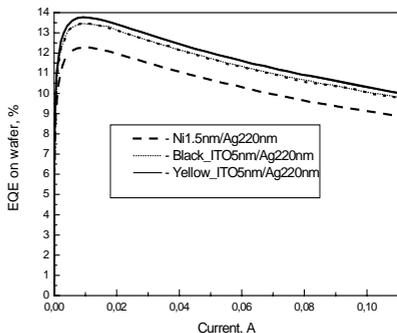


Рис. 1. Зависимость внешней квантовой эффективности от тока накачки

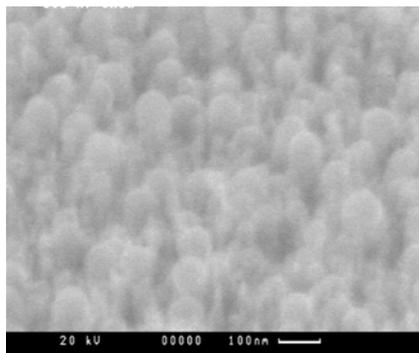


Рис. 2. Микрофотография поверхности пленки ITO после сухого травления в аргоновой плазме

- [1] J. Wierer, D. Steigewald, M.R. Krames, *et al. Appl.Phys.Lett.* **78**, 3379 (2001)
- [2] D.A.Zakheim, I.P.Smirnova, E.M.Arakcheeva, *et al. Physica status solidi (c)* **1**, 2401 (2004).
- [3] Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский и др. *ФТП* **39**, 885 (2005).
- [4] И.П.Смирнова и др. Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы. Тезисы докладов 5-й Всероссийской конференции, с.63 (Москва, 2007).
- [5] И.П.Смирнова, Д.А.Закгейм, и др. Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы. Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции, с.134 (С.Петербург, 2005).

FLIP-CHIP AlGaInN-BASED LEDs WITH INDIUM TIN OXIDE p -CONTACTS

I.P.Smirnova, *L.K.Markov, E.M.Arakcheeva, M.M.Kulagina, A.S.Pavlyuchenko*

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, RAS, 194021 St. Petersburg

*e-mail: irina@quantum.ioffe.ru

In this work, we study the optical and electrical properties of thin indium tin oxide (ITO) films to apply them as a reflective p -contact in flip-chip AlGaInN-based LEDs. It was shown that the reflectivity of ITO(5nm)/Ag(220nm) coating was significantly higher than that for the standard Ni(1.5nm)/Ag(220nm) contact. The LED chips with ITO(5nm)/Ag(220nm) as a reflective p -contact showed an increase in the external quantum efficiency by 15% and lower values of the forward voltage. ITO films are also promising for producing a microroughed surface on their tops. It was shown that an appropriate choice of the ion etching parameters allowed us to obtain the relief providing better conditions of the light extraction. A use of the microroughed ITO films for p -contacts can lead to a further increase in the LED external efficiency.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ФТОРИДНО-ОКСИДНЫЕ ФОТОЛЮМИНОФОРЫ ДЛЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ In-Ga-N СТРУКТУР

Сошин Н.П.¹, Ло Вей Хун², P.Tsai²

¹ФГУП 'НИИ Платан' Заводской проезд д 2 .141195 Фрязино Моск.обл.Россия

Тел: +7(495)456 8888, E-mail: soschin@mail.ru;

²Yanotech Co,1F, Building B,NO.18,Lane 1305,Rd .HuaJing,Dist. Xuhui, Shanghai, China(200231)

Оксидные редкоземельные люминофоры со структурой граната являются одними из важнейших материалов в производстве холодно и тепло белых светодиодов на основе полупроводниковых структур из In-Ga-N. Алюмо-иттриевый гранат $Y_2Al_5O_{12}:Ce$, UAG:Ce, алумотербиевый гранат $(Tb,Ln)_3Al_5O_{12}:Ce$ ($Ln=Y,Gd,Lu$) и твердые растворы между $Y_3(Al,Ga)_5O_{12}$, $Gd_3Al_5O_{12}$ и $Lu_3Al_5O_{12}$ составляют основу этих широко используемых люминофоров. Варьируя содержание Y, Gd, Lu, Tb, Al, Ga в основании материалов, удается в широких пределах изменять их параметры:

- положение максимума излучения от $\lambda_{max}=538nm$ до $\lambda_{max}=590nm$,
- полуширину спектра излучения $\lambda_{0.5}$ от $\lambda=120nm$ до $\lambda=132nm$
- коррелированную цветовую температуру излучения от $T=2800K$ до $T=10000K$,
- дисперсность гранулометрического состава от $d_{50}=1.5\mu$ до $d_{50}=8\mu$.

В современных светодиодах материалы типа ФЛЖ (Фрязино) или YAG-1 (Шанхай) обеспечивают световые потоки в сотню люмен и эффективность до 100 люмен/Вт.в рабочем режиме с $W=1$ Вт [1,2,3].

За рубежами России применение этих материалов, известных в катодной электронике и ядерной физике еще с 1965 года, неоправданно юридически ограничивается вследствие недоказанных нарушений правовых претензий одной из компаний.

В нашей работе описана принципиально новая фторидно-оксидная модификация люминофоров со структурой граната, имеющая общую стехиометрическую формулу $(\sum Ln)_3Al_2[AlO_{4-x}\{Fx\}]_3$, где $Ln=Yu$ или Gd , и/или Tb , и /или Lu , и /или Eu , и /или Sm . Синтез подобной двухлигандной композиции был проведен методами контролируемого расплавленного спекания из наноразмерного сырья высокой чистоты (4N) в восстановительно-фторирующей атмосфере (H_2+N_2+HF) при температурах от $1200^\circ-1500^\circ C$. В подобных условиях достигается замена до 25% O^{2-} ионов на фторидные ионы F^{-1} , которые по расчетам детального равновесия точечных дефектов должны находиться как в узлах, так и в междуузлиях $Al(O,F)$ тетраэдров. Для иттриевого фторидно -кислородного граната с активацией $[Ce]=0.03$ атомной доли получено значение параметра кристаллической кубической решетки при $[F]=x=1$ $a=11.9601-11.9708$ А в сравнении с $a=12.1$ А для стандартного материала.

Получены также гранатные материалы $(Lu,Ce)_3Al_2[Al(O_{3.5}F_{0.5})]_3$, $(Gd,Ce)_3Al_2[Al(O_{3.2}F_{0.8})]_3$ и ранее не синтезируемые гранаты лантановой подгруппы $(La,Ce)_3Al_2[Al(O_{3.6}F_{0.4})]_3$; $(La,Ce,Pr)_3Al_2[Al(O_{3.8}F_{0.2})]_3$ и т.д.

Иттрий - содержащие композиции $(Y,Ce)Al_2[Al(O_{3.5}F)]_3$ могут быть активированы церием в пределах концентрации $[Ce]=1.5-3\%$ атомных доли и по своим параметрам существенно отличаются от стандартного YAG :Ce:

- коротковолновым сдвигом края возбуждения с $\lambda=470nm$ до $\lambda=462nm$,
- коротковолновым сдвигом положения спектрального максимума от $\lambda_{max}=548nm$ до $\lambda_{max}=531nm$,
- существенным сужением на 10-12 нанометров спектральной полосы излучения,
- увеличением вдвое коэффициента поглощения первичного синего излучения ,
- четко наблюдаемой длинноволновой асимметрией на 12-15nm спектральной полосы излучения,
- зависимостью этих параметров от соотношения между концентрациями O^{2-}/F^{-1} в основании люминофора.

Особенностью предложенного метода синтеза является получение конечного продукта в виде неагломерированных монокристаллических микрочерен. имеющих близкую к естественному гранату морфологию в виде тетрагонтриоктаэдров или ромбододекаэдров. На поверхности зерен в процессе их финишной обработки формируется наноразмерная пленка силикатов(100 nm). увеличивающая взаимную адгезию зерен и полимерного связующего в люминофорном конвертере СИД.

Синтезированные в условиях оптимального технологического процесса фторидно-оксидные гранаты имели высокую квантовую эффективность $\zeta \geq 0.97$; при узкой спектральной полосе с $\lambda_{0.5} = 110$ нм и положении спектрального максимума $\lambda_{max} = 552$ нм это обеспечивает люмен-эквивалент излучения люминофора $Q = 380-400$ люмен/св Ватт в сравнении со значением для стандартного люминофора $Q_1 = 318-325$ люмен/св.Ватт.

Промышленные партии фторидно-оксидного люминофора в производстве холодно-белых светодиодов на основе структур In-Ga-N с низким температурным сопротивлением обеспечили силу света $J = 126$ кд для $2\theta = 60^\circ$ и световой поток от $F = 100$ люмен до $F = 106$ люмен при рассеиваемой электрической мощности $W = 1$ Ватт. В режиме с $W = 0.5$ вт -- 0.25 вт -- 0.1 вт. световой поток от белых светодиодов с координатами цветности $X = 0.34$, $y = 0.346$ составил соответственно $F_{0.5} = 56$ люмен, $F_{0.25} = 31$ люмен и $F_{0.1} = 14.6$ люмен, а световая отдача соответственно $\zeta_{0.5} = 112$ люмен/Вт, $\zeta_{0.25} = 124$ люмен/Вт, $\zeta_{0.1} = 146$ люмен/Вт.

После первых 2500 часов испытания на долговечность сила света холодно белых светодиодов возрастает на 3-12%. координаты цветности и цветовая температура в режиме старения не изменяются. При нагревании приборов до $125-150^\circ\text{C}$. в течении 10 минут сила света его излучения уменьшается на 10-12% при сохранении постоянными координат цветности свечения и цветовой температуры.

Увеличение атомной доли гадолиния до 0.90 по отношению к 0.1 доли иттрия необходимо при синтезе гранатов с оранжевым свечением, создающим тепло-белые оттенки излучения в светодиодах. Для этого был разработан гадолиний фторидно-оксидный гранат $(\text{Gd}_{0.87}\text{Y}_{0.1}\text{Ce})_3\text{Al}_2[\text{Al}(\text{O}_{4-x}\text{F}_x)]_3$. Сужение основной полосы излучения до $\lambda_{0.5} = 116-120$ нанометров достигалось при этом увеличенной концентрацией вводимого фтор-иона. Материал имел доминирующую длину волны $\lambda_d = 584-588$ нанометров, а для двухактиваторных составов (Ce.Pr) $\lambda_d = 609$ нанометров. Фторирование сопровождается при этом значительным увеличением термической устойчивости излучения тепло белого фотолюминофора. Световой поток тепло-белых приборов составил более 80 люмен, а световая отдача более 80 лм./Вт при цветовой температуре в 3000К.

Организовано массовое производство новых фторидно-оксидных гранатных фотолюминофоров.

- [1] Мощные светодиоды белого свечения с световым потоком до 300 лм и световой отдачей до 70лм/Ватт. Коган Л.М. Гальчина Н.А.,Рассохин И.Т. Сочи.Н.П.Тезисы докладов5-й Всероссийской конференции"Нитриды галлия, индия, алюминия – структуры и приборы".стр. 57-58.
- [2] Сравнительные характеристики различных классов фотолюминофоров для белых СИД Сошин Н. П. Там же, стр 59-60.
- [3] Мощные белые светодиоды с улучшенной до 100 люмен. Вт светоотдачей. Гальчина Н.А.Коган Л.М Полищук А.Г.Россохин И.Т, Сошин НП, Юнович А.Э, Светотехника.2007. №3 .стр24-26.

GARNET STRUCTURE FLUORIDE-OXIDE PHOTOLUMINESCENT PHOSPHORS FOR WHITE LIGHT-EMITTING DIODES

N.Soschin¹, Luo Weihong², P.Tsai²,

¹Platan”R&DI ,Fryazino,Russia ,E-mail: soschin@mail.ru

²Yanotech Co,1F, Building B,NO.18,Lane 1305,Rd .HuaJing,Dist. Xuhui, Shanghai, China(200231)

We have prepared different modifications of new fluoride-oxide phosphor materials with a general formula $(\Sigma\text{Lu})_3\text{Al}_2(\text{AlO}_{4-x}\{\text{F}\}_x)_3$. Synthesis of these one-phase compositions was conducted by a method of preliminary deposition or nanosized solid-state sintering in a controlled reducing-fluorening atmosphere ($\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{HF}$). Y, Gd, Lu, Tb, Yb compositions were obtained with up to 25% O^{2-} anion sites substituted by F^{-1} ions. The heterovalent substitution was followed by entering one more F^{-1} ion into interstitial space of $\text{Al}(\text{O},\text{F})_4$ tetrahedron. The synthesized materials have a cubical lattice with a lattice parameter $d = 11.96-11.97\text{\AA}$ for an yttrium composition in which up to 10% oxygen are substituted for fluorine.

On the basis of fluoride-oxide phosphors the cold-white light-emitting diodes with $I = 100000$ mcd and light output $\eta > 124$ lm/W were fabricated.

СВЕТОДИОДЫ ТЕПЛОГО БЕЛОГО СВЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ p-n- ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaN/AlGaIn/GaN, ПОКРЫТЫХ ЛЮМИНОФОРАМИ ИЗ ИТТРИЙ-ГАДОЛИНИЕВЫХ ГРАНАТОВ

Н.П.Сощин¹, Н.А.Гальчина², Л.М. Козан², С.С. Широков³ А.Э. Юнович³*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие "НИИ "Платан", 141190 гор. Фрязино.

² Научно-производственный центр оптико-электронных приборов «ОПТЭЛ», 105187 Москва.

³ Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова (физ. фак-т), 119991 Москва.
soschin@pochta.ru

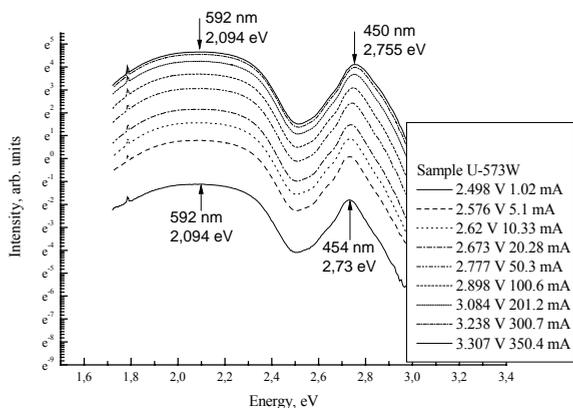
Изучены спектры электролюминесценции и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе p-n- гетероструктур типа InGaIn/AlGaIn/GaN с синим излучением ($\lambda_{\text{max}} \approx 460$ нм), покрытых люминофорами, активированными ионами Ce^{3+} . Синтезированы и описаны люминофоры типа алюминий-гадолиний-иттриевых гранатов со сдвигом максимума излучения в оранжевую область спектра. Максимум в спектрах их возбуждения изменяется в пределах 460-470 нм; спектры люминесценции имеют максимумы от 530 до 590 нм и ширину на половине интенсивности от 120 до 135 нм, в зависимости от состава соединений. Подбор отношения интенсивностей синей и желто-оранжевой полос позволяет сдвинуть координаты цветности белых светодиодов в область "теплого" свечения с коррелированной цветовой температурой до 3000 К и индексом цветопередачи до 70.

Одним из механизмов длинноволнового сдвига излучения Ce^{3+} в гранатах является изоморфное замещение большей доли иона Y^{3+} в катионной подрешетке на ион Gd^{3+} . Ионные радиусы этих элементов при координационном числе $k=6$ равны, соответственно, $\tau_{\text{Y}}=0,97$ Å и $\tau_{\text{Gd}}=0,94$ Å, что указывает на возможность образования в ряду $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ - $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ не распадающихся твердых растворов. Созданы люминофоры составов $(\text{Gd}_{0,62}\text{Y}_{0,35}\text{Ce}_{0,03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $(\text{Gd}_{0,97}\text{Ce}_{0,03})\text{Al}_5\text{O}_{12}$, с параметрами решеток $a=12,068$ Å и $a=12,02$ Å. Длинноволновый сдвиг максимума в спектрах люминесценции составлял для первого из этих составов 571-535=36 нм, а для второго 583-535=48 нм. Ширина спектров увеличивалась до 128 - 133 нм.

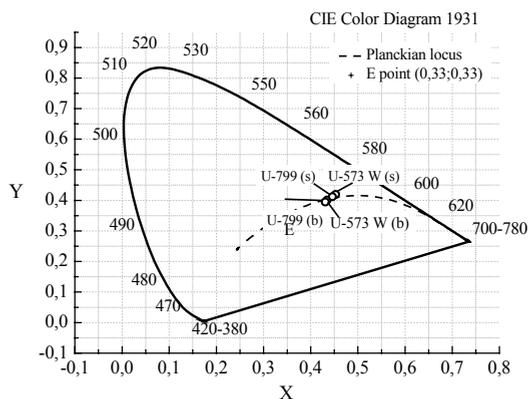
Спектры электролюминесценции белых СД для люминофора $(\text{Gd}_{0,92}\text{Y}_{0,05}\text{Ce}_{0,03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ в зависимости от тока представлены на рис. 1а. В спектрах наблюдается 2 максимума интенсивности излучения. Максимум на длине волны 450 – 456 нм соответствует излучению кристалла СД, а максимум на длине волны ≈ 590 нм соответствует излучению люминофора. Следует отметить, что отношение интенсивностей пиков СД и люминофора всегда меньше единицы. Этот параметр существенно влияет на цветовые характеристики СД.

На цветовой диаграмме МКО-1931 (рис. 1б) показаны координаты цветности образцов светодиодов с люминофорами $(\text{Gd}_{0,62}\text{Y}_{0,35}\text{Ce}_{0,03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ и $(\text{Gd}_{0,97}\text{Ce}_{0,03})\text{Al}_5\text{O}_{12}$ при большом и малом токе инжекции. Коррелированная цветовая температура составляла 2860-3010 К. Световая эффективность (люмен - эквивалент) этих образцов при токе $J = 350$ мА составляет 355 ± 2 лм/Вт, общие индексы цветопередачи 67. Абсолютные значения мощности излучения при токе 25 мА, измеренные с помощью интегрирующей сферы, составляли 9,9 мВт. Это соответствует к.п.д. 14.6%, световому потоку 3.55 лм и световой отдаче 52 лм/Вт. При токе 350 мА значения мощности излучения и светового потока для образца 573 W, рассчитанные из зависимости интегральной интенсивности спектров излучения от тока, составляли 82 мВт и 30 лм. Это соответствует световой отдаче 25 лм/Вт.

Выбор «чипов» и технологии нанесения описанных люминофоров позволяет получить образцы белых светодиодов с указанными цветовыми характеристиками со световой отдачей до 40-50 лм/Вт при токе 350 мА.



(a)



(б)

Рис. 1 (а) Спектры электролюминесценции образца У-573 Бл, созданного на основе люминофора $(\text{Gd}_{0.62}\text{Y}_{0.35}\text{Ce}_{0.03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, в зависимости от тока. (б) Положение координат цветности образцов У-573 Бл и У-799 (на основе $(\text{Gd}_{0.97}\text{Ce}_{0.03})\text{Al}_5\text{O}_{12}$) при малом и рабочем токе на цветовой диаграмме МКО 1931 г (индекс «s» означает малый ток, а «b» - рабочий).

WARM WHITE LEDs BASED ON InGaN/AlGaIn/GaN p-n- HETEROSTRUCTURES COVERED WITH GARNETE PHOSPHORS

N.P.Soschin^{1*}, *N.A.Galchina*², *L.M.Kogan*², *S.S.Shirokov*³, *A.E.Yunovich*³

¹Research Institute "Platan", 141190 Moscow, Russia

²"Optel Center", 105187 Moscow, Russia

³M.V.Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, 119899 Moscow, Russia

soschin@pochta.ru

Electroluminescence spectra of light emitting diodes (LED) based on InGaN/AlGaIn/GaN p-n-heterostructures covered by Yttrium-Gadolinium garnet phosphors were studied. These phosphors were activated by Ce^{3+} . Color temperature of these samples increased from 2860 K to 3010 K with current increase from 1 mA to 350 mA. Power and luminous flux were 82 mW and 30 lm at 350 mA. Color coordinates placed in the region of "warm" white light (0,453; 0,419) – (0,431; 0,394) and color rendering index is up to 70. The luminous efficacy of the best LEDs was 40-50 lm/W at 350 K

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЗРАЧНОГО ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА Au/BeO НА P-GaN

А.И. Стогний^{1}, Н.Н. Новицкий¹, Е.В. Луценко², А.С. Шуленков³, А.В. Беспалов⁴, А.А. Евдокимов⁴*

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П.Бровки 19, 220072, г. Минск,
тел. +375(17)284-13-06, e-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

²ГНУ Институт физики им. Б.И.Степанова, пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск.

³УП Минский НИИ радиоматериалов, ул. Кижеватова 86, 220024 г. Минск.

⁴Московский государственный институт радиоэлектроники, электроники автоматики (ГУ)

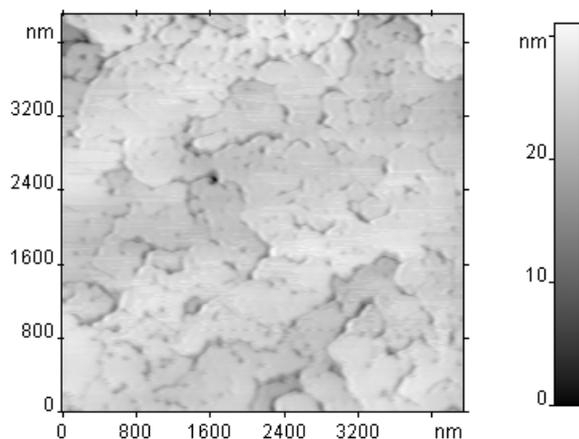
Омические контакты к эпитаксиальным слоям p-GaN светодиодных и детекторных структур должны быть прозрачными в требуемом спектральном диапазоне, иметь низкие значения контактного сопротивления, обеспечивать механическую прочность и обладать термостабильными свойствами в условиях длительной эксплуатации. Стандартные методы металлизации, состоящие в подборе состава многослойных контактных пленочных структур и определении условий их отжига, не позволяют удовлетворить перечисленным требованиям. В связи с этим предложены методы изготовления прозрачных омических контактов наноразмерной толщины к эпитаксиальным слоям на основе p-GaN, заключающиеся в увеличении концентрации легирующей примеси в приконтактных областях и применении металлов, образующих при термообработке оптически прозрачные химические соединения, способствующие уменьшению высоты потенциального барьера на границе контакта с поверхностью слоя p-GaN [1, 2].

Контактная структура формировалась следующим образом. Поверхности подложек в течение 20–30 минут очищались потоком ионов азота с максимальной энергией 180 эВ и средней энергией ~120 эВ, потом через сеточные источники ионов с холодным полым катодом напускался кислород и проводилось предварительное нанесение слоев на образец-спутник в течение одной–двух минут для золота и десяти–пятнадцати минут для бериллия. Далее позиционировались рабочие образцы, нагретые до температуры 350...370°C, и на их поверхность последовательно наносились слой золота со средней скоростью 2,2 нм/мин и слой оксида бериллия со скоростью 0,6 нм/мин. Толщина нанесенных слоев оценивалась на основе сравнения спектров пропускания и значений поверхностного сопротивления полученных контактных структур со значениями эталонных образцов, толщина слоев которых измерялась при помощи атомно-силового микроскопа [3].

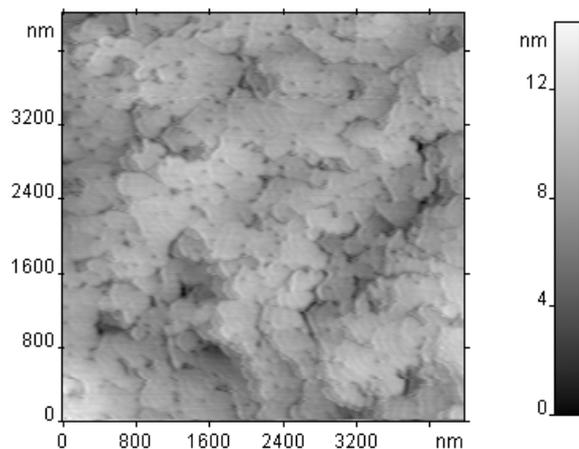
Измерения показали, что оптимальная структура имеет вид BeO (3нм)/Au (4нм)/BeO (3нм)/p-GaN, а оптимальное значение температуры составляет 350...370°C, контактное сопротивление после нанесения составляет 6×10^{-4} Ом·см, после выдержки на воздухе в течение 24 часов при температуре 550°C растёт до $2,4 \times 10^{-3}$, при этом коэффициент термостабильности равен 4, а прозрачность на длине волны 460 нм составляет 78%. При меньших значениях толщины нижнего слоя оксида бериллия нарушается омический характер вольт-амперной характеристики контакта, а при большей толщине наблюдался быстрый рост контактного сопротивления. Толщина верхнего слоя оксида бериллия наименее критично влияет на свойства контактной структуры. Однако, исследования методом атомно-силовой микроскопии показали, что среднеквадратическая шероховатость поверхности образцов после термоиспытаний увеличивается для пленок бериллия толщиной менее 3 нм, а для пленок большей толщины остается практически неизменной. Толщина пленки золота наиболее критично влияет на свойства контактной структуры. Пленка толщиной менее 3 нм имела островковый вид после термоиспытаний, что приводило к деградации контактной структуры. Оптическое пропускание в диапазоне толщин золота от 3 нм до 6 нм уменьшалось по нелинейному закону, а поверхностное сопротивление уменьшалось по линейному закону. Оптимальное значение толщины пленки золота составило примерно 4 нм.

Оптимальный интервал температуры нагрева образцов составил 350...370°C, т.к. при больших температурах пленки оксида бериллия после осаждения имели островковый вид, что нарушало омический характер проводимости контактной структуры. При меньших значениях температуры нагрева образцов наблюдалось увеличение поверхностного сопротивления контактной структуры и, кроме того, в процессе испытаний на термостабильность контактное сопротивление возрастало более чем на порядок уже после первых десяти часов выдержки.

- [1] Jang H.W., Kim K.J.H., Kim J.K., Hwang S.-W., Yang J.J., Lee K.J., Son S.-J., Lee J.-L. Appl. Phys. Lett. **79**, 1822 (2001).
- [2] Патент US6287947 Method of forming transparent contacts to a p-type GaN layer, Maranowski Steven A (US), et.al, STEIGER-WALD DANIEL A (US).
- [3] Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Тушина С.Д., Калининков С.В. ЖТФ. **73**(6), 86 (2003).



АСМ-изображение поверхности нитрида галлия после очистки потоком ионов азота



АСМ-изображение поверхности нитрида галлия с нанесённым контактом

ION-BEAM FORMATION OF TRANSPARENCY OHMIC CONTACT BEO/Au/BeO TO P-TYPE GaN

A.I. Stognij^{1}, N.N. Novitski¹, E.V. Lutsenko², A.S. Shulenkov³, A.V. Bepalov⁴, A.A. Evdokimov⁴*

¹SSPA «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus», Brovki str. 19, 220072 Minsk tel. +375(17)284-13-06, e-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

²Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus Nezavisimosti Ave, 68, 220072, Minsk.

³Unitary Enterprise «Minsk Research Institute of Radiomaterials», Kizhevatova str. 86, 220024 Minsk.

⁴MIREA.

High-transparency ohmic contacts to p-type GaN as nanosize trilayer BeO/Au/BeO/p-GaN were prepared by oxygen ion-beam sputter-deposition. The light transmittance of the BeO (3nm)/Au (4nm)/BeO (3nm) was measured to be 78% at 460 nm. Specific contact resistance was $6 \times 10^{-4} \Omega \times \text{cm}$ after formation, and $2.4 \times 10^{-3} \Omega \times \text{cm}$ after annealing at 520°C (24 h).

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaN/InGaN С СИСТЕМОЙ МНОЖЕСТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ ЯМ

А.А. Арендаренко, И.Г. Ермошин, Ю.Н. Свешников, И.Н. Цыпенков.*

ЗАО "Элма-Малахит"-ДО ОАО "Концерн Энергомера". Пр.4922, д.4, стр.3, 124460, Москва, Зеленоград

тел. +7(495)5328370, e-mail: sveshnikov@emal.zelcom.ru;

Несмотря на широкое распространение гетероструктур GaN/InGaN с системой множественных квантовых ям (МКЯ) для производства светоизлучающих устройств и интенсивные исследования механизмов электролюминесценции (ЭЛ) в таких структурах, целый ряд принципиальных вопросов требует более глубокого изучения. В их числе и понимание того, почему же использование системы МКЯ позволяет заметно увеличить квантовую эффективность ЭЛ по сравнению со структурами, содержащими одиночную квантовую яму.

В последнее время все больше исследователей склоняются к выводу о том, что начальная область системы МКЯ выполняет роль некой сверхрешетки, приводящей к более благоприятным условиям роста последующей части системы МКЯ, но не принимающей участия в излучательных процессах [1,2].

Нами проведена серия экспериментов, направленных на более детальное изучение особенностей формирования области МКЯ в структурах GaN/InGaN и соответствующих излучательных характеристик.

Гетероструктуры получали МОС-гидридным методом на установке D-180 фирмы Veeco. В качестве подложек использовались пластины сапфира (0001). Система МКЯ формировалась на предварительно выращенном n^+ -GaN слое толщиной 2,5 мкм и, как правило, состояла из барьеров GaN толщиной 7,5 нм и ям InGaN толщиной 2,5 нм с содержанием In 16-18 ат.%. Сверху выращивалась р-область AlGaIn-GaN, легированная магнием, толщиной 0,15 мкм. После активации Mg на полученных структурах исследовались спектры ЭЛ.

На первом этапе исследований варьировалось число квантовых ям в структуре. При этом все КЯ выращивались при одинаковой температуре $\sim 740^\circ\text{C}$. На рис.1(а) показана зависимость интенсивности и длины волны максимума ЭЛ в зависимости от количества КЯ. Как видно из рисунка, интенсивность ЭЛ резко возрастает при увеличении числа КЯ от 1 до 4 – 5, а затем незначительно уменьшается.

Затем были проведены два процесса с пятью КЯ, в которых температурный режим получения КЯ ступенчато изменялся в диапазоне $730-750^\circ\text{C}$, причем в первом случае температура во время роста КЯ понижалась (результаты измерения ЭЛ и ФЛ показаны на рис.1(б)), а во втором повышалась в указанном промежутке (результаты измерения ЭЛ и ФЛ показаны на рис.1(в)). Для сравнения на рис.1(г) показаны спектры для структуры, пять КЯ которой были получены в изотермических условиях. Можно видеть, что спектры ФЛ отражают изменение температуры роста отдельных КЯ (спектры уширены в коротковолновую или длинноволновую сторону), в то время как спектры ЭЛ для всех структур практически симметричны, их полуширина составляет ~ 20 нм, а максимумы соответствуют условиям роста последней КЯ. Этот результат предполагает, что во всех случаях процесс излучательной рекомбинации происходит только в КЯ, ближайшей к р-п переходу.

Для подтверждения такого вывода была проведена серия процессов, в которых из 7 КЯ, составляющих область МКЯ, первые КЯ имели постоянную толщину 2 нм (что соответствовало длине волны максимума ЭЛ 440 нм), а одна, две или 3 последних КЯ имели толщину 2,5 нм. Предполагалось, что если в процессе ЭЛ участвует не только последняя КЯ, то можно было ожидать изменения как интенсивности, так и формы спектров ЭЛ. Однако, во всех случаях не было отмечено сколько-нибудь заметных изменений ни в интенсивности ЭЛ, ни в положении максимума длины волны спектра ЭЛ, ни в форме самого спектра.

Таким образом, можно полагать, что основной вклад в процесс ЭЛ вносит только одна КЯ, ближайшая к р-п переходу, при этом роль нижележащих КЯ заключается в подготовке условий для получения высокого уровня излучательной рекомбинации в этой, последней, КЯ. Что это за условия – соответствующая структура, напряжения, рельеф – вопрос дальнейших исследований на пути оптимизации конструкции и технологии структур для СИД.

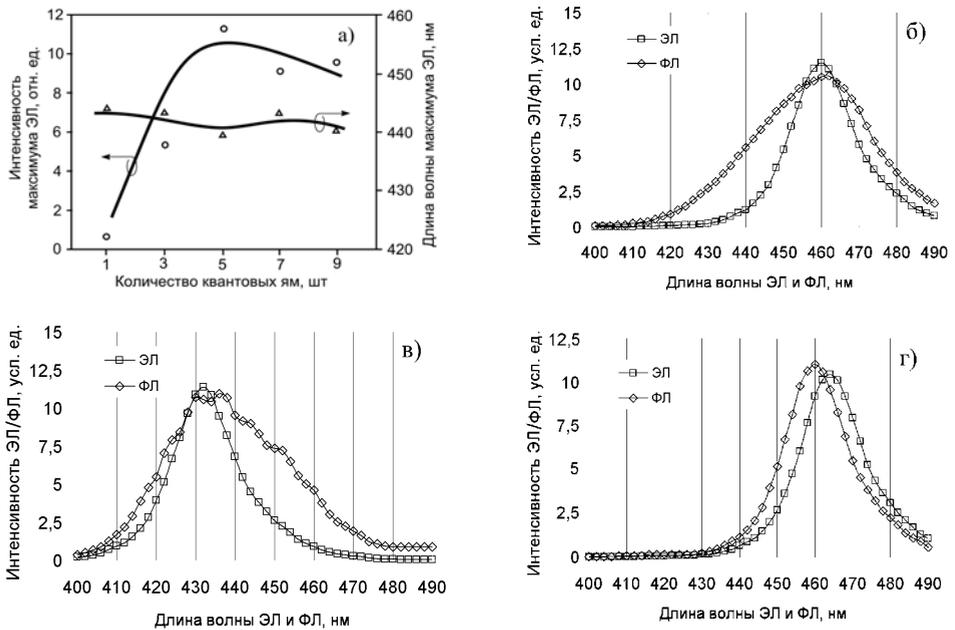


Рис. 1 Зависимость оптических характеристик светодиодных структур от числа КЯ и температурных режимов роста активной области
 а) зависимость отн.интенсивности и длины волны максимума ЭЛ от числа КЯ в структуре
 б)-г) – спектры ЭЛ и ФЛ для различных режимов роста МКЯ
 (б) –снижение температуры; в) – повышение температуры; г)-изотермический режим)

[1] М.Г. Агапов, Д.В. Давыдов, Д.А. Лавринович и др. Доклад на 5-й Всероссийской конф. "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Москва, МГУ, 2007)
 [2] A.David, M.Grudmann, J.Kaeding et.al. Appl.Phys.Lett. v.92, issue 5, 053502 (2008)

ELECTROLUMINESCENCE AREA LOCALIZATION IN LEDs HETEROSTRUCTURES WITH GaN/InGaN MQWs

A.A. Arendarenko, I.G. Ermoshin, Yu.N. Sveshnikov, I.N. Tsyplenkov*
 JSC "Elma-Malahit", pass.4922, b.4/3, Moscow, Zelenograd, 124460
 tel.: +7(495)5328370, e-mail: sveshnikov@emal.zelcom.ru;

Despite the fact that numerous research studies have already been made with a view to improving emission efficiency of LEDs there is a lack of full understanding of recombination process. The main misunderstanding is why MQW structure improves optical characteristics of LEDs comparing to single quantum well structures.

We carried out several experiments to study formation of MQWs and their emission properties. Samples grown in different conditions were analyzed in terms of photo- and electroluminescence. The result of this study proves that electroluminescence properties of the GaN/InGaN structure depend on the growth condition of the QW nearest to the p-n junction and it is the last quantum well that works as emitting area. QW's below the upper one in MQWs stack do not contribute to light emission but create favorable conditions for the high quality last quantum well growth.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КПД МОЩНЫХ СИНИХ СВЕТОДИОДОВ

Ю.В. Трофимов¹, В.И. Цвирко^{1*}, П.П. Асламов²

¹Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072, Минск, Республика Беларусь,
тел.: +375(17)284-13-62, e-mail: tsvirko@inel.bas-net.by;

²УП "ДМТ Технолоджи", пр. Победителей 89, оф. 11, 220020, Минск, Республика Беларусь,
тел./факс +375(17)209-63-41, e-mail: tako@dmtrade.com;

Проведены сравнительные исследования мощных синих коммерческих светодиодов. Для измерений были отобраны светодиоды LXXK2-PB14-P00 (№1), LXXK2-PR14-Q00 (№2), LXHL-LB3C (№3), LXML-PB01-0018 (№4) и NS6B083 (rank WPSL) (№5). Первые четыре типа – светодиоды различных поколений с потребляемой мощностью до 3 Вт, изготовленные Philips Lumileds Lighting по технологии flip-chip. Образец №3 (Luxeon III Star) – представитель первого поколения мощных светодиодов. Образцы №1 и №2 – светодиоды второго поколения (Luxeon K2), допустимая температура активной области которых увеличена с 120°C до 185°C за счет использования усовершенствованных технологий посадки и новых материалов 0. Образец №4 в миниатюрном корпусе (3×4,5×2,1 мм) (Luxeon Rebel) с керамическим теплоотводящим основанием. Образец №5 – одноваттный светодиод производства Nichia, представляющий собой сборку из шести кристаллов, соединенных параллельно. По нашим оценкам размеры кристаллов образцов №№1–4 составляют 1×1 мм², а образца №5 – 0,32×0,32 мм².

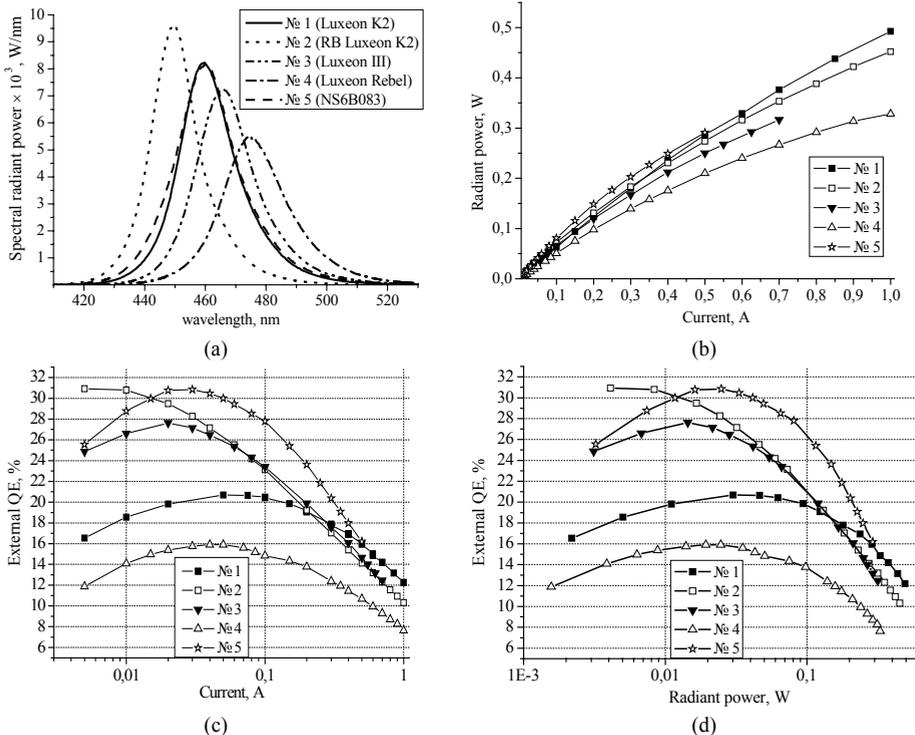


Рис.1. Спектральные распределения мощности излучения при токе 350 мА (а), зависимости мощности излучения (б) и КПД (с) от тока и соотношения между КПД светодиодов и излучаемой мощностью (д)

Спектральные измерения образцов проводились на спектрорадиометрическом оборудовании Instrument Systems, включающем сканирующий спектрометр SPECTRO 320 и интегрирующую сферу. Образцы №№1–3 с помощью специальных адаптеров устанавливались на активное теплоотводящее основание, температура которого поддерживалась постоянной 20°C ± 0,2°C. Образцы №4 и №5 были запаяны на алюминиевую плату диаметром 40 мм, которая, в свою

очередь, устанавливалась на пассивный алюминиевый радиатор диаметром 60 мм и толщиной 12 мм. Во время измерений температура окружающей среды составляла $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Измерения проводились на постоянном токе после наступления тепловой стабилизации светодиодных источников излучения.

Спектральные распределения электролюминесценции образцов и зависимости мощности излучения от тока приведены на рисунках 1а и 1б. Наблюдался характерный для светодиодов на основе нитридов индия галлия спад интенсивности излучения при смещении полосы излучения в длинноволновую сторону. Для образцов № 1 и № 5 при токе 350 мА наблюдались практически идентичные спектральные распределения излучения.

Внешний квантовый выход образцов достигал максимума при различных значениях токов. Причем наибольшим значением (около 31 %) характеризовались образцы № 2 и № 5 при токе 5 мА и 30 мА, соответственно. Из графических зависимостей на рисунках 1с и 1д следует, что для величины тока ниже 0,5 А «шестикристалльный» светодиод NS6B083 (№ 5) характеризовался наибольшим внешним квантовым выходом. В диапазоне значений тока 0,5 – 1 А наибольшим КПД (от 16% до 12%) обладает светодиод LXX2-PB14 (№ 1). Максимальный КПД образца № 1 близок 21% при токе 50 мА.

В ходе выполнения сравнительных исследований мощных синих светодиодов производства Philips Lumileds Lighting и Nichia было установлено, что наибольшим КПД (до 31%) при токе питания ниже 0,5 А характеризуется светодиод NS6B083, а при токе выше 0,5 А – светодиод LXX2-PB14-P00 из серии Luxeon K2.

[1] M.R. Kramers, O.B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G.O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, M.G. Craford. IEEE J. Display Technol., **3**, 160 (2007).

COMPARATIVE EFFICACY ANALYSIS OF POWER BLUE LEDs

Yu.V. Trofimov¹, V.I. Tsvirko^{1}, P.P. Aslamov²*

¹Institute of Physics of NAS of Belarus, Independence Ave. 68, 220072, Minsk, Belarus,
phone: +375(17)284-13-62, e-mail: tsvirko@inel.bas-net.by;

²UE “DMT Technology”, Pobediteley Ave. 89, 220020, Minsk, Belarus,
phone: +375(17)209-63-41, e-mail: tako@dm-trade.com;

Comparative analysis of external quantum efficacy of power blue LEDs from Philips Lumileds Lighting and Nichia in the current range from 5 mA to 1 A are carried out. All spectroradiometric measurements were fulfilled on Instrument Systems equipment. As a result of measurements the highest quantum efficacy and radiant power was found for Nichia NS6B083 LED for current values below 0.5 A (QE \approx 31% at 30 mA and 19% at 350 mA). For current values from 0.5 to 1 A the Luxeon K2 (LXX2-PB14-P00) LED from Lumileds has the highest quantum efficacy and radiant power (QE \approx 16% at 0.5 A and 12% at 1A).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК НА ДЕГРАДАЦИЮ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДОВ

А.Г. Полищук¹, А.Н. Туркин^{1,2}, В.М. Харитонов¹.*

¹ПРОСОФТ, Профсоюзная ул., 108, 117437, Москва,
тел. +7(495)2321652, e-mail: turkin@xlight.ru;

² МГУ им.М.В.Ломоносова, физический факультет. Ленинские Горы, МГУ, физический факультет,
119899, Москва;

Проведено исследование работы мощных светодиодов при питании импульсным током и влияния импульсных токовых перегрузок на процесс деградации светодиодных структур. Целью исследования было определение предельных импульсных режимов работы мощных светодиодов Cree Xlamp, а также определения возможных причин выхода из строя светодиодов и механизмов деградации структур. Исследования проводились в импульсном режиме, амплитуда тока достигала значений более 2 А при длительностях импульсов в диапазоне 200–300 мкс. Исследования проводились с использованием образцов двух семейств светодиодов – XR7090 и XR-E7090, на основе двух типов синих кристаллов – XB900 и EZ1000, соответственно. Обнаружено, что при таком режиме выход из строя наблюдается только для первого типа светодиодов – XR7090; выход из строя светодиодов XR-E7090 не наблюдался. Это может быть связано с конструктивным различием двух семейств светодиодов. Во-первых, различием в методе монтажа кристалла – разварка двух контактных площадок (отрицательной полярности) у кристалла EZ-1000 и одной у кристалла XB-900, что влияет на последовательное сопротивление контактов светодиода. Во-вторых, различием структур кристаллов указанных серий, что влияет на емкостные и электрические характеристики структуры.

Также на части образцов в процессе исследования наблюдался эффект короткого замыкания - резкий спад интенсивности электролюминесценции при протекании тока. Это можно объяснить увеличением безызлучательной составляющей механизмов рекомбинации, что связано с увеличением дефектов в структуре. Это может произойти при локальном выделении тепла в структуре при протекании мощного импульса тока.

INVESTIGATION OF PULSE CURRENT OVERLOAD INFLUENCE ON POWER LIGHT EMITTING DIODES DEGRADATION

A.G. Polishuk¹, A.N. Turkin^{1,2}, V.M. Kharitonov²*

¹PROSOFT, Profsoyuznaya Str., 108, 117437, Moscow,
phone. +7(495)2321652, e-mail: turkin@xlight.ru;

² M.V.Lomonosov Moscow State University, Department of Physics. Leninskiye Gory, MSU, Dept. of
Physics, 119899, Moscow

Investigations of power light-emitting diodes (LED) operating at pulse current regime and influence of current pulse overload on LED structures degradation process have been made. The power Cree Xlamp LED pulse current regime limit determination and probable cause of damage and degradation process understanding have been a goal of these experiments. The different behavior of two LEDs families – XR7090 and XR-E7090 based of different chip series – XB900 and EZ-1000 correspondingly at the same pulse regime has been observed. This fact can be caused by difference of contact plate and chip structure. Also the short circuit effect – dramatic electroluminescence intensity decreasing at forward current has been observed for several samples. This fact can be caused by non-radiative mechanisms increasing at structure local heating.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ «КРИСТАЛЛ+ЛЮМИНОФОР» ДЛЯ ЭФФЕКТИВНЫХ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

А.Н. Туркин^{1}, С.С. Широков¹, А.Э. Юнович¹, Р. Джаббаров², Н. Мусаева²,
F. Scholz³, T. Wunderer³.*

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет. Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, 119899, Москва, тел. +7(495)9392994, e-mail: turkin@xlight.ru;

²Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан;

³Университет Ульма, Институт Оптоэлектроники, Ульм, Германия;

Для создания белых светодиодов (СД) «холодного» свечения (коррелированная цветовая температура > 5000 К) широко используется люминофор YAG:Ce³⁺, имеющий широкую желто-зеленую полосу люминесценции, которым покрывают синий кристалл СД. Однако индекс цветопередачи таких СД сравнительно низкий. Для его увеличения и получения «теплого» свечения, желательно сдвинуть спектр излучения люминофора в красную область.

Проведены исследования различных люминофоров для создания теплого белого СД. Были исследованы Al-Y, Y-Gd, Tb-Gd гранаты и сульфиды Ca, Mg и Ba, легированные ионами Ce³⁺. Также были исследования люминофоров на основе оксидов и оксинитридов [1]. Данные исследования проведены для сульфидов Sr – Ca – Ba с активатором Eu²⁺. Новые составы люминофоров Sr (Ca) – Ga – S : Eu²⁺ были синтезированы методом реакций в твердом теле.

Исследованные белые СД представляли систему кристалл (длины волн в максимуме спектров излучения 405, 415 и 450 нм) и люминофор на основе SrGa₂S₄:Eu²⁺ (зеленый) и SrS:Eu²⁺ (красный). В комбинациях этих люминофоров возможно каскадное возбуждение, т.е. красная полоса люминесценции возбуждается свечением зеленого люминофора.

Спектр возбуждения люминофора SrS:Eu²⁺ содержит полосу в области низких энергий, соответствующую переходу 4f⁷(8S^{7/2})→4f⁶5d(T_{2g}). Полоса в области высоких энергий соответствует переходу 4f⁷(8S^{7/2})→4f⁶5d(E_g), тогда как плечо в области низких энергий может быть сопоставлено переходу между уровнями 4f⁶5d→4f⁷(8S^{7/2})→4f⁶6s иона Eu²⁺. Появление полосы излучения с пиком около 615 нм соответствует переходу 4f⁶5d→4f⁷(8S^{7/2}) между нижним возбужденным и основным уровнями иона Eu²⁺. Максимум в спектре возбуждения на краю видимой области соответствует длине волны 405 нм.

Спектры возбуждения люминофора SrGa₂S₄:Eu²⁺ содержат широкие полосы в УФ и видимой области (рис. 1). Полоса излучения SrGa₂S₄:Eu²⁺ с пиком 537 нм - это разрешенный дипольный переход между возбужденным уровнем 4f⁶5d на основной уровень 4f⁷(8S^{7/2}) ионов Eu²⁺.

В спектрах излучения композитных люминофоров X(SrGa₂S₄:Eu²⁺)+Y(SrS:Eu²⁺) при возбуждении светодиодами с длинами волн 405, 415 и 460 нм наблюдаются и зеленая, и красная полосы, отношение интенсивностей которых зависит от отношения концентраций X/Y. Эффективность преобразования излучения кристалла в излучение люминофора максимальна на длине волны 405 нм, в соответствии со спектрами возбуждения (рис. 2). Это позволяет получить координаты цветности светодиодов на цветовой диаграмме, близкие к кривой Планка в области белого свечения ((x, y) от (0,495; 0,476) до (0,293; 0,191)) с коррелированной цветовой температурой от 3500 до 5300 К.

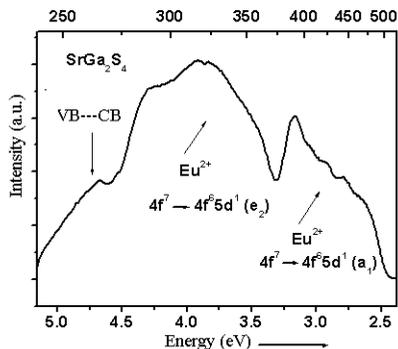


Рис.1. Спектр возбуждения люминофора SrGa₂S₄:Eu²⁺

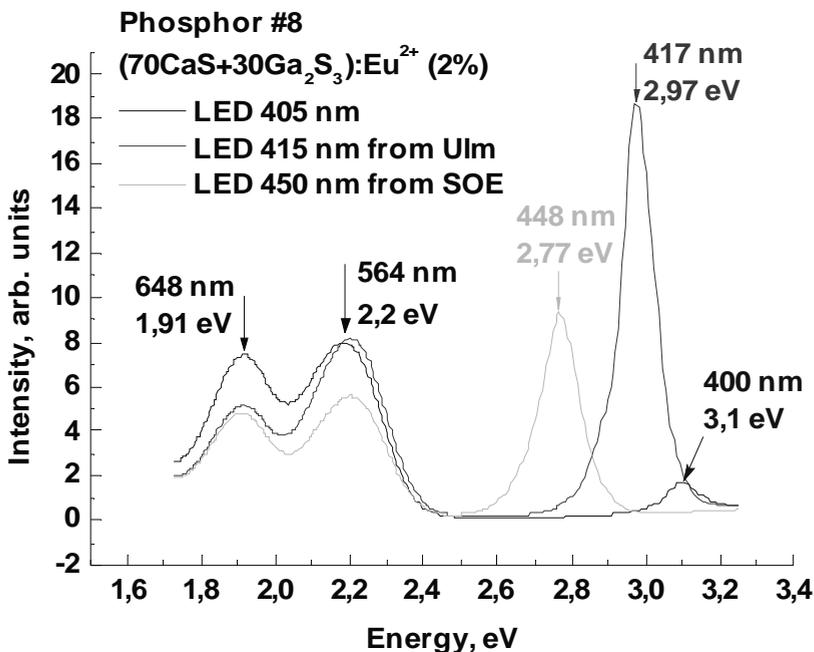


Рис.2. Спектры люминесценции композитного люминофора (70CaS+30SrGa₂S₄:Eu²⁺):Eu²⁺ при возбуждении разными кристаллами.

[1] N.Kimura, K.Sakuma, S.Hirafune, K.Asano. Appl. Phys. Lett., **90**, 051109, 2007.

INVESTIGATION OF «CHIP+PHOSPHOR» SYSTEM FOR EFFECTIVE WHITE LIGHT-EMITTING DIODES

A.E. Yunovich¹, A.N. Turkin^{1}, S.S. Shirokov¹, R. Jabbarov², N. Musayeva²,
F. Scholz³, T. Wunderer³.*

¹ M.V.Lomonosov MSU, Department of Physics, Leninskiye Gory, MSU, Dept. of Physics, 119899, Moscow, tel. +7(495)9392994, e-mail: turkin@xlight.ru;

² Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan;

³ Institut fuer Optoelektronik, Ulm University, Ulm, Germany;

White LED combining various crystals (405, 415, 450 nm) with composite phosphors SrGa₂S₄:Eu²⁺ (green) and SrS:Eu²⁺ (red) phosphors were studied. New compositions of Sr (Ca) – Ga – S : Eu²⁺ phosphors were synthesized by solid state reaction method. Cascading excitation from SrGa₂S₄:Eu²⁺ to SrS:Eu²⁺ is realized. GaN based LEDs ($\lambda = 415$ nm) were grown by MOVPE on low-defect buffer and used to excite phosphors. Color coordinates of LEDs depend of concentration ratio of two phosphors; positions of color coordinates on the chromaticity diagram can be adjusted to the Planckian locus with correlated color temperatures from 3500 to 5300 K.

ВЫСОКОМОЩНЫЕ СИНИЕ И БЕЛЫЕ СВЕТОДИОДЫ ИРС50/МК24: КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ В СРАВНЕНИИ С ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

Д.А.Антоненков¹, Д.А.Бауман³, А.А.Богданов¹, Е.Д.Васильева¹, А.Л.Закгейм^{2*}, Д.А.Закгейм³,
Г.В.Иткинсон¹, А.Е.Черняков², А.В.Феофантов¹

¹ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» пр.Энгельса, д.27, 194156, Санкт-Петербург;

²Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе, РАН, Политехническая ул., д.26, 194021, Санкт-Петербург, тел.+7(812)29227922, *e-mail:zakgeim@mail.ioffe.ru;

³ЗАО «ЭПИ-Центр» пр.Энгельса, д.27, 194156, Санкт-Петербург.

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в энергетических параметрах мощных светодиодов, предназначенных для использования в системах освещения. Современный уровень приборов, задаваемый лидирующими зарубежными фирмами Cree, Philips-Lumileds, Osram, Nichia, может быть охарактеризован следующими цифрами: при токе 350 мА для синих (460-470 нм) светодиодов значения внешнего квантового выхода достигают ~40%, а мощность излучения ~400 мВт; при люминофорном преобразовании в белый ($T_c \sim 6000$ К) типичные значения световых потоков промышленных приборов превысили 80 лм, при светоотдаче порядка 70 лм/Вт. Основные тенденции последнего времени включают, помимо повышения квантовой эффективности и светоотдачи, увеличение внешнего квантового выхода до уровня в единицы ампер и площади излучающих кристаллов до нескольких квадратных миллиметров [1].

В данной работе приводятся сведения по конструкции и электро-оптическим характеристикам мощных синих и белых светодиодов на основе AlGaInN квантово-размерных гетероструктур, чей технологический цикл изготовления которых (от эпитаксиального роста до корпусирования) осуществляется на ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». Фотография общего вида, схематический разрез светодиода с выделением основных конструктивных элементов и фотография излучающего кристалла представлены на рис.1 а,б,в.

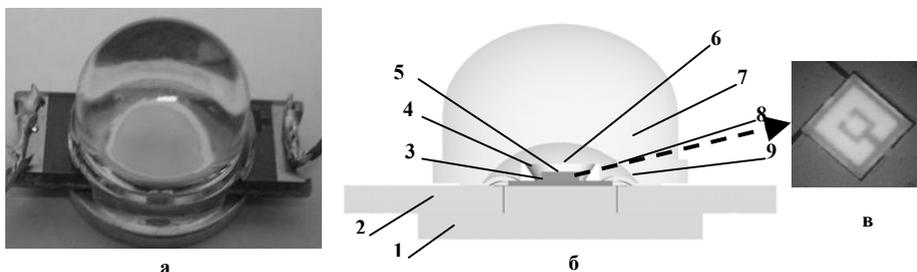


Рис.1.а,б,в. а – общий вид светодиода; б- схематический разрез: 1 – корпус; 2 – печатная плата; 3 – подкристалльная плата; 4 – отражатель; 5 – чип; 6 – люминофорный слой; 7 – линза; 8 – лунка линзы, заполненная гелем; 9 – проволочные проводники; в – излучающий кристалл площадью ~1мм².

Излучающие структуры выращивались на двухдюймовых сапфировых подложках методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений в установке E300 производства фирмы Veeco. Структуры содержали низкотемпературный зародышевый слой, слой n-GaN толщиной 3.5 мкм, активную область, содержащую 5 InGaN квантовых ям, токоограничивающий слой p-AlGaIn толщиной 20 нм и слой p-GaN толщиной 0.1 мкм. Для создания высокоэффективного и мощного излучающего кристалла большой площади МК24 использовалась мезапланарная флип-чип конструкция с тыльным расположением отражающих контактов, описанная нами ранее [2]. Оптимизация топологии и технологии изготовления омических контактов позволила увеличить коэффициенты отражения для n- и p-контактных покрытий, однородность токорастекания по площади кристалла и снизить последовательное сопротивление до уровня ~0.5 Ом ($U_{пр}=2.9$ В при $I=350$ мА). Обеспечение теплового режима работы, а именно минимизация теплового сопротивления р-п-переход – основание корпуса до значений 3-4 К/Вт, достигалась за счет флип-чип монтажа кристалла на кремниевую плату-носитель припоем в системе Pb/Sn. В свою очередь, кремниевая плата присоединялась к медному основанию с помощью теплопроводящего клея ЕРОТЕК Н-20S. Было проведено подробное исследование влияния толщин и состава монтажных слоев на тепловое сопротивление приборов.

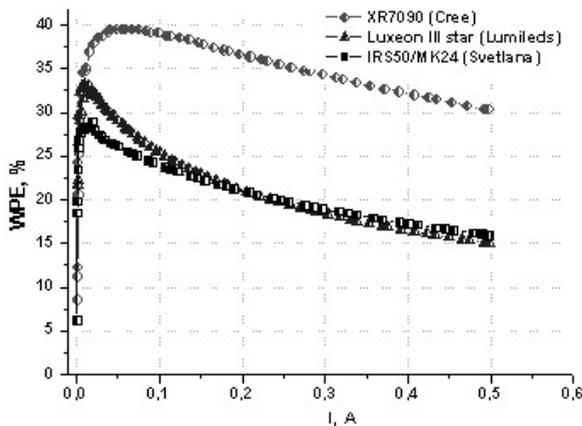


Рис.2. Зависимость кпд (WPE) от тока для трех типов светодиодов: IRS50/MK24, XR-E7090 и Luxeon III Star

На рис.2 приведены зависимости полного кпд от тока для светодиодов IRS50/MK24, а также лучших из представленных на рынке светодиодов серий XLamp™ XR-E7090 на базе кристаллов EZ1000 (Cree) и Luxeon III Star (Philips-Lumileds).

Как видно из рис.2 абсолютные величины и ход токовой зависимости кпд близки для нашего прибора и Luxeon III Star, но при этом заметно уступают XR-E7090 (Cree), который, на наш взгляд, является лучшим из представленных на рынке. Можно отметить, что, несмотря на меньший исходный внешний квантовый выход, значения кпд, начиная с токов порядка 150 мА, для IRS50/MK24 становятся выше, чем у прибора Luxeon, благодаря меньшим потерям на последовательном сопротивлении.

На основе разработанных конструкций были изготовлены также белые светодиоды с преобразованием излучения в слое люминофора. Параметры люминофора: квантовая эффективность ~90%, максимумы спектра возбуждения и люминесценции 470 нм и 560 нм, соответственно. В номинальном режиме $I=350$ мА – световой поток $\Phi \sim 30$ лм при $T_c = 3700-4100$ К.

[1] M.G.Craford. *Proceedings of First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07)*, Tokyo, November 2007, p.5.

[2] Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, С.А.Гуревич, М.М.Кулагина, Е.М.Аракчеева, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева Г.В.Иткинсон. ФТП, **39** (7), 885 (2005).

HIGH-POWER BLUE AND WHITE LEDs IRS50/MK24: DESIGN AND CHARACTERISTICS IN COMPARISON WITH WORLD BEST ANALOGUES

D.A.Antonenkov¹, D.A.Bauman³ A.A.Bogdanov¹ E.D.Vasilyeva¹, A.L.Zakgeim^{2}, D.A.Zakgeim³, G.V.Itkinson¹, A.E.Chernyakov², A.V.Feopentov¹*

¹ “Svetlana-Optoelectronica”, Engel’sa 27, 194156, Saint-Petersburg;

² A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Scientific Engineering Center for Microelectronics, Polytechnicheskaya 26, 194021, St.Petersburg, phone. +7(812)29227922, *e-mail:zakgeim@mail.ioffe.ru

³ “EPI-Centre”, Engel’sa 27, 194156, Saint-Petersburg

Data are presented on the design and fabrication) process of high power AlGaInN flip-chip light-emitting diodes. The emitting chips have a large emitting area ~ 1 mm² and an optimized contacting scheme allowing to reach high operation current $\sim 350-1000$ mA, low forward voltages (2.9 V at 350 mA), low thermal resistance ~ 4 K/W and, therefore, high wall-plug efficiency: 20% for blue and 30 lm/W for neutral (~ 400 K) white at large current. The whole technology processes of LED manufacture starting with epitaxial growth and ending with packaging were conducted at “Svetlana-Optoelectronika”. A comparison between our LEDs and best world devices produced by Cree and Lumileds is given.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МОЩНЫХ InGaN/GaN СВЕТОДИОДАХ С ПОМОЩЬЮ ИК ТЕПЛОВИЗИОННОГО МИКРОСКОПА

А.Л.Закгейм¹, М.Н.Мизеров¹, А.Е.Черняков¹, Н.М.Шмидт²*

¹ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе, РАН, Политехническая ул., д.26, 194021, Санкт-Петербург, тел.+7(812)29227922, *e-mail:zakgeim@mail.ioffe.ru

² Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, РАН, Политехническая ул., д.26, 194021, Санкт-Петербург

Основные тенденции в совершенствовании мощных InGaN/GaN светодиодов для твердотельного освещения связаны, помимо повышения КПД, с увеличением токовых нагрузок, площади излучающих кристаллов и допустимых рабочих температур [1]. Совокупность указанных факторов обостряет проблемы прецизионного контроля разогрева рабочей области и оценки его влияния на функциональные и ресурсные характеристики приборов. Известны и широко используются косвенные методы измерения тепловых параметров светодиодов по электрическим или спектральным характеристикам. Однако, как правило, они дают усредненные и не слишком точные результаты. В то же время для кристаллов большой площади с неравномерным распределением тока ("current crowding") и неоднородным теплоотводом ("flip-chip/bumps"-монтаж) важно иметь пространственно разрешенную картину температурных полей с выявлением локально перегретых областей, потенциально опасных с точки зрения надежности приборов. Ранее мы использовали для этой цели обработку спектров электролюминесценции, получаемых при сканировании по площади кристалла [2], но аппаратная сложность и большие временные затраты делают этот метод малопродуктивным.

В данной работе для исследования тепловых процессов в светодиодных кристаллах нами продолжено развитие другого - тепловизионного подхода [3], основанного на анализе цифровых изображений объектов, получаемых в ИК-диапазоне собственного теплового излучения. Регистрация теплового излучения осуществлялась с помощью специально разработанного в ИФП СО РАН инфракрасного микроскопа на основе InAs фотоприемной матрицы 128x128 с шагом элементов 50мкм и областью чувствительности 2.5-3.1мкм. Поле зрения микроскопа составляло 400x400мкм, разрешающая способность ~3мкм, время накопления варьировалось в диапазоне 10-150мс. Исследовались образцы мощных InGaN флип-чип светодиодов, идентичные описанным в [4].

Одной из основных методических проблем при тепловизионном методе исследования светодиодов является сильное различие в излучательной способности материалов, используемых в конструкции приборов: контактов, отражающих покрытий, элементов монтажа и др. В силу указанной причины важную роль играет исходная калибровка, при которой температура исследуемого объекта задается внешним нагревателем с регистрацией интенсивности ИК-излучения. Полученные таким путем исходные калибровочные кривые (температура - биты) используются затем для расчета температурных полей в реальных режимах работы при разогреве собственным током.

На рис.1, приведено распределение интенсивности ИК излучения (температуры) для одного из сечений мощного флип-чип излучающего кристалла типа TM26 с прямоугольной конфигурацией р-области (350x470мкм), обтекаемой с трех сторон П-образным n-контактом. На вставках показаны фотографии области свечения в собственном (а) и ИК тепловом (б) излучении при наблюдении сквозь сапфировую подложку; пунктирной линией обозначено исследуемое сечение.

Приведенные на рис.1 зависимости относятся к трем режимам работы: 0mA/65^oC; 100mA/25^oC; 250mA/25^oC (здесь первое число обозначает ток через кристалл, второе температуру теплоотвода) Как следует из рис.1, при внешнем разогреве или небольшом токе (100mA), мы имеем однородное или близкое к однородному распределение температуры по всей площади р-контакта. Ситуация резко меняется при возрастании тока до 250mA (соответствующая кривая и вставка б), когда возникают заметные градиенты температурных полей: 58^oC в центре р-контакта и 72^oC на периферии, вблизи n-контакта. Такой характер распределения температуры понятен с учетом известного эффекта шнурования тока к границе n-контакта в флип-чип структурах на изолирующей подложке. Полученное распределение находится в хорошей корреляции с расчетными значениями распределения плотности тока, а также экспериментальными данными по распределению электролюминесценции.

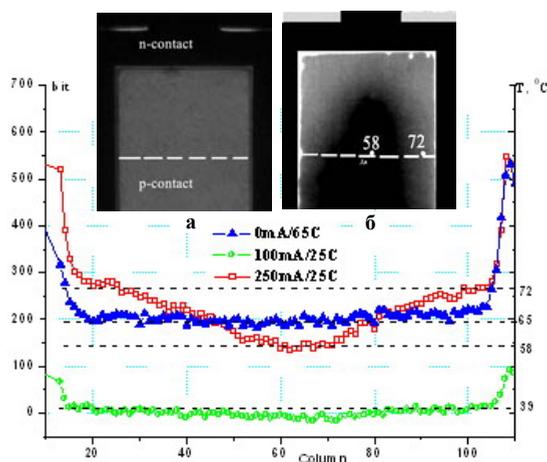


Рис. 1. Зависимость температуры от координаты при 3-х режимах работы светодиода. На вставках: - фотографии в собственном (а) и ИК (б) излучении

Применение ИК-тепловизионного «микромэппинга» представляет интерес и для исследования процессов деградации приборов. Отказ светодиода за период наработки может быть вызван как медленным снижением оптической мощности, обусловленным деградацией электролюминесценции в активной области [5], так и относительно быстрыми процессами возникновения значительных токов утечки, связанных с макродефектами, либо изначально присутствующими в кристалле, либо вносимыми при контрольных операциях, монтаже и корпусировании. Наличие таких дефектов сопровождается локальным разогревом, обусловленным повышенной плотностью тока. В работе исследованы различные виды каналов утечек, инициированные механическими повреждениями, статическим разрядом, поверхностными загрязнениями и т.д.

- [1] M.G.Craford. *Proceedings of First International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07)*, Tokyo, November 2007, p.5.
 [2] G. A. Onushkin, A. L. Zakgeim, D. A. Zakgeim, I. V. Rozhansky, A. F. Tsatsulnikov, W. V. Lundin, D. S. Sizov. *physica status solidi (c)* **3**(6), 2149 (2006).
 [3] V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.V. Zinovchuk A.L. Zakheim, D.A. Zakheim, I.P. Smirnova, S.A. Gurevich. *Proc.of SPIE* . **5941**, 59411K-1 (2005).
 [4] Д.А.Закгейм, И.П. Смирнова, И.В.Рожанский, С.А.Гуревич, М.М.Кулагина, Е.М. Аракчеева, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева Г.В.Иткинсон. *ФТП*, **39** (7), 885 (2005).
 [5] Е.Д.Васильева, А.Л.Закгейм, Ф.М.Снегов, А.Е.Черняков, Н.М.Шмидт, Е.Б.Якимов *Светотехника*, **5**, 30 (2007).

STUDY OF HEAT -DISTRIBUTION IN HIGH-POWER InGaN/GaN LEDs USING INFRARED THERMOVISION MICROSCOPY

A.L.Zakgeim¹, M.N.Mizerov¹, A.E.Chernyakov¹, N.M.Shmидt²*

¹ A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Scientific Engineering Center for Microelectronics, Polytechnicheskaya 26, 194021, St.Petersburg, phone. +7(812)29227922, *e-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru

² A.F.Ioffe Physico-Technical Institute Polytechnicheskaya 26, 194021, St.Petersburg

We report on study of temperature distribution in flip-chip high-power InGaN/GaN blue LEDs performed with an IR highly spatially resolved technique. The tailor-made microscope, based on InAs matrix with photosensitivity in 2.5-3.1 range was employed for getting IR-intensity maps and calculation of temperature across the emitting chips. Much attention was given to micro mapping of device overheating and local temperature gradients associated with current crowding effects. Also, IR-thermivision allows revealing the current leakage channels generated in emitting chips during operating life. It was found that in flip-chip LEDs the leakage channels are predominantly localized near the boundary between p- and n-contact areas, owing to maximum current density and worse condition of heat removal.

МОЩНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА С ДИНАМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ СИСТЕМ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО» ОСВЕЩЕНИЯ

С.В.Демин, А.Д.Закгейм, М.Н.Мизеров, О.Н.Сараев, А.Е.Черняков, А.Ф.Чумаченко*

Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе, РАН, Политехническая ул., д.26, 194021, Санкт-Петербург, тел.+7(812)29227922, *e-mail:zakgeim@mail.ioffe.ru

Среди преимуществ полупроводниковых светодиодов по отношению к традиционным источникам света в последнее время выделяют не только малое энергопотребление, но и возможность динамического управления интенсивностью и цветовыми параметрами. Последнее качество, получившее в зарубежной литературе название «интеллектуального» света (smart light) [1], является основой для создания нового поколения эргономических источников освещения, способных оказывать благоприятное влияние на психофизиологическое состояние человека.

В данной работе описывается прототип мощного полупроводникового источника света с динамически управляемыми яркостью и цветом, предназначенный для медико-биологических исследований влияния режимов освещения на эмоциональное состояние человека: концентрацию внимания или, напротив, релаксацию, особенно в условиях напряженных психических нагрузок.

В целом система «интеллектуального» света включает в себя следующие основные блоки:

- собственно светодиодный излучатель – матрица RGB светодиодов, соединенных в последовательно/параллельные группы с возможностью модуляции по току питания в каждом цветовом канале;
- драйверы и системы обратной связи, обеспечивающие поддержание заданного программой светового режима;
- управляющий компьютер с пользовательским интерфейсом, позволяющим устанавливать режимы освещения в количественных (люмены, цветовые координаты), или качественных (рассвет, день, сумерки и т.п.) параметрах.

Внешний вид источника и интерфейса управляющего компьютера показаны на рис. 1 а,б.

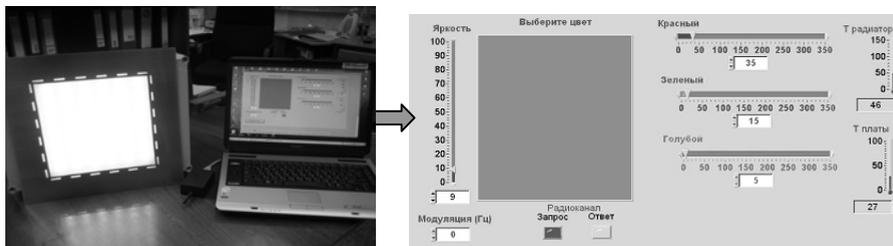


Рис1 а,б. Фотография «интеллектуального» источника света (а) и интерфейса управления (б).

В качестве элементной базы излучающего модуля использовались 48 мощных светодиодов ACULED™, каждый из которых содержал 4 плотноупакованных излучающих кристалла: один синий ($\lambda_{\text{рек}}=460$ нм, $\Phi_{\text{max}}=5.3$ лм), два последовательно включенных зеленых ($\lambda_{\text{рек}}=520$ нм, $\Phi_{\text{max}}=53$ лм), один красный ($\lambda_{\text{рек}}=630$ нм, $\Phi_{\text{max}}=24$ лм). Приведенные величины относятся к номинальному току через кристалл 350 мА, при этом мощность, рассеиваемая одним светодиодом, достигает ~5 Вт. Всего в излучающем модуле задействовано 192 излучающих кристалла. Для удобства питания была выбрана следующая схема соединения: 8 параллельных ветвей по 6 последовательно включенных кристаллов в каждой (достаточное напряжение источника питания 20 В). Управление модулем осуществлялось восьмиразрядным микроконтроллером ATtiny 461, в состав которого входят три 10-разрядных широтно-импульсных контроллера, работающих на частоте 64 МГц. Задание режимов работы осуществляется внешним компьютером по полудуплексному радиоканалу на частоте 433 МГц со скоростью 20 кБод. Разработанный пакет программ обеспечивает обмен статусной и управляющей информацией между модулем и компьютером с частотой 1 Гц,

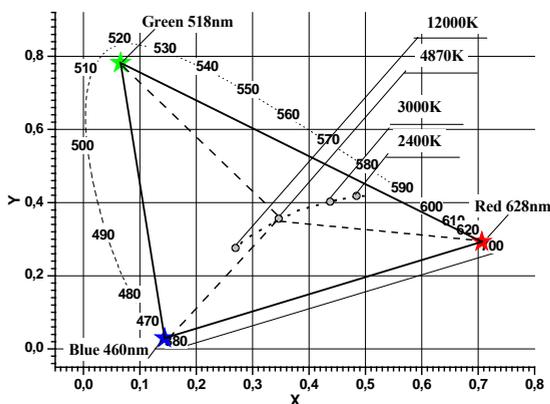


Рис.2. Цветовая диаграмма МКО 1931г. с точками, соответствующими 4-м цветовым температурам 2400К, 3000К, 4870К и 12000К на кривой Планка. Звездочками отмечены координаты цветности смешиваемых цветов зеленого, синего и красного светодиодов.

Основные проблемы RGB-смешения излучения от множества полупроводниковых кристаллов связаны с нелинейностью свет - токовых зависимостей и влиянием разогрева на эффективность и спектральные характеристики излучателей. Для уменьшения роли последнего использовалось принудительное охлаждение с помощью встроенных вентиляторов. В предельном режиме работы (входная мощность $P_{вх} \sim 200$ Вт, выходной световой поток $\Phi = 4000$ лм), температура платы-носителя с закрепленными светодиодами не превосходила 35°C , а активной области наиболее разогретого из кристаллов - 53°C ($R_{th,j-amb} \sim 27$ K/W). В ходе работы была детально изучена связь токовых режимов питания с координатами цветности и уровнем световых потоков выходного излучения, необходимая для поддержания заданного баланса белого. На цветовой диаграмме рис.2. представлены некоторые характерные точки, относящиеся к белому свету с различной цветовой температурой в диапазоне 2400-12000 К, для которых были установлены отвечающие им значения токов питания по каналам, общий выходной поток и светоотдача.

- [1] E. Fred Schubert and Jong Kyu Kim. Solid-State Light Sources Getting Smart. Science **308** (5726), 1274 (2005)

A DYNAMIC-CONTROLLED HIGH POWER LED LUMINAIRE FOR “SMART” ILLUMINATION SYSTEMS

*S.V.Demin, A.L.Zakgeim**, A.E.Chernyakov, M.N.Mizerov, O.N.Saraev, A.F.Chumachenko

A.F.Ioffe Physico-Technical Institute, Scientific Engineering Center for Microelectronics, Polytechnicheskaya 26, 194021, St.Petersburg, phone. +7(812)29227922, *e-mail:zakgeim@mail.ioffe.ru

Data are presented on solid state smart light source based on 48 high power three-color LEDs of ACULED™ Series. The question of light source design, LED connection and modulation, algorithms of controlling and computer interface are discussed. The possibility of receiving of white light with different color temperature was demonstrated.

InGaN СВЕТОДИОДНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С p-AКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ

Д.А. Закейм^{1}, Д.А. Бауман², М.Г. Аганов²*

¹ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН. Политехническая ул. 26, 194021, С.-Петербург
e-mail: mitya@quantum.ioffe.ru;

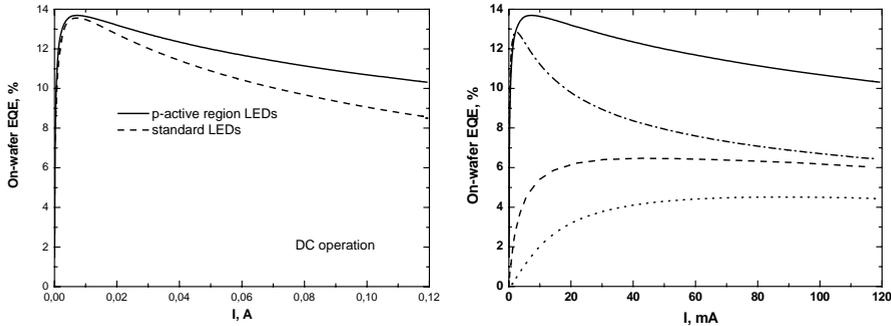
²ЗАО “Эпицентр”. Пр. Энгельса 27, 194156, С.-Петербург;

Падение эффективности InGaN светодиодов с ростом тока накачки является на сегодняшний момент главным препятствием на пути их повсеместного использования в целях общего освещения и в других приложениях, требующих высокой оптической мощности. В последнее время на решение этой проблемы в мире направлено большое количество усилий. Среди прочего, предлагается использование в качестве активной области широких квантовых ям [1], переход на неполярный GaN [2] и др. В нашей последней работе [3] мы показали, что характерное для всех коммерческих структур падение эффективности с ростом тока накачки может быть вызвано утечкой электронов через широкозонный барьер p-AlGaIn. В этой же работе мы предложили расположить активную область структуры с p-стороны p-n перехода. В этом случае, процессом, лимитирующим эффективность электролюминесценции, будет инжекция электронов, а не дырок, как в традиционной структуре, а для препятствования утечке дырок в p-GaN будет служить широкозонный барьер n-AlGaIn. Расчеты показывают, что из-за влияния пьезоэлектрических полей, n-AlGaIn барьер препятствует утечке носителей существенно эффективнее, чем p-AlGaIn. Вследствие этого, структура с p-активной областью должна обладать более высокой эффективностью излучения при больших плотностях тока накачки.

В данной работе мы сообщаем об успешной практической реализации предложенной гетероструктуры. Светодиодная структура с многоямной активной областью, предложенной с p-стороны p-n перехода, была выращена методом MOCVD в коммерческом реакторе Veeco TurboDisk™. Структура выращивалась на сапфировой подложке и состояла из слоя p-GaN толщиной 3.5 мкм, токоограничивающего слоя n-Al_{0.1}Ga_{0.9}N толщиной 20 нм, нижнего p-GaN слоя толщиной 10-12 нм, нелегированной InGaIn/GaN активной области и верхнего контактного слоя p-GaN толщиной 100 нм. Для измерения внешней квантовой эффективности, методом реактивного ионного травления и электронно-лучевого напыления были изготовлены светодиодные кристаллы с отражающим p-контактом на основе серебра. Кристаллы имели прямоугольную форму p-контакта размером 380×400 мкм. Генерируемый свет выводился через прозрачную сапфировую подложку и регистрировался кремниевым фотодетектором в геометрии «on-wafer». Так же, для сравнения, была выращена стандартная светодиодная структура с той же длиной волны излучения (460 нм).

Сравнение зависимостей внешней квантовой эффективности стандартной структуры и структуры с p-активной областью приведено на Рис.1. Как видно из рисунка, обе структуры обладают примерно равной максимальной эффективностью, достигаемой при токах накачки 5-10 мА. Однако, при более высоких токах, эффективность структуры с p-активной областью падает значительно медленнее. При импульсной накачке, внешняя квантовая эффективность такой структуры при плотности тока 200 А/см² составляет 62% от максимального значения, в то время как для стандартной структуры эта цифра равна 47%.

В отличие от стандартной структуры, зависимость эффективности электролюминесценции структуры с p-активной областью от тока существенно образом эволюционирует со временем. Эта эволюция проиллюстрирована на Рис.2. Точками на этом рисунке изображена начальная зависимость эффективности от тока, измеренная непосредственно после изготовления образца. Однако, эта зависимость существенно образом изменяется, если оставить светодиодный кристалл на некоторое время под рабочим током 100-200 мА. Эффективность монотонно возрастает в течение первых 10-20 минут (пунктирная кривая), а затем на кривой возникает резкий максимум в области малых токов (штрих-пунктирная кривая). В дальнейшем происходит постепенное увеличение эффективности на больших токах накачки, пока, через примерно 20 часов, не наступает насыщение (сплошная кривая). Одновременно с этим, прямое падение напряжения при 100 мА уменьшается от 4.5 вольт при первом измерении до порядка 3.5 вольт. Мы связываем такое поведение эффективности светодиодной структуры с p-активной областью с известным эффектом увеличения диффузионной длины неосновных носителей в p-GaN в процессе инжекции электронов через p-n переход, либо при облучении электронным пучком [4].



Таким образом, в данной работе приводится экспериментальное подтверждение вывода о том, что InGaN светодиодные структуры с p-активной областью могут обеспечить высокую оптическую эффективность на больших плотностях тока накачки и являются перспективными кандидатами на использование в светодиодах высокой мощности.

Эта работа была выполнена при поддержке Российского Федерального Агентства по Науке и Инновациям (договор №02.523.11.3008). Авторы выражают благодарность Региональному Центру коллективного пользования «Материаловедение и Диагностика в Передовых Технологиях» за проведение материаловедческих исследований, ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» и сотрудникам лаборатории полупроводниковой квантовой электроники за процессирование гетероструктур.

- [1] N.F.Gardner, G.O.Mueller, Y.C.Shen et al., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 243506 (2007).
- [2] K.-C.Kim, M.C.Schmidt, H.Sato et al., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 181120 (2007).
- [3] I.V.Rozhansky, D.A.Zakheim, *Phys. Status Solidi A* **204**, 227 (2007).
- [4] L.Chernyak, G.Nootz, A.Osinsky, *Electronics Letters*, **37**, 922 (2001)

P-ACTIVE REGION InGaN BLUE LIGHT EMITTING HETEROSTRUCTURES

***D.A.Zakheim*^{1*}, *D.A.Bauman*², *M.G.Agapov*²**

¹Ioffe Physico-Technical Institute, 194021 Polytechnicheskaya 26, St.-Petersburg, Russia

e-mail: mitya@quantum.ioffe.ru;

²Epi-Center, 194156 Engelsa 27, St.-Petersburg, Russia;

In this paper we report on successful fabrication of InGaN-based blue light-emitting diode (LED) heterostructures with active region located on p-side of p-n junction. In such structures the radiative recombination efficiency in active region is controlled by electron injection rather than hole injection in standard heterostructures. Since n-AlGaIn layer blocks hole leakage more effectively than p-AlGaIn blocks electron leakage, the p-active region LEDs demonstrate superior external quantum efficiency (EQE) at high driving currents compared to standard ones. The on-wafer EQE of standard MOCVD grown LED chips with 0.14 mm² area reaches maximum (13.8%) at about 5 mA and constitutes ~9% at 100 mA. The similar p-active region LED chips demonstrate the same maximum efficiency at 5 mA, while their EQE at 100 mA is ~11%. In pulsed operation, the difference between EQE vs. pumping curves of standard and p-active region LEDs is even more pronounced.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ГАЛЛИЯ ПРОЦЕССАМИ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТНЛЬНОСТИ

И.Н. Завестовская^{1}, П.Г. Елисеев², О.Н. Крохин¹*

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Ленинский проспект, дом 53, 119991, Москва, Россия, тел. +7(499)1326159, e-mail: zavest@sci.lebedev.ru;

² Центр высокотехнологичных материалов при Университете Нью Мексико, Годдард, 1313 Альбукерке, США.

Структуры на основе полупроводниковых нитридов (GaN, AlN и некоторые соединения типа AlGaN) являются перспективными оптоэлектронными материалами с широким спектром практических применений в качестве активных сред в высокоэффективных лазерных диодах и светодиодах в области коротких длин волн [1-3].

Максимальная оптическая мощность полупроводниковых лазеров на основе GaAs ограничена катастрофическим оптическим разрушением (деградацией) поверхностей зеркал. Механизм разрушения связан с ростом поглощения вблизи зеркала, которое происходит за счет уменьшения ширины запрещенной зоны с увеличением температуры. Случаи возникновения разрушения зеркал в лазерах на основе полупроводниковых нитридов не известны. Изучение деградации активной области полупроводниковых лазеров на основе нитридов является важной задачей.

Полупроводниковые лазеры на основе InGaN излучают на длине волны около 400 нм. Для генерации фемтосекундных импульсов используются твердотельные лазеры с применением режима мод-локкинг и нелинейного преобразования, что позволяет получить как одиночные, так и периодически-повторяемые импульсы со стабильной амплитудой и с перестройкой в широком спектральном диапазоне - от 375 до 850 нм. Результаты по определению порога разрушения (абляции) эпитаксиальных слоев на основе нитридов галлия под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны генерации лазеров на их основе могут быть использованы для определения оптической прочности этого материала в процессе работы лазера.

Исследование процессов абляции эпитаксиальных слоев GaN, нанесенных на сапфировую подложку, с использованием фемтосекундных лазерных импульсов представлено в [1]. Определены пороги абляции и параметры режима лазерной абляции. Для генерации лазерных импульсов фемтосекундной длительности использовался титан - сапфировый лазер с длиной волны порядка 800 нм. После того как лазерный пучок проходит через систему удвоения частоты, длина волны лазерного импульса составляет 400 нм. Длительность импульса составляла величину 135+/-15 фс.

Критическая энергия в импульсе составила величину порядка 42 нДж при пятне фокусировки радиусом порядка 695нм. Величина порога абляции составила 20 ТВт/см² при облучении лазерными импульсами с длиной волны 400 нм. При тех же параметрах режима лазерного облучения, что и для GaN были определены пороги абляции других прозрачных материалов, таких как сапфир (Al₂O₃) и стеклообразный SiO₂, а также такой же SiO₂ с примесью Ge. Экспериментально установлено, что интенсивность лазерного облучения на пороге поверхностного повреждения вышеперечисленных материалов под действием единичных импульсов (400 нм, 150 фс) растет как ширина запрещенной зоны (величина края полосы поглощения) в степени 3,1 - $E_g^{3.1}$.

Наличие абляции прозрачных материалов означает, что существует эффективный нелинейный механизм поглощения квантов света с интенсивностью порядка десятков ТВт/см² и длительностями импульса порядка сотни фемтосекунд в области прозрачности. Коэффициент поглощения, например, в GaN составляет величину порядка $2.5 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$, тогда как линейное поглощение при 400 нм составляет величину менее 100 см⁻¹.

В работе представлены результаты теоретического исследования механизмов разрушения и нелинейного поглощения света в прозрачных материалах - широкозонных полупроводниках и диэлектриках. Вероятность ионизации атомов и твердых тел в поле сильной электромагнитной волны, чья средняя энергия фотонов в импульсе меньше потенциала ионизации (нелинейный механизм поглощения) была получена Л.В.Келдышем в [4]. Критический параметр данной теории был назван адиабатическим и может быть представлен в виде:

$$\gamma = \frac{\omega \sqrt{2mE_g}}{e\mathcal{E}} \quad (1)$$

где \mathcal{E} и ω напряженность и частота электрического поля излучения, m – приведенная масса.

Если $\gamma \gg 1$ (большое значение частоты ω и относительно не сильное поле) происходит одновременное поглощение нескольких фотонов – реализуется многофотонный механизм поглощения. В случае $\gamma \ll 1$ (значение лазерной мощности велико и низкая частота) реализуется туннельный механизм поглощения [4]. Для GaN: $E_g \approx 3.43$ эВ, и для $I = 40$ ТВт/см², $\gamma \sim 1/2$ и $\omega = 10^{15}$ с⁻¹. Это означает, что для процесса абляции GaN при лазерной мощности порядка десятков тераватт реализуется туннельный механизм поглощения. Таким образом, в случае малых частот можно использовать модель туннельного поглощения, развитую для постоянного электрического поля.

Используя формулу для вероятности туннельного поглощения из [4] мы можем определить порог абляции в зависимости от E_g [3]:

$$I_{th} = \frac{\tilde{n}}{4\pi} \left| \mathcal{E}_{th} \right|^2 = \frac{\pi}{16} \frac{cmE_g^3}{\hbar^2 e^2} \quad (2)$$

Вычисленные значения порога абляции для других прозрачных материалов находятся в хорошем согласии с экспериментом. Порог абляции GaN существенно меньше по сравнению с другими прозрачными диэлектриками. С другой стороны параметр γ отличается для всех материалов не существенно и во всех случаях меньше единицы. Для лазерного режима облучения с интенсивностью порядка десятков и сотен ТВт/см² и фемтосекундной длительностью импульсов наиболее эффективным механизмом нелинейного поглощения света для диэлектриков и полупроводников с шириной запрещенной зоны больше 3 эВ является туннельный механизм поглощения света.

Таким образом, в работе показано, что пороговая интенсивность разрушения зависит от ширины запрещенной зоны облучаемого материала и для случая полупроводников на основе нитридов галлия лежит в области 20 ТВт/см², что намного превышает рабочие интенсивности светового потока, реализуемые при работе лазера с той же активной средой. Такой же вывод можно сделать из описанного в данной работе эксперимента. Это означает, что сопротивление GaN к оптическому разрушению очень высокое при фемтосекундных лазерных импульсах и интенсивностях $\sim 10^{13}$ Вт/см², при этом не наблюдается признаков теплового распада. Таким образом, можно ожидать более высокий порог разрушения зеркал для лазеров на основе GaN.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур» и гранта РФФИ 07-02-01240.

- [1] Eliseev, P.G., Sun, H.-B., Juodkazis, S., Sugahara, T., Sakai, S. & Misawa, H. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 839-841, (1999).
- [2] И.Н. Завестовская, О.А. Глазов, П.Г. Елисеев, О.Н. Крохин, Н.А. Менькова. «Труды Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. Звенигород, 27-29 ноября 2007г.» Москва, Из-во ФИАН, 2008г., с.152-161.
- [3] Eliseev, P.G., Krokhin, O.N. & Zavestovskaya, I.N. *Applied Surface Science*, **248**, 313-315, (2005).
- [4] Keldysh, L.V. *JETF (USSR)*, **47**, 1945, (1964).

MODELLING OF THE DEGRADATION PROCESSES OF GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTOR RADIATING STRUCTURES MAKING USE OF THE DAMAGE PROCESSES IN ABLATION OF THE MATERIALS BY FEMTOSECOND LASER PULSES

I.N. Zavestovskaya^{1}, P.G. Eliseev², O.N. Krokhin¹*

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of RAS, Leninskiy Prosp.53, 119991 Moscow, Russia
phone. +7(499)1326159, e-mail: zavest@sci.lebedev.ru;

² Center for High Technology Materials, UNM, 1313 Goddard SE, Albuquerque, USA

The results of the laser induced damage threshold investigations in the experiments for femtosecond laser ablation of GaN semiconductors are making use of the analysis of the degradation processes of the GaN lasers. The processes of the nonlinear absorption and ablation of the transparent materials such as nitride semiconductor, sapphire and others under irradiation with ultrashort laser pulses are considered theoretically. The ablation threshold is in multi- TW/cm² range. The power consumption under the ablation process is described in terms of the nonlinear mechanism of the tunneling absorption. It was derived the ablation threshold increases as about third power of the energy bandgap of the material, in close agreement with experimental data.