

**«МОСТ ЧЕРЕЗ «ЗЕЛЕНУЮ ДОЛИНУ».
ПО ПУТИ К RGB ИСТОЧНИКАМ БЕЛОГО СВЕТА**

*А.Ф. Цацудьников^{1,2}, В.В. Лундин^{1,2}, А.В. Сахаров^{1,2}, Е.Е. Заварин^{1,2}, С.О. Усов^{1,2},
А.Е. Николаев^{1,2}, Н.В. Крыжановская^{1,2}, М.А. Сеницын^{1,2}, В.С. Сизов^{1,2}, Н.А. Черкашин³,
А.Е. Черняков², А.Л. Закгейм², М.Н. Мизеров²*

¹ УРАН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. Политехническая 26, 194021, С.Петербург.
тел. +7(812)2973182, e-mail: andrew@beam.ioffe.rssi.ru

² УРАН Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН.
Политехническая 26, 194021, С.Петербург

³ Center for Material Elaboration & Structural Studies (CEMES) of the National Center for Scientific Research (CNRS). 31055, Toulouse, France

Увеличение эффективности излучения светодиодов видимого диапазона на основе нитрида галлия в течение последних двух десятилетий позволило создать эффективные источники белого света на их основе [1]. Однако до сих пор в качестве источников белого света используются светодиоды на основе люминофорных покрытий, а не на принципе RGB-смешения. Основной причиной этого является то, что до сих пор не созданы эффективные светодиоды, излучающие в глубоком зеленом диапазоне длин волн 530 – 580 нм («зеленая долина»), крайне необходимые для создания полноцветных источников белого света [2] с высоким индексом цветопередачи. В системе материалов AlInGaP созданию излучателей с длиной волны менее 580 нм препятствуют фундаментальные проблемы перехода зонной структуры от прямой к непрямой при увеличении содержания алюминия [3]. С другой стороны, в системе материалов AlInGaN нет фундаментальных ограничений, препятствующих увеличению длины волны излучения. Все бинарные соединения и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками и перекрывают диапазон, намного более широкий, чем видимый спектр.

Главной проблемой при создании светодиодов глубокого зеленого диапазона на основе InGaN/GaN структур является то, что увеличение содержания индия в слоях InGaN в активной области светодиода, необходимое для сдвига излучения в длинноволновую сторону, осложнено большим рассогласованием параметров кристаллической решетки в системе GaN-InN, приводящим к возникновению значительных механических напряжений. В данной работе были исследованы методы синтеза активных областей InGaN/GaN для светодиодов глубокого зеленого диапазона и подходы к созданию монокристаллических источников белого света, содержащих в активной области несколько квантовых ям (КЯ) InGaN, излучающих в различных областях спектра, смешение излучения которых дает белый свет.

Обычно активная область светодиодов содержит в основе одну или нескольких КЯ InGaN. Для светодиодов синего диапазона было установлено, что число КЯ оказывает некоторое влияние на эффективность светодиода и ее зависимость от плотности тока, однако практически не влияет на положение и форму линии излучения (Рис. 1а). Это связано с тем, что при малых толщинах КЯ (1.5-2.5 нм) и умеренном содержании индия в них (<20%), релаксация напряжений даже в структурах с большим числом КЯ не происходит. В результате, при сохранении неизменных условий роста КЯ, они формируются с одинаковым содержанием индия. Кроме того, в этих светодиодах, вне зависимости от числа КЯ в активной области, при характерной для светодиодов плотности тока 10-50 А/см² практически вся рекомбинация протекает в ближайшей к р-области прибора квантовой яме [4]. Как следствие этих двух особенностей, спектр излучения светодиодов сине-фиолетового диапазона, для которых характерно небольшое содержание индия в активной области, определяется в основном режимами роста последней (верхней) квантовой ямы и не зависит ни от полного числа КЯ в структуре, ни от содержания индия в нижележащих ямах.

В отличие от случая синих светодиодов, сдвиг спектра излучения в зеленую область, требующий увеличения содержания индия в активной области, приводит к значительно более сложной зависимости свойств многослойной AlInGaN гетероструктуры от числа КЯ. На рис. 1б приведены спектры электролюминесценции (ЭЛ) светодиодных структур, содержащих 1, 3 или 5 КЯ, выращенных в одинаковых технологических режимах. Режимы роста этих структур отличались от аналогичных для светодиодов с длиной волны излучения 460 нм только пониженной на 50°С температурой роста активной области, что приводит к увеличению эффективности вхождения индия. Светодиодная структура с одной КЯ имеет длину волны излучения 500 нм, что соответствует ожидаемой при вышеуказанном снижении температуры. В то же время, светодиодная структура с тремя КЯ имеет длину волны излучения 550 нм, а с пятью КЯ – уже 590 нм. Так как описываемый

эффект наблюдается только для структур с относительно высоким содержанием индия и нарастает с увеличением числа КЯ, можно предположить, что он связан с релаксацией упругих напряжений.

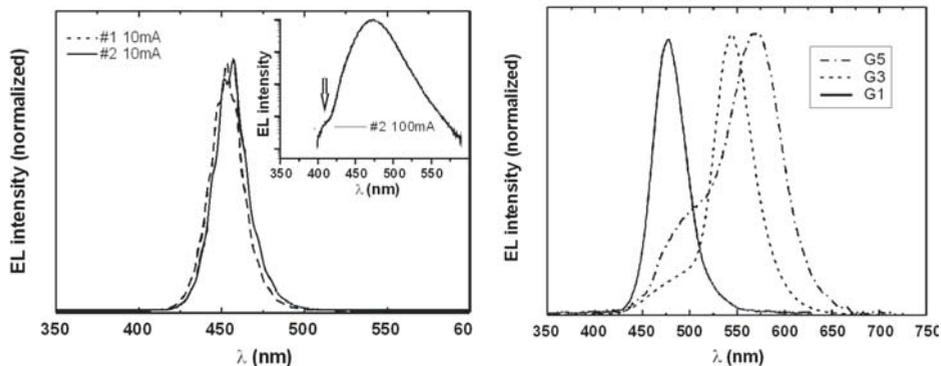


Рис. 1. Спектры ЭЛ светодиодных гетероструктур синего диапазона (а) с различным дизайном активной области: #1 – структура с пятью одинаковыми КЯ, #2 – структура с верхней КЯ, излучающей на длине волны 455 нм и четырьмя нижележащими КЯ, излучающими на длине волны 410 нм. (На вставке к Рис.1а – спектр ЭЛ структуры #2 при большом токе инжекции). Спектры ЭЛ (б) светодиодных гетероструктур G1, G3 и G5 с 1, 3 и 5 КЯ в активной области при токе 100 мА.

Выращенные структуры были исследованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Определение локального содержания индия в квантовых ямах проводилось путем сравнения параметров решетки в КЯ, полученных методом математической обработки ПЭМ изображений высокого разрешения [5] с использованием закона Вегарда. На рисунке 2а представлена двумерная карта распределения локальных деформаций кристаллической решетки по отношению к ненапряженной матрице GaN в направлении [0001] в районе активной области для структуры с тремя КЯ. Более светлые участки соответствуют большему межплоскостному расстоянию, а значит – большему содержанию индия. Отчетливо видно увеличение содержания индия от ямы к яме (Рис. 2б), а также существенные флуктуации распределения индия в плоскости ямы, наблюдавшиеся ранее и для структур синего диапазона [6].

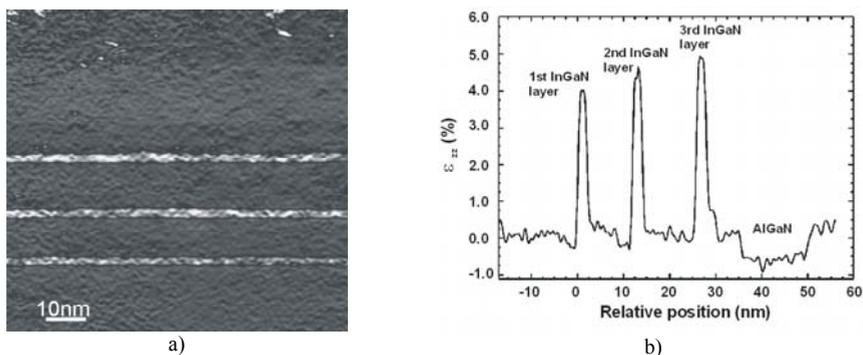


Рис. 2. ПЭМ изображения активной области светодиодной структуры, содержащей три КЯ InGaN (а), и профиль распределения деформации в направлении роста структуры (б).

Из сопоставления данных ПЭМ с данными математического моделирования процесса эпитаксии можно сделать вывод о частичной (в пределах десятков процентов) релаксации упругих напряжений в структурах, приводящей к увеличению вхождения индия в КЯ. Вышеописанная релаксация напряжений происходит с образованием дислокаций, снижающих эффективность люминесценции. Однако, локализация носителей на флуктуациях состава позволяет достичь приемлемой эффективности излучения даже при высокой плотности дислокаций, которая, в свою

очередь, может быть снижена в результате дальнейшей оптимизации дизайна и процесса эпитаксиального роста.

Для преодоления проблемы формирования дислокаций был предложен дизайн активной области светодиодных структур «глубокого» зеленого диапазона содержащей одну КЯ, осажденную на короткопериодную InGaN/GaN сверхрешетку. Параметры полученных светодиодов «глубокого» зеленого диапазона приведены на Рис. 3а.

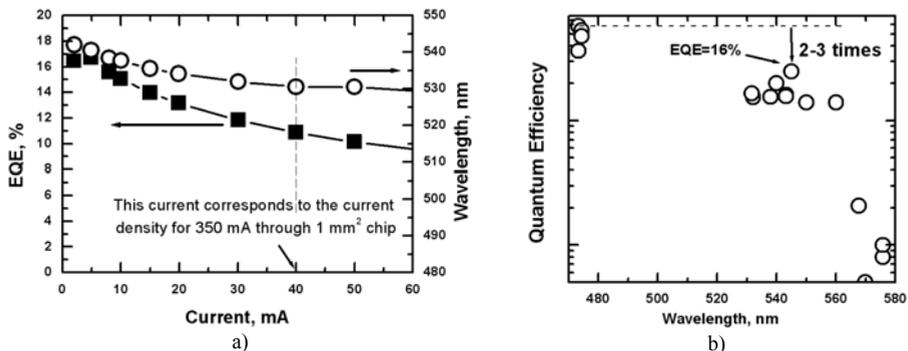


Рис. 3. Зависимости внешней квантовой эффективности и положения максимума излучения светодиода от тока (а), и зависимость внешней квантовой эффективности излучения светодиодных структур (измерения на пластине) от длины волны (б).

За счет уменьшения общего содержания индия и улучшения структурного качества удалось значительно увеличить эффективность излучения и создать светодиодные структуры диапазона длин волн 540-560 нм с эффективностью в 2-3 раза ниже по сравнению со структурами синего диапазона.

На основании проведенных исследований были исследованы подходы к созданию монокристаллических светодиодов. Были созданы структуры, содержащие в активной области КЯ, излучающие в синем 440-450 нм и «глубоком» зеленом 540-570 нм диапазонах. Для создания монокристаллических источников света, содержащих несколько КЯ InGaN, необходимо обеспечить инжекцию носителей во все КЯ. Неоднородная инжекция приводит к тому, что интенсивность излучения уменьшается по мере увеличения расстояния между КЯ InGaN и областью р-легирования. Данный эффект приводит к зависимости интенсивности излучения этих слоев от величины тока и, следовательно, к зависимости от тока цветовых параметров. В данной работе в качестве барьера между КЯ InGaN, излучающими в синей и зеленой областях спектра, была осаждена короткопериодная сверхрешетка InGaN/GaN. Как было показано в работе [7] такая сверхрешетка позволяет увеличить эффективность инжекции носителей в КЯ InGaN, расположенные на большом расстоянии от области р-легирования, и повысить эффективность излучения в светодиодных структурах. Измерения спектров электролюминесценции выращенных структур показали, что спектры излучения содержат две линии, связанные с излучением различных КЯ, причем соотношение интенсивностей «синей» и «зеленой» линий меняется в пределах 0.7-0.3 в зависимости от тока, протекающего через структуру. Данный факт свидетельствует о том, что, несмотря на значительное расстояние между КЯ, удается реализовать эффективную инжекцию носителей.

На рисунке 4 приведена цветовая диаграмма монокристаллического светодиода. Видно, что наблюдается сильная зависимость цветовых параметров от тока, что связано с изменением интенсивностей «синей» и «зеленой» полос при увеличении тока. Коррелированная цветовая температура (CCT) при увеличении тока меняется в пределах от 6000 до 7600 К. Внешняя квантовая эффективность достигает своего максимального значения ~3.5% (для светодиода без линзы) при токе ~20 мА. Уменьшение эффективности излучения монокристаллического светодиода по сравнению с эффективностью зеленых светодиодов связано со значительным увеличением общего содержания индия в активной области, что, по-видимому, приводит к дополнительному формированию дефектов. Однако, необходимо отметить, что несмотря на это увеличение общего содержания индия, катастрофического уменьшения квантового выхода излучения не наблюдается и достигнутое значение внешней квантовой эффективности при данном значении CCT является в настоящее время рекордным.

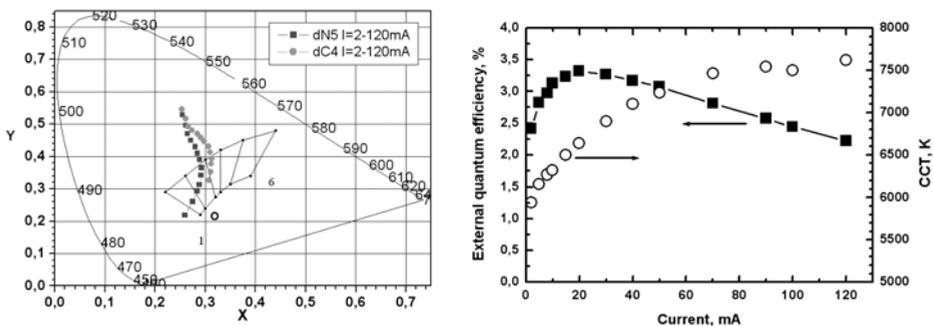


Рис. 4. Цветовые диаграммы МКО 1931 г. (а) и зависимости внешней квантовой эффективности и коррелированной цветовой температуры от тока (б). Точками на рис.4а отмечены координаты цветности при различных величинах тока для спектров от двух исследованных образцов.

Увеличение индекса цветопередачи возможно с помощью осаждения дополнительных КЯ InGaN, излучающих в зеленой области спектра, а также смещения излучения одной из КЯ InGaN в желто-красную область спектра (либо увеличением состава по In в слое, либо увеличением ширины полосы излучения).

Работа проведена при поддержке проектов РФФИ № 08-02-01344-а и № 09-02-12449-офи_м и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27. Авторы выражают благодарность ЗАО “Светлана-Оптоэлектроника” за изготовление светодиодов.

- [1] E. F. Schubert. Light-emitting diodes. Cambridge University Press 2003
- [2] A. Zukauskas, M. Shur, R. Gaska. Introduction to Solid-State Lighting. J. Wiley & Sons, NY, 2002
- [3] Х. Кейси М. Паниш Лазеры на гетероструктурах т.2 изд."Мир", Москва 1981
- [4] А.А. Арендаренко, др., тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия», С-Петербург, 2008, стр 123.
- [5] HREM Research, <http://www.hremresearch.com>.
- [6] Yu.G. Musikhin, et.al. Appl. Phys. Lett. 80 (12), 2099-2101 (2002)
- [7] А.Ф. Цацульников, и др. ФТП, 44 (1), 96-100 (2010).

BRIDGE OVER THE “GREEN VALLEY”. TOWARDS RGB WHITE LIGHT SOURCE

A.F.Tsatsulnikov^{1,2}, *W.V.Lundin*^{1,2}, *A.V.Sakharov*^{1,2}, *E.E.Zavarin*^{1,2}, *S.O.Usov*^{1,2},
A.E. Nikolaev^{1,2}, *N.V.Kryzhanovskaya*^{1,2}, *M.A. Synitsin*^{1,2}, *V.S. Sizov*^{1,2}, *N.A. Cherkashin*³,
*A.E.Chernyakov*², *A.L.Zakgeim*², *M.N. Mizerov*²

¹ Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Politehnicheskaya 26, 194021, St. Petersburg
 Phone. +7(812)2973182

² Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center RAS
 Politehnicheskaya 26, 194021, St. Petersburg

³ Center for Material Elaboration & Structural Studies (CEMES) of the National Center for Scientific
 Research (CNRS). 31055, Toulouse, France

Approaches to the fabrication of LED structures emitting in epy “deep” green optical range (~540 nm) were investigated. Dependence of the In content in the MQW structure on the number of period was studied and enhance in the In content with increase in the number of QWs was revealed for the green LED structures. It was shown that using of the novel design of active region based on the single InGaN QW deposited on the top of short-period InGaN/GaN superlattice leads to the increase of the emission efficiency. Monolithic white LED structures based on the active region containing two QWs emitting in blue and green ranges and separated by short-period InGaN/GaN superlattice were developed. White light emission with maximal external quantum efficiency more than 3.5% and CCT in the range of 6000 - 7600 K was demonstrated.

СИНИЙ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЙ ДИОД С ПЕРИОДИЧЕСКИ СТРУКТУРИРОВАННЫМ КОНТАКТОМ

Холопова Ю.В.; Барабанков М.Ю., Шановал С.Ю.*

ИПТМ РАН, Московская область, Черноголовка, ул. Институтская 6,
e-mail: jvkh@iptm.ru

В настоящее время широко применяются светоизлучающие диоды (СИД) на основе гетеропитаксиальных структур

Вывод генерируемого в р-п-переходе излучения существенно ограничен из-за потерь на полное внутреннее отражение излучения, падающего на границу раздела под углом, большим критического; потерь на поглощение излучения в толще полупроводника и диэлектрических потерь внутри конуса выхода света.

Длительное время ведутся работы по нахождению способов увеличения доли выводимого излучения, которые приведены в работе [1].

Мы исследовали характеристики AlGaIn/InGaIn/GaN синего светодиода, конструкция которого рассчитана на частоту модуляции излучения до 100 ГГц. На излучающую поверхность такого светодиода впервые в качестве р-контакта нанесена Au/Ni дифракционная решётка, параметры которой сравнимы с характерной длиной волны излучения СИД. Расстояние от активной области до границы раздела сред полупроводник-воздух составляет менее 200 нм, что значительно снижает потери в толще полупроводника по сравнению с теми СИД, в которых вывод света осуществляется через подложку, где расстояние от активной области до поверхности более 200 мкм [1-3].

Целью работы являлось изучение влияния такого объекта как дифракционная решётка на электрооптические характеристики СИД, исследование СВЧ характеристик такого светодиода.

Пластина со светодиодными структурами выращивалась методом химического осаждения из газовой фазы из металлоорганических соединений с травлением мезаструктуры плазмой в режиме электронного циклотронного резонанса.

Формирование Au/Ni двумерной решётки над излучающей поверхностью произведено методами электронно-лучевой литографии.

Параметры решетки с шириной направляющей 0,1 мкм выбраны на основе моделирования ее частотных спектров отражения [1].

На изготовленной структуре с контактом-решеткой проведены измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, получена зависимость проводимости от напряжения, диаграммы направленности и спектры излучения [1].

Из экспериментальных данных получена эффективность преобразования электрической мощности (при токе 0,4 мА) в оптическую мощность, которая составляет 26%, что на 8% превышает значение аналогичного параметра светодиода с обычным контактом. Кроме того, дифракционная решетка позволяет варьировать угловое распределение излучения простым изменением величины электрического смещения (рисунок 1).

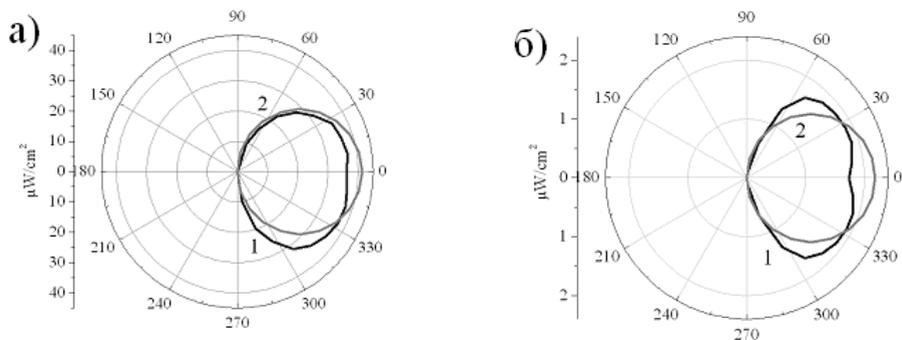


Рисунок 1. Измеренные диаграммы направленности излучения (1) и источника Ламберта (2) при токе 10 (а) и 0,4 (б) мА, протекающего по направляющим контактам-решеткам.

- [1] М.Ю. Барабаненков, А.В. Ковальчук, Е.А.Полушкин, В.В.Сироткин, Ю.В. Холопова, С.Ю. Шаповал. Вестник МГТУ им. Баумана, Естественные науки, 2(33), 48 (2009).
- [2] S. Shapoval, M. Barabanenkov, V. Sirotkin, E. Polushkin, L. Saptsova, A. Kovalchuk, V. Zemlyakov, N. Antonova, A.Tsasulnikov, W. Lundin, E. Zavarin, A. Sakharov, V. Ustinov. // WOCSDISE 2007. Venice, Italy. 2007/05/20 – 23. – pp. 29 – 30.
- [3] М. Barabanenkov, V. Sirotkin, Yu. Kholopova, A. Kovalchuk, N. Antonova, E. Polushkin, S. Shapoval. VII Международная научно-техническая конференция. Квантовая электроника. Минск, Беларусь, 2008/10/13 – 16. с. 65

BLUE LIGHT EMITTING DIODE WITH THE PERIODICALLY STRUCTURED P-CONTACT

Yu. Kholopova, M. Barabanenkov, S. Shapoval

Institute of Microelectronics Technology RAS, 142432 Chernogolovka,
Moscow region, Russia, e-mail: jvkh@iptm.ru

The device studied in the present report is a LED structure grown by MOCVD on a sapphire substrate. Getting LED's p-contact into shape of laminar diffraction grating promises more efficient light output. Stripe-like grooves of grating can spatially homogeneous spread of applied current driving across the whole structure being the grating covered structure surface totally.

As results, the presented pattern p-contact due to an ability of diffraction grating not only does control the emission angle cone but to couple exponentially decaying (evanescent) part of LED radiance to the air. It is shown that using such contact increases the LED efficiency at least by 8 %.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ ЧИПОВ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.Ю. Карпов*, К.А. Булашевич, О.В. Хохлев, М.В. Богданов, М.С. Рамм, И.Ю. Евстратов
ООО «Группа СТР» – ООО «Софт-Импакт», пр. Энгельса 27, 194156 Санкт-Петербург,
тел. +7(812)5544570, e-mail: sergey.karpov@str-soft.com ;

Тонкоплёночные светодиоды (СД) флип-чип конструкции, основанные на удалении подложки после выращивания на ней СД структуры и текстурировании обратной стороны n-GaN контактного слоя, были предложены с целью существенного увеличения эффективности экстракции света [1-3]. В настоящее время существуют две разновидности таких СД – с двухсторонней [1,2] и односторонней [3] геометрией контактов. В последнем случае металлические электроды к n-GaN контактному слою формируются внутри ряда отверстий протравленных через p-контактный слой и активную область гетероструктуры. В данной работе с помощью моделирования проведён анализ сильных и слабых сторон обеих конструкций.

Для анализа работы каждого из СД чипов была выбрана типичная гетероструктура, состоящая из толстого n-GaN контактного слоя с концентрацией электронов $n = 1.5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, активной области, 40 нм p-Al_{0.2}Ga_{0.8}N блокирующего слоя и 200 нм p-GaN контактного слоя с концентрацией акцепторов $[Mg] = 2.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Активная область включала в себя четыре InGaN квантовые ямы (КЯ), излучающие свет с длиной волны 452 нм, разделённые 10 нм GaN барьерами ($n = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Конструкции $815 \times 875 \text{ мкм}^2$ и $1000 \times 1000 \text{ мкм}^2$ СД чипов с двухсторонней и односторонней геометрией контактов показаны схематически на Рис. 1a,b.

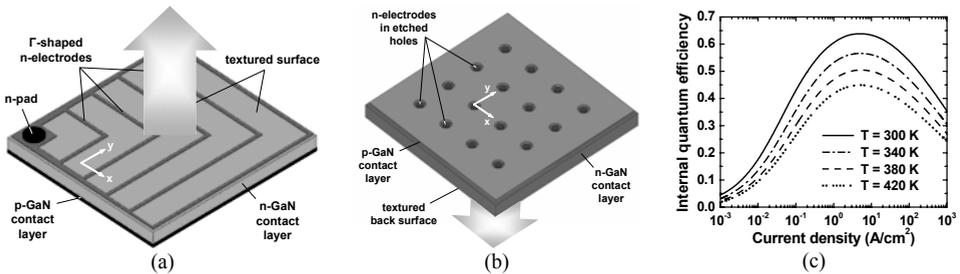


Рис.1. СД чипы с двухсторонней (а) и односторонней (б) геометрией контактов. ВКЭ СД структуры в зависимости от плотности тока, рассчитанная для различных температур (с).

Моделирование работы СД проводилось с помощью пакета SimuLED [4], обеспечивающего сопряжённый анализ электрических, термических и оптических процессов. Оже-рекомбинация в InGaN КЯ рассматривалась как основной нетермический механизм, лимитирующий внутреннюю квантовую эффективность (ВКЭ) СД структуры при больших плотностях тока [5,6] – см. Рис.1с. Текстурирование обратной поверхности n-GaN контактного слоя моделировалось с помощью плотной упаковки гексагональных пирамид с периодом, равным 500 нм и отношением высоты к основанию, равным 4. Оптические свойства серебра и золота использовались при трассировке лучей для анализа отражения излучённого света от n- и p-омических контактов, соответственно.

Моделирование предсказывает сильный эффект локализации тока вблизи краёв n-электродов для обоих СД (см. Рис.2a,b). Эта локализация усиливается с ростом тока, протекающего через СД. Из-за меньшего полного периметра n-электродов локализация тока гораздо более выражена в чипе с односторонней геометрией контактов, чем в чипе с двухсторонней геометрией, в частности к большему рабочему напряжению такого СД при больших токах (Рис.2с). В двухстороннем чипе ток локализуется вблизи n-электродов, особенно в области усиления контакта (Рис.2a). Свет, излучённый в этих областях, имеет весьма низкую вероятность вывода из чипа из-за потерь, связанных с неполным отражением от металлических n-электродов (Рис.3a). В результате полная эффективность экстракции света (ЭЭС) из СД становится зависимой от его рабочего тока (Рис.3б). Падение ЭЭС может быть заметно подавлено за счёт вставки изолирующей плёнки под площадку усиления контакта и использования более узких Г-образных электродов с уменьшенным расстоянием между ними (лучшенная конструкция двухстороннего чипа). В то же время ЭЭС из одностороннего чипа практически не зависит от тока и превышает ЭЭС одностороннего чипа, благодаря отсутствию металлизации n-GaN контактного слоя. С другой стороны, односторонний

чип обнаруживает более сильный спад внешней квантовой эффективности с током из-за более сильной его локализации вблизи p-электродов. Все эти эффекты приводят к существенно различному поведению коэффициента полезного действия (КПД) СД обеих конструкции при изменении тока (см. Рис.3с).

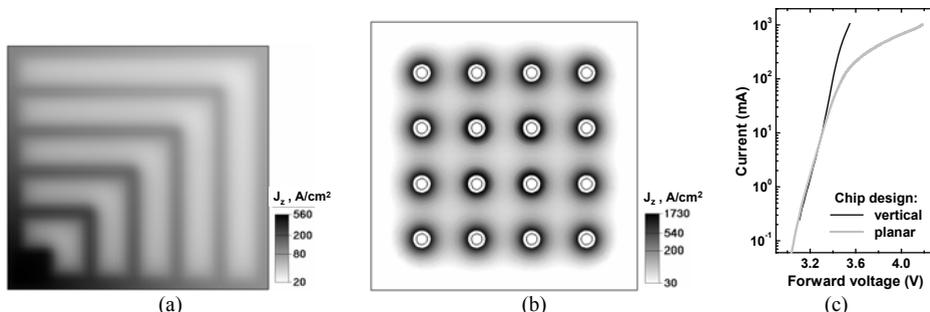


Рис.2. Распределение плотности тока в активной области чипа с (а) двухсторонней и (б) односторонней геометрией контактов. Вольт-амперные характеристики СД разных конструкций (с).

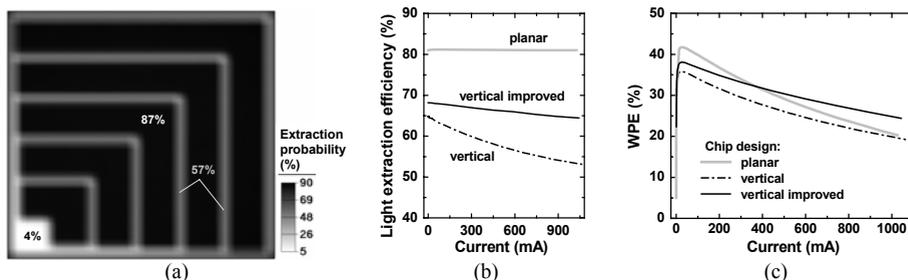


Рис.3. Вероятность экстракции света из определённой точки активной области в двухстороннем чипе (а). Полная эффективность экстракции света (б) и КПД СД обеих конструкций в зависимости от их рабочего тока (с).

Рассмотренные выше два типа СД предполагают различные стратегии их дальнейшего улучшения. Двухсторонний СД требует, прежде всего, повышения эффективности экстракции света, что может быть достигнуто за счёт изменения конструкции чипа. Характеристики одностороннего СД, напротив, могут быть улучшены путем оптимизации гетероструктуры, направленной на уменьшение зависимости её ВКЭ от плотности тока.

- [1] V. Härle, B. Hahn, S. Kaiser, A. Weimar, D. Eisert, et al., Proc. of SPIE, **4996**, 133 (2003).
- [2] V. Härle, B. Hahn, S. Kaiser, A. Weimar, et al., Phys. Stat. Solidi (a), **201**, 2736 (2004).
- [3] O. B. Shchekin, J. E. Epler, T. A. Trottier, T. Margalith, et al., Appl. Phys. Lett., **89**, 071109 (2006).
- [4] <http://www.str-soft.com/products/SimuLED/>
- [5] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, et al., Appl. Phys. Lett., **91**, 141101 (2007).
- [6] K. A. Bulashevich and S. Yu. Karpov, Phys. Stat. Solidi (c), **5**, 2066 (2008).

MODELING OF HIGH-POWER LIGHT-EMITTING DIODES: COMPARATIVE ANALYSIS OF ADVANCED CHIP DESIGNS

S.Yu. Karpov¹, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, M.V. Bogdanov, M.S. Ramm, and I.Yu. Evstratov

STR-Group – Soft-Impact, Ltd., 27 Engels ave., 194156 St. Petersburg,
phone: +7(812)5544570, e-mail: sergey.karpov@str-soft.com ;

Vertical and planar thin-film flip-chip blue LEDs are compared by simulation to identify strong and weak points of approaches to their design. Current crowding and its effect on internal quantum efficiency and light extraction efficiency are found to be key factors limiting the device performance.

ОПТИМИЗАЦИЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ III-НИТРИДОВ

В.С. Сизов *, *А.Ф. Цацульников*, *А.В. Сахаров*, *В.В. Лундин*, *Е.Е. Заварин*, *А. Е. Николаев*
УРАН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, РАН

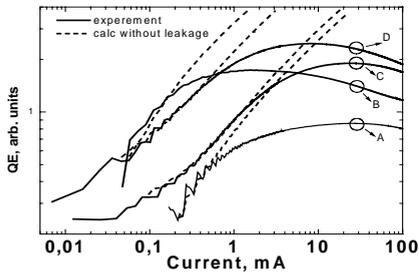
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26 Россия. e-mail: vsizov@mail.ioffe.ru;

Несмотря на значительный прогресс в технологии светоизлучающих приборов на основе нитрида галлия проблема повышения эффективности приборов по-прежнему остаётся актуальной. Предпринимались многочисленные попытки оптимизации дизайна структур и режимов выращивания эпитаксиальных структур. Помимо улучшения качества самих слоёв подбором режимов роста в III-нитридах активно используются слои InGaN, ограничивающие транспорт носителей к безызлучательным центрам (БЦ). В рамках настоящей работы были предложены пути оптимизации дизайна активной области светодиодных структур с InGaN активной областью позволяющие с одной стороны улучшить условия инжекции, а с другой - качество активной области и ограничение транспорта к БЦ.

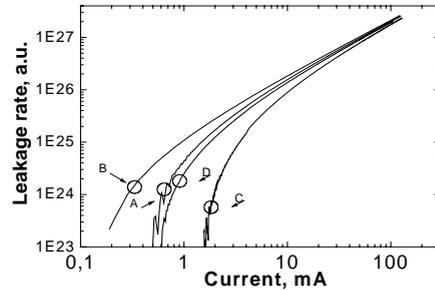
В работе исследовались три серии образцов, выращенные методом MOCVD на установке Aixtron 2000 HT. Первая серия образцов состояла из двух рабочих слоёв InGaN, излучающих на длине волны 470nm (A-D). В образце А перед осаждением рабочих слоёв выращивались слои InGaN меньшего состава, служащие для контроля напряжений. В образце В вместо нижних слоёв InGaN выращивалась короткопериодная решётка InGaN/GaN (КПСР) [1]. Образец С был аналогичен образцу А, однако после осаждения рабочих слоёв InGaN перед блокирующим слоем AlGaN выращивалась КПСР. В образце D КПСР выращивалась как вместо нижних слоёв InGaN, так и после рабочих слоёв. Были получены зависимости квантовой эффективности от тока через структуру рис1а. Анализ этих зависимостей, подробно описанный в [2], позволяет получить значения коэффициента безызлучательной рекомбинации, а также зависимости от тока дополнительных утечек, не связанных с моно- и би – молекулярной (МОР, БИР) рекомбинацией рис1б. Значения МОР получились равными $2.3 \cdot 10^8$, $0.8 \cdot 10^8$, $2.9 \cdot 10^8$, $1.4 \cdot 10^8$ с⁻¹ для структур А, В, С, D, соответственно. Видно, что применение КПСР снизу значительно уменьшает скорость МОР. Поскольку скорость МОР определяется не только плотностью БЦ, но и транспортом к ним. Для образцов А и В были исследованы температурные зависимости эффективности ФЛ. Аппроксимация зависимостей по закону Аррениуса выявила, что образцы имеют одинаковые энергии активации (ЭА), но значение предэкспоненциального множителя, отражающего плотность БЦ, оказалось в два раза больше у образца А. Следовательно, применение КПСР под активной областью позволяет существенно снизить плотность БЦ. Также, как видно из рис1б применение КПСР над активной областью позволяет уменьшить значение утечек при увеличении тока, протекающего через структуру. Мы связываем это со следующим. Как было показано в работе [3], при повышении уровня инжекции блокирующий слой AlGaN перестаёт эффективно ограничивать диффузию электронов в р – область, из-за чего наблюдается падение эффективности структур. Применение верхней КПСР приводит к увеличению эффективной высоты барьера AlGaN, уменьшая, тем самым, диффузию электронов в р – область. Увеличение утечки носителей при малых токах при использовании КПСР, по-видимому, связано с утечкой дырок в п- область. Однако, совместное использование КПСР снизу и над активной областью в целом значительно увеличивает стабильность и КЭ структур.

Остальные две серии (F1-F2, S1-S3) были выращены аналогично структуре D, однако имели различную толщину барьера между нижней КПСР и рабочими слоями InGaN. Причём в серии F1-F2 образцы содержали один рабочий слой InGaN, а серии S1-S3 - три. Толщины барьеров между КПСР и активными слоями были 2,6 нм для F1,F2 и 10,15,22.5 нм для S1-S3, соответственно. Для обеих серий структур были получены и проанализированы зависимости КЭ от тока аналогично первой серии. На рис2а представлены зависимости дополнительных утечек от тока. Видно, что в каждой серии увеличение толщины барьера между КПСР и рабочими слоями приводит к уменьшению утечек при малых токах, что также объясняется утечкой дырок в п – область. На рис 2б представлены зависимости скорости МОР от толщины барьера GaN. Видно, что увеличение толщины также влечёт за собой уменьшение скорости МОР вплоть до толщин 20нм. Дальнейшее увеличение приводит к возрастанию скорости МОР. Для обеих серий были получены и проанализированы температурные зависимости эффективности ФЛ от температуры. На рис 2б. Представлены зависимости ЭА в зависимости от толщины барьера. Видно, что для каждой серии увеличение толщины барьера приводит к увеличению ЭА до значений толщины 20 нм. Следовательно, уменьшение скорости МОР вызвано подавлением транспорта носителей к БЦ.

Показано, что использование КПСР позволяет с одной стороны уменьшить плотность БЦ в активной области, с другой стороны - улучшить условия инжекции. Толщина барьера между нижней КПСР и рабочими слоями InGaN определяет степень фазового распада и позволяет регулировать транспорт носителей к БЦ. Комбинация описанных в работе подходов к оптимизации дизайна позволяет значительно увеличить эффективность и стабильность светодиодных структур.

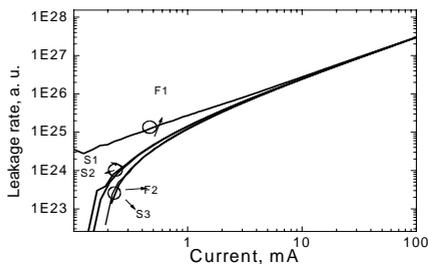


(a)

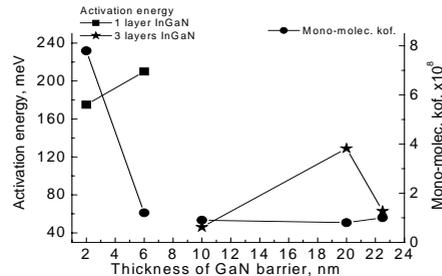


(b)

Рис.1. (а) Зависимость КЭ и от тока для первой серии структур. (б) Зависимость дополнительных потерь помимо мономолекулярной рекомбинации.



(a)



(b)

Рис.2. (а) Зависимость утечек и от тока для второй и третьей серии структур. (б) Зависимость коэффициента мономолекулярной рекомбинации и энергии активации от ширины барьера между КПСР и активными слоями.

Работа проведена при поддержке Федерального агентства по образованию, Государственного контракта №02.523.12.3017 от 14 августа 2008 г., Проектов РФФИ № 09-02-12449-офи_м и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27 «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

[1] А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Сахаров, Е.Е. Заварин, С.О. Усов. ФТП 44, 1 (2010) pp-96-100.

[2] I. V. Rozhansky and D. A. Zakheim, Phys. Stat. Sol. (a) 204, 1, 227–230 (2007).

[3] Martin F. Schubert et al., Appl. Phys. Lett. 91, 231114 (2007).

OPTIMIZATION OF ACTIVE REGION FOR GaN BASED LEDs

V.S.Sizov, A. F. Tsatsulnikov, A.V.Sakharov, W.V.Lundin, E.E.Zavarin, A.E. Nikolaev*

Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, 26 Polytekhnicheskaya, St Petersburg 194021, Russian Federation
e-mail: vsizov@mail.ioffe.ru;

EL and PL of several series of sample were investigated. It was shown that applying of SPSL in design of GaN based LEDs leads to improve their injection condition and quality of active layers. When SPSL is situated under active region (AR) density of non-radiative centers decreases, in case SPSL is above AR it leads to increase of effective height of AlGaIn blocking layer and prevent diffusing of electrons to p - layer. The thickness of GaN barrier between SPSL under active layers and active layers affect to phase separation of InGaIn layers and suppress diffusion of hole to n - layer. Combination of these approaches can greatly increase efficiency of GaN based devices.