

Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе $p-n$ -гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами¹

© М.Л. Бадгутдинов, Е.В. Коробов, Ф.А. Лукьянов, А.Э. Юнович[¶], Л.М. Коган⁺,
Н.А. Гальчина⁺, И.Т. Рассохин⁺, Н.П. Социн^{*}

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (физический факультет),

119899 Москва, Россия

⁺ НПЦ ОЭП „ОПТЭЛ“,

105187 Москва, Россия

^{*} ФГУП НИИ „Платан“,

141190 Москва, Россия

(Получена 1 ноября 2005 г. Принята к печати 14 ноября 2005 г.)

Исследованы спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN синего свечения, выращенных на подложках из SiC, и покрытых желто-зелеными люминофорами на основе алюмоиттриевых гранатов с примесями редкоземельных элементов. Светодиоды синего свечения имеют коэффициент полезного действия до 22% при токе 350 мА и напряжении 3.3 В. Светодиоды белого свечения имеют светоотдачу до 40 лм/Вт и световой поток до 50 лм при токе 350 мА.

PACS: 85.60.Jb

1. Введение

Разработки светодиодов (СД) белого свечения на основе $p-n$ -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN в последние годы идут быстрыми темпами во всем мире, поскольку они должны стать элементной базой освещения будущего [1–4]. Увеличение внутреннего квантового выхода излучения η_i эпитаксиальных структур с квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN определяется выбором материала подложки (сапфир или карбид кремния), улучшением качества буферного слоя, составом и легированием множественных квантовых ям [1–4]. Это за последние годы привело к уменьшению концентрации дислокаций от 10^9 до 10^6 см⁻² [5,6]. Максимальные значения η_i , о которых сообщалось в литературе, достигают 60% для длин волн вблизи $\lambda = 405$ нм и 12% вблизи $\lambda = 530$ нм. Величина η_i имеет максимум в зависимости от тока. Ее падение при больших токах определяется инжекцией неосновных носителей за пределы активной области с квантовыми ямами [7,8], неоднородностью растекания тока вблизи контактов [9] и увеличением температуры диода. Внешний квантовый выход излучения η_e зависит от оптической конструкции — геометрии кристалла и контактов, показателя преломления и формы фокусирующего купола. Достигнутые в последние годы значения η_e : 43% вблизи $\lambda = 405$ нм и до 35% вблизи $\lambda = 460$ нм [10].

Настоящая статья продолжает работы [11–14] по исследованию спектров и эффективности светодиодов на

основе GaN. Существенное отличие рассматриваемых в статье диодов заключается в том, что они созданы из структур, выращенных на подложках из карбида кремния. Подложки из SiC (в отличие от сапфира) могут быть проводящими, что позволяет создавать контакты к p - и n -областям структуры с разных сторон „чипа“. Это в свою очередь уменьшает неоднородность растекания тока вблизи контактов и создает лучший теплоотвод от активной области при больших токах [15,16].

Существуют разные способы создания светодиодов белого свечения [2–4,17]. В настоящей статье применен способ сложения излучения синего кристалла с излучением возбуждаемого им желто-зеленого люминофора на основе алюмоиттриевого граната [18,19]. Вариации состава и количества люминофора позволяют создать суммарный спектр с нужными цветовыми характеристиками белого света [11,13,14]. В статье обращено внимание на анализ цветовых характеристик спектров.

2. Методика экспериментов

Светодиоды были созданы из кристаллов фирмы Cree, выращенных на подложке из SiC; они имеют активную область на основе $p-n$ -гетероструктур с множественными квантовыми ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN. СД белого свечения получали смешением синего излучения кристалла с излучением желто-зеленого люминофора [14].

Спектры люминофоров на основе алюмоиттриевых гранатов с общей формулой $Y_{3-x}(TR)_xAl_{5-y}Ga_yO_{12}:Ce^{3+}$ могут быть изменены замещением части (x) ионов иттрия Y^{3+} на атомы переходных металлов, в частности гадолиния или празеодима ($TR = Gd, Pr$), или части (y) атомов Al на атомы Ga [14]. Добавки Gd позволяли смещать

¹ Работа частично доложена на 4-й Всероссийской конференции „Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы“ (Санкт-Петербург, 2005) и на 7-й Российской конференции по физике полупроводников (Звенигород, 2005).

[¶] E-mail: yunovich@phys.msu.ru

максимум полосы люминесценции от 530 до 590 нм, добавки Ga — смещать максимум поглощения от 475 до 445 нм для согласования с максимумом спектра излучения диода. Эффективность возбуждения люминофора зависит от положения максимума синей линии относительно полосы поглощения люминофора. Количество люминофора варьировалось, что позволяло изменять спектры и цветовые характеристики СД.

Конструкции мощных светодиодов создавались в соответствии с патентом [20]. Чипы устанавливались прямым монтажом стороной выращенной структуры с *p*-областью на металлизированную поликоробовую пластину толщиной 0.3 мм, вывод излучения осуществлялся через прозрачную подложку из SiC. Площадь кристалла варьировалась для разных СД, приведены данные для площади *p*-*n*-перехода $S = 0.8 \text{ мм}^2$. Такая конструкция позволяла пропускать большие токи (до 350 мА).

Для сбора и преобразования бокового излучения кристаллов использовался накладной керамический отражатель [21], согласованный по размерам с полимерной линзой. Для фокусировки излучения использовался полимерный купол полусферической или эллиптической формы, показатель преломления полимера $n \approx 1.55$.

Спектры люминесценции исследовались по методике, описанной в [12]. Световой поток измерялся с применением калиброванной интегрирующей сферы, мощность излучения — измерителем Coherent FieldMax-Top или градуированным кремниевым фотоэлементом.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Спектры излучения и эффективность синих светодиодов

На рис. 1, *a* представлены спектры электролюминесценции одного из СД синего свечения, на основе которых были изготовлены белые СД.

Общая форма спектров, так же как и спектров электролюминесценции структур типа InGaN/AlGaIn/GaN, выращенных на сапфире, описывалась в модели, учитывающей комбинированную двумерную плотность состояний вблизи краев зон, имеющих „хвосты“ с характерным показателем экспоненциального спада в длинноволновой области E_0 . Модель учитывает произведение функций заполнения состояний в зоне проводимости и в валентной зоне $f_c(1 - f_v)$ с характерным показателем экспоненциального спада $E_1 = mkT$ (T — температура, k — постоянная Больцмана) [22,23]. Заметим, что эта же модель хорошо описывает и спектры фотолюминесценции структур с квантовыми ямами типа InGaIn/AlGaIn/GaN [24].

Показатель экспоненты длинноволнового спада спектра имел значения $E_0 = 58\text{--}61$ мэВ. Физический смысл этого показателя — характерная энергия флуктуаций потенциала в структурах. Следует понять, почему этот параметр, зависящий от неоднородностей состава InGaIn

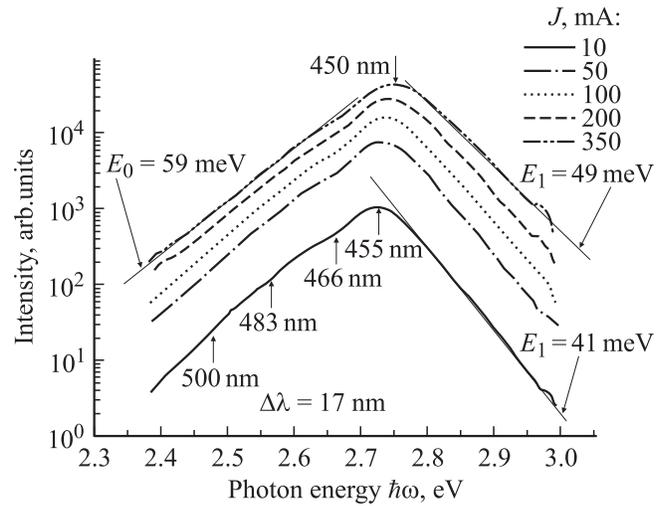


Рис. 1. Спектры электролюминесценции СД синего свечения при изменении тока от 10 до 350 мА. Показана экспоненциальная аппроксимация наклонов с показателями E_0 и $E_1 = mkT$. Стрелками в длинноволновой части показаны относительные минимумы, обусловленные интерференцией, с периодом $\Delta\lambda = (17 \pm 1)$ нм.

по In, от флуктуаций пьезоэлектрических полей и ширины ям, слабо зависит от условий роста на разных подложках и изменяется в узких пределах 56–65 эВ.

Максимум в спектрах излучения смещался в пределах длин волн $\lambda_{\text{max}} \approx 455\text{--}450$ нм (энергии фотона $\hbar\omega_{\text{max}} = 2.729\text{--}2.755$ эВ) при изменении тока от $J = 10$ до 350 мА (плотность тока $j = 1.2\text{--}44$ А/см²). Полный сдвиг максимума $\delta(\hbar\omega_{\text{max}}) = 26$ мэВ (рис. 1) больше, чем для синих структур с модулированно-легированными множественными квантовыми ямами, выращенными на сапфире, где $\delta(\hbar\omega_{\text{max}}) = 5$ мэВ [12,22,23]. Заметим, что энергия максимума $\hbar\omega_{\text{max}}$ для создания белых светодиодов должна совпадать с энергией максимума в спектрах возбуждения люминофоров и не изменяться в области рабочих токов.

Показатель экспоненты коротковолнового спада спектра, определяемый из спектра в полулогарифмическом масштабе, $d(\hbar\omega)/d(\ln I)$ (I — интенсивность), изменялся при увеличении тока в пределах $E_1 = mkT = 41\text{--}49$ мэВ. Отсюда был оценен нагрев структуры при 350 мА: $\Delta T \approx 60$ К.

На длинноволновом крыле наблюдалась особенность вблизи длины волны 465–466 нм. Более подробный анализ формы спектров по методике [22,23] показал, что частично эта особенность связана с интерференционной модуляцией спектров (рис. 1). Из периода модуляции $\Delta\lambda = (17 \pm 1)$ нм была оценена общая толщина слоя GaIn и активной области структур:

$$d = (\lambda/2)(1 + \lambda/\Delta\lambda)/n[1 + (\lambda/n)(dn/d\lambda)] \approx 2.3 \text{ мкм}. \quad (1)$$

На рис. 2 показана зависимость мощности излучения (P) и коэффициента полезного действия (η_p) синие-

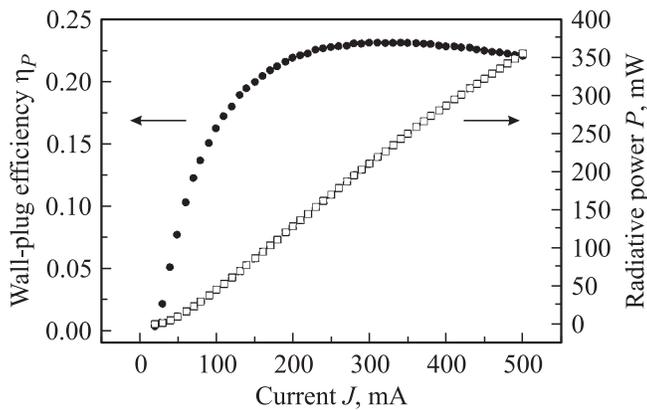


Рис. 2. Зависимость мощности излучения P и коэффициента полезного действия η_P синего светодиода от тока.

го диода от тока. Зависимость имеет пологий максимум вблизи токов $J = 300\text{--}350$ мА (плотности токов $j = 38\text{--}44$ А/см²). При увеличении тока до 350 мА мощность излучения синих СД с полимерным корпусом изменялась в пределах 200–270 мВт. По измерениям светового потока в интегрирующей сфере это соответствовало КПД $\eta_P \approx 21\text{--}28\%$.

3.2. Спектры излучения и эффективность белых светодиодов

На рис. 3 представлены спектры излучения белого СД со сравнительно малой долей люминофора при изменении тока до 350 мА. Основная полоса спектра обусловлена излучением кристалла синего СД. Максимум смещается с током от 459.5 до 457 нм ($\hbar\omega_{\max} = 2.694\text{--}2.713$ эВ). Небольшой сдвиг максимума (1–1.5 нм) в длинноволновую сторону заметен при токах $J > 100$ мА. Показатель экспоненты коротковолнового спада изменяется в пределах $E_1 = mkT = 43\text{--}62$ мэВ. Сделанная отсюда оценка нагрева при $J = 350$ мА дает $\Delta T \approx 130$ К, т.е. несколько больше, чем для синего диода без люминофора. Ширина полосы на полувысоте при $J = 350$ мА равна $(\Delta\hbar\omega)_{1/2} = 0.13$ эВ.

Широкая желто-зеленая полоса излучения люминофора имеет максимум при 575 нм (2.156 эВ) во всем диапазоне токов, ширина полосы равна 0.5 эВ. В спектре излучения люминофора наблюдается пик в красной области, связанный с наличием в составе люминофора редкоземельных металлов (Dy, Pr). Пик разрешается как дублет с длинами волн 695.5 и 694 нм. Минимум спектральной интенсивности (2.45–2.48 эВ) между основной линией диода и желто-зеленой полосой люминофора проявляется достаточно резко.

На рис. 4 приведены спектры излучения трех белых СД с последовательным увеличением содержания люминофора. Положение максимума синей полосы в спектрах разных СД при токе $J = 350$ мА изменяется в пределах $\lambda_{\max} = 450\text{--}457$ нм ($\hbar\omega_{\max} = 2.755\text{--}2.713$ эВ). Небольшое отличие этих значений от данных рис. 1 отражает

разброс параметров синих СД по исходной пластине и влияние поглощения части излучения люминофором.

Положение максимума желто-зеленой полосы люминофора в спектрах зависело от описанных выше небольших изменений состава люминофора и изменялось в пределах 566–575 нм; ширина спектральной полосы на половине интенсивности была ~ 135 нм ($(\Delta\hbar\omega)_{1/2} \approx 0.50$ эВ). Отношение интенсивности синей полосы к интенсивности полосы люминофора в максимумах слабо зависело от тока при $J > 200$ мА и от диода к диоду изменялось в пределах от 2.8 до 0.9 при последовательном увеличении толщины слоя люминофора. Вариации этих спектров определяли цветовые характеристики светодиодов.

На рис. 5 приведены зависимости светового потока (L), измеренного с помощью интегрирующей сферы, и светоотдачи (η_L) белого СД с повышенным содержанием

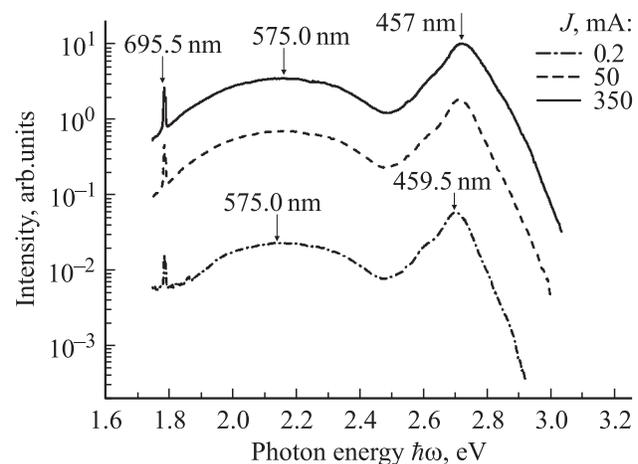


Рис. 3. Спектры электролюминесценции СД белого свечения с пониженным содержанием люминофора при разных токах.

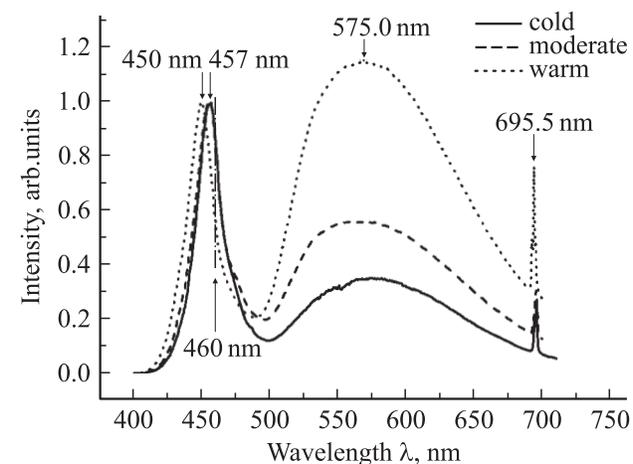


Рис. 4. Спектры электролюминесценции СД белого свечения с разным содержанием люминофора. При последовательном увеличении содержания люминофора характер свечения изменяется как cold→moderate→warm. Стрелка 460 нм указывает на максимум в спектре поглощения люминофора.

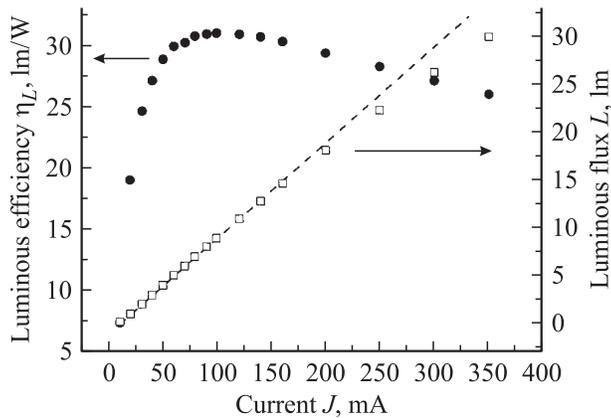


Рис. 5. Зависимость светового потока и светоотдачи белого СД „теплого“ свечения от тока.

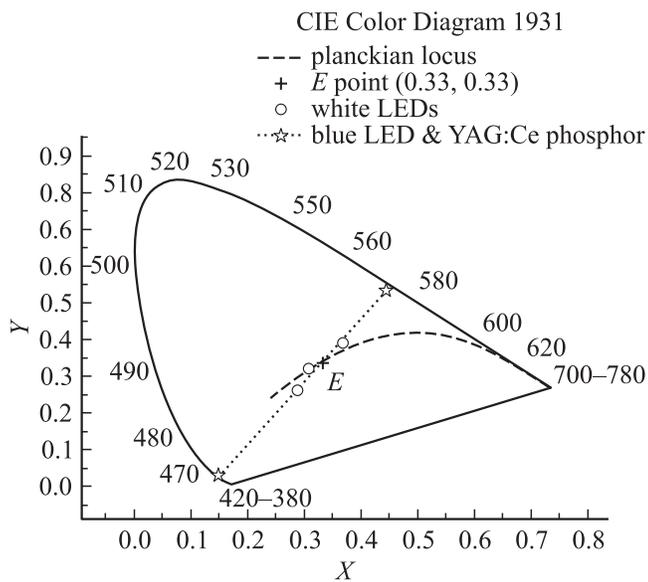


Рис. 6. Цветовая диаграмма МКО 1931 г. с точками, соответствующими трем белым СД при изменении содержания люминофора. Штриховая линия — кривая Планка. Звездочками отмечены координаты цветности синего диода и желто-зеленого люминофора.

люминофора от тока до $J = 350$ мА. Зависимость $L(J)$ линейна вплоть до 150 мА, затем сублинейна, и при 350 мА световой поток достигает 31 лм. Рассчитанная из этой кривой зависимость $\eta_L(J)$ имеет максимум 30 лм/Вт при $J = 100$ мА. В таблице приведены максимальные значения L и η_L при $J = 350$ мА для светодиодов с разным содержанием люминофора. Значения η_L достигают 40 лм/Вт.

3.3. Цветовые характеристики белых светодиодов

На рис. 6 приведена цветовая диаграмма Международного комитета по освещению 1931 г. На диаграмме отмечены точки, соответствующие координатам цвето-

сти (X, Y) трех белых СД (см. таблицу). Значения координат цветности дают количественное определение восприятия данного спектра системой человеческого зрения. Видно, что в зависимости от количества нанесенного люминофора координаты цветности (X, Y) могут меняться в довольно широких пределах. Левая точка соответствует так называемому „холодному“ источнику света, правая — „теплому“. Центральная точка $(0.31, 0.32)$ для диода с умеренным содержанием люминофора близка к центру диаграммы E $(0.33, 0.33)$ — стандартному источнику света на кривой Планка с $T = 6770$ К.

По формуле для люмен-эквивалента (световой эффективности) спектра

$$L_{\text{eq}} = \frac{\int V_y I_\lambda \hbar \omega d\lambda}{\int I_\lambda \hbar \omega d\lambda}, \quad (2)$$

где V_y — спектральная функция чувствительности глаза, I_λ — спектральная интенсивность излучения (число квантов на единичный интервал длин волн), были рассчитаны значения L_{eq} для трех белых СД. Эта величина характеризует предельную светоотдачу η_L при заданной форме спектра (светоотдачу при внешнем квантовом выходе и КПД, равных 100%).

Значения L_{eq} при $J = 350$ мА приведены в таблице. Люмен-эквивалент L_{eq} дает связь между КПД η_P и светоотдачей η_L :

$$\eta_L = \eta_P L_{\text{eq}}. \quad (3)$$

В таблице приведена также коррелированная цветовая температура (ближайшая к координатам цветности точка на кривой Планка по цветовой диаграмме 1960 г.).

Для цветовых характеристик источников белого цвета необходимо учитывать отражение света от поверхностей с различными спектрами отражения в сравнении с отражением стандартного излучения черного тела при определенной температуре. Этот учет количественно обоснован эмпирическим введением индекса цветопередачи как среднего значения индексов цветопередачи от 8 стандартных поверхностей (см. определения в [19]). В таблице приведены общие индексы цветопередачи трех белых СД (методика расчета приведена в [25,26]).

4. Обсуждение результатов

Спектры излучения синих СД, созданных на основе p - n -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на подложках из SiC, существенно не отличаются от исследованных ранее спектров СД на основе структур, выращенных на подложках из сапфира. Экспоненциальные спады в длинноволновой и коротковолновой областях имеют показатели E_0 и $E_1 = mkT$, близкие к определенным в [12,22,23]. Для количественного описания формы спектров на основе модели двумерной плотности состояний с „хвостами“, обусловленными флуктуациями потенциала, надо знать размеры и степени легирования ям и барьеров и исследовать распределение зарядов в структурах. Это выходит за рамки настоящей работы.

Максимальные значения светового потока, светоотдачи и индексов цветопередачи для исследованных белых светодиодов при токе 350 мА

Параметр	Содержание люминофора		
	пониженное	умеренное	повышенное
Световой поток, лм	30	50	45
Светоотдача, лм/Вт	26	40	35
Люмен-эквивалент, лм/Вт	260	300	350
Координаты цветности МКО 1931 г. (X, Y)	0.29, 0.26	0.31, 0.32	0.37, 0.39
Коррелированная цветовая температура, К	11600	6500	4500
Индексы цветопередачи	85	83	72

Важно, что в области рабочих токов $J = 100\text{--}350$ мА ($j = 12\text{--}44$ А/см²) положение максимума синей полосы изменяется в небольших пределах ($\lambda_{\max} = 450\text{--}463$ нм), что соответствует полосе возбуждения люминофора. Это обеспечивает приблизительное постоянство отношения интенсивностей в максимумах синей и желто-зеленой полос и соответственно постоянство цветовых характеристик белых СД с изменением тока.

Заметим, что толщина выращенного слоя GaN с активной областью, определенная как ~ 2.3 мкм из интерференционной модуляции спектров, заметно меньше толщин слоев в структурах, выращенных на сапфире (4.2–4.5 мкм [12,22,23]). Это позволяет предположить, что в процессе эпитаксиального роста на SiC-подложках удается вырастить слои, в которых плотность дислокаций в активной области сравнительно мала, несмотря на малое расстояние области от границы с подложкой.

Полученный в настоящей работе КПД синих светодиодов на подложках из SiC ($\eta_p \sim 16\text{--}22\%$) больше, чем КПД исследованных нами ранее СД на подложках из сапфира ($\eta_p \approx 10\text{--}11\%$) [12,22,23]. Однако эта величина пока меньше опубликованных максимальных значений КПД для синих СД (35% [10]).

Предположим, что возможно сделать конструкцию СД, при которой полный коэффициент преобразования синего излучения в желто-зеленое излучение люминофора будет приблизительно равен 0.95. Тогда для значений $\eta_p \approx 16\text{--}22\%$ и люмен-эквивалента $L_{\text{eq}} = 300\text{--}320$ лм/Вт будет возможно получить светоотдачу белого СД $\eta_L \approx 46\text{--}70$ лм/Вт и световой поток одного белого СД ~ 90 лм (при $J = 350$ мА). Если же взять для перспективной оценки величину $\eta_p \approx 35\%$, то получается светоотдача $\eta_L \approx 110$ лм/Вт. В сообщении [16] оценки будущего еще более оптимистичны: $\eta_L \approx 150$ лм/Вт.

Измеренные нами максимальные значения светового потока $L \approx 46\text{--}50$ лм и светоотдачи $\eta_L \approx 37\text{--}40$ лм/Вт приблизительно в 1.5–3 раза меньше приведенных теоретических оценок и приблизительно в 1.5 раза меньше рекордных значений, приводимых в [4,10,16]. Полученные значения превышают светоотдачу ламп накаливания в 2–2.5 раза — результаты, уже достаточные для применения белых СД в освещении. Можно считать, что дальнейшие разработки белых СД на подложках из

SiC позволят в будущем достигнуть параметров, которые сделают их конкурентно способными с люминесцентными лампами.

Цветовые характеристики белых СД удовлетворяют условиям создания источников освещения. Важно, что подбором люминофора достигнуты нужные для тех или иных применений координаты цветности. Общие индексы цветопередачи 72–85% достаточны для ряда применений, хотя и уступают значениям, которые можно получить для полноцветных сборок нескольких светодиодов [19].

На основе этих экспериментов разработаны осветители широкого применения, в частности, с использованием последовательного соединения трех или последовательно-параллельного соединения четырех белых СД в корпусе под одним фокусирующим куполом. Они дают световой поток до 175 лм при входной мощности 5 Вт [27].

5. Заключение

Результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Спектры излучения синих СД ($\lambda_{\max} = 450\text{--}463$ нм), созданных на основе $p\text{--}n$ -гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с множественными квантовыми ямами, выращенных на подложках из SiC, существенно не отличаются от спектров СД на основе структур на подложках из сапфира. Спектры в длинноволновой и коротковолновой области спадают экспоненциально с показателями $E_0 = 58\text{--}61$ мэВ и $E_1 = mkT = 43\text{--}62$ мэВ соответственно. Коэффициент полезного действия исследованных СД достигает значений $\eta_p = 16\text{--}22\%$ при токах 100–350 мА.

2. Коэффициент полезного действия синих светодиодов обеспечивает в белых светодиодах с люминофорным покрытием для разработанных конструкций максимальные значения световых потоков до $L \approx 46\text{--}50$ лм и светоотдачи до $\eta_L \approx 37\text{--}40$ лм/Вт при токе 350 мА. Примененные люминофоры на основе алюмоиттриевых гранатов позволили получить координаты цветности и индексы цветопередачи в области белого свечения, достаточные для применений белых СД в освещении.

Авторы из МГУ благодарны Московскому комитету по науке и технологиям за финансовую поддержку (договор ГА-159/05).

Список литературы

- [1] Л.М. Коган *Светотехника*, № 5, 16 (2002).
- [2] А.Э. Юнович. *Светотехника*, № 3, 2 (2003).
- [3] *Light Emitting Diodes for General Illumination. Tutorial materials. OIDA*, ed. by Jeff I. Tsao (2002); <http://lighting.sandia.gov/>.
- [4] *Strategies in Light 2004, Conf. Proc.* (San-Diego, 2004). (strategies-u.com).
- [5] А.Я. Поляков, Н.Б. Смирнов, А.В. Говорков, А.В. Марков, In-Hwan Lee. *Тез. докл. 4-й Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“* (СПб., 2005) с. 62.
- [6] Hideki Hirayama. *J. Appl. Phys.*, **97**, 091101 (2005).
- [7] V.F. Mymrin, K.A. Bulashevich, N.I. Podolskaya, I.A. Zhmakin, S.Yu. Karpov, Yu.N. Makarov. *Phys. Status Solidi C*, **2** (7), 2928 (2005).
- [8] И.Ю. Евстратов, В.Ф. Мымрин, С.Ю. Карпов. *Тез. докл. 4-й Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“* (СПб., 2005) с. 122.
- [9] И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм. *Тез. докл. 4-й Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“* (СПб., 2005) с. 124.
- [10] T. Taguchi. *J. Light & Visual Environment*, **27** (3), 131 (2003).
- [11] В.С. Абрамов, Д.Р. Агафонов, И.В. Рыжиков, Н.П. Сошин, А.В. Шишов, Н.В. Щербаков, А.Э. Юнович. *Светодиоды и лазеры*, № 1/2, 25 (2002).
- [12] С.С. Мамакин, А.Э. Юнович, А.Б. Ваттана, Ф.И. Маняхин. *ФТП*, **39** (9), 1131 (2003).
- [13] В.Б. Афанасьев, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин. *Светотехника*, № 6, 52 (2004).
- [14] М.Г. Варешкин, Н.А. Гальчина, Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.П. Сошин, А.Э. Юнович. *Светотехника*, № 1, 15 (2005).
- [15] V.A. Dmitriev. *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* (1996) v. **1**, N 29.
- [16] *Cree Lighting Announces LED Brightness Levels Two Years Ahead of Industry's Performance Predictions* (2005); <http://www.cree.com/News/news240.asp>.
- [17] В.А. Абрамов, О.Н. Ермаков, В.П. Сушков. А. с. СССР N635813 приор. 09.12.1977.
- [18] S. Nakamura, G. Fasol. *The blue laser diodes* (Berlin, Springer, 1998).
- [19] A. Zukauskas, M. Shur, R. Gaska. *Introduction to Solid-State Lighting* (J. Wiley & Sons, N.Y., 2002).
- [20] Л.М. Коган, И.Т. Рассохин, Н.А. Гальчина. Патент на полезную модель № 48673 от 25.10.2004.
- [21] Н.А. Гальчина, Л.М. Коган. Патент на изобретение № 2207663 от 17.07.2001.
- [22] В.Е. Кудряшов, С.С. Мамакин, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович, А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин. *ФТП*, **35** (7), 861 (2001).
- [23] Ф.И. Маняхин, А.Н. Ковалев, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *ФТП*, **32** (1), 63 (1998).
- [24] М.А. Якобсон, Д.К. Нельсон, О.В. Константинов, А.В. Матвеевцев. *ФТП*, **39** (12), 1459 (2005).
- [25] В.С. Абрамов, П.П. Аникин, С.С. Просветова, М.В. Рыжков, А.В. Шишов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. *Тез. докл.*

4-й Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“ (СПб., 2005) с. 122.

- [26] Ф.А. Лукьянов, В.В. Тагулин. *Тез. докл. 3-й Всеросс. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы“* (М., МГУ, 2004) с. 170.
- [27] Сайт ООО „НПЦ ОЭП «ОПТЭЛ»“: www.optelcenter.com.

Редактор Л.В. Шаронова

Luminescence spectra, efficiency and color characteristics of white light-emitting diodes based on $p-n$ -heterostructures InGaN/GaN with phosphor coating

M.L. Badgutdinov, E.V. Korobov, F.A. Lukyanov, A.E. Yunovich, L.M. Kogan⁺, N.A. Gal'china⁺, I.T. Rassokhin⁺, N.P. Soschin^{*}

Moscow State Lomonosov University,
Department of Physics,
119899 Moscow, Russia
⁺ „Optel Center“,
105187 Moscow, Russia
^{*} Research Institute „Platan“,
141190 Moscow, Russia

Abstract Electroluminescence spectra, efficiency and color characteristics of white light-emitting diodes based on blue emission InGaN/AlGaIn/GaN $p-n$ -heterostructures grown on SiC substrates and with yellow-green YAG:Ce³⁺ phosphor coatings have been studied. Blue diodes have wall-plug efficiency up to 22% at the current of 350 mA and the applied voltage of 3.3 V. White light-emitting diodes have luminous efficiency up to 40 lm/W and luminous flux up to 50 lm at 350 mA.