

Монолитный белый светодиод с активной областью на основе квантовых ям InGaN, разделенных короткопериодными InGaN/GaN-сверхрешетками

© А.Ф. Цацульников^{¶,*,+}, В.В. Лундин^{*,+}, А.В. Сахаров^{*,+}, Е.Е. Заварин^{*,+}, С.О. Усов^{*,+},
А.Е. Николаев^{*,+}, Н.В. Крыжановская^{+,•}, М.А. Сеницын^{+,•},
В.С. Сизов^{*,+}, А.Л. Закгейм⁺, М.Н. Мизеров⁺

^{*}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[•]Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр Российской академии наук,
195220 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 ноября 2009 г. Принята к печати 23 ноября 2009 г.)

Описан новый подход к созданию эффективных монолитных источников белого света, основанный на использовании в активной области светодиодных структур короткопериодной InGaN/GaN-сверхрешетки в качестве барьерного слоя между квантовыми ямами InGaN, излучающими в синей и желто-зеленой областях спектра. Исследованы оптические свойства таких структур и показано, что использование такой сверхрешетки позволяет реализовать эффективное излучение из активной области.

1. Введение

Возросшая яркость и эффективность светодиодов на основе нитрида галлия, а также перекрытие ими практически всего видимого спектрального диапазона привели в настоящее время к их использованию в качестве эффективных источников света не только в системах индикации, подсветки или сигнальной аппаратуре, но и для общего освещения. В настоящее время созданы твердотельные источники света на основе светодиодов с люминофорным покрытием со светоотдачей более 160 лм/Вт, что более чем в 10 раз превышает светоотдачу традиционных ламп накаливания и вдвое ртутных люминесцентных ламп. Недостатком таких источников света являются наличие стоксовых потерь в люминофорах, ограничивающих светоотдачу, и невозможность динамического (в процессе работы) регулирования цветовых параметров белого света.

В этой связи вызывает интерес создание принципиально нового поколения высокоэффективных источников света на основе смешения излучения светодиодов различного цвета (полихромные источники). На основе данного подхода в многокристалльных светодиодных излучателях можно получать практически все реально существующие цвета и, что особенно важно, получать белый свет высокого качества (индекс цветопередачи > 90), в широком диапазоне цветовых температур (2500–20 000 К). Разработка монолитных полихромных источников белого света является дальнейшим развитием данного подхода. Такие источники света, помимо повышения эффективности, в силу упрощения технологии изготовления (отпадает необходимость гибридной

сборки нескольких кристаллов) должны иметь меньшую стоимость при более высокой надежности.

В настоящее время предложено несколько подходов к созданию монолитных источников белого света. Наиболее распространенным вариантом является использование активной области на основе 2 и 3 InGaN-квантовых ям (КЯ), излучающих на различных длинах волн [1–5]. Исследования структур, содержащих набор InGaN КЯ, излучающих в синем и зеленом (510–530 нм) диапазонах, показали, что данная комбинация цветов позволяет получить белый свет с неприемлемо низким индексом цветопередачи [2,5]. В работах [3,4] были получены дихромные источники белого света на основе смешения излучений с длинами волн 450 и 560 нм, что позволило увеличить индекс цветопередачи, однако эффективность излучения была мала. Основной причиной, приводящей к низкой общей эффективности монолитных белых светодиодов, является низкое значение внутреннего квантового выхода излучения в InGaN КЯ с высоким содержанием In. Другой проблемой, которую надо решить при создании монолитных источников белого света, является обеспечение эффективной инжекции носителей в различные КЯ.

В данной работе предложен новый подход к улучшению однородности инжекции носителей в активной области монолитного белого светодиода, содержащей несколько КЯ InGaN, излучающих в синем (440 нм) и зеленом (540–570 нм) диапазонах, основанный на использовании короткопериодной InGaN/GaN-сверхрешетки в качестве барьерного слоя между КЯ InGaN. Проведены эксперименты по эпитаксиальному росту таких структур, исследованы их оптические свойства методами фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ).

[¶] E-mail: andrew@beam.ioffe.ru

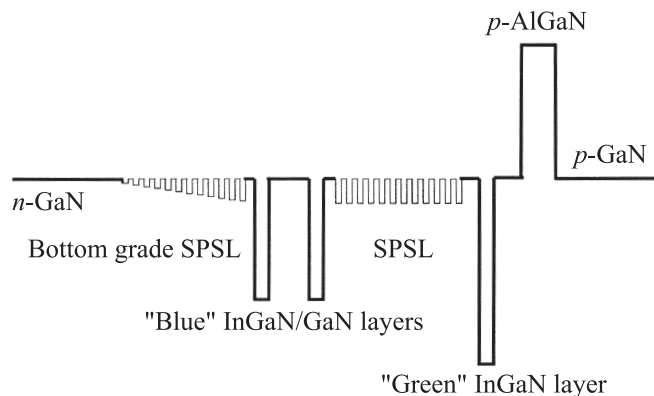


Рис. 1. Схематическое изображение активной области исследованных структур.

2. Эксперимент

Эпитаксиальные структуры выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии на сапфировых подложках ориентации (0001). Аммиак, триметилгаллий (ТМГ), триэтилгаллий (ТЭГ), триметилиндий (ТМИ), триметилалюминий, моносилан и биспентациклодиенил магния использовались в качестве соединений — источников. Азот, водород и их смеси использовались в качестве несущих газов. Использувавшиеся газы очищались соответствующими очистителями Aeropex.

Активные области выращенных структур содержали две КЯ InGaN толщиной 3 нм, излучающие в синем диапазоне длин волн 440–450 нм, разделенные барьером GaN толщиной ~ 10 нм, и КЯ InGaN толщиной ~ 3 нм, излучающую в зеленом спектральном диапазоне 540–570 нм. КЯ, излучающие в синем и зеленом диапазонах, были разделены 12-периодной сверхрешеткой InGaN/GaN с толщинами слоев InGaN и GaN ~ 1 нм. Детальное описание активной области светодиодной структуры приведено на рис. 1. Подробное изложение методики формирования и свойств короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN и ее влияние на свойства светодиодных структур приведены в статье [6].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a* приведены спектры электролюминесценции выращенных структур. Структуры 1 и 2 отличались условиями роста, что привело к различному положению „зеленой“ полосы в спектре излучения. Из рис. 2, *a* видно, что в зависимости от положения „зеленой“ полосы соотношение интенсивностей „синей“ и „зеленой“ полос сильно изменяется. При этом для обеих структур значения внешней квантовой эффективности близки (рис. 2, *b*). Также на рис. 2, *b* приведены для сравнения зависимости внешней квантовой эффективности от тока для „синей“ (430–450 нм) светодиодной структуры (кривая 3), содержащей в активной области две КЯ

InGaN, аналогичные тем, которые были выращены в исследуемой структуре, и для „зеленой“ (540–560 нм) светодиодной структуры (кривая 4), содержащей в активной области одну КЯ InGaN, также аналогичную той, которая была выращена в исследуемой структуре. Из приведенных на рис. 2, *b* зависимостей видно, что интенсивность излучения в исследуемой структуре монолитного светодиода примерно в 2 раза ниже интенсивности излучения светодиодной структуры зеленого диапазона. Этот эффект связан со значительным увеличением общего содержания индия в активной области, что, по-видимому, приводит к дополнительному формированию дефектов. Данный вывод косвенно подтверждается тем фактом, что если для структуры 1 максимум квантовой эффективности наблюдается при низких значениях тока, то для структуры 2, в которой состав по In в „зеленой“ КЯ выше, наблюдается рост внешней квантовой эффективности с током, что может свидетельствовать о боль-

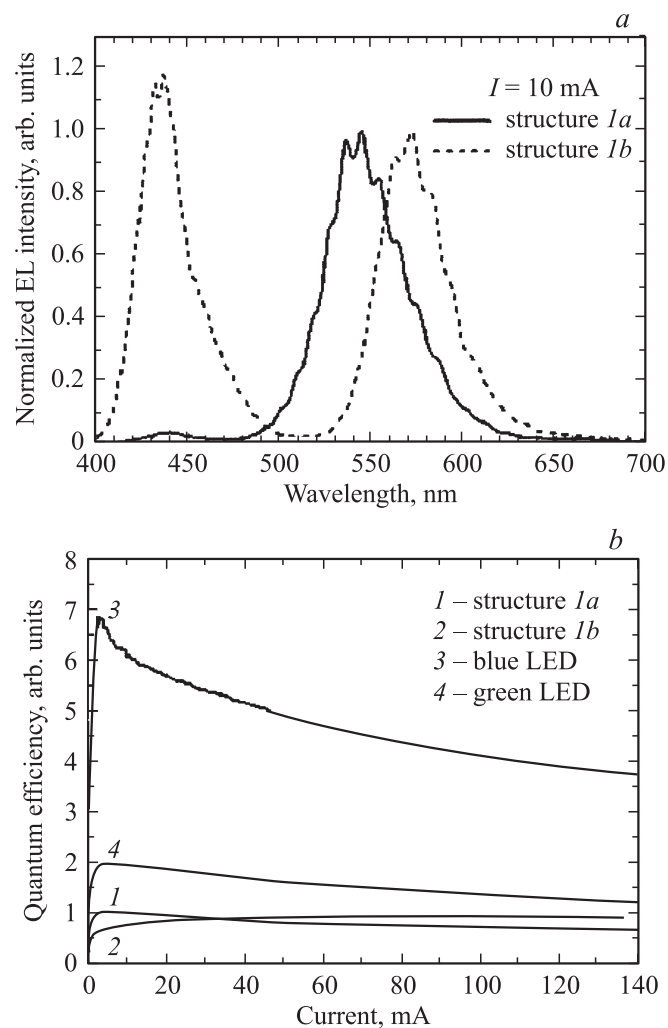


Рис. 2. Спектры электролюминесценции исследованных структур (*a*), зависимости внешней квантовой эффективности от тока для структуры 1a (кривая 1), структуры 1b (кривая 2), „синей“ (кривая 3) и „зеленой“ (кривая 4) светодиодных структур.

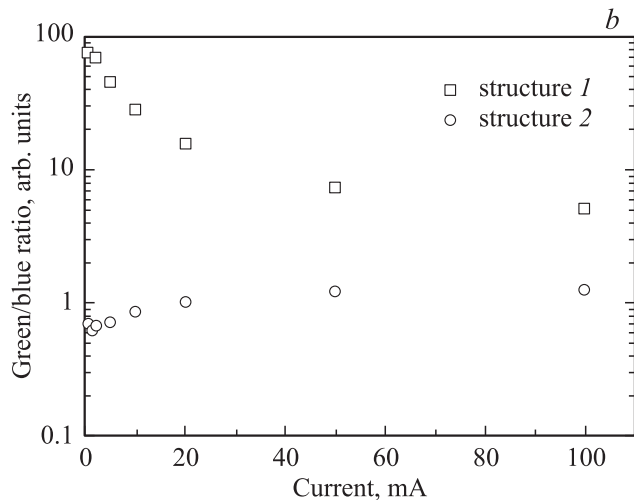


Рис. 3. Зависимости отношения пиковой интенсивности „зеленой“ и „синей“ линий излучения от тока для структур *1a* и *1b*. Пунктирная линия — значение отношения, равное 1.

шей плотности дефектов. Однако необходимо отметить, что, несмотря на увеличение общего содержания индия в активной области исследуемых монолитных светодиодов, катастрофического уменьшения квантового выхода излучения не наблюдается. Принимая во внимание, что после процессирования и сборки внешняя квантовая эффективность синего и зеленого светодиодов составляла ~ 25 и ~ 8% соответственно, можно ожидать, что для исследуемой структуры внешний квантовый выход составляет 4–5% без применения технологических приемов, позволяющих увеличить вывод света.

Как уже отмечалось выше, для создания монолитных 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 *p*-легирования. Данный эффект приводит к зависимости интенсивности излучения этих слоев от величины тока и, следовательно, к зависимости от тока цветовых параметров монолитного источника белого света. В данной работе в качестве барьера между КЯ InGaN, излучающими в синей и зеленой областях спектра, была осаждена короткопериодная сверхрешетка InGaN/GaN. Как показано в работе [6], такая сверхрешетка позволяет увеличить эффективность инжекции носителей в КЯ InGaN, расположенные на большом расстоянии от области *p*-легирования, и повысить эффективность излучения в светодиодных структурах. На рис. 3 показаны зависимости отношения интенсивностей излучения „зеленой“ и „синей“ полос от тока для исследованных структур. Видно, что для структуры *1*, в спектре излучения которой „зеленая“ полоса с максимумом при 540 нм является доминирующей, наблюдается достаточно быстрое насыщение интенсивности излучения „зеленой“

полосы с ростом тока. Это приводит к тому, что при увеличении тока соотношение между интенсивностями „синей“ и „зеленой“ полос изменяется в очень широких пределах: от ~ 80 в области малых токов до ~ 5 в области больших токов. Для структуры *1b* соотношение „синей“ и „зеленой“ полос практически не зависит от тока и составляет 1–1.2 в диапазоне токов 10–100 мА. Причины этого значительного различия в поведении интенсивности излучения „синей“ и „зеленой“ полос от тока требуют дальнейшего изучения кристаллических, оптических и электрофизических свойств таких структур.

Зависимость отношения „синей“ и „зеленой“ полос от тока приводит к токовой зависимости координат цветности (рис. 4). Видно, что излучение образца 2 лежит в области белого света. Коррелированная цветовая темпе-

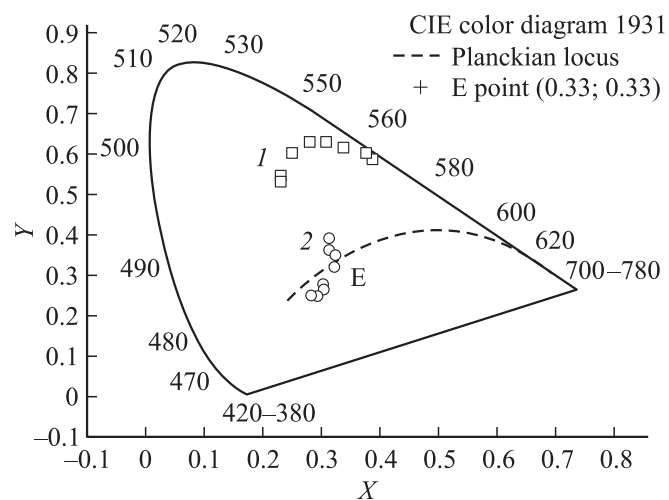


Рис. 4. Цветовые диаграммы МКО 1931 г. Точками отмечены координаты цветности при различных величинах тока для спектров от исследованных образцов: *1* — образец *1a*, *2* — образец *1b*.

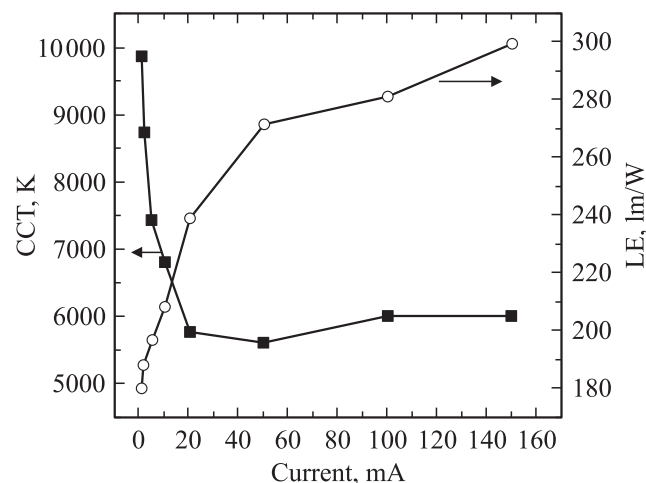


Рис. 5. Зависимость коррелированной цветовой температуры (CCT) и эффективности преобразования (LE) от тока.

ратура (ССТ) при увеличении тока до 20 мА меняется от 10 000 до 6000 К и дальше слабо меняется с током (рис. 5). Оптическая эффективность (люмен-эквивалент) полученного белого света достигает 300 лм/Вт.

Излучение структуры 2 имеет низкий индекс цветопередачи вследствие отсутствия полос излучения, лежащих в красной и ближней зеленой (~ 500 нм) областях спектра. 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).

В данной работе были выращены и исследованы светодиодные структуры для монолитных источников белого света, содержащие в активной области КЯ InGaN, излучающие в синей и зеленой областях спектра, разделенные короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN. Показано, что для активной области, содержащей КЯ InGaN, имеющую полосы излучения с максимумами при 430 и 570 нм, возможно получение белого света с коррелированной цветовой температурой ~ 6000 К. Изменение тока через такую структуру в диапазоне 20–100 мА не приводит к сильному изменению в соотношении интенсивностей „синей“ и „зеленой“ полос, что выражается в относительно слабой зависимости коррелированной цветовой температуры от тока.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-02-12449-офи_м „Монолитные инжекционные источники белого света на основе самоорганизованных квантовых точек InGaN“.

Список литературы

- [1] C.F. Huang, C.F. Lu, T.Y. Tang, J.J. Huang, C.C. Yang. Appl. Phys. Lett., **90**, 151 122 (2007).
- [2] Y.L. Li, T. Gessmann, E.F. Schubert, J.K. Sheu. J. Appl. Phys., **94**, 2167 (2003).
- [3] S.C. Shei, J.K. Sheu, C.M. Tsai, W.C. Lai, M.L. Lee, C.H. Kuo. Jpn. J. Appl. Phys., **45**, pt 1, 2463 (2006).
- [4] J.W. Shi, H.Y. Huang, C.K. Wang, J.K. Sheu, W.C. Lai, Y.S. Wu, C.H. Chen, J.T. Chu, H.C. Kuo, W.P. Lin, T.H. Yang, J.I. Chyi. IEEE Phot. Techn. Lett., **18**, 2593 (2006).
- [5] H.S. Park, J.Y. Kim, M.K. Kwon, C.Y. Cho, J.H. Lim, S.J. Park. Appl. Phys. Lett., **92**, 091 110 (2008).
- [6] А.Ф. Цацуньников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, С.О. Усов, А.Е. Николаев, Н.А. Черкашин, Б.Я. Бер, Д.Ю. Казанцев, М.Н. Мизеров, H.S. Park, M. Hytch, F. Hue. ФТП, **44** (1), 96 (2010).

Редактор Л.В. Беляков

Monolithic white LED with active region based on InGaN quantum wells, separated by short-period InGaN/GaN superlattice

A.F. Tsatsulnikov^{*,+}, W.V. Lundin^{*,+}, A.V. Sakharov^{*,+}, E.E. Zavarin^{*,+}, S.O. Usov^{*,+}, A.E. Nikolaev^{*,+}, N.V. Kryzhanovskaya^{+,•}, M.A. Synitsin^{+,•}, V.S. Sizov^{*,+}, A.L. Zakgeim⁺, M.N. Mizerov⁺

* Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
 + Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia
 • St. Petersburg Physics and Technology Centre for Research and Education, Russian Academy of Sciences, 195220 St. Petersburg, Russia

Abstract New approach to the development of effective monolithic white light emitters, based on the utilizing of short period InGaN/GaN superlattice as barrier layer between InGaN QWs emitting in blue and yellow–green ranges was investigated. Optical properties of such structures were studied and it was shown that using of this superlattice allows to realize effective emission from the active InGaN layers.