

06

Высокоэффективные InGaN/GaN/AlGaN светодиоды с короткопериодной InGaN/GaN сверхрешеткой для диапазона 530–560 nm

© *В.В. Лундин, А.Е. Николаев, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин,
С.О. Усов, В.С. Сизов, А.Л. Закгейм, А.Е. Черняков,
А.Ф. Цацульников*

Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных
гетероструктур РАН, Санкт-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: lundin.vpegroup@mail.ioffe.ru

Описан новый метод формирования активной области высокоэффективных InGaN/GaN/AlGaN светоизлучающих диодов длинноволнового зеленого диапазона. Показано, что введение в конструкцию эпитаксиальной гетероструктуры непосредственно под излучающей квантовой ямой короткопериодной InGaN/GaN сверхрешетки, зарощенной слоем нитрида галлия при пониженной температуре, позволяет более чем на порядок повысить эффективность излучения. На собранных диодах значения максимальной квантовой эффективности и соответствующей ей длины волны излучения составили 12% и 552 nm и 8% и 560 nm соответственно.

Стремительный рост эффективности светодиодов видимого диапазона в течение последних двух десятилетий позволил значительно расширить область их применений [1]. Однако до сих пор не созданы эффективные светодиоды, излучающие в диапазоне длин волн 530–560 nm, соответствующем максимуму чувствительности человеческого глаза, крайне необходимые для создания полноцветных источников белого света [2] с высоким индексом цветопередачи.

При всем кажущемся многообразии вариантов альтернативы III-N-материалам для создания светодиодов длинноволнового зеленого диапазона на данный момент нет. В материальной системе AlInGaN нет фундаментальных ограничений, препятствующих увеличению длины волны излучения — все бинарные материалы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной

зоны, изменяющейся от 6.2 до 0.7 eV. Однако увеличение содержания индия в слоях InGaN в активной области светодиода осложнено в первую очередь большим рассогласованием параметров кристаллической решетки в системе GaN–InN, приводящим к возникновению значительных механических напряжений. С одной стороны, наличие напряжений в слое InGaN смещает химическое равновесие в сторону усиления десорбции индия, снижая эффективность вхождения индия в растущий слой [3], а с другой стороны, большое содержание индия в слоях InGaN приводит к образованию дислокаций несоответствия. Ранее нами были представлены два новых подхода к созданию длинноволновых зеленых светодиодов: формирование метаморфных активных областей [4] и использование эффекта наномаскирования тонким слоем AlN [5]. Несмотря на обнадеживающие результаты, эффективность излучения в данных структурах была низка. В данной работе мы публикуем первые результаты использования нового дизайна светодиодной структуры с короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN, расположенной ниже излучающей InGaN квантовой ямы.

Эпитаксиальные структуры выращивались методом газовой фазной эпитаксии из металлорганических соединений (MOVPE) на сапфировых подложках ориентации (0001). Азот, водород и их смеси использовались в качестве несущих газов. Аммиак, триметилгаллий, триэтилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий, моносилан и биспентациклодиенил магния использовались в качестве соединений-источников. Подаваемые в реактор газы очищались соответствующими системами очистки Aeropex ®.

Как было показано [4], светодиоды синего и зеленого диапазонов существенно отличаются зависимостью свойств от числа квантовых ям (КЯ) в активной области. Для последних, в силу большего содержания индия в КЯ, характерно развитие релаксации напряжений с увеличением числа КЯ, что, с одной стороны, приводит к увеличению вхождения индия, а с другой — к снижению эффективности излучения за счет образования новых дислокаций несоответствия. Данная проблема, в принципе, может быть решена оптимизацией дизайна структуры и режимов роста для предотвращения проникновения дислокаций несоответствия в активную область при метаморфном росте. Однако в данной работе мы стремились предотвратить образование этих дислокаций, что для длинноволновых зеленых светодиодных структур означает наличие не более чем одной высокосоставной КЯ в структуре.

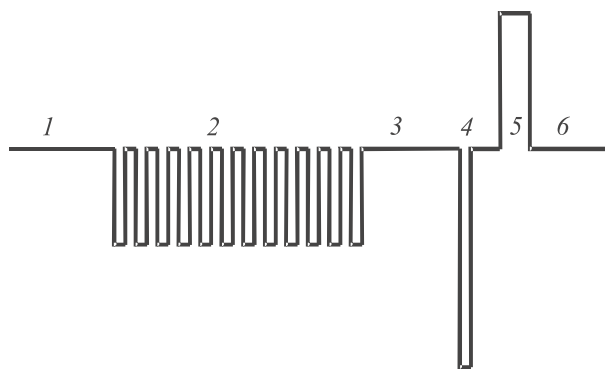


Рис. 1. Схематическое изображение светодиодной структуры: 1 — n -GaN, 2 — InGaN/GaN КПСР, 3 — LT GaN, 4 — InGaN КЯ, 5 — p -AlGaN, 6 — p -GaN.

Использование простейшего дизайна только с одной КЯ приводит к очень низкой эффективности люминесценции. Ранее нами было продемонстрировано увеличение эффективности излучения при использовании InGaN/GaN короткопериодных сверхрешеток (КПСР) в активной области синих светодиодов [6]. Прямое использование такого дизайна с двумя КПСР над и под активной КЯ для зеленых светодиодов на данный момент остается безуспешным, так как выращивание любых индийсодержащих слоев над КЯ с большим содержанием индия приводит к релаксации напряжений. Возможно, данное явление может быть предотвращено при тщательной оптимизации как дизайна структуры, так и режимов ее формирования. Однако даже использование в структуре только нижней КПСР (рис. 1) уже привело к существенному увеличению эффективности излучения (рис. 2, *a*). Кроме того, в таких структурах наблюдался длинноволновый сдвиг линии излучения по сравнению со структурами простейшего дизайна, содержащими только КЯ (рис. 2, *b*).

Оптимизированная структура состояла из слоя n -GaN ($5\ \mu\text{m}$), 12-периодной InGaN/GaN КПСР толщиной 24 nm, полученной методом конвертации InGaN [6], барьерного слоя n -GaN (25 nm), выращенного при пониженной температуре (LT GaN), квантовой ямы InGaN толщиной 2.5 nm, нелегированного верхнего барьера GaN (4 nm), слоя p -AlGaN (15 nm) и слоя p -GaN толщиной 120 nm. Исследования

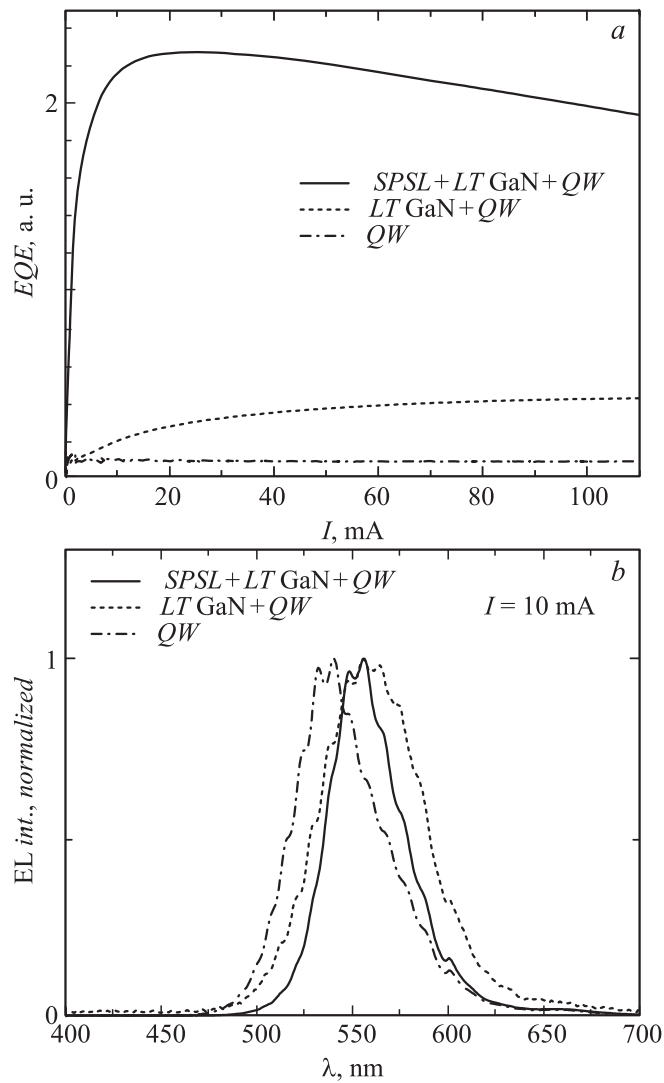


Рис. 2. Зависимость внешней квантовой эффективности от тока (а) и спектры электролюминесценции (b) для структур различного дизайна. Измерения проведены на эпитаксиальной пластине.

InGaN/GaN короткопериодных сверхрешеток (как в составе светодиодов, так и выращенных отдельно) методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии показали, что при выращивании данных объектов не происходит релаксации упругих напряжений и формирования новых дислокаций несоответствия [7].

Для разделения влияния оказываемого сверхрешеткой и низкотемпературным слоем GaN была выращена структура без КПСР, но содержащая слой LT GaN, лежащий непосредственно под активной КЯ. Эффективность излучения для такой структуры была несколько выше (рис. 2, *a*), чем для структуры простейшего дизайна, но тем не менее существенно уступала эффективности для структур, содержащих КПСР и слой низкотемпературного GaN. Спектр электролюминесценции для структуры такого дизайна оказался уширенным и немного смещенным в длинноволновую область спектра (рис. 2, *b*). Такой эффект при использовании низкотемпературного GaN в активной области синих светодиодов наблюдался ранее [8], хотя природа его не до конца изучена.

Следует также отметить, что эффективность излучения структуры, содержащей только InGaN/GaN КПСР без слоя GaN между КПСР и КЯ, была значительно меньше, чем структуры с оптимальным дизайном. Длина волны излучения для такой структуры также была сдвинута в коротковолновую область спектра. Таким образом, увеличение эффективности излучения связано с комплексным влиянием InGaN/GaN сверхрешетки и низкотемпературного GaN, а сдвиг длины волны излучения, скорее всего, связан с влиянием слоя низкотемпературного GaN. Детальное выяснение механизмов влияния этих слоев на свойства светодиодов требует дополнительных исследований.

На рис. 3 приведены зависимости мощности излучения и внешней квантовой эффективности для двух светодиодов, собранных в стандартной флип-чип геометрии из кристаллов, произведенных из эпитаксиальных пластин оптимизированного дизайна. Никаких специальных мер для увеличения вывода света (отделение подложки, матирование поверхности) не применялось. Значения максимальной квантовой эффективности и соответствующей ей длины волны излучения составили 12% и 552 nm и 8% и 560 nm соответственно.

Показано, что InGaN/GaN короткопериодная сверхрешетка, выращенная слоем низкотемпературного GaN, является ключевым элементом высокоэффективного светодиода глубокого зеленого диапазона. Если квантовая яма InGaN выращивается непосредственно на

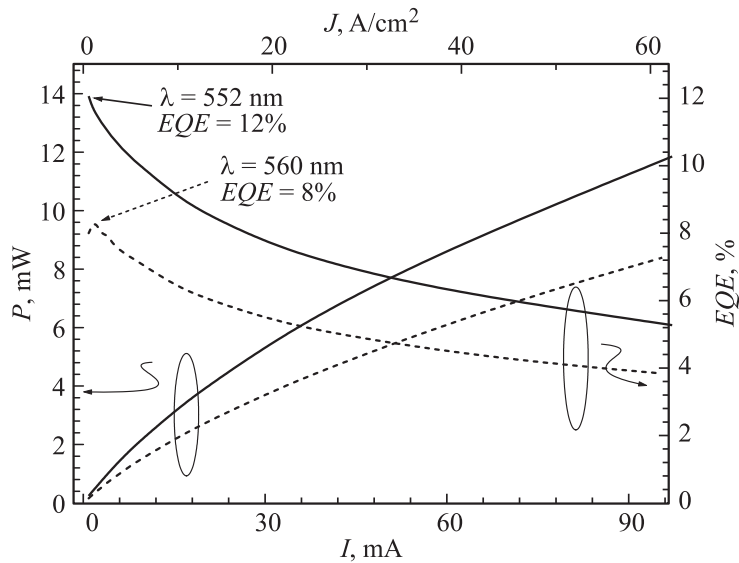


Рис. 3. Зависимость мощности излучения и внешней квантовой эффективности от тока для структур оптимизированного дизайна, измеренная на собранных светодиодах.

поверхности слоя *n*-GaN, выращенного при высокой температуре, то электролюминесценция оказывается в ~ 20 раз слабее и ее пик сдвинут в коротковолновую сторону по сравнению с оптимизированной структурой.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.523.12.3017 от 14 августа 2008 г., при поддержке Федерального агентства по образованию (проект „Технология создания монолитного полихромного инжекционного источника белого света на основе квантоворазмерных гетероструктур“), грантов РФФИ 09-02-12449-офи_м, 08-02-01344, программы фундаментальных исследований президиума РАН № 27.

Авторы благодарят ЗАО „Светлана-Оптоэлектроника“ за помощь в изготовлении светодиодов.

Список литературы

- [1] *Schubert F. Light-emitting diodes.* Cambridge University Press, 2003.
- [2] *Zukauskas A., Shur M., Gaska R. Introduction to Solid-State Lighting.* J. Wiley & Sons, NY, 2002.
- [3] *Karpov S.Yu., Talalaev R.A., Yakovlev E.V., Makarov Yu.N. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2001. V. 639. G 3.18.*
- [4] *Сахаров А.В., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Синицын М.А., Николаев А.Е., Усов С.О., Сизов В.С., Михайловский Г.А., Черкашин Н.А., Нутч М., Ние Ф., Яковлев Е.В., Лобанова А.В., Цацульников А.Ф. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 6. С. 841.*
- [5] *Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Лундин В.В., Давыдов Д.В., Сизов В.С., Цацульников А.Ф. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 21. С. 88.*
- [6] *Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Черкашин Н.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Мизеров М.Н., Ние Сеок Парк, Нутч М., Ние Ф. // ФТП. 2010. Т. 44. В. 1. С. 96.*
- [7] *Крыжановская Н.В., Лундин В.В., Николаев А.Е., Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Павлов М.М., Черкашин Н.А., Вальковский Г.А., Яговкина М.А., Усов С.О. // ФТП. 2010. Т. 44. В. 6. С. 857.*
- [8] *Tao Y.B., Chen Z.Z., Zhang F.F., Jia C.Y., Qi S.L., Yu T.J., Kang X.N., Yang Z.J., You L.P., Yu D.P., Zhang G.Y. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. P. 103529.*