

А.С. Павлюченко^{1,2}, Д.А. Закгейм², Д.А. Бауман¹

¹ ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника»

² ЗАО «ЭПИ-ЦЕНТР»

Российский опыт создания высокоэффективных светодиодов на основе нитрида галлия для общего освещения

Представлены основные результаты разработки светодиодных гетероструктур, светодиодных кристаллов и светодиодов на их основе за последние десять лет, полученные группой компаний «Светлана-Оптоэлектроника».

Ключевые слова: светодиодная гетероструктура, нитрид галлия, внешний квантовый выход

В последние годы значительные успехи были достигнуты в технологии эпитаксиального выращивания гетероструктур AlGaInN. Это привело к созданию эффективных светодиодов, работающих в видимой, синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Такие светодиоды находят всё более широкое применение в системах индикации, подсветки, и т.д. Однако, наиболее важная область применения – создание на основе синих светодиодов AlGaInN источников белого света, способных составить конкуренцию традиционным лампам накаливания, флуоресцентным и галогеновым лампам. Прогресс в данной области связан с разработкой эффективных мощных светодиодов, работающих при высоких плотностях токов накачки. Более десяти лет проблемой разработки таких светодиодов и источников света на их основе, занимаются подразделения группы компаний Светлана-Оптоэлектроника. За это время нами накоплен значительный опыт на всех этапах производства: выращивание светодиодных гетероструктур методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОГФЭ), изготовление светодиодных кристаллов, сборка светодиодных кристаллов в корпуса светодиодов, изготовление осветительных приборов. Представляемый доклад посвящен нашему опыту разработки эффективных производимых светодиодов.

Первый этап работ в 2000-2004 годах был посвящен разработке конструкций и технологических процессов изготовления светодиодных кристаллов, и источников света. При участии ОАО «Светлана» и Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, была полностью разработана технология изготовления светодиодных кристаллов с отражающими и полупрозрачными контактами. Были разработаны базовые конструкции светодиодных кристаллов и светодиодов, изготовлены первые партии светодиодных кристаллов и светодиодов на основе импортных коммерческих гетероструктур, что позволило перейти к разработке собственной технологии выращивания светодиодных гетероструктур.

Первые AlGaInN светодиодные гетероструктуры, излучающие в синей области видимого спектра, выращенные на установке роста Veeco D180 были получены уже в начале 2005 года. Однако, эффективность этих гетероструктур была невелика (внешний квантовый выход, измеренный на пластине – менее 10%, в готовом светодиоде – менее 20%). Отработка технологических режимов роста базовых гетероструктур позволила существенно повысить кристаллическое совершенство слоёв гетероструктуры, что

привело к повышению эффективности электролюминесценции. Дальнейшая работа была связана прежде всего с оптимизацией конструкции гетероструктур для создания эффективных высокоомощных сверхъярких светодиодов белого света.

Эффективность мощных светодиодов на основе AlGaInN как правило ограничивается двумя основными факторами: падением внутреннего квантового выхода электролюминесценции гетероструктур с ростом плотности тока накачки и низкой эффективностью вывода света из светодиодных кристаллов.

Проблема падения квантового выхода с ростом плотности тока накачки (в англоязычной литературе – “efficiency droop”) хорошо известна с момента изготовления первых достаточно эффективных гетероструктур с внешним квантовым выходом более 1-2% более 20 лет назад [1, 2]. Было замечено, что в светодиодных гетероструктурах AlGaInN, значение внешнего квантового выхода растет с увеличением тока накачки при малых значениях плотности тока и, начиная с некоторого значения плотности тока, начинает падать. На рис. 1 представлены зависимости мощности излучения и внешней квантовой эффективности от плотности тока накачки, характерные для всех нитридных светодиодов.

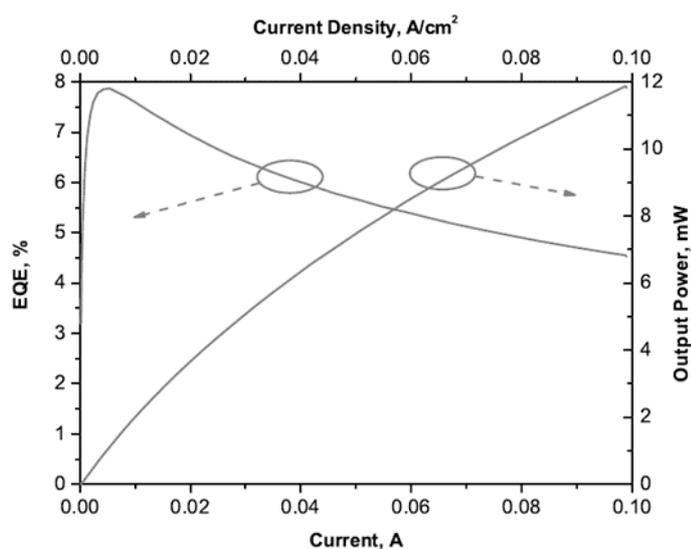


Рисунок 1

Для анализа причин такого падения эффективности в сотрудничестве с ФТИ им. Иоффе РАН была разработана численная диффузионно-дрейфовая модель [3], позволявшая проводить исследование транспорта носителей в реальной гетероструктуре. Было показано, что рост внешнего квантового выхода при малых значениях плотности тока обусловлен конкуренцией между излучательной и безызлучательной рекомбинацией. Падение же квантового выхода при плотностях тока объяснялось утечкой электронов в p-область гетероструктуры. Для подавления этого эффекта была предложена оригинальная модификация конструкции светодиодного кристалла, в которой указанный эффект был бы подавлен [4]. На рис. 2 представлены схематические изображения стандартной гетероструктуры (слева) и разработанной «инверсной» гетероструктуры (справа). Нижний n-легированный слой стандартной гетероструктуры имеет толщину 4.5 мкм и обеспечивает растекание электрического тока. Нелегированная активная область

стандартной гетероструктуры содержит несколько квантовых ям $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ толщиной 2-5 нм, разделённых широкими барьерами GaN толщиной 8 – 12 нм. Между активной областью и p-GaN выращивается токоограничивающий слой $\text{Al}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$, призванный снизить утечку электронов за активную область. Верхний слой p-легированного GaN имеет толщину 100 нм. В отличие от стандартной гетероструктуры, в инверсной гетероструктуре токоограничивающий слой расположен в n-легированной области, и отделён от активной области слоем p-GaN. Такое смещение, согласно расчётам, должно препятствовать утечке носителей за активную область более эффективно, чем в стандартной гетероструктуре [5].

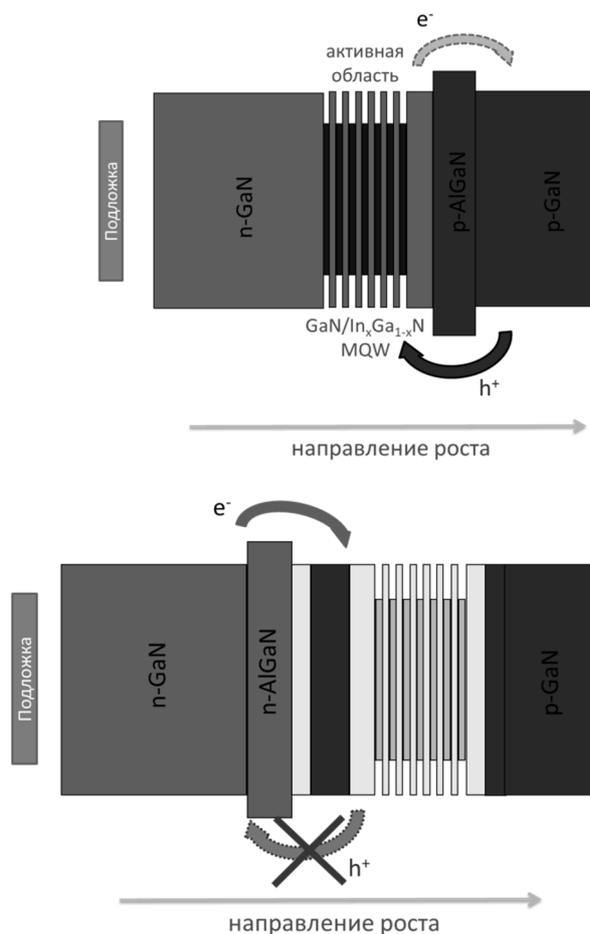


Рисунок 2

Первые результаты, полученные на выращенных «инверсных» гетероструктурах показали, что падение эффективности электролюминесценции было подавлено. Однако, при разработке технологии выращивания таких гетероструктур было обнаружено, что добавление p-легированного слоя под активную область приводит к значительному снижению кристаллического совершенства слоёв активной области, и, как следствие, снижает общую эффективность гетероструктуры. В силу этого дальнейшая разработка технологии инверсных гетероструктур была нами прекращена.

Одновременно в литературе и на основных тематических конференциях [6, 7, 8, 9] были опубликованы результаты измерений и теоретических оценок, предложивших совершенно иной механизм падения внешнего квантового выхода в светодиодных

гетероструктурах. Было показано, что при высоких плотностях токов накачки в активной области гетероструктуры помимо безызлучательной рекомбинации Шокли-Рида-Холла и бимолекулярной излучательной рекомбинации, значительный вклад в общий ток может давать безызлучательная Оже-рекомбинация. Падение внешнего квантового выхода с ростом плотности тока накачки в таком случае определялось конкуренцией излучательной рекомбинации и безызлучательной Оже-рекомбинации. Поскольку, темп излучательной рекомбинации пропорционален второй степени концентрации носителей, а темп Оже-рекомбинации пропорционален третьей степени концентрации носителей, при увеличении плотности тока накачки, внешний квантовый выход должен снижаться. Таким образом, повышение внешнего квантового выхода может быть достигнуто за счёт снижения концентрации носителей в активной области при фиксированном токе. Для решения этой задачи нами было предложено использовать в активной области набор квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, разделённых тонкими, туннельно-прозрачными барьерами [10, 11]. Для подбора параметров активной области в сотрудничестве с ООО «Группа СТР» - ООО «Софт-Импакт» было применено численное моделирование. Использовалась одномерная диффузионно-дрейфовая модель транспорта носителей в гетероструктуре. Модель учитывает пиро- и пьезоэлектрические поля возникающие вследствие рассогласования параметров решётки слоёв структуры, а также излучательную и безызлучательную рекомбинацию Шокли-Рида-Холла и Оже-рекомбинацию. Численная модель представляет собой систему конечно-разностных уравнений для неизвестных профилей концентраций носителей заряда и электрического потенциала. Численные расчёты проводились в коммерческом продукте SimuLED производства «Софт-Импакт», (www.str-soft.com/products/SimuLED). Данный продукт реализует методы решения систем уравнений описанной модели и позволяет рассчитывать распределение концентраций носителей в гетероструктуре, распределение электрического поля и плотностей токов, внутренний квантовый выход при заданном напряжении. Применение модели позволило подтвердить эффективность предложенного метода, а также определить оптимальные параметры гетероструктуры. По результатам моделирования были выращены партии светодиодных гетероструктур, в которых удалось заметно снизить падение внешнего квантового выхода с ростом плотности тока накачки. На рис. 4 представлены нормализованные зависимости внешней квантовой эффективности от тока накачки для синих светодиодов, изготовленных из стандартной гетероструктуры (кривая 1) и оптимизированной гетероструктуры с тонкими барьерами (кривая 2). Штриховыми линиями нанесены результаты численного моделирования представленных гетероструктур [11].

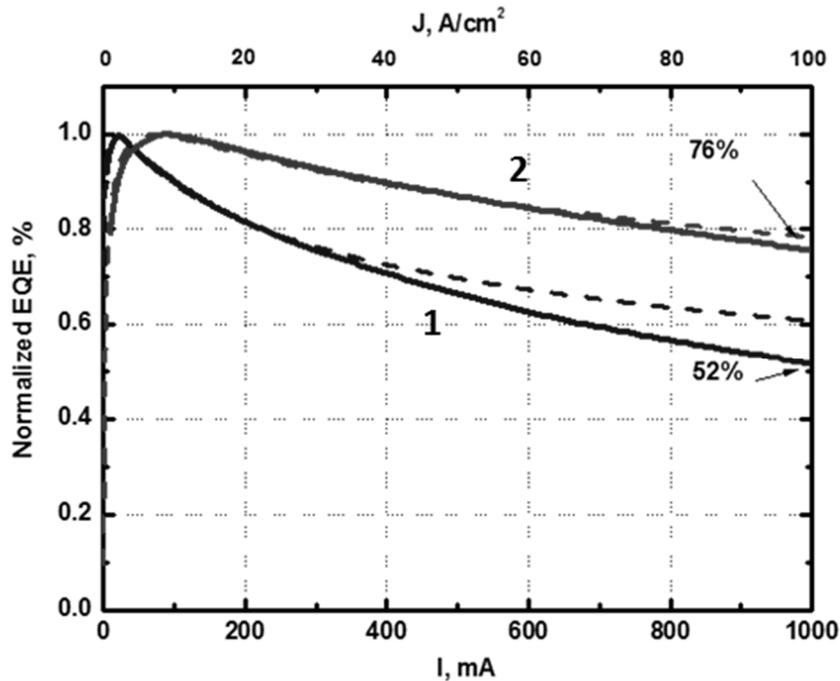


Рисунок 3

Помимо потерь, связанных с Оже процессами, в светодиодах на основе гетероструктур AlGaInN, выращиваемых, как правило, на подложках из сапфира, эффективность вывода излучения ограничена эффектом полного внутреннего отражения генерируемого света на границах полупроводника с воздухом и с подложкой и поглощением излучения в отражающих или полупрозрачных контактах. Сильнее всего эти ограничения проявляются в кристаллах светодиодов AlGaInN большой мощности и, соответственно, большой площади. Повышение эффективности вывода генерируемого излучения может достигаться путём создания высокоотражающих или прозрачных контактов и формирования оптических неоднородностей в структуре прибора, в частности, рассеивающего свет микрорельефа на одной из поверхностей эпитаксиальной гетероструктуры. Для решения данной проблемы нами был разработан способ создания пор на границе нитрид – сапфир, что позволило повысить эффективность вывода света из светодиодного кристалла [12]. В дальнейшем, для повышения эффективности вывода света из светодиодных кристаллов была разработана технология выращивания гетероструктур на профилированной поверхности сапфировой подложки.

Разработанные нами решения и технологии запатентованы и позволяют создавать синие светодиоды с внешней квантовой эффективностью более 60% и белые светодиоды со светоотдачей свыше 130лм/Вт. На рис. 4 представлены зависимости внешней квантовой эффективности от тока накачки для синего светодиода (слева), а также светоотдачи белого светодиода от тока накачки (справа).

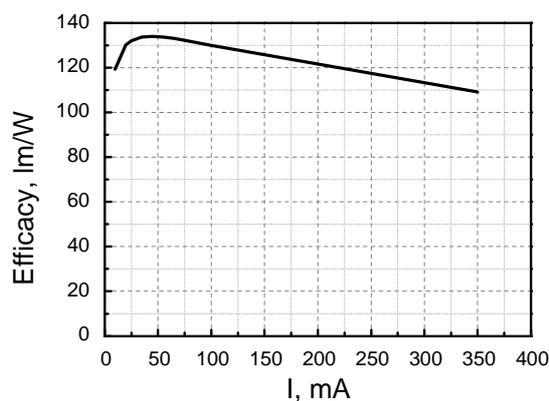
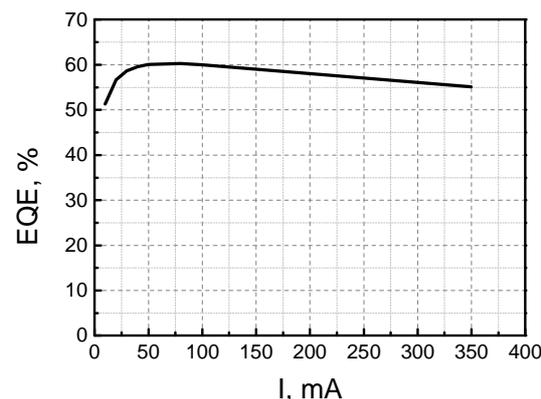


Рисунок 4

Авторы выражают благодарность ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН за помощь в работе над данным докладом.

Библиографический список

1. N.F. Gardner, G.O. Muller, Y.C. Shen, G. Chen, S. Watanabe et al., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, p. 243506, 2007.
2. F. Degave, P. Ruterana, G. Nouet, and C.C. Kim. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 169, 2001, с. 281.
3. I. V. Rozhansky, D. A. Zakheim, *Phys. Status Solidi A-Appl. Res.*, vol. 204, no. 1, p. 227, 2007.
4. И.В.Рожанский, Д.А.Закгейм, *ФТП*, vol. 40, no. 7, p. 867, 2006.
5. А.С.Павлюченко, И.В.Рожанский, Д.А.Закгейм, *ФТП*, vol. 43, no. 10, pp. 1391-1395, 2009.
6. A. Laubsch, M. Sabathil, J. Baur, M. Peter, and B. Hahn, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, p. 79, 2010.
7. J. Hader, J. V. Moloney, B. Pasenow, S. W. Koch, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 26, p. 261103, 2008.
8. K. T. Delaney, P. Rinke, and C. G. Van de Walle, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 26, p. 261103, 2009.
9. M. Meneghini, N. Trivellin, G. Meneghesso, and E. Zanoni, *J. Appl. Phys.*, vol. 106, p. 114508, 2009.
10. [A3] Zakheim D.A., Pavluchenko A.S., Bauman D.A., Blue LEDs – way to overcome efficiency droop // *Phys. Status Solidi (C)*, vol. 8, issue 7-8, 2340–2344 (2011)
11. Закгейм Д. А., Павлюченко А.С., Лундин В.В., Способы повышения квантовой эффективности светодиодных гетероструктур AlInGaN на высоких плотностях тока накачки // *Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 5-й всероссийской конференции*, М. 2007. стр. 53
12. In situ method of improving blue LED light extraction efficiency. D. A. Zakheim, A. S. Pavluchenko, D.A. Bauman // *Theses of 8th International Conference on Nitride Semiconductors*, Jeju Island, Korea, 2009