

УДК 621.382.2

И.А. ПРУДАЕВ*, И.С. РОМАНОВ*, Вад.А. НОВИКОВ*, А.А. МАРМАЛЮК**,
В.А. КУРЕШОВ**, Д.Р. САБИТОВ**, А.В. МАЗАЛОВ**

ВНЕШНИЙ КВАНТОВЫЙ ВЫХОД СВЕТОДИОДНЫХ СТРУКТУР InGaN/GaN, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПРОФИЛИРОВАННОЙ САПФИРОВОЙ ПОДЛОЖКЕ¹

Представлены результаты исследования влияния профилированной сапфировой подложки на увеличение внешнего квантового выхода в «синих» светодиодных структурах на основе InGaN/GaN. Показано, что в структурах с высоким внутренним квантовым выходом (не менее 60 %) увеличение внешнего квантового выхода обеспечивается за счет роста коэффициента вывода излучения из кристалла. При этом эпитаксиальный рост GaN на сапфировой подложке с массивом элементов пирамидальной формы с основанием 900 нм и периодом 1200 нм позволяет увеличить коэффициент вывода излучения на 75 %.

Ключевые слова: светодиод, гетероструктура, нитрид галлия, квантовые ямы, внешний квантовый выход.

Структуры с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN (МКЯ) применяются для создания светодиодов видимого диапазона. Внешний квантовый выход (ВКВ) является основным параметром светодиодных структур, характеризующим их энергетическую эффективность. В общем случае ВКВ определяется выражением [1]

$$\eta = \gamma \cdot \eta_i \cdot \eta_{\text{ext}}, \quad (1)$$

где γ – коэффициент инжекции; η_i – внутренний квантовый выход; η_{ext} – коэффициент вывода излучения. Также в литературе внутренним квантовым выходом (IQE – Internal Quantum Efficiency) обозначают произведение $\gamma \cdot \eta_i$ [2]. При этом значение η_i определяется только механизмами рекомбинации и зависит от кристаллического совершенства активной области. Значение IQE также определяется дизайном активной области, так как зависит от количества инжектированных в нее и вышедших из нее носителей.

В технологии светодиодов с МКЯ InGaN/GaN известно несколько взаимоисключающих методов повышения внешнего квантового выхода светодиодных кристаллов. К ним относятся технология обратного монтажа (flip-chip), технология отделения сапфировой подложки (lift-off), технология роста эпитаксиальных слоев на профилированных подложках (PSS – Patterned Sapphire Substrates). Наибольшее распространение на сегодняшний день получила технология роста на PSS, которая позволяет добиться высокой экономической эффективности производства (наибольшего показателя лм/дол.). Анализ литературных данных показывает, что использование технологии PSS может приводить к двум качественным эффектам: к увеличению η_{ext} за счет роста коэффициента отражения на границе GaN/Al₂O₃ [3–5] и увеличению η_i за счет уменьшения плотности прорастающих дислокаций [6–8]. При этом вклад каждого из эффектов в увеличение ВКВ светодиодов зачастую не устанавливается; в литературе представлены противоречивые данные. В связи с этим в настоящей работе проводится исследование увеличения η_i и η_{ext} при переходе от технологии роста на планарной подложке к росту на PSS.

В рамках теоретического исследования проводился численный расчет трассировки лучей в кристалле светодиода «синего» диапазона. Используемая математическая модель основана на законах 2D-геометрической оптики и представлении о комплексном коэффициенте преломления:

$$\tilde{N} = N + i \cdot \kappa, \quad (2)$$

где N – реальная часть коэффициента преломления; κ – показатель поглощения.

Алгоритм расчета включает следующие основные шаги:

1. Трассировка каждого луча начинается в источнике (слое InGaN квантовой ямы) с мощностью P_0 . Мощности от векторов с взаимно-перпендикулярной поляризацией равны: $P_{TE} = P_{TM} = P_0/2$.

2. При распространении в среде мощность луча уменьшается по закону Ламберта – Бугера:

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (ФЦП ГК 14.516.11.0088) и РФФИ (проект № 13-02-98019).

$$P(x) = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x), \quad (3)$$

где x – длина, на которую распространился луч; $\alpha = \alpha(\kappa)$ – коэффициент поглощения.

3. При попадании на границу между двумя средами с различными коэффициентами преломления угол падения равен углу отражения, а угол преломления рассчитывается по закону Снеллиуса. При этом мощности отраженного и прошедшего лучей рассчитываются по формулам Френеля с учетом их поляризации.

4. Расчет трассировки каждого луча прерывается в случае, если луч выходит за пределы светодиодной структуры или когда мощность луча уменьшается до заданного минимального значения.

Для моделирования спонтанного изотропного характера излучения для каждого источника в квантовых ямах рассчитывалось свое направление луча путем вычисления угла β к плоскости квантовых ям с помощью генератора случайных чисел. Для моделирования реальной структуры с неоднородной шириной квантовых ям расчет проводился для пяти различных заданных интервалов углов β : 1) $0-90^\circ$ (изотропный характер); 2) $20-90^\circ$; 3) $40-90^\circ$; 4) $60-90^\circ$; 5) $80-90^\circ$. Таким образом, варьируемым параметром расчета был минимально возможный угол $\beta \equiv \beta_{\min}$, который изменялся в пределах $20-80^\circ$. Использование такого подхода необходимо для исключения случая распространения лучей только в волноводе активной области (квантовой яме).

С целью уменьшения времени расчетов модельные образцы были выбраны меньших размеров по сравнению с реальными: толщина сапфировой подложки составляла 2 мкм, поперечный размер образца – 6 мкм. Количество квантовых ям InGaN/GaN – 10 шт., толщина квантовых ям – 2.5 нм, толщина барьеров – 15 нм, толщина слоя p -GaN – 150 нм, толщина слоя n -GaN (до горизонтального интерфейса n -GaN/Al₂O₃) – 4 мкм. Профиль сапфировой подложки задавался периодической последовательностью треугольников с основанием 900 нм и высотой 500 нм (период – 1200 нм).

Результаты расчета коэффициента γ для двух идентичных структур, отличающихся видом подложки (профилированная и планарная) представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 изображены монохромные картины трассировки, из которых можно качественно судить о том, что профилированная подложка эффективно отражает излучение в сторону эпитаксиального слоя (в области профилированной подложки лучи разряжены сильнее, чем в структуре на планарной подложке). Согласно расчетным данным, коэффициент вывода излучения вырастает на 40–72 % при переходе от планарной к профилированной подложке (рис. 2).

Стоит отметить, что результат расчета во многом определяется задаваемыми коэффициентами поглощения для GaN, InGaN и Al₂O₃. В нашем расчете использовались данные экспериментальных исследований: $\alpha(\text{GaN}) = 23 \text{ см}^{-1}$, $\alpha(\text{InGaN}) = 250 \text{ см}^{-1}$, $\alpha(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.04 \text{ см}^{-1}$ [9].

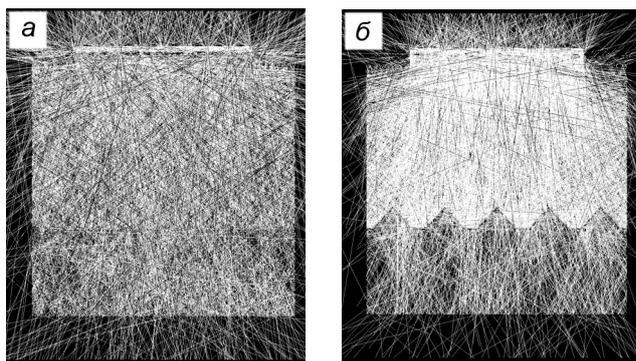


Рис. 1. Монохромные изображения трассировки лучей (результат расчета для $\beta_{\min} = 60^\circ$) в структурах на планарной (а) и на профилированной (б) подложках

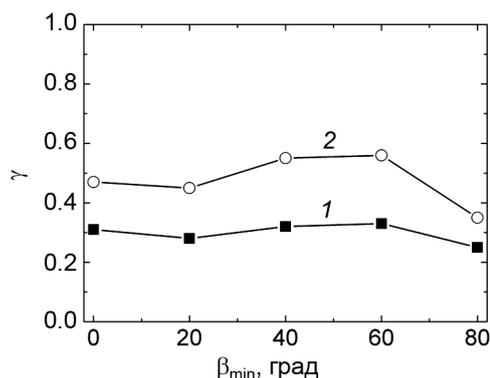


Рис. 2. Рассчитанные значения коэффициента вывода излучения из светодиодного кристалла для структур на планарной (кр. 1) и профилированной (кр. 2) подложках

Для экспериментальных исследований было изготовлено две «синих» светодиодных структуры. Структуры выращивались методом эпитаксии из металлорганических соединений на разных сапфировых подложках (профилированной и планарной) на плоскости (0001) и имели одинаковую последовательность слоев активной области: легированный кремнием слой n -GaN толщиной 2 мкм, 10 пар InGaN/GaN с толщинами 2.5 и 15 нм, легированный магнием слой p -GaN толщиной

150 нм. Профилированная поверхность сапфира представляла собой упорядоченный массив пирамид с периодом 1200 нм, основание пирамид треугольной формы с диаметром 900 нм, высота пирамид 500 нм.

Для экспериментальных образцов измерялись внутренний квантовый выход фотолюминесценции и увеличение коэффициента вывода излучения при переходе от структур на планарной подложке к структурам на PSS. Внутренний квантовый выход определялся по температурной и мощностной зависимостям интенсивности фотолюминесценции [10]. Подробное описание метода представлено в [11]. Измерение увеличения γ проводилось в интегрирующей сфере в режиме фотолюминесценции с учетом экспериментально полученных значений η_i . Для этого два образца одинаковой формы и одинаковых размеров, выращенные на планарном и профилированном сапфире, поочередно помещались в интегрирующую сферу, после чего проводилось возбуждение фотолюминесценции и определение ее интенсивности. В эксперименте использовали интегрирующую сферу фирмы «Labsphere» диаметром 10 дюймов, оптоволоконный спектрометр фирмы «Ocean Optics» и импульсный YAG-лазер со средней мощностью 35 мВт (1 кГц, длительность – 10 нс, 355 нм). По измеренным значениям интегральной интенсивности фотолюминесценции и с учетом идентичности активной области образцов рассчитывалось увеличение γ по формуле

$$K = \left[\frac{I_{\text{пр}} \eta_{\text{пл}}}{I_{\text{пл}} \eta_{\text{пр}}} - 1 \right] \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где $I_{\text{пр}}$ и $I_{\text{пл}}$ – измеренные интегральные интенсивности фотолюминесценции образцов на профилированном и планарном сапфире; $\eta_{\text{пр}}$ и $\eta_{\text{пл}}$ – соответствующие значения внутреннего квантового выхода.

Результаты измерения внутреннего квантового выхода фотолюминесценции представлены на рис. 3. Полученные зависимости качественно совпадают и могут быть объяснены в рамках АВС-модели рекомбинации [11]. Небольшое понижение $\eta_{\text{пр}}$ относительно $\eta_{\text{пл}}$ находится в пределах максимальной относительной случайной ошибки методики, которая в нашем случае составляла 8%. Однако стоит отметить, что незначительное ухудшение кристаллического совершенства структур на профилированном сапфире наблюдалось и по данным рентгеновской дифрактометрии: ширина рефлекса (004) на полувысоте составляет $261''$, что несколько больше, чем для планарного сапфира ($236''$). Возможное ухудшение структурного совершенства в данном случае может быть вызвано неоптимизированной технологией роста буферного слоя GaN на PSS.

Спектры фотолюминесценции, измеренные в интегрирующей сфере, представлены на рис. 4. По полученным спектрам рассчитано значение K , которое составило $\approx 75\%$, что близко к максимальному расчетному значению (для $\beta_{\text{min}} = 60^\circ$ коэффициент $K \approx 72\%$).

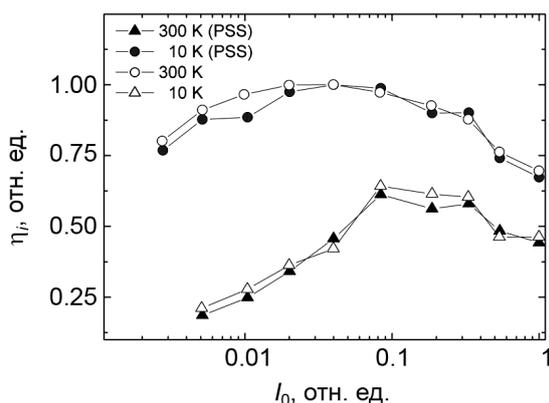


Рис. 3. Мощностная зависимость внутреннего квантового выхода фотолюминесценции (нормированная) для двух температур для структур на профилированной (PSS) и планарной подложках

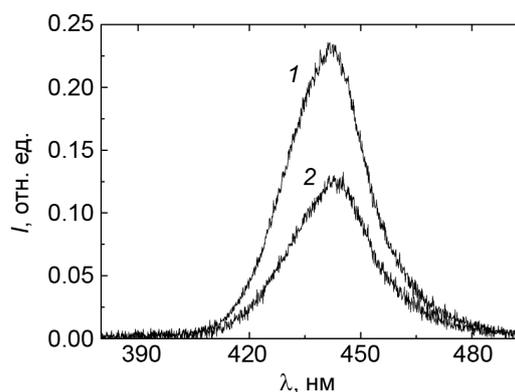


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции, измеренные в интегрирующей сфере для структур на профилированной (кр. 1) и планарной (кр. 2) подложках

Из полученных результатов следует, что увеличение ВКВ структур, выращенных на профилированных подложках сапфира, полностью обусловлено увеличением γ . По-видимому, значительное увеличение η_i в структурах на PSS наблюдается при их сравнении со структурами с высокой плотностью дислокаций [6]. В нашем случае плотность прорастающих дислокаций в структу-

рах на планарных подложках, измеренная по ямкам травления, составила $\approx 10^8$ см⁻². Данное значение является небольшим для системы GaN/Al₂O₃, что и обуславливает высокое значение $\eta_i \approx 60$ %. Для дальнейшего эффективного повышения внутреннего квантового выхода, по-видимому, необходимо использование иных технологических приемов, например введение короткопериодных сверхрешеток в буферный слой [12].

Таким образом, в работе показано, что рост светодиодных InGaN/GaN-структур на профилированных подложках сапфира позволяет увеличить их внешний квантовый выход на 75 %. При этом для структур с высоким исходным значением внутреннего квантового выхода (не менее 60 %) рост внешнего квантового выхода полностью определяется увеличением коэффициента вывода излучения за счет отражения на интерфейсе GaN/Al₂O₃.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
2. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сеницын М.А. и др. // ПЖТФ. – 2008. – Т. 34. – С. 39.
4. Huang H.W., Lin C.H., Huang J.K., et al. // Mat. Sci. Eng. B. – 2009. – V. 164. – P. 76.
5. Hyoungwon Park, Kyeong-Jae Byeon, Jong-Jin Jang, et al. // Microelectr. Eng. – 2011. – V. 88. – P. 3207.
6. Wu D.S., Wang W.K., Wen K.S., et al. // J. Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 89. – P. 161105.
7. Ya-Ju Li, Ching Hua-Chiu, Chih Chun Ke, et al. // IEEE J. Select. Top. Quant. Electron. – 2009. – V. 15. – P. 1137.
8. Kohno T., Sudo Y., Yamauchi M., et al. // Jpn. J. Appl. Phys. – 2012. – V. 51. – P. 072102.
9. Леликов Ю.С., Бочкарева Н.И., Горбунов Р.И. и др. // ФТП. – 2008. – Т. 42. – Вып. 11. – С. 1371.
10. Watanabe S., Yamada N., Nagashima M., et al. // J. Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 83. – No. 24. – P. 4906.
11. Prudaev I.A., Romanov I.S., Kor'ev V.V., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 56. – No. 7. – P. 757.
12. Romanov I.S., Prudaev I.A., Marmalyuk A.A., et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 56. – No. 7. – P. 760.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
**ООО «СигмПлюс», г. Москва, Россия
E-mail: jaia@pochta.ru

Поступила в редакцию 21.11.13.

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Романов Иван Сергеевич, науч. сотр.;
Новиков Вадим Александрович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., технический директор;
Курешов Владимир Александрович, инженер;
Сабитов Дамир Равильевич, инженер;
Мазалов Александр Владимирович, инженер.