

УДК 621.382.2

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

СВЕТОДИОДНЫЕ СТРУКТУРЫ InGaN/GaN С КОРОТКОПЕРИОДНОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ, ВЫРАЩЕННЫЕ НА ПЛАНАРНОЙ И ПРОФИЛИРОВАННОЙ САПФИРОВЫХ ПОДЛОЖКАХ¹

Представлены результаты исследования светодиодных гетероструктур InGaN/GaN синего диапазона длин волн, выращенных на планарных и профилированных подложках Al₂O₃, с короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN перед активной областью структуры. В таких структурах отмечено увеличение внутреннего квантового выхода. Измерены спектры рентгеновской высокоразрешающей дифрактометрии, а также интегральная интенсивность фотолюминесценции для двух температур – 10 и 300 К при различных уровнях оптической накачки YAG-лазером.

Ключевые слова: светодиод, гетероструктура, короткопериодная сверхрешетка, множественные квантовые ямы, фотолюминесценция.

Введение

Гетероструктуры InGaN/GaN применяются при создании светодиодов видимого диапазона длин волн, при этом внешний квантовый выход (External Quantum Efficiency, EQE) является основным параметром светодиодов, характеризующим их энергетическую эффективность. В общем случае величина EQE определяется выражением [1]

$$EQE = \gamma \cdot IQE \cdot LEE, \quad (1)$$

где γ – коэффициент инжекции; IQE – внутренний квантовый выход (Internal Quantum Efficiency, IQE); LEE – коэффициент вывода излучения (Light Extraction Efficiency). Значение IQE определяется механизмами рекомбинации неравновесных носителей заряда и зависит от кристаллического совершенства активной области гетероструктуры, а коэффициент инжекции γ зависит от дизайна светодиодной гетероструктуры. В настоящей работе исследовались светодиодные гетероструктуры InGaN/GaN с короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN, выращенные на профилированных и планарных сапфировых подложках.

Эксперимент

Гетероструктуры In_xGa_{1-x}N/GaN выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на планарных и профилированных сапфировых подложках с ориентацией (0001). В горизонтальный планетарный реактор установки фирмы «AIXTRON» одновременно загружались планарная и профилированная подложки для обеспечения идентичных условий роста светодиодных структур. В качестве источников элементов III группы использовались металлоорганические соединения: триметилиндий In(CH₃)₃, триметилгаллий Ga(CH₃)₃ и триэтилгаллий Ga(C₂H₅)₃, а в качестве источника азота аммиак NH₃. Для получения материала *p*-типа проводимости использовался бис-циклопентодиенил магния Mg(C₅H₅)₂, а для получения материала *n*-типа проводимости – моносилан SiH₄. В качестве газа-носителя во время роста квантовых ям (КЯ) InGaN/GaN использовался азот, остальная часть светодиодной гетероструктуры выращивалась с использованием газа-носителя водорода. Светодиодные структуры содержали низкотемпературный зародышевый слой, буферный слой *i*-GaN, слой *n*-GaN, активную область на основе (5–10) КЯ In_xGa_{1-x}N/GaN ($x = 0.12$ – 0.16) и слой *p*-GaN. В некоторых образцах между эпитаксиальным слоем *n*-GaN и активной областью светодиодной структуры выращивалась короткопериодная (5 периодов) сверхрешетка (КПСР) In_xGa_{1-x}N/GaN ($x = 0.02$ – 0.03) с толщинами квантовых ям и барьеров около 1 нм/1 нм.

¹ Работа выполнена при поддержке госзадания № 3.398.2014/К.

Светодиодные гетероструктуры исследовались методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии на двухкристальном дифрактометре фирмы «PANalytical». Для определения IQE проводились измерения интегральной интенсивности фотолюминесценции в зависимости от интенсивности возбуждающего излучения при низкой (10 К) и комнатной (300 К) температурах по методике, предложенной в [2], подробное описание которой для структур с квантовыми ямами InGaN/GaN изложено в [3–5]. В качестве возбуждающего оптического источника использовался импульсный YAG-лазер с мощностью 35 мВт (частота следования импульсов – 1 кГц, длительность импульса – 10 нс, длина волны излучения – 355 нм). Для достижения низких температур использовался криостат замкнутого цикла фирмы «Janis». Спектры фотолюминесценции регистрировались оптоволоконным спектрометром Ocean Optics USB2000.

Результаты и их обсуждение

Эксперименты по выращиванию светодиодных структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaN/GaN на профилированных сапфировых подложках (Patterned Sapphire Substrate, PSS) проводились с использованием таких же режимов роста буферного слоя, как и для планарных сапфировых подложек (Flat Sapphire Substrate, FSS). В частности, толщина буферного слоя *i*-GaN в структурах составляла около 2 мкм. По данным *in situ* мониторинга с помощью системы LayTec EpiCurve TT было отмечено, что переход от островкового роста к двумерному росту в процессе зародышевого слоя на PSS-подложке происходит позднее, чем на FSS-подложке. Таким образом, в момент начала роста слоя *n*-GaN поверхность структуры на профилированной подложке представляет собой частично заросшие островки, что приводит к ухудшению кристаллического совершенства структуры, выращиваемой на PSS-подложке. По данным рентгеновской дифрактометрии ширина кривой качания на полувысоте (FWHM) в геометрии GaN (004) для светодиодных структур, выращенных на PSS-подложках с буферным слоем толщиной 2 мкм, составляет 370–380 угл. с (рис. 1), что на 80–100 угл. с больше, чем типичные значения для аналогичных светодиодных структур, выращиваемых на подложке FSS. Также для структур, выращенных на PSS-подложках, наблюдалось уменьшение пиковой интенсивности дифрагированных лучей (I_D) для 1-го и 2-го сателлитов, по сравнению со структурами, выращенными на FSS-подложках.

Улучшить кристаллическое совершенство

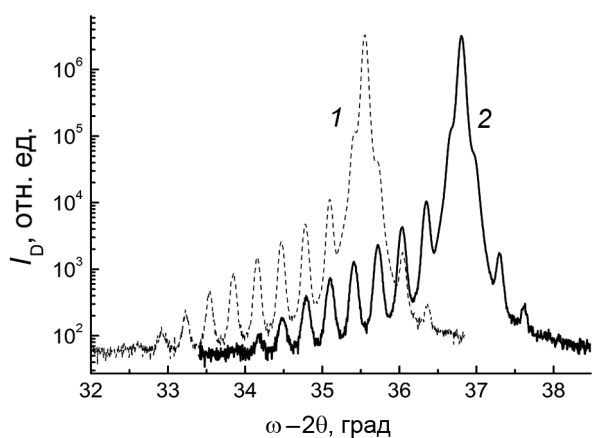


Рис. 2. Кривые качания GaN (004) для светодиодных структур с 10 квантовыми ямами, выращенных на FSS- (кр. 1) и PSS- (кр. 2) подложках с буферным слоем *i*-GaN толщиной 4 мкм. Кривые качания смещены по оси абсцисс для наглядности

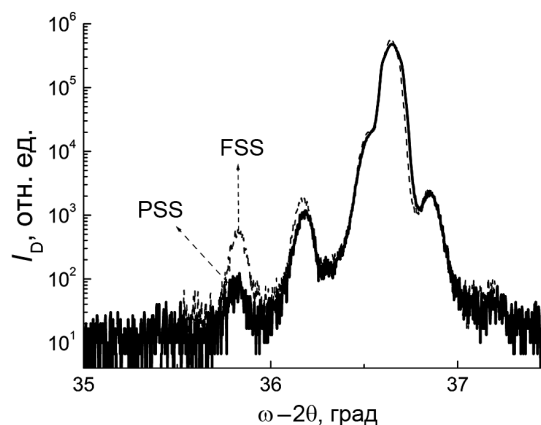


Рис. 1. Кривые качания GaN (004) для светодиодных структур с 5 квантовыми ямами, выращенных на FSS- и PSS-подложках с буферным слоем *i*-GaN толщиной 2 мкм

светодиодных структур на PSS-подложках удалось увеличением толщины буферного слоя *i*-GaN до 4 мкм. По данным *in situ* мониторинга при выбранной толщине буферного слоя произошло полное зародышевание островков, так что рост слоя *n*-GaN начинался на гладкой поверхности буферного слоя *i*-GaN. После увеличения толщины буферного слоя *i*-GaN значения FWHM кривой качания для светодиодных структур на FSS- и PSS-подложках составили около 270–280 угл. с (рис. 2).

На рис. 3 представлена зависимость IQE от интенсивности накачки YAG-лазером при температурах 10 и 300 К для структур с КПСР InGaN/GaN (образец *S*) и без КПСР (образец *M*). Общий вид зависимостей IQE от интен-

сивности лазерной накачки для структур с МКЯ InGaN/GaN можно описать в рамках ABC-модели согласно выражению [1]

$$IQE(n, T) = \frac{B(T) \cdot n^2}{A(T) \cdot n + B(T) \cdot n^2 + C(T) \cdot n^3}, \quad (2)$$

где $A(T)$, $B(T)$ и $C(T)$ – температурно-зависимые коэффициенты рекомбинации Шокли – Рида, излучательной и рекомбинации Оже; n – концентрация неравновесных носителей заряда в квантовой яме.

Отмечено падение IQE в области малой интенсивности лазерной накачки, что может быть обусловлено захватом неравновесных носителей заряда центрами безызлучательной рекомбинации. В области больших интенсивностей оптической накачки существенную роль начинает играть

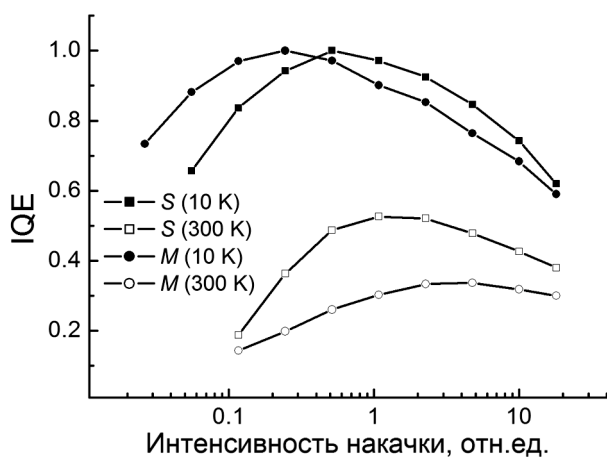


Рис. 3. Зависимость IQE от интенсивности накачки при температурах 10 и 300 К для светодиодных структур S и M

оже-рекомбинация, что приводит к спаду величины IQE с ростом интенсивности накачки. При оценке значения IQE при рабочей температуре (300 К) используется предположение, что при низкой температуре (10 К) значение IQE в максимуме составляет 100 %. Как видно из рис. 3, общий вид зависимостей IQE от интенсивности накачки при низких и высоких температурах для образцов M и S качественно подобен. При температуре 300 К максимальное значение IQE для структур с КПСР в среднем на 40–50 % выше, чем в структурах без КПСР. Согласно исследованиям авторов [6], введение дополнительной короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN со стороны n -области приводит к увеличению эффективности светодиодов, что приписано улучшению растекания носителей заряда в активной области структуры. В нашем случае эффекты, связан-

ные с растеканием электронов, отсутствуют, так как измерения проводятся в режиме фотолюминесценции. Поэтому наблюдаемое увеличение IQE в структурах S предположительно может быть приписано меньшей плотности дислокаций за счет их частичного замыкания в области короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN, аналогично, как это имело место для короткопериодных сверхрешеток AlGaIn/GaN [7].

На рис. 4 приведены характерные спектры фотолюминесценции (ФЛ) структур с КПСР InGaN/GaN и без нее при комнатной температуре, выращенных на планарных подложках сапфира. Интенсивность ФЛ для структур с КПСР на 15–25 % больше, чем для структур без КПСР. На рис. 5 приведены спектры ФЛ для структур, выращенных в одном процессе на PSS- и FSS-подложках. Характерной особенностью структур, выращенных на подложках PSS, является увеличение интенсивности ФЛ на 60–70 % по сравнению со структурами на подложках FSS, при этом значения IQE для обоих типов подложек имеют близкие величины (совпадают в пределах погрешности методики измерения), что может быть объяснено одинаковым кристаллическим совершенством активной области светодиодных структур. Увеличение интенсивности ФЛ структур, выращенных на профилированных подложках, обусловлено увеличением коэффициента вывода излучения, что согласуется с проведенными авторами ранее экспериментальными исследованиями и численными

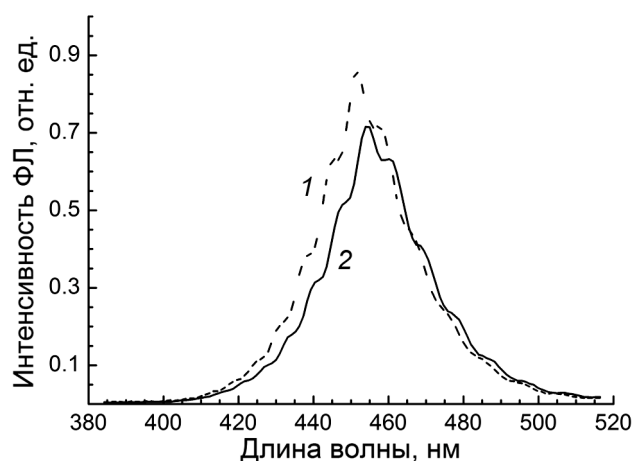


Рис. 4. Характерные спектры ФЛ светодиодных структур InGaN/GaN с КПСР InGaN/GaN (кр. 1) и без КПСР InGaN/GaN (кр. 2) при 300 К

расчетами методом трассировки оптических лучей. Для используемого типа профилирования подложек – периодической последовательности треугольных пирамидок с основанием 900 нм, высотой 500 нм и периодом 1200 нм – получено возрастание коэффициента вывода излучения для структур на PSS относительно FSS на 40–72 % [8].

Заключение

Таким образом, результаты исследований показывают, что светодиодные структуры InGaN/GaN, выращенные на планарных и профилированных сапфировых подложках, имеют близкие значения внутреннего квантового выхода, что указывает на идентичное кристаллическое совершенство этих структур. При этом значение внутреннего квантового выхода в таких светодиодных структурах с короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN с малым содержанием In, выращенной в буферном слое структуры, более чем в 1.5 раза превышает соответствующие значения для структур InGaN/GaN без сверхрешетки. Рост внешнего квантового выхода в светодиодных структурах, выращенных на профилированных сапфировых подложках, происходит за счет увеличения коэффициента вывода оптического излучения.

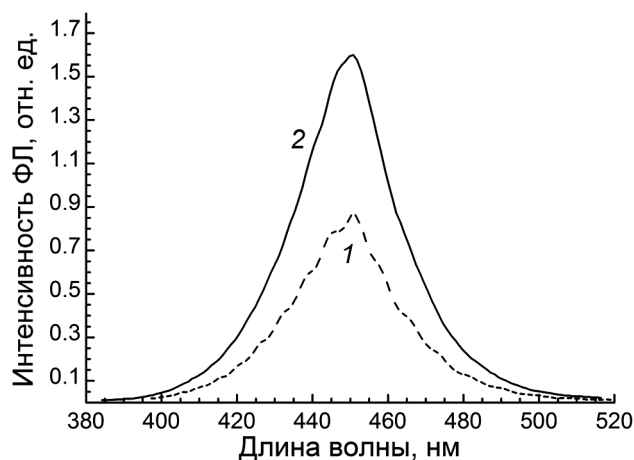


Рис. 5. Характерные спектры ФЛ при 300 К для светодиодных структур InGaN/GaN, выращенных на FSS- (кр. 1) и PSS- (кр. 2) подложках

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Watanabe S., Yamada N., Nagashima M., et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – V. 83. – P. 4906.
3. Kohno T., Sudo Y., Yamauchi M., et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 51. – P. 072102.
4. Романов И.С., Прудаев И.А., Мармалюк А.А. и др. // *Изв. вузов Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 33–35.
5. Прудаев И.А., Романов И.С., Копьев В.В. и др. // *Изв. вузов Физика.* – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 30–32.
6. Цацунчиков А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В. и др. // *ФТП.* – 2010. – Т. 44. – № 1. – С. 96–100.
7. Wang S.-L., Gong J.-R., Yeh M.-F., et al. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2006. – V. 18. – No. 14. – P. 1497.
8. Прудаев И.А., Романов И.С., Новиков Вад. А. и др. // *Изв. вузов Физика.* – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 85.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

**ООО «СигмПлюс», г. Москва, Россия
E-mail: rff.romis@gmail.com

Поступила в редакцию 16.07.14.

Романов Иван Сергеевич, мл. науч. сотр.;
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Брудный Валентин Натанович, д.ф.-м.н., профессор;
Копьев Виктор Васильевич, магистрант;
Новиков Вадим Александрович, науч. сотр.;
Мармалюк Александр Анатольевич, д.т.н., технический директор;
Курешов Владимир Александрович, инженер;
Сабитов Дамир Равильевич, инженер;
Мазалов Александр Владимирович, инженер.