

07.2;08.3;13.1

## Светодиод на основе AlInGaN-гетероструктур, выращенных на подложках SiC/Si и технология его изготовления

© Л.К. Марков<sup>1</sup>, С.А. Кукушкин<sup>2,¶</sup>, И.П. Смирнова<sup>1</sup>, А.С. Павлюченко<sup>1</sup>, А.С. Гращенко<sup>3</sup>, А.В. Осипов<sup>2</sup>, Г.В. Святец<sup>4</sup>, А.Е. Николаев<sup>1</sup>, А.В. Сахаров<sup>1</sup>, В.В. Лундин<sup>1</sup>, А.Ф. Цацуньников<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ООО „Научно-технический центр „Новые технологии“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: sergey.a.kukushkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 18 мая 2021 г.

В окончательной редакции 18 мая 2021 г.

Принято к публикации 1 июня 2021 г.

Описаны методика и технология изготовления как светодиодных чипов, так и корпусированных светодиодов из AlInGaN/GaN-гетероструктур, выращенных на подложках нового типа SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов. Исследованы вольт-амперные характеристики, спектры излучения, зависимости мощности излучения и внешней квантовой эффективности от величины тока. Показано, что наличие пор в подложке SiC/Si, естественным образом формирующихся в процессе ее роста, приводит к значительному повышению квантовой эффективности светодиодов по сравнению с квантовой эффективностью светодиодов, изготовленных на кремнии без подслоя SiC.

**Ключевые слова:** светодиоды, светодиоды на кремнии, светодиоды на карбиде кремния на кремнии, карбид кремния на кремнии, гетероструктуры AlInGaN/GaN/SiC/Si.

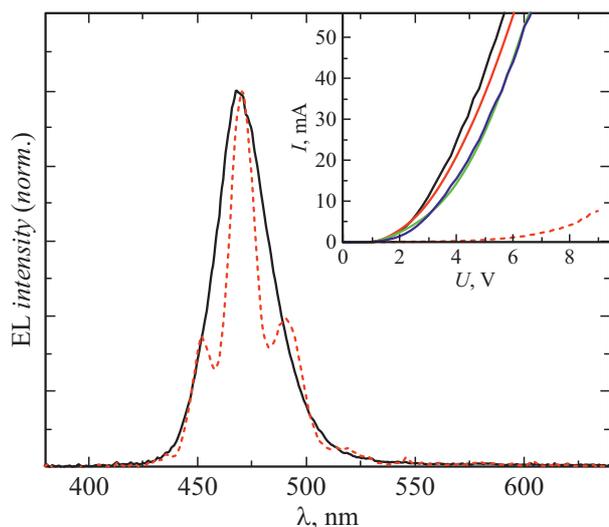
DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51462.18877

Светодиоды на основе GaN активно используются для создания источников белого света, успешно заменяя традиционные лампы. На данный момент эпитаксиальный рост гетероструктур для таких светодиодов производится в основном на подложках сапфира, но при переходе к большим размерам подложек крайне перспективным с экономической точки зрения является использование кремния [1] и подложек на его основе, одной из которых является SiC/Si. Светодиодная структура на гибридной подложке SiC/Si впервые была получена в [2]. В этой работе была показана принципиальная возможность создания светоизлучающих широкозонных структур на основе III-нитридов на кремнии с буферным нанослоем SiC. Характеристики указанной структуры не были выдающимися [2], но эта была первая светодиодная структура, полученная на подложках нового типа SiC/Si, выращенных методом согласованного замещения атомов [3,4]. За прошедшее с момента опубликования работы [2] время удалось существенно модифицировать технологию получения SiC/Si и значительно улучшить качество слоев SiC [3], что позволило развить новые подходы к получению гетероструктур. В [5] приведено описание технологии выращивания и исследованы свойства светодиодных AlInGaN/GaN-структур на темплайтах SiC/Si (111) диаметром 2 дюйма с толщиной слоя SiC  $\sim 100$  nm. При помощи высокоразрешающей микроскопии в работе [5] было изучено распределение дислокаций в структуре и показано, что использование AlGaIn/GaN-сверхрешеток позволяет эффективно сни-

зить плотность дислокаций в активной области гетероструктуры с  $\sim 10^{10}$  до  $\sim 3 \cdot 10^9$  cm<sup>-2</sup>.

В настоящей работе на основе полученных в [5] гетероструктур были изготовлены светодиодные чипы и собственно светодиоды. Данная технология применяется впервые для подложек SiC/Si и имеет свои особенности. Цель работы — описать особенности технологии изготовления светодиодов на подложках SiC/Si. Для сравнения параметров светодиодов, выращенных на подложках кремния и на гибридных подложках SiC/Si, были изготовлены соответствующие светодиодные гетероструктуры.

Поскольку подложки кремния непрозрачны, а дизайн гетероструктуры с использованием зародышевого слоя AlN [5] затруднял вертикальную проводимость, для изготовления светодиодного чипа рассматривался единственный возможный без удаления подложки вариант конструкции чипа. Это так называемая face-up геометрия, при которой обе контактные площадки к *n*- и *p*-областям гетероструктуры располагаются по одну сторону, а большая часть света выводится через прозрачные элементы контакта к *p*-области GaN. Чип представляет собой квадрат размером  $500 \times 500$   $\mu$ m в плоскости контактов, по двум соседним сторонам которого реактивным ионным травлением до *n*-слоя сформирована мезоструктура и проложены металлические шины *n*-контакта. На оставшейся площади поверхности чипа располагается *p*-контакт площадью  $0.08$  mm<sup>2</sup>, через который и осуществляется вывод света из чипа.



**Рис. 1.** Спектр излучения светодиодных чипов на основе гетероструктур на подложках SiC/Si (сплошная линия) и Si (штриховая линия). На вставке приведены ВАХ соответствующих чипов.

Детали конструкции светодиодов и основные стадии их изготовления представлены в работе [6]. Прозрачный проводящий контакт к  $p$ -области GaN был изготовлен на основе оксида индия и олова (ITO). Пленки ITO наносились методом электронно-лучевого испарения на предварительно нагретую подложку. Такой способ нанесения позволяет создавать так называемые градиентные покрытия, т.е. покрытия, в которых эффективный показатель преломления материала изменяется монотонным образом в направлении, перпендикулярном плоскости подложки [7], что дает возможность оптимального вывода света одновременно в широком диапазоне длин волн излучения за счет подавления френелевского отражения на границе двух сред, что ведет к увеличению квантовой эффективности светодиода.

На рис. 1 приведены типичные спектры электролюминесценции гетероструктур на подложках Si и SiC/Si, а на вставке к этому рисунку представлены их вольт-амперные характеристики (ВАХ). Пиковая длина волны излучения составила 470 нм. Свечение по площади поверхности светодиодного чипа на Si имело неравномерный характер, что может свидетельствовать о высокой плотности дефектов в гетероструктуре, при которой, как правило, свечение локализуется в выделенных областях. Поскольку измерения проводились на пластине, а не на чипе в интегральной сфере, на спектре хорошо различимы минимумы и максимумы, возникающие в результате интерференции собственного излучения в гетероструктуре. Аналогичные исследования светодиодных гетероструктур, выращенных на подложках SiC/Si, показали (рис. 1), что в спектре данных структур подобные интерференционные экстремумы отсутствуют. ВАХ всех изготовленных светодиодных чипов имели

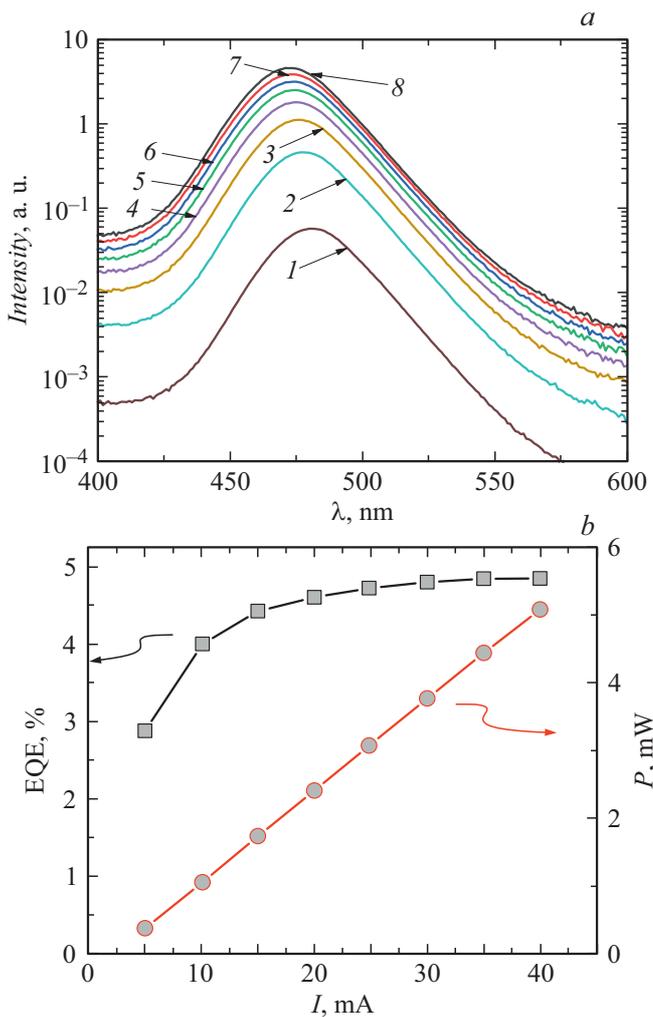
близкие характеристики. При рабочем токе, который для чипов такого размера составляет 20 мА, напряжение для разных чипов находится в диапазоне 3.5–4.5 В.

Разделение пластин на отдельные чипы производилось с помощью алмазных дисков толщиной 20  $\mu\text{m}$ . В дальнейшем чипы размещались на подкристалльных платах, которые монтировались в корпусе светодиода, и формировалась линза из эпоксидной смолы. Внешний вид готового светодиода представлен на рис. 2. Показаны три светодиода без покрытия люминофором, а на вставке к этому рисунку приведено изображение такого же светодиода, но покрытого полимерной линзой, содержащей в своем составе люминофор, что позволило получить источник белого света со следующими цветовыми координатами: CIE 1931  $(x, y) = (0.378, 0.370)$ . На рис. 3 приведены параметры чипов светодиодов, изготовленных на подложках SiC/Si. Оптические характеристики светодиодов измерялись в интегральной сфере диаметром 152 мм при помощи спектрорадиометра Optronic Laboratories OL-770. Для каждого светодиода был получен спектр излучения при фиксированном наборе токов (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 мА). На рис. 3, а представлены спектры излучения одного из изготовленных светодиодов, а на рис. 3, б — зависимости мощности излучения и внешней квантовой эффективности от величины тока.

Проведенные исследования однозначно показали, что поры, формирующиеся в процессе образования SiC из Si при синтезе методом замещения атомов [3,4], играют



**Рис. 2.** Внешний вид готового светодиода: три светодиода без покрытия люминофором и светодиод с полимерной линзой, содержащей в своем составе люминофор (на вставке).



**Рис. 3.** *a* — спектры собственного излучения при значениях тока 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4), 25 (5), 30 (6), 35 (7), 40 мА (8); *b* — зависимости мощности излучения ( $P$ ) и внешней квантовой эффективности (EQE) от величины тока для одного из изготовленных светодиодов на основе гетероструктуры, выращенной на подложке SiC/Si.

позитивную роль при создании светодиодов, поскольку они эффективно рассеивают собственное излучение. Как уже отмечалось, из спектра излучения светодиодов на подложке SiC/Si, приведенного на рис. 1, хорошо видно, что в нем отсутствуют интерференционные экстремумы, наблюдавшиеся в спектре чипов на кремниевой подложке. Это означает, что ростовые поры [3,4], образующиеся на границе слоя Si–SiC в подложке SiC/Si, эффективно рассеивают собственное излучение. Наличие таких пор на интерфейсе SiC/Si помимо сильного рассеяния света и увеличения его вывода за счет разрушения „конуса вывода света“ также приводит к повышению отражения света в силу большого значения контраста показателей преломления поры и материала SiC. Следовательно, уменьшается доля света, поглощаемого непрозрачной подложкой. Кроме того, поры, способствуя рассеянию

света на границе гетероструктуры, предотвращают захват генерируемого света в волновод гетероструктуры с последующим его поглощением при многократном отражении от ее границ. На сапфировых подложках для устранения данного эффекта предварительно создается специальный рассеивающий свет рельеф. В процессе изготовления светодиодных кристаллов наличие пор в подложках SiC/Si привело к заметному отличию внешнего вида поверхности этих образцов от такового для образцов светодиодных структур на Si-подложке. К сожалению, из-за ограниченного объема публикации мы не смогли привести здесь соответствующий рисунок. Также можно отметить, что светодиодные чипы, изготовленные на подложке SiC/Si, показывали равномерное свечение по всей поверхности активной области в отличие от чипов на подложке Si.

Таким образом, подложки SiC/Si, синтезированные методом согласованного замещения атомов, могут успешно использоваться для изготовления светодиодных чипов синего и ультрафиолетового диапазонов. При этом наличие ростовых пор на границе слоя Si–SiC подложки играет позитивную роль за счет рассеяния и повышения отражения собственного излучения светодиода на указанной границе.

### Благодарности

Синтез пленок Si/SiC проводился с использованием оборудования Уникальной научной установки „Физика, химия и механика кристаллов и тонких пленок“ ФГУП ИПМаш РАН (Санкт-Петербург).

### Финансирование работы

С.А. Кукушкин и А.В. Осипов выполняли свою часть работы при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по контракту № FFNF-2021-0001, А.С. Гращенко выполнял свою часть работы при поддержке гранта Санкт-Петербургского государственного университета № 75746688.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H.Y. Ryu, K.S. Jeon, M.G. Kang, H.K. Yuh, Y.H. Choi, J.S. Lee, *Sci. Rep.*, **7**, 1 (2017). DOI: 10.1038/srep44814
- [2] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, С.Г. Жуков, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, М.А. Синецын, М.М. Рожавская, А.Ф. Цацульников, С.И. Трошков, Н.А. Феоктистов, *Письма в ЖТФ*, **38** (6), 90 (2012). [S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, S.G. Zhukov, E.E. Zavarin, W.V. Lundin, M.A. Sinitsyn, M.M. Rozhavskaya, A.F. Tsatsulnikov, S.I. Troshkov, N.A. Feoktistov, *Tech. Phys. Lett.*, **38** (3) 297 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012030261].

- [3] S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, *Materials*, **14** (1), 78 (2021). DOI: 10.3390/ma14010078
- [4] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов, *ФТТ*, **56** (8), 1457 (2014). [S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, N.A. Feoktistov, *Phys. Solid State*, **56** (8), 1507 (2014). DOI: 10.1134/S1063783414080137].
- [5] Н.А. Черкашин, А.Ф. Цагульников, А.В. Сахаров, А.Е. Николаев, В.В. Лундин, С.О. Усов, А.С. Гращенко, С.А. Кукушкин, А.А. Осипов, *Письма в ЖТФ*, **47** (15), 15 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51227.18827
- [6] И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, *ФТП*, **46** (3), 384 (2012). [I.P. Smirnova, L.K. Markov, A.S. Pavlyuchenko, M.V. Kukushkin, *Semiconductors*, **46** (3), 369 (2012). DOI: 10.1134/S1063782612030190].
- [7] Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, И.П. Смирнова, С.И. Павлов, *ФТП*, **52** (10), 1228 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.10.46466.8853 [L.K. Markov, A.S. Pavluchenko, I.P. Smirnova, S.I. Pavlov, *Semiconductors*, **52** (10), 1349 (2018). DOI: 10.1134/S106378261810010X].