

06;12

Светодиод на основе III-нитридов на кремниевой подложке с эпитаксиальным нанослоем карбида кремния

© С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, С.Г. Жуков, Е.Е. Заварин,
В.В. Лундин, М.А. Сеницын, М.М. Рожавская, А.Ф. Цацульников,
С.И. Трошков, Н.А. Феоктистов

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: sergey.a.kukushkin_s@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 ноября 2011 г.

Впервые выращена светодиодная структура на основе III-нитридов на подложке кремния (111) с использованием нанослоя SiC (50–200 nm), полученного методом твердофазной эпитаксии. При этом достигается рекордно низкая плотность дислокаций несоответствия решеток $< 10^8 \text{ cm}^{-2}$ при общей плотности дислокаций $\sim 8 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Измерены спектры фото- и электролюминесценции полученных структур.

В последние годы интенсивно разрабатываются оптоэлектронные приборы на основе гетероэпитаксиальных пленок широкозонных полупроводников — нитридов металлов III группы, а именно GaN, AlN, InN и твердых растворов на их основе AlGaIn, InGaIn и др. [1]. Структуры, изготовленные на основе III-нитридов, в настоящее время выращивают преимущественно на подложках из сапфира Al_2O_3 и карбида кремния SiC. Однако наибольший интерес вызывает эпитаксия таких структур на кремниевых подложках из-за перспектив интеграции нитрид-галлиевой и кремниевой электроники, возможности использования подложек большого диаметра, их низкой стоимости, хорошей электро- и теплопроводности [1–3]. Большое различие постоянных решеток ($\sim 17\%$) и коэффициентов термического расширения ($\sim 33\%$) GaN и Si является главной причиной деформации гетероструктур на основе GaN/Si, которая приводит к высокой плотности дефектов в эпитаксиальном слое GaN при непосредственном выращивании его на

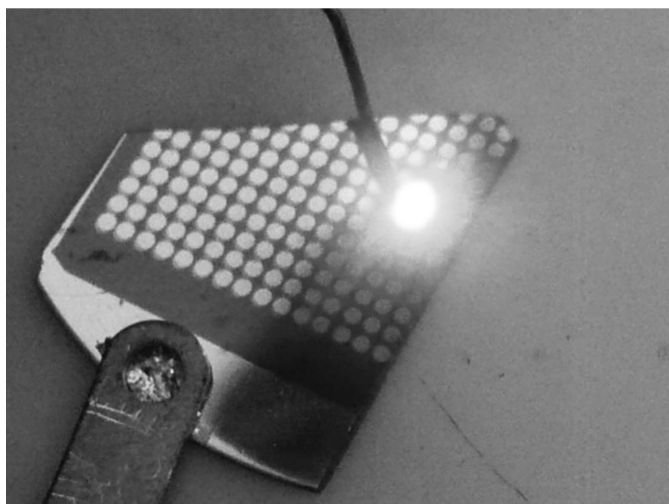
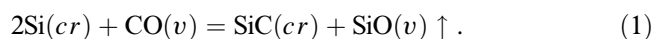


Рис. 1. Светоизлучающий кристалл на основе GaN, выращенный на Si с буферным нанослоем SiC.

Si [1]. Существенная разница в параметрах решетки SiC и Si ($\sim 20\%$) приводит к тому, что на границе Si и SiC образуются дислокации несоответствия решеток, которые затем все равно прорастают в GaN. В результате даже лучшие образцы GaN/SiC/Si, полученные методом MOVPE при толщине SiC $\sim 1 \mu\text{m}$ [4], содержат $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$ дислокаций несоответствия.

В данной работе для уменьшения плотности дислокаций несоответствия предлагается использовать нанометровый ($\sim 50\text{--}200 \text{ nm}$) буферный слой SiC, который выращен на Si методом твердофазной эпитаксии [5], обеспечивающим предельно низкие значения плотности дислокаций несоответствия [6]. Принципиальное отличие метода твердофазной эпитаксии от остальных заключается в том, что слой SiC не выращивается сверху на поверхности Si, как обычно, а формируется непосредственно в объеме кремниевой подложки за счет химической реакции



Поры и вакансии, которые образуются в матрице кремния при выведении из системы газа SiO, обеспечивают эффективную релаксацию

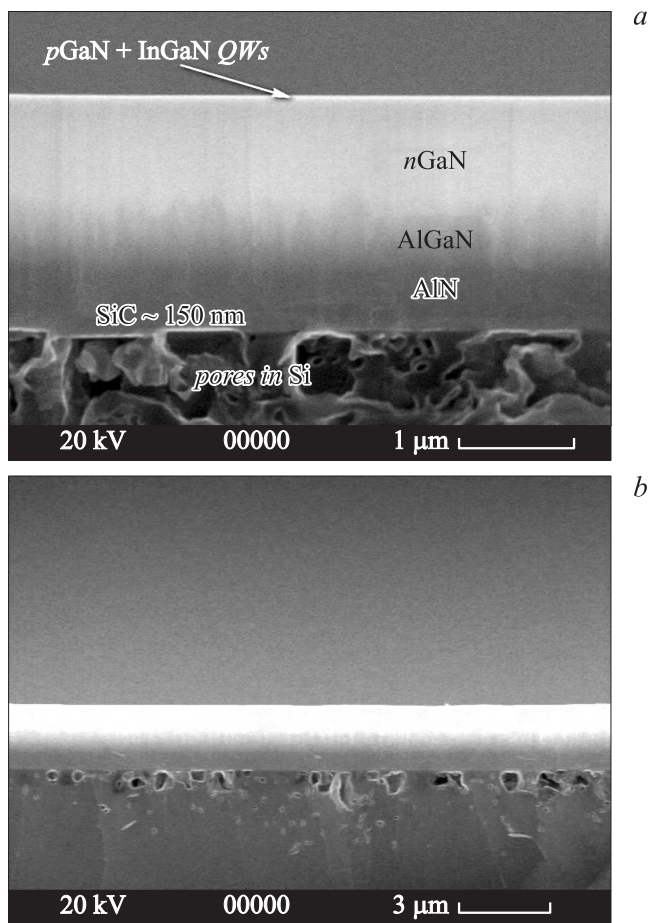


Рис. 2. SEM-изображение скола светодиодной структуры на темплейте SiC/Si, полученном методом твердофазной эпитаксии (a); то же при меньшем увеличении (b).

упругих напряжений, возникающих из-за разницы параметров решеток Si и SiC. Расчеты показывают, что ключевую роль в образовании и упорядочении слоя SiC играют особые устойчивые объекты — дилатационные диполи, которые представляют собой два центра дилатации,

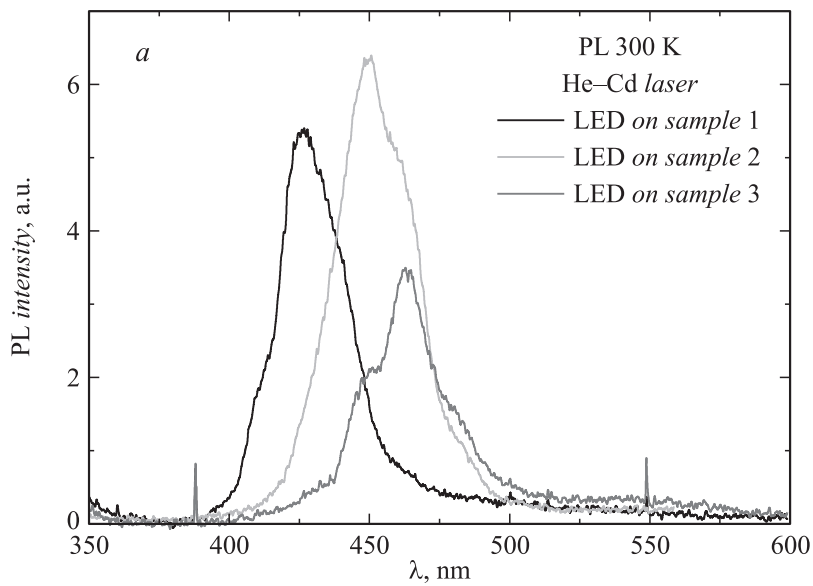


Рис. 3. Спектры фотолуминесценции (a) и электролюминесценции (b) светоизлучающего кристалла, выращенного на темплейтах SiC/Si, полученных методом твердофазной эпитаксии.

один из которых расширяет решетку Si — это молекула SiC, а второй, наоборот, сжимает — это кремниевая вакансия. Притяжение этих двух центров дилатации существенно уменьшает упругие напряжения на самой ранней стадии зарождения и способствует упорядочению образующихся молекул SiC аналогично ступеням и изломам на поверхности кристалла. Электронно-микроскопические исследования показали, что концентрация дислокаций несоответствия решеток при таком механизме роста крайне мала, поэтому слои GaN, AlN, AlGa_xN, выращенные на таких темплейтах, т.е. нанослоях SiC на подложках Si, также будут иметь низкую концентрацию дислокаций несоответствия [6].

В данной работе на подложках Si(111) с нанесенными на них эпитаксиальными нанослоями ($\sim 50\text{--}200\text{ nm}$) SiC выращивались светодиодные гетероструктуры на основе GaN. Такие структуры представляют собой следующую последовательность слоев. Сначала на темплейт SiC/Si осаждался зародышевый слой AlN толщиной $\sim 100\text{--}400\text{ nm}$, затем выращивался переходный слой твердого раствора Al_xGa_{1-x}N с

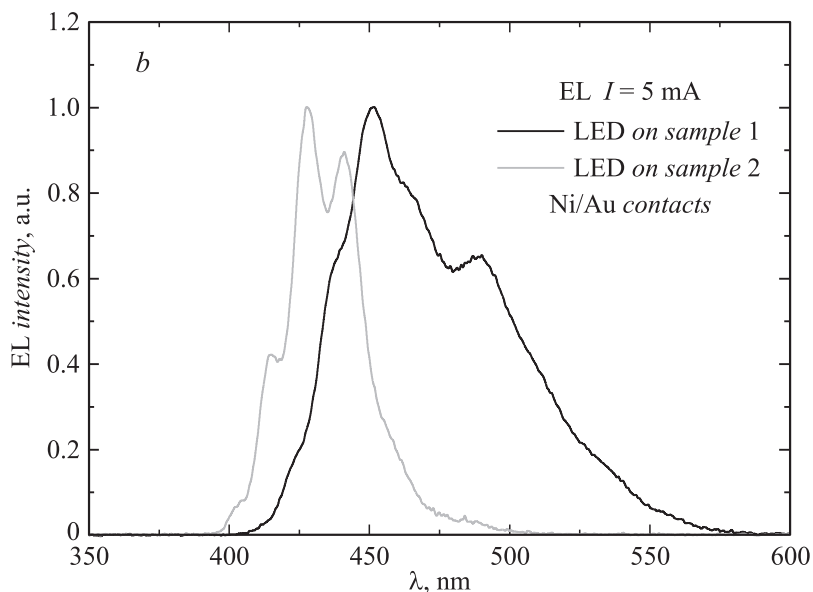


Рис. 3 (продолжение).

переменным содержанием Al от $x = 1$ до $x = 0$ вдоль направления роста, толщина этого переходного слоя $\sim 100\text{--}500$ nm. Использование переходного слоя позволило компенсировать упругие напряжения, возникающие из-за рассогласования параметров кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения GaN и Si. Далее выращивался слой GaN, обеспечивающий планарность поверхности структуры. После этого выращивалась стандартная светодиодная структура, содержащая слои GaN n - и p -типа и активную область на основе 5 квантовых ям InGaN, разделенных барьерными слоями GaN. Для предотвращения трещин общая толщина светодиодной структуры была ограничена $2.5\ \mu\text{m}$.

Измерения спектров электролюминесценции проводились непосредственно на эпитаксиальных структурах с использованием полупрозрачных контактов Ni/Au, нанесенных методом термического распыления.

На рис. 1 приведена фотография выращенной светодиодной структуры. На рис. 2 представлены SEM-изображения сколов образцов светодиодных структур на подложках кремния. Поры, находящиеся в кремнии

под нанослоем SiC, обеспечивают эффективную релаксацию упругих напряжений в системе, в результате чего концентрация дислокаций несоответствия в слоях GaN минимальна ($\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$) при общей концентрации дефектов $\sim 8 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ [6].

Спектры фото- и электролюминесценции представлены на рис. 3. Видно, что в зависимости от условий выращивания можно получить излучение в спектральном диапазоне от фиолетового до зеленого. Образцы 1–3 отличаются друг от друга временем роста SiC и, следовательно, упругими напряжениями в SiC. Поскольку вхождение атомов индия в растущую структуру при эпитаксиальном росте InGaN на GaN сильно зависит от упругих напряжений в GaN, то наблюдаемые изменения в спектре линии излучения обусловлены различием свойств GaN, выращенного на темплейтах SiC/Si.

Таким образом, показана принципиальная возможность создания светоизлучающих низкодефектных широкозонных структур на основе III-нитридов на кремнии с буферным нанослоем SiC, выращенным методом твердофазной эпитаксии [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 09-03-00596, 11-02-00496, 11-02-12154-офи-м, 12-02-00935-а), „Фонда поддержки науки и образования“, Санкт-Петербург, программы президиума РАН № 27 „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и программы президиума РАН „Поддержка инноваций и разработок“.

Список литературы

- [1] III–V Compound Semiconductors: Integration with Silicon-based microelectronics // Ed. by T. Li, M. Mastro, A. Dadgar. Boca Raton: CRC Press, 2011. 594 p.
- [2] Pearton S.J., Kang B.S., Suku Kim, Ren F., Gila B.P., Abernathy C.R., Jenshan Lin, Chu S.N.G. // J. Phys.: Cond. Mater. 2004. V. 16 (29). P. R961–R994.
- [3] Ishikawa H., Jimbo T., Egawa T. // Phys. Stat. Sol. 2008. V. 5 (6). P. 2086–2088.
- [4] Yoshida S. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2006. V. 297 (2). P. 279–282.
- [5] Кукушкин С.А., Осипов А.В. // ФТТ. 2008. Т. 50. В. 7. С. 1188–1195.
- [6] Сорокин Л.М., Калмыков А.Е., Бессолов В.Н., Феоктистов Н.А., Осипов А.В., Кукушкин С.А., Веселов Н.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 72–79.