

07.3;08.3;13.1

Тонкопленочный светодиод на основе слоев AlInGaN, выращенных на гибридных подложках SiC/Si

© Л.К. Марков¹, С.А. Кукушкин², А.С. Павлюченко¹, И.П. Смирнова¹, А.В. Сахаров¹, А.Е. Николаев¹, А.С. Гращенко², А.В. Осипов², А.Ф. Цацульников³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 4 мая 2023 г.

В окончательной редакции 18 мая 2023 г.

Принято к публикации 18 мая 2023 г.

Представлены результаты изготовления flip-chip-светодиодов с удаленной подложкой на основе гетероструктур AlInGaN, выращенных на подложках SiC/Si, синтезированных методом вакансионного согласованного замещения атомов. Показано, что использованные подложки SiC/Si являются оптимальными с точки зрения согласования параметров решетки, теплопроводности и оптических характеристик материала при низкой себестоимости. При этом упрощается процедура резки пластин на отдельные чипы и удаления непрозрачной кремниевой части подложки, а остающаяся на поверхности чипа прозрачная часть подложки (SiC) создает рельеф, облегчающий вывод света.

Ключевые слова: тонкопленочные светодиоды, светодиоды на кремнии, светодиоды на карбиде кремния на кремнии, AlInGaN-гетероструктуры, SiC/Si.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55855.19616

В связи с широким распространением светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур в качестве источников твердотельного освещения, а в последнее время и ультрафиолетового (УФ) излучения исследователями ведется постоянная работа по усовершенствованию их конструкции. Как известно, набор подложек, обеспечивающих возможность эпитаксиального роста материала GaN, довольно ограничен [1]. Оптимальными с точки зрения согласования параметров решетки, теплопроводности и оптических параметров являются подложки нитрида галлия, но они до сих пор недоступны в больших размерах. Следующими по сочетанию параметров идут подложки карбида кремния. Однако соображения экономического характера привели к тому, что подавляющая часть светодиодов на базе GaN имеет в своей основе гетероструктуры, выращенные на более дешевых подложках лейкосапфира, уступающего SiC по своим характеристикам. При переходе к большим диаметрам (200–300 мм) хорошую альтернативу для роста GaN предоставляют кремниевые подложки, что связано как с их ценой, так и с детально отработанными за многие годы развития кремниевых технологий особенностями работы с ними. Однако существенное рассогласование параметров кристаллической решетки и температурных коэффициентов расширения кремния и GaN не позволило им занять серьезную нишу на рынке. Интересную возможность для роста гетероструктур на основе GaN предоставляют, на наш взгляд, создание и использование подложек со слоем SiC, выращенным на поверхности кремниевых подложек (SiC/Si). Такие подложки способны сочетать основные преимущества подложек карбида

кремния с низкой себестоимостью и хорошей технологичностью кремниевых подложек. Успешный рост GaN на таких подложках был описан в [2], однако, как показали дальнейшие исследования [3], для получения GaN требуемого качества необходимо использовать очень толстые слои SiC (более 1 μm). Сообщалось также и об использовании аморфного SiC [4] на подложках SiO₂/Si для создания тонкопленочных светодиодов.

В работе [5] рассмотрена технология изготовления face-up-светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур, выращенных на подложках SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов (method of coordinated substitution of atoms) [6]. Как было показано в работе [5], наличие ростовых пор на границе слоя SiC/Si улучшает эффективность светодиода за счет рассеяния света на указанной границе и повышения эффективности вывода излучения. Однако для достижения максимальных значений КПД чипов на подложке SiC/Si непрозрачную часть подложки необходимо удалить.

Поскольку дизайн гетероструктуры с использованием зародышевого слоя AlN, используемый для роста на подложках нового типа SiC/Si, не обеспечивает необходимой вертикальной проводимости гетероструктуры, оптимальным представляется решение использовать flip-chip-конструкцию светодиода с последующим удалением непрозрачной кремниевой части ростовой подложки. Напомним, что в случае flip-chip-монтажа светодиодный чип монтируется на теплоотвод лицевой стороной, т.е. эпитаксиальными слоями, а свет выводится через его противоположную поверхность. Такая конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с упоминавшейся

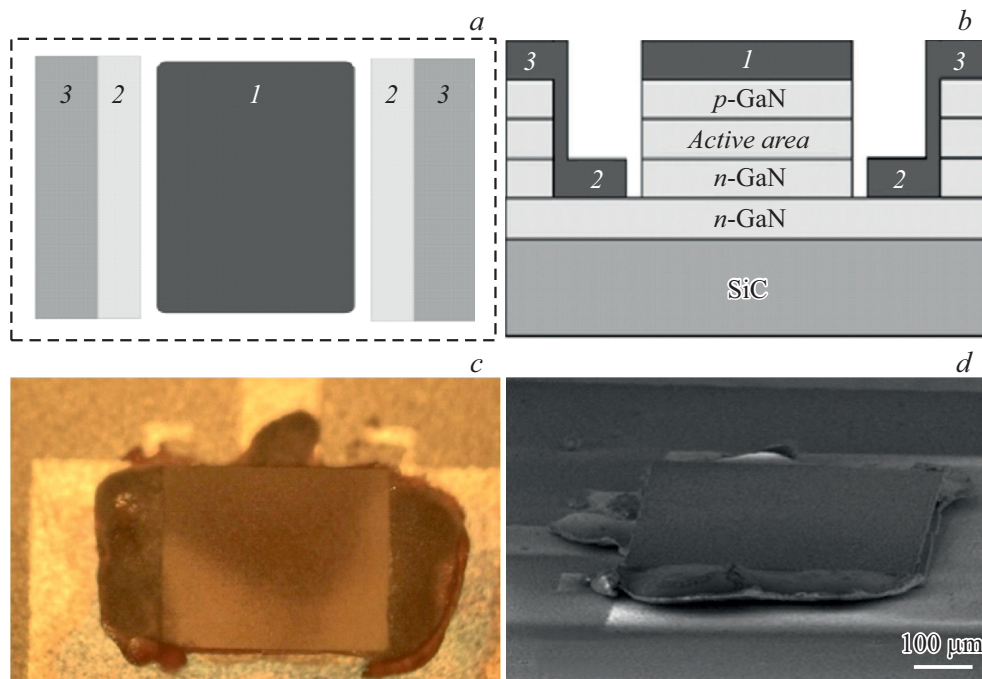


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции светодиодного чипа flip-chip-дизайна: вид сверху (a), сечение (b) и внешний вид светодиодного чипа с удаленной кремниевой подложкой в оптическом микроскопе (c) и в электронном микроскопе (d) со стороны, первоначально обращенной к кремниевой подложке (светорассеивающие кристаллы, присутствующие на этой стороне, не позволяют видеть контакты, расположенные на стороне чипа). 1 — отражающий *p*-контакт, 2 — *n*-контакт, 3 — область *n*-контакта, расположенная на одном уровне с *p*-контактом, предназначенная для пайки.

выше face-up-геометрией и применяется при разработке мощных, эффективных светодиодов, работающих при повышенных плотностях токов. Удаление ростовой подложки у flip-chip-чипов и формирование так называемых тонкопленочных чипов (thin-film flip-chip (TFFC)) даже в случае прозрачной подложки позволяют дополнительно повысить квантовый выход светодиодов за счет формирования светорассеивающего рельефа на открывшейся после удаления подложки границе гетероструктуры. Поскольку контакты к *n*- и *p*-областям гетероструктуры находятся на одной ее стороне (в отличие от так называемых „вертикальных“ светодиодных чипов, которые тоже предполагают удаление ростовой подложки), TFFC востребованы при создании УФ-светодиодов, имеющих в составе гетероструктуры буферные слои низкой проводимости [7,8].

Основным недостатком метода согласованного замещения атомов [6] является то, что толщина слоя SiC, выращиваемого этим методом, имеет физическое ограничение. Данный способ не позволяет выращивать слои SiC толщиной более чем 200 nm. В работе [9] метод согласованного замещения атомов [6] был существенно развит, в результате был предложен и реализован метод вакансионного согласованного замещения атомов. Метод позволяет существенно увеличить толщину слоя карбида кремния в процессе замещения атомов. Отметим, что при синтезе SiC данным методом не только увеличивается толщина слоя карбида кремния, но и

происходит отслоение карбида кремния от подложки кремния, если толщина слоя SiC превышает 400 nm.

Детали технологии выращивания и свойства светодиодных InGaN/GaN-структур на подложках SiC/Si приведены в работе [10].

Для отработки всех постростовых операций была выбрана простая конфигурация расположения контактов на поверхности гетероструктуры, в которой прямоугольная *p*-область с расположенным на ней контактом находилась на осевой линии чипа (рис. 1). По двум противоположным сторонам от нее в гетероструктуре до уровня *n*-слоя вытравливались узкие прямоугольные меза-структуры, предназначенные для расположения *n*-контактов. Для удобства монтажа чипа на подкристалльную плату *n*-контактные площадки были выведены на уровень *p*-области по высоте на краях чипа. Сам чип представляет собой прямоугольник размером 0.7×0.56 mm, площадь *p*–*n*-перехода 0.13 mm².

Процесс изготовления светодиода состоял из комплекса стандартных операций постростовой технологии, включающих создание методом реактивного ионного травления в атмосфере Cl₂:BCl₃:Ar меза-рельефа в гетероструктуре, обеспечивающего доступ к *n*-слою гетероструктуры (0.3 μm в нашем эксперименте), нанесение металлических контактов к *n*- и *p*-областям структуры, разделение пластины на кристаллы, монтаж на подкристалльную плату и удаление подложки кремния. Отметим, что с целью повышения квантового

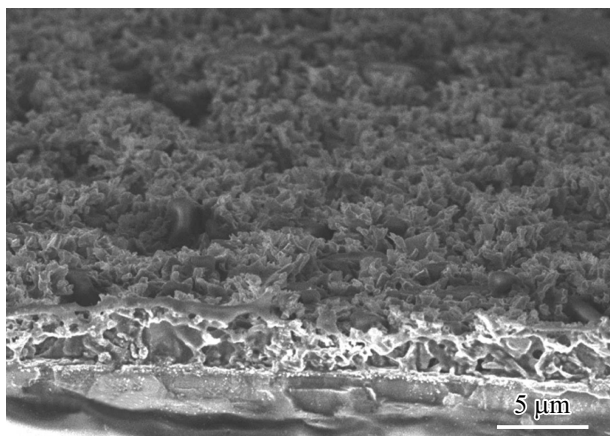


Рис. 2. Изображение светодиодного чипа с удаленной частью кремниевой подложки, полученное при помощи растрового электронного микроскопа. Вид сбоку под наклоном 15° к поверхности чипа.

выхода светодиодов в составе металлических контактов к обеим областям гетероструктуры целесообразно использовать металлы с высоким отражением на длине волны собственного излучения светодиода. Однако так как в рамках данного исследования ставилась задача отработки основных операций изготовления TFPC на подложках SiC/Si, в качестве контактов к *n*- и *p*-областям гетероструктуры были выбраны комбинации металлов Ti/Au и Ni/Au соответственно. Можно отметить позитивный эффект применения подложек SiC/Si в отличие от традиционно используемых сапфировых, связанный с упрощением операции разделения пластины на отдельные чипы, поскольку ввиду меньшей твердости кремния резка может быть проведена более простыми методами. В настоящей работе использовались алмазные диски толщиной $20\ \mu\text{m}$.

Для монтажа чипов были изготовлены подкристалльные платы на основе AlN-керамики. Рисунок областей металлизации, сформированных на подкристалльных платах и предназначенных для размещения чипа и подведения электрического тока к нему, определялся формой контактов самого чипа. Удаление подложки проводилось жидкостным способом. Для этого чип, расположенный на подкристалльной плате, погружался в травитель на основе HF. Монтаж чипа осуществлялся с помощью контактола, поскольку он более устойчив к различным химическим растворам, использовавшимся в качестве травителей. Проведенные эксперименты с различными видами травителей показали, что наилучшие результаты могут быть достигнуты при использовании трехкомпонентной смеси — раствора перекиси водорода и плавиковой кислоты $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HF} = 1:1$ с добавлением нескольких капель Вг. Данный травитель способствует эффективному разделению слоя SiC и массивной кремниевой части подложки. Благодаря высокой пористости слоя, возникающего при замещении атомов, травление

происходит в тонком слое кремния на интерфейсе SiC/Si, а пористая часть остается вместе со сплошным слоем SiC. При этом процесс удаления подложки не требует растворения всего объема кремния, а благодаря наличию пористого слоя подтравливается только тонкий интерфейсный слой кремния. В результате достигаются более высокие скорости процесса, а также его более высокая экономичность и экологическая безопасность, поскольку основной объем кремниевой подложки остается нетронутым. Соответственно процесс требует меньшего количества реагентов. Помимо этого удаленная структура (рис. 1) не имеет сколов, трещин или иных повреждений, которые обычно появляются в процессе лазерного удаления сапфировых подложек вследствие резкого выделения газообразного азота, возникающего в результате разложения материала GaN. После удаления кремния наружная световыводящая поверхность чипа оказывается покрытой кристаллитами карбида кремния с характерными размерами в сотни нанометров (рис. 2). Это прозрачный, очищенный от кремния в результате травления пористый слой карбида кремния общей толщиной в несколько микрометров. Поскольку характерные размеры элементов слоя сопоставимы с длиной волны собственного излучения светодиода, слой рассеивает свет на границе чип–окружающая среда, что помогает выводить излучение из гетероструктуры. Чип после удаления подложки не требует создания дополнительного рельефа для борьбы с полным внутренним отражением в волноводе гетероструктуры, что экономически выгодно, поскольку позволяет исключить дорогостоящую и трудоемкую операцию по созданию световыводящих поверхностей на внешней границе гетероструктуры. Полученные в экспериментах чипы показывали устойчивую люминесценцию, однако для получения максимальных значений квантового выхода приборов необходимо оптимизировать ряд технологических операций, использованных в процессе их изготовления.

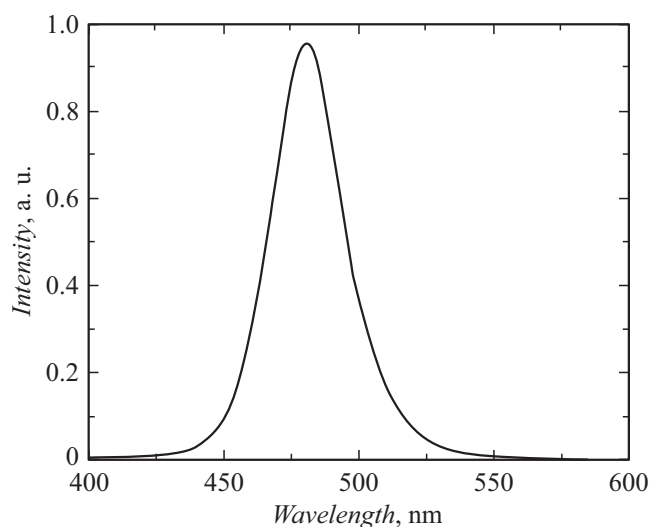


Рис. 3. Спектр электролюминесценции светодиодного чипа.

Спектр электролюминесценции полученных чипов приведен на рис. 3.

Таким образом, нами был разработан ряд принципиально новых подходов к изготовлению TFFC с удаленной подложкой. Предложенный способ имеет существенные преимущества по сравнению с известными технологиями получения подобных чипов и может быть использован при разработке технологического процесса их производства, в том числе микронных размеров (micro-LED). Результаты исследований показали, что подложки SiC/Si являются новым и оптимальным материалом для создания светодиодных чипов с точки зрения согласования параметров решетки, теплопроводности и оптических характеристик материала при невысокой их себестоимости.

Благодарности

Образцы SiC/Si выращены на оборудовании Уникальной научной установки „Физика, химия и механика кристаллов и тонких пленок“ ФГУП ИПМаш РАН (Санкт-Петербург). Исследования параметров образцов выполнены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Финансирование работы

С.А. Кукушкин, А.В. Осипов и А.С. Гращенко выполнили свою часть работы при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания ФГУП ИПМаш РАН № FFNF-2021-0001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Zhang, X. Xiu, in *Light-emitting diodes: materials, processes, devices and applications*, ed. by J. Li, G.Q. Zhang (Springer, Cham, 2019), p. 1–39. DOI: 10.1007/978-3-319-99211-2_1
- [2] T. Takeuchi, H. Amano, K. Hiramatsu, N. Sawaki, I. Akasaki, *J. Cryst. Growth*, **115**, 634 (1991). DOI: 10.1016/0022-0248(91)90817-0
- [3] M. Katagiri, H. Fang, H. Miyake, K. Hiramatsu, H. Oku, H. Asamura, K. Kawamura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **53**, 05FL09 (2014). DOI: 10.7567/JJAP.53.05FL09
- [4] C.H. Cheng, A.J. Tzou, J.H. Chang, Y.C. Chi, Y.H. Lin, M.H. Shih, C.K. Lee, C.I. Wu, H.C. Kuo, C.Y. Chang, R. Lin, *Sci. Rep.*, **6**, 19757 (2015). DOI: 10.1038/srep19757
- [5] Л.К. Марков, С.А. Кукушкин, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, А.С. Гращенко, А.В. Осипов, Г.В. Святец, А.Е. Николаев, А.В. Сахаров, В.В. Лундин, А.Ф. Цацуньников, *Письма в ЖТФ*, **47** (18), 3 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51462.18877 [L.K. Markov, S.A. Kukushkin, I.P. Smirnova, A.S. Pavlyuchenko, A.S. Grashchenko, A.V. Osipov, G.V. Svyatets, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, V.V. Lundin, A.F. Tsatsulnikov, *Tech. Phys. Lett.*, **48**, 31 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022020043].
- [6] S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 313001 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/31/313001
- [7] M.A. Bergmann, J. Enslin, M. Guttman, L. Sulmoni, N.L. Ploch, F. Hjort, T. Kolbe, T. Wernicke, M. Kneissl, Å. Haglund, *ACS Photon.*, **10**, 368 (2023). DOI: 10.1021/acsphotonics.2c01352
- [8] M.A. Bergmann, J. Enslin, F. Hjort, T. Wernicke, M. Kneissl, Å. Haglund, *Appl. Phys. Lett.*, **116**, 121101 (2020). DOI: 10.1063/1.5143297
- [9] A.S. Grashchenko, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, A.V. Redkov, *Catalys. Today*, **397**, 375 (2022). DOI: 10.1016/j.cattod.2021.08.012
- [10] Н.А. Черкашин, А.В. Сахаров, А.Е. Николаев, В.В. Лундин, С.О. Усов, В.М. Устинов, А.С. Гращенко, С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, А.Ф. Цацуньников, *Письма в ЖТФ*, **47** (15), 15 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51227.18827 [N.A. Cherkashin, A.V. Sakharov, A.E. Nikolaev, V.V. Lundin, S.O. Usov, V.M. Ustinov, A.S. Grashchenko, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, A.F. Tsatsulnikov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 753 (2021). DOI: 10.1134/S106378502108006X].