

07.3;13.1

Теплопроводность гибридных подложек SiC/Si для роста светодиодных гетероструктур

© С.А. Кукушкин¹, Л.К. Марков², А.В. Осипов¹, Г.В. Святец³, А.Е. Черняков⁴, С.И. Павлов²¹ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия³ Научно-технический центр „Новые технологии“, Санкт-Петербург, Россия⁴ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 7 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 мая 2023 г.

Принято к публикации 17 мая 2023 г.

Экспериментально исследованы тепловые характеристики образцов SiC/Si, полученных методом согласованного замещения атомов, при различных толщинах SiC. Установлено, что при толщинах SiC, меньших 200 nm, тепловое сопротивление SiC/Si примерно равно 2 K/W, что совпадает с величиной для чистой подложки кремния. Такие образцы будут прекрасно отводить тепло от светоизлучающей гетероструктуры, выращенной на SiC/Si. При увеличении толщины SiC происходит отслоение пленки SiC, что приводит к потере теплового контакта между SiC и Si. Тепловое сопротивление возрастает при этом более чем на два порядка. Возможность легкого удаления непрозрачной части подложки может лечь в основу технологии изготовления светодиодных чипов flip-chip-конструкции.

Ключевые слова: светодиоды, карбид кремния на кремнии, III–V гетероструктуры, тепловое сопротивление.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55820.19584

Светодиоды на основе нитрида галлия (GaN) и твердых растворов AlGaN, InGaN и других III–V полупроводников активно применяются в настоящее время для создания источников света [1]. Чаще всего для роста III–V гетероструктур используются подложки сапфира. Они обладают целым рядом недостатков, особенно в случае подложек большого диаметра, поэтому в последние годы активно ведется поиск эффективной замены указанных подложек [1]. Одним из актуальных вариантов является использование гибридных подложек карбида кремния на кремнии (SiC/Si), которые получают из кремния методом согласованного замещения атомов в результате химической реакции исходного монокристаллического кремния с газом монооксида углерода (CO) [2,3]. Существенными преимуществами данного вида подложек являются отсутствие дислокаций несоответствия решеток в слое SiC, неплохое согласование параметров решеток GaN и SiC и хорошее согласие коэффициентов теплового расширения GaN и SiC. В частности, на гибридных подложках SiC/Si данного типа были успешно выращены светоизлучающие гетероструктуры на основе AlInGaN [4,5]. В процессе создания светодиодов на основе данных структур была обнаружена серьезная проблема, связанная с отводом тепла от p – n -перехода. Дело в том, что при росте SiC из Si методом согласованного замещения атомов в кремнии под слоем SiC образуется слой пор ввиду того, что объем одной ячейки SiC кубического политипа примерно в 2 раза меньше объема одной ячейки Si [2,3]. Чем толще слой SiC, тем большее количество SiC образуется под

слоем и тем больше пор находится в слое Si толщиной 1–5 μm под SiC. Сами поры частично заполнены SiC, причем объем этого SiC примерно равен объему пустот [2,3]. Возникает вопрос: как влияет пористость Si на теплоотвод от p – n -перехода в светоизлучающей структуре, выращенной на SiC/Si? Исследованию этой проблемы методом измерения теплового сопротивления выращенной структуры в зависимости от толщины слоя SiC и посвящена настоящая работа.

Анализ тепловых параметров выращенных структур SiC/Si проводился путем сравнения значений теплового сопротивления. Тепловое сопротивление исследовалось методом, базирующимся на измерении переходных температурозависимых характеристик: прямого напряжения на p – n -переходе в ответ на скачкообразное воздействие греющего токового импульса с использованием прибора Thermal Transient Tester T3Ster [6], реализующего измерения по международному стандарту JESD 51-14 [7]. Программное обеспечение прибора T3Ster позволяет получить кумулятивную и дифференциальные структурные функции [8], наглядно отражающие тепловой импеданс (теплоемкость и тепловое сопротивление звеньев тепловой цепи, т.е. отдельных слоев структуры и границ между ними). Аналогичным методом исследовались тепловые параметры полисилоксан-графитовых композитов [9].

Были изучены образцы гибридных подложек SiC/Si, выращенных на Si(111) типа КДБ 50, с толщинами SiC 100, 200 и 400 nm, а также чистая подложка Si(111) типа КДБ 50, что эквивалентно нулевой толщине SiC.

Из всех образцов были вырезаны алмазным диском участки размером 1.15×1.15 mm, совпадающие с размером светодиодного чипа компании Epistar, который использовался в качестве греющего индикационного элемента. Светодиодные чипы прикреплялись к исследуемым образцам SiC/Si с помощью контактола, имеющего теплопроводность $29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, после чего образцы прикреплялись контактолом к алюминиевому радиатору. Таким образом, в данных экспериментах измерялось тепловое сопротивление между p - n -переходом светодиода Epistar и алюминиевым радиатором, на котором был размещен исследуемый образец SiC/Si. В эффективных светодиодах значительное количество подводимой электрической энергии преобразуется в свет. Поэтому при определении теплового сопротивления светодиодов R_{th} с помощью электрических измерений (с помощью T3Ster) полученное значение было скорректировано с учетом выходной оптической мощности P_{opt} , структура слоев показана на рис. 1.

На рис. 2 представлены кумулятивные структурные функции всех четырех образцов SiC/Si с различными толщинами. Близкие к горизонтальным участки отражают малое изменение теплоемкости и значительное изменение теплового сопротивления, т.е. области достаточной толщины и малой теплопроводности. Напротив, близкие к вертикальным участки отражают тонкие слои с высокой теплопроводностью. Резкое изменение наклона свидетельствует о границе различных слоев конструкции (гетероструктура, подложка, металлизация и т.д.) [8].

Видно, что образцы с малыми толщинами SiC, а именно 100 и 200 nm, а также чистая подложка Si (т.е. при нулевой толщине SiC) практически неотличимы друг от друга и отводят тепло от чипа совершенно одинаково, тогда как образец с толщиной SiC 400 nm отводит тепло гораздо хуже. Это связано с тем, что при толщине SiC 400 nm произошло отслоение пленки SiC от подложки Si. Снизу слой SiC не имеет теплового контакта с алюминиевым радиатором через кремний. Если при толщинах SiC, меньших 200 nm, тепловая цепь представляет собой последовательное соединение исходного чипа, контактола, гибридной подложки SiC/Si

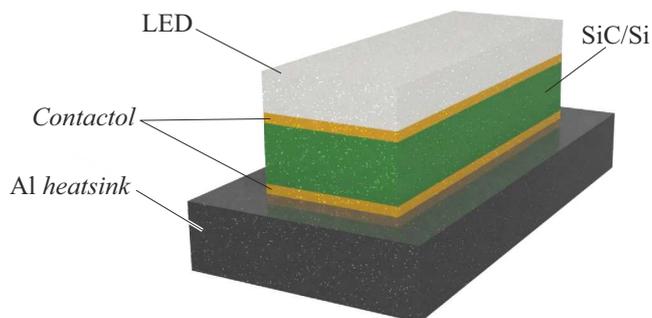


Рис. 1. Схема эксперимента исследуемых образцов SiC/Si на алюминиевом радиаторе.

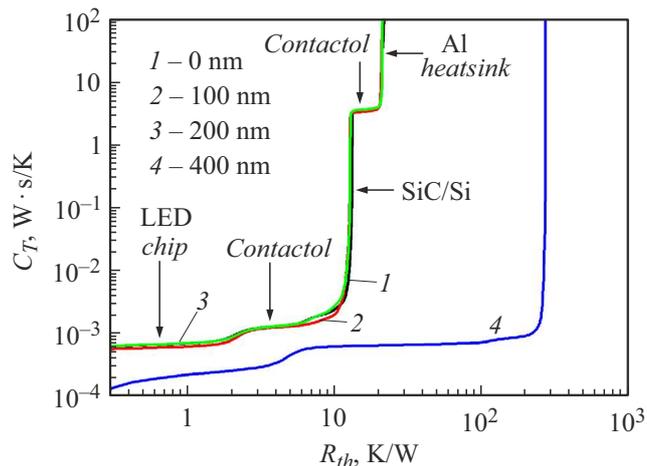


Рис. 2. Кумулятивные функции всех четырех образцов SiC/Si с различными толщинами слоя SiC. Кумулятивные функции образцов с толщинами слоя SiC 0–200 nm практически неотличимы друг от друга, а кумулятивная функция образца с толщиной слоя SiC 400 nm сильно отличается от остальных.

и алюминиевого радиатора, то при толщине SiC 400 nm контактола и SiC/Si сливаются в одно тепловое звено с очень высоким тепловым сопротивлением, т.е. непосредственно через гибридную подложку тепло практически не отводится. Визуально разница в строении образцов SiC/Si с толщинами 200 и 400 nm видна на микроструктурных снимках разрезов этих образцов (рис. 3).

Из рис. 2 видно, что тепловое сопротивление SiC/Si при толщинах SiC до 200 nm примерно равно $2 \text{ K}/\text{W}$, что соответствует очень хорошей теплопроводности, а при толщине SiC 400 nm тепловое сопротивление образца SiC/Si вместе с контактолом примерно равно $250 \text{ K}/\text{W}$, что фактически соответствует теплоизолятору из-за отсутствия теплового контакта между SiC и Si.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующий вывод. Гибридные подложки SiC/Si с толщинами SiC до 200 nm обеспечивают прекрасный теплоотвод от светоизлучающего p - n -перехода. В частности, в работах [4,5] использовались пленки SiC с толщинами 70 и 100 nm. Несмотря на наличие пористого слоя, теплопроводность гибридной подложки SiC/Si в этом случае практически равна теплопроводности чистого кремния из-за малой толщины SiC по сравнению с Si ($\sim 500 \mu\text{m}$). При дальнейшем увеличении толщины SiC (т.е. свыше 200 nm) происходит потеря теплового контакта между SiC и Si, и такие образцы SiC/Si уже не могут служить подложками для изготовления светодиодных чипов — так называемой face-up-конструкции, в которой вывод света осуществляется через прозрачные проводящие контакты, наносимые поверх p -области гетероструктуры. В то же время такие структуры могут быть успешно применены при изготовлении чипов „перевернутой“ (flip-chip) конструкции, в которых поверх p -области гетероструктуры наносит-

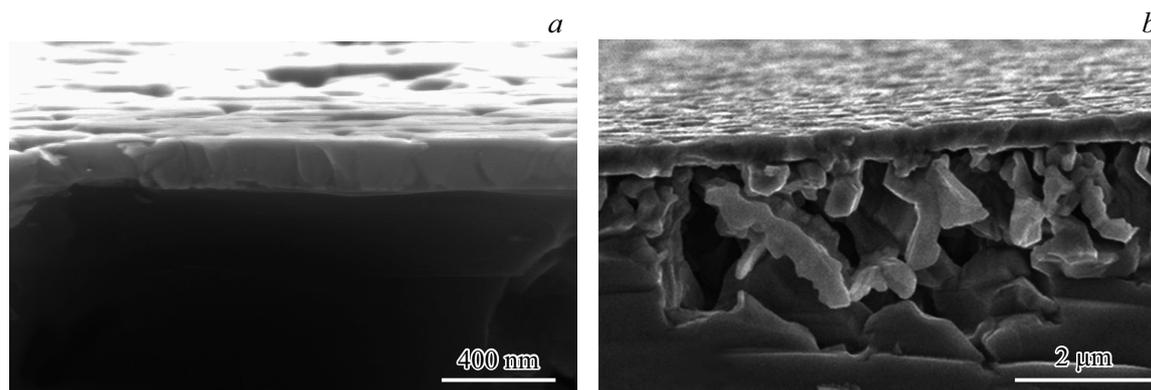


Рис. 3. Микроструктурные снимки разрезов образцов SiC/Si с толщинами 200 (a) и 400 nm (b).

ся непрозрачный отражающий контакт, расположенный непосредственно на теплоотводе. Как было показано выше, удаление непрозрачной части подложки, необходимое для вывода света из светодиодного кристалла flip-chip-конструкции, максимально облегчено для структур SiC/Si с толщинами слоя SiC свыше 200 nm. В этом случае свет будет выводиться через прозрачный слой SiC, входивший в состав комбинированной подложки.

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 и А.В. Осипов выполняли 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] *Gallium oxide. Materials properties, crystal growth, and devices*, ed by M. Higashiwaki, Sh. Fujita. Springer Ser. in Materials Science (Springer, Cham, 2020), vol. 293. DOI: 10.1007/978-3-030-37153-1
- [2] С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, ЖОХ, **92** (4), 547 (2022). DOI: 10.31857/S0044460X22040023 [S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, Russ. J. Gen. Chem., **92**, 584 (2022). DOI: 10.1134/S1070363222040028].
- [3] S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, *Condens. Matter Interphases*, **24**, 407 (2022). DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/10549.

- [4] 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. Цацульников, *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. Tsatsul'nikov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 753 (2021). DOI: 10.1134/S106378502108006X].
- [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. Цацульников, *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] T3Ster MicReD, „T3Ster“ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/>
- [7] IC Thermal Measurement Method — Electrical Test Method EIA/JEDEC JESD51-1 Standard [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jedec.org/standards-documents/results/JESD51-1>
- [8] C. Lasance, A. Poppe, *Thermal management for LED applications. Solid State Lighting Technology and Application Ser.* (Springer, N.Y., 2014). DOI: 10.1007/978-1-4614-5091-7
- [9] J. Vishnu Chandar, S. Shanmugan, D. Mutharasu, M. Khairudin, A.A. Azlan, *Polym.-Plast. Technol. Mater.*, **59**, 106 (2020). DOI: 10.1080/25740881.2019.1625392