

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР SiC/Si

М. В. Лобанок*, Н. В. Полонский, П. И. Гайдук

УДК 539.23,548.75

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;
e-mail: mishalobanok@gmail.com

(Поступила 10 апреля 2022)

Эпитаксиальные слои SiC толщиной 80 нм на Si-подложке выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии при 950 °C. Спектры комбинационного рассеяния света содержат пик при 793 см⁻¹, что соответствует поперечной оптической фононной моде кубического политипа SiC. Показано, что увеличение фототока в областях 1.25—1.4 и 1.5—2.0 эВ связано с дефектами в гетероструктуре SiC/Si. Обнаружено, что спектры фотолюминесценции гетероструктур SiC/Si и Pt₂Si/SiC/Si содержат две основные полосы излучения в синей (2.8 эВ) и красной (1.9 эВ) областях.

Ключевые слова: карбид кремния, гетероструктура SiC/Si, фотолюминесценция, фототок, комбинационное рассеяние света.

Epitaxial SiC layers 80 nm thick on Si were grown by molecular beam epitaxy at 950°C. The Raman spectra have a peak at 793 cm⁻¹, which corresponds to the transverse optical phonon mode of the cubic SiC polytype. It is shown that the increase in photocurrent in the ranges of 1.25—1.4 and 1.5—2.0 eV is associated with defects in the SiC/Si heterostructure. It has been found that the photoluminescence spectra of the SiC/Si heterostructures and the Pt₂Si/SiC/Si structure contain two main emission bands in the blue (2.8 eV) and red (1.9 eV) spectral regions.

Keywords: SiC, SiC/Si heterostructure, photoluminescence, photocurrent, Raman spectroscopy.

Введение. Эпитаксиальные слои SiC, выращенные на Si-подложках, привлекают внимание благодаря возможности интеграции SiC и GaN в кремниевую технологию [1]. В частности, гетероструктуры SiC/Si перспективны для использования в фотодетекторах УФ- и видимого диапазонов оптического излучения [2, 3]. Фотодетекторы, изготовленные на основе SiC, могут достигать больших коэффициентов усиления, высокого отношения сигнал/шум [3]. Вместе с тем слои SiC могут быть использованы для изготовления приборов ИК-оптоэлектроники, поскольку обладают большими коэффициентами температурного сопротивления (4—6 %), а также возможностью возбуждения в них поверхностных фононных поляритонов в среднем ИК-диапазоне [4]. Кроме того, SiC может обеспечить долговременную стабильность работы в условиях интенсивного излучения и при высоких рабочих температурах [5].

Слои SiC, выращенные непосредственно на кремнии, имеют большое количество структурных дефектов, связанных с несоответствием параметров кристаллических решеток SiC и Si, а также различием коэффициентов термического расширения [1], что приводит к изменению характеристик готовых полупроводниковых приборов. Для улучшения структурного качества SiC используются буферные слои, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, связанных с несоответствием параметров решетки и различием коэффициентов теплового расширения. В качестве буфера можно использовать тонкие слои SiC, сформированные при карбидизации кремния [6—8]. Согласно [6, 7], подобные буферные слои в значительной степени определяют структурное качество пленок SiC, поэтому получение низкодефектных гетероэпитаксиальных слоев 3C-SiC на поверхности пластин монокристаллического кремния является важной задачей для развития компонентной базы микро- и оптоэлектроники нового поколения. В настоящей работе исследованы фотоэлектрические и структурные характеристики гетероструктур SiC/Si.

PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF SiC/Si HETEROSTRUCTURES

M. V. Lobanok*, M. V. Palonski, P. I. Gaiduk (Belarusian State University, Minsk, Belarus; e-mail: mishalobanok@gmail.com)

Эксперимент. В качестве исходных подложек использованы высокоомные ($1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) пластины кремния *n*-типа проводимости с ориентацией поверхности вдоль (111). Гетероструктуры SiC/Si выращивали методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке VG Semicon V80. Толщина выращенных слоев SiC на Si-подложке составляла 80 нм. Сформированную пластину разделяли на серию образцов для структурного исследования и формирования контактов. Для исследования фотоэлектрических характеристик формировали барьерные структуры Pt₂Si/SiC [9]. На часть образцов наносили Pt-пленки методом ионного распыления на установке RMC-Eiko IB-5 при токе 6 мА, длительности 20 мин в вакууме не хуже 33 Па, что обеспечило нанесение слоев платины толщиной ~20 нм. Для формирования силицидов платины проводили термообработку в инертной среде (сухой N₂) в интервале 350—500 °C в течение 10 мин. Для оптоэлектрических измерений на образцах сформировали мезоструктуры [9] с помощью фотолитографии и селективного травления в HF:HNO₃ в пропорции 1:5. На тыльной стороне образцов формировались омические контакты путем нанесения галлий-алюминиевой пасты. Для исследования фотоэлектрических характеристик гетероперехода SiC/*n*-Si на тыльную и лицевую стороны образца наносились Al-слои толщиной 30 нм электронно-лучевым напылением. Затем проводился отжиг при 350 °C в окисляющей среде (O₂) в течение 10 мин и формировались контакты с помощью фотолитографии и селективного травления в растворе HNO₃:H₂O:H₃PO₄ в пропорции 1:5:20.

Толщина и состав сформированных контактов и слоев SiC определены методом растровой электронной микроскопии [9]. Химический и фазовый составы образцов структур SiC/Si исследованы методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) на установке Nanofinder High End (LOTIS ТП, Беларусь–Япония). Источником излучения служил твердотельный лазер с диодной накачкой, работающий на $\lambda_{\text{возб}} = 532 \text{ нм}$. Мощность и время накопления 2 мВт и 30 с. Излучение лазера фокусировалось на образце в пятно диаметром <1 мкм. Спектральное разрешение не хуже 3 см^{-1} . Для исследований толщина образцов уменьшалась до ~200 нм путем полирующего химико-динамического травления обратной стороны пластины в смеси концентрированных кислот HF:HNO₃ в пропорции 1:5. КР-спектры измерены при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния света при падении излучения нормально к поверхности образца.

Измерения фотolumинесценции (ФЛ) проводились при комнатной температуре в диапазоне 300—850 нм на оптическом столе, время накопления 30 с, источник излучения — лазер с $\lambda = 325 \text{ нм}$. Для регистрации спектров ФЛ использован монохроматор Solaris M150. Измерения спектральных зависимостей фототока образцов проводились на оптической штанге. Источником излучения служила вольфрамовая лампа СИ6-100, которая излучает пучок света в диапазоне 0.38—3.5 мкм. Диаметр сфокусированного на образце пятна ~2 мм. Спектральные характеристики определены с помощью монохроматора МДР-12 в диапазоне 350—2000 нм. Фототок измерен с помощью пикоамперметра МПИПИ А2-4. Темновой ток ~0.1 нА.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, *а* представлен типичный спектр КР гетероструктуры SiC/Si, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии при 950 °C. Выделяются пики поперечной оптической (ТО) 793 см^{-1} фононной моды SiC и поперечной моды акустических колебаний (ТА) вблизи 152 см^{-1} . Пик поперечных акустических колебаний SiC проявляется только при гексагональной ориентации кристалла SiC [10, 11]. Появление подобного пика может быть обусловлено наличием дефектов в сформированном слое SiC [11]. Спектр КР содержит пики, принадлежащие кремниевой подложке: ~ 430 — 500 и 940 — 1000 см^{-1} , которые являются КР-полосой второго порядка в кремнии. Полоса с максимумом вблизи 455 см^{-1} принадлежит ТО-моду Si-Si. При этом сдвиг максимума в сторону низких частот фононной моды Si (ЛО) от максимумов аморфного (480 см^{-1}) и монокристаллического кремния (500 см^{-1}) в области спектра КР 430 — 500 см^{-1} , вероятно, связан с нарушением структуры и уменьшением толщины кремниевой подложки в результате химического травления [12, 13].

На рис. 1, *б* представлена спектральная зависимость фототока гетероструктуры SiC/Si. Наблюдается увеличение фототока до 123 нА при 1.27 эВ. Для определения влияния слоя карбида кремния на спектральную характеристику поглощения структуры на спектре представлена аппроксимация функцией с несколькими лоренциалами. Низкоэнергетические лоренциалы в диапазоне 1.1—1.2 эВ соответствуют ширине запрещенной зоны кремния. Лоренциал вблизи 1.3 эВ, вероятно, связан с дефектами у границы раздела SiC/Si [14—16]. Согласно [17], фототок в диапазоне 1.5—1.7 эВ связан с вакансиями углерода в слоях SiC. Лоренциал в диапазоне 1.7—2.3 эВ связан с дефектами в кристаллическом SiC [15, 18].

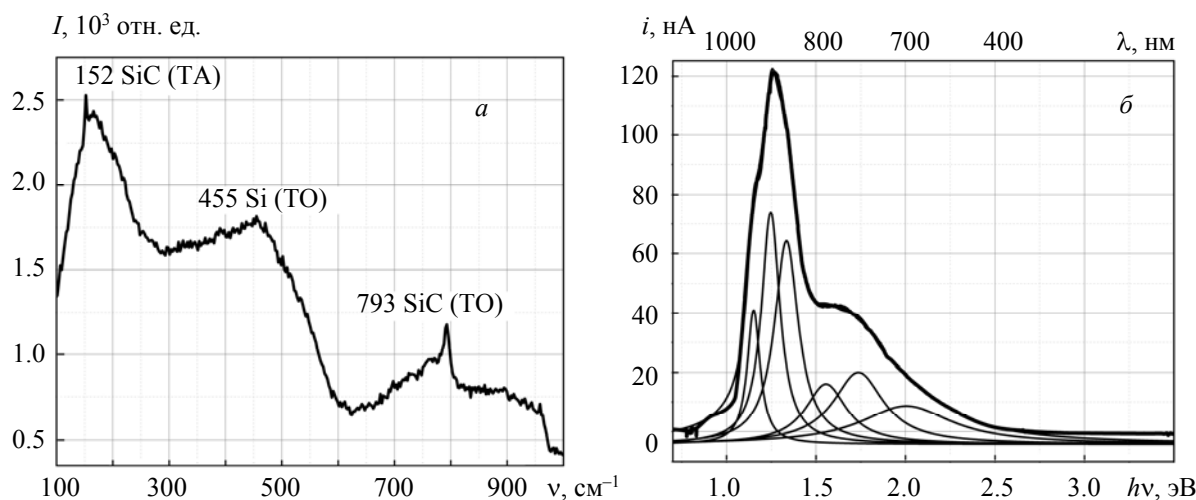


Рис. 1. Спектр КР гетероструктуры SiC/Si, измеренный в области частот колебаний Si-C (а), и спектральная зависимость фототока в области оптических колебаний (б)

На рис. 2 представлена координатная зависимость фототока структуры Pt₂Si/SiC/Si. В видимом диапазоне ($\lambda = 430, 530$ нм) при смещении светового пучка монохроматора с контакта Pt₂Si в сторону свободной пленки SiC полярность фототока изменяется с положительной на отрицательную. При этом в ближней ИК-области ($\lambda = 990$ нм) при смещении светового пучка подобной смены полярности фототока не наблюдается, что коррелирует с результатами [14]. Особенность фототока при смещении пучка света с контакта силицида платины в [14] объясняли разной направленностью воздействия барьеров на границах раздела металл–карбид кремния и карбид кремния–кремний на суммарный фототок. Когда световой пучок направлен на контакт, фототок генерируется в слое SiC. Фототок преобладает над током с отрицательной полярностью, генерируемым в Si-подложке. При небольшом смещении светового пучка от контакта генерируемые токи в SiC и Si компенсируют друг друга. При полном уходе светового пучка с контакта остается только фототок, генерируемый в Si-подложке.

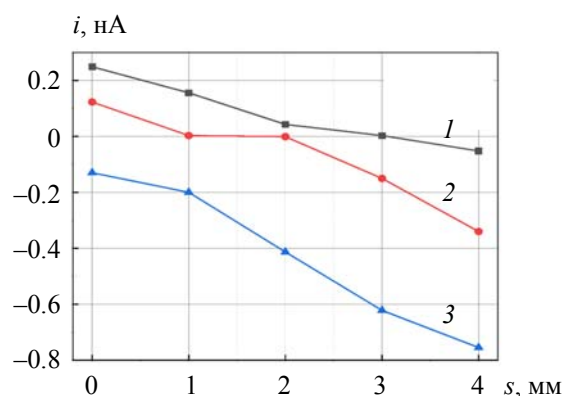


Рис. 2. Зависимости фототока структуры Pt₂Si/SiC/Si от смещения светового пучка, $\lambda = 430$ (1), 530 (2) и 990 нм (3)

На рис. 3 представлены спектры ФЛ гетероструктур SiC/Si и Pt₂Si/SiC/Si. Узкий максимум излучения 705 нм, вероятно, связан с излучательной рекомбинацией Шокли—Рида—Холла электронно-дырочных пар, захваченных глубокими уровнями в SiC [19]. На образцах SiC/Si обнаружены хаотично расположенные включения с голубой люминесценцией. Им соответствует широкая полоса люминесценции в диапазоне 370—530 нм.

Образование структурных дефектов в сформированных гетероструктурах SiC/Si подтверждают данные КР-спектроскопии. Присутствие дефектов деформации подтверждает полоса 152 см^{-1} , которая соответствует линии (145 см^{-1}) гексагонального поли типа 6H-SiC со сдвигом 6 см^{-1} . В [20] подобное поведение спектра объясняли наличием двойников в сформированном слое SiC.

Установлена корреляция результатов КР-спектроскопии с данными, полученными при измерении спектральной зависимости фототока и ФЛ. На рис. 2 фототок в диапазонах 1.25—1.40 и 1.7—2.3 эВ связан с дефектами у границы раздела SiC/Si. Согласно [14, 15], область 1.3 эВ соответствует электронным состояниям в центре запрещенной зоны, которые в модели Дэвиса—Мотта [15, 16] обусловлены сеткой дефектов, т. е. наличием разорванных связей и вакансий.

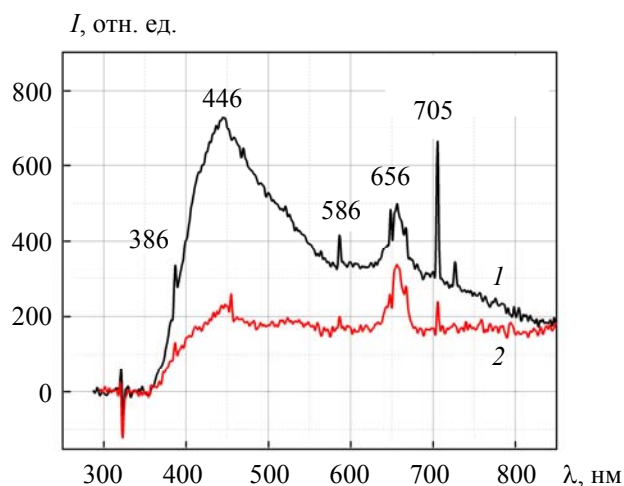


Рис. 3. Спектр ФЛ гетероструктур SiC/Si (1) и Pt₂Si/SiC/Si (2)

В спектре ФЛ (рис. 3) в диапазоне 647—669 нм наблюдается полоса люминесценции, вероятно, связанная с излучательной рекомбинацией на донорно-акцепторных парах. При этом донорами могут быть внедренные в структуру при термообработке атомы азота, акцепторами — структурные дефекты [21]. Согласно [22], полоса вблизи 650 нм связана с образованием микродвойников SiC. Широкую полосу ФЛ 370—530 нм можно интерпретировать как люминесценцию свободного экситона [23]. В [21] показано, что в спектре КР SiC наблюдается дополнительная мода с частотой $\sim 200\text{ см}^{-1}$, отсутствующая у 3C-SiC, которая обусловлена экситонной люминесценцией и приводит к дополнительному уширению фонового спектра [21]. При этом достаточно узкий пик спектра КР 793 см^{-1} оптических фононов с шириной на полувысоте 10 см^{-1} , а также присутствие максимума ФЛ 705 нм указывают на хорошую кристаллическую структуру слоев 3C-SiC. При комнатной температуре максимум излучения 705 нм может появиться только в чистом кристаллическом SiC [23].

Заключение. Исследованы фотоэлектрические и структурные характеристики гетероструктур SiC/Si. Анализ спектров комбинационного рассеяния света подтверждает формирование SiC на кремнии, а также присутствие дефектов деформации в SiC. Показано, что увеличение фототока в области 1.0—1.5 эВ связано с дефектами у границы раздела SiC/Si и влиянием Si-подложки. В спектре фотолюминесценции структуры SiC/Si преобладает излучение в синей области (2.8 эВ), а в структуре Pt₂Si/SiC/Si — в красной (1.9 эВ).

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук О. В. Королик за помощь в проведении исследования методом спектроскопии комбинационного рассеяния света, а также И. А. Романову за помощь в проведении измерений фотолюминесценции.

Исследования выполнены в рамках проекта 3.1.2 ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций” (№ 20212702) и проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований T22-030 (№ 20221052).

- [1] **G. Ferro.** Crit. Rev. Solid State Mater. Sci., N 40 (2015) 56—76, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408436.2014.940440>
- [2] **W. R. Chang, Y. K. Fang, S. F. Ting, Y. S. Tsair, C. N. Chang, C. Y. Lin, S. F. Chen.** IEEE Electron. Dev. Lett., 24, N 9 (2003) 565—567, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1224519>
- [3] **A. Aldalbahi, E. Li, M. Rivera, R. Velazquez, T. Altalhi, X. Peng, P. X. Feng.** Sci Rep., 6 (2016) 23457, <https://www.nature.com/articles/srep23457>
- [4] **Y. Chen, Y. Francescato, J. D. Caldwell, V. Giannini, T. W. W. Maß, O. J. Glembocki, F. J. Bezares, T. Taubner, R. Kasica, M. Hong, S. A. Maier.** ACS Photon., 1 (2014) 718—724, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ph500143u>
- [5] **J. Fan, P. K. Chu.** General Properties of Bulk SiC in Silicon Carbide Nanostructures: Fabrication, Structure, and Properties, Ch. 2, Springer Int. Publ., Switzerland (2014) 7—114, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-08726-9>
- [6] **M. Bosi, C. Ferrari, D. Nilsson, P. J. Ward.** Crystal. Eng. Comm., 18 (2016) 7478—7486, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/CE/C6CE01388K>
- [7] **M. Zimbone, M. Mauceri, G. Litrico, E. G. Barbagiovanni, C. Bongiorno, F. La Via.** J. Crystal Growth, 498 (2018) 248—257, <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003>
- [8] **I. A. Skibarko, O. V. Milchanin, P. I. Gaiduk, F. F. Komarov, J. Marks, B. Pastuszka, A. Iller, R. Diduszko.** Inst. Phys. Conf. Ser., 166 (1999) 465—469
- [9] **М. В. Лобанок.** Изв. Гомельского гос. ун-та имени Ф. Скорины, № 6 (2022) 124—129
- [10] **L. A. Falkovsky, J. M. Bluet, J. Camassel.** Phys. Rev. B, 57 (1998) 11283, <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.57.11283>
- [11] **И. Г. Аксянов, М. Е. Компан, И. В. Кулькова.** ФТТ, 52 (2009) 1724—1728, <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/1957>
- [12] **F. A. Johnson.** Proc. Phys. Soc., 73 (1959) 265, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0370-1328/73/2/315>
- [13] **I. H. Campbell, P. M. Fauchet.** Solid State Comm., 58 (1986) 739, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038109886905132>
- [14] **А. С. Гращенко, Н. А. Феоктистов, А. В. Осипов, Е. В. Калинина, С. А. Кукушкин.** ФТП, 51, № 5 (2017) 651—658, <https://journals.ioffe.ru/articles/44423>
- [15] **V. I. Vlaskin, L. I. Berezhinsky, C. I. Vlaskina, D. H. Shin, K.-H. Kwon.** J. Korean Phys. Soc., 42 (2003) 391—393
- [16] **Н. Мотт, Э. Дэвис.** Электронные процессы в некристаллических веществах, пер. с англ., Москва, Мир (1982)
- [17] **E. Janzén, I. G. Ivanov, N. T. Son, B. Magnusson, Z. Zolnai, A. Henry, J. P. Bergman, L. Storasta, F. Carlsson.** Phys. B, Cond. Matter (2003) 340—342, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2003.09.001>
- [18] **A. A. Lebedev.** Semicond., 33 (1999) 107—130, <https://doi.org/10.1134/1.1187657>
- [19] **F. Zhang.** Sci. China Phys. Mech. Astron., 65 (2022) 107331, <https://doi.org/10.1007/s11433-022-1941-5>
- [20] **М. В. Лобанок, А. И. Мухаммад, П. И. Гайдук.** Журн. прикл. спектр., 89 (2022) 256—260
- [21] **M. V. Lobanok, A. I. Mukhammad, P. I. Gaiduk.** J. Appl. Spectr., 89 (2022) 256—260, <https://doi.org/10.1007/s10812-022-01352-2>
- [22] **В. В. Евсτροφ, И. Ю. Линьков, Я. В. Морозенко, Ф. Г. Пикус.** ФТП, 26 (1992) 969—978
- [23] **Д. Б. Шустов, А. А. Лебедев, С. П. Лебедев, Д. К. Нельсон, А. А. Ситникова, М. В. Загорянская.** ФТП, 47 (2013) 1279—1282, <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5082>
- [24] **S. Castelletto, B. Johnson, V. Ivády, N. Stavrias, T. Umeda, A. Gali, T. Ohshima.** Nature Mater., 13 (2014) 151—156, <https://doi.org/10.1038/nmat3806>