

# Оптические характеристики гетероструктур SiC/Si, полученных методом быстрой вакуумно-термической карбидизации кремния

М. В. Лобанок, А.И. Мухаммад, П. И. Гайдук

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

Представлены результаты измерений спектров инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектров комбинационного рассеяния (КР) гетероструктур SiC/Si. Наблюдаемая в спектрах структур SiC/Si полоса  $798\text{ см}^{-1}$  соответствует поперечной оптической (ТО) фоновой моде в решетке кубического карбида кремния. Обнаружена полоса ИК поглощения Si-O-Si  $1100\text{ см}^{-1}$ . Определен коэффициент пропускания.

**Ключевые слова:** карбид кремния, ИК-спектроскопия, КР-спектроскопия

## Введение

Эпитаксиальные гетероструктуры SiC/Si представляют интерес в развитии микро- и опто-электроники благодаря возможности интеграции SiC в кремниевую технологию [1]. В частности, гетероструктуры SiC/Si можно использовать в разработке фотодетекторов [2, 3] и в качестве буферов для роста активных структур на основе GaN [4–6]. Однако, слои SiC, выращенные непосредственно на Si, имеют большое количество структурных дефектов, связанных с несоответствием параметров кристаллических решеток SiC и Si, а также различием коэффициентов термического расширения [1]. Для улучшения структурного качества SiC используют буферные слои, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, связанных с несоответствием параметров решетки и различием коэффициентов теплового расширения.

В соответствии с одним из возможных механизмов [6], релаксация напряжений при карбидизации может проходить по пути формирования дилатационных диполей, которые формируются при взаимодействии междоузельно-вакансионных пар. В наших более ранних исследованиях формирование таких вакансионно-междоузельных диполей зарегистрировано методами электронной микроскопии в упруго-деформированных слоях Si/SiGe/Si [7]. В случае карбидизации кремния неравновесные концентрации вакансий и междоузельных атомов образуются при внедрении атомов углерода в междоузельные позиции кремниевой решетки. Междоузельные атомы и вакансии являются центрами дилатации и за счет их притяжения друг к другу образуют устойчивые кластеры (дилатационные диполи). Предполагается, что образование таких диполей обеспечивает эффективную релаксацию упругих напряжений [6, 7].

В настоящей работе представлено исследование оптических характеристик гетероструктур SiC/Si, предположительно содержащих дилатационные дефекты.

## 1. Материалы и методы

В работе использовались образцы (100) Si-пластины марки КДБ-12/24. Перед процессом карбидизации образцы очищались в 5 % водном растворе плавиковой кислоты (HF: H<sub>2</sub>O) с последующей промывкой в деионизированной воде. Тонкие эпитаксиальные слои SiC формировались методом быстрой вакуумно-термической карбидизации кремния на установке Jipelec JetFirst-100. Параметры формирования SiC были следующими: температура карбидизации  $1100\text{ °C}$ , время 30 секунд, давление в реакционной камере  $P \sim 1 \times 10^{-2}\text{ Па}$ .

ИК спектры измерены с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра PerkinElmer Spectrum 3 Optica. Измерения проводились в диапазоне волновых чисел  $400\text{--}7000\text{ см}^{-1}$  ( $\lambda \sim 2,5\text{--}25\text{ мкм}$ ) с накоплением 1 мин и спектральным разрешением  $4\text{ см}^{-1}$ . Спектры регистрировались при нормальном падении излучения на образец с использованием диафрагмы 3 мм. Измерение спектров КР производилось с помощью

микрорамановского спектрометра Nanofinder High End. Длина волны возбуждения, мощность и время накопления составляли соответственно 532 нм, 2 мВт, 30 сек. Излучение лазера фокусировалось на образце в пятно диаметром менее 1 мкм. Измерение спектров производилось при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния света при падении излучения нормально к поверхности образца. Для получения более выраженных пиков SiC на КР спектре проводилось химическое утонение образцов

## 2. Результаты и обсуждение

Методом КР установлено, что вакуумная карбидизация кремния при температуре 1100 °С в течение 30 секунд приводит к формированию кубического политапа SiC (3C-SiC). Так, на КР спектре можно выделить пики поперечной оптической (TO) 793 см<sup>-1</sup> фоновой моды SiC и продольных акустических колебаний (LA) в области 180 см<sup>-1</sup>. Стоит отметить, что пик продольных акустических колебаний SiC проявляется только при гексагональной ориентации кристалла SiC [8]. Вероятно, появление подобного пика обусловлено наличием дефектов в сформированном слое SiC [8]. В соответствии с исследованием релаксации деформации в гетероструктуре SiC/Si [9], уширение полосы оптических фононов в области 793 см<sup>-1</sup> связано с дефектами деформации в SiC/Si. Спектр КР содержит пики, принадлежащие кремниевой подложке: область 480–520 см<sup>-1</sup> и область 940–1000 см<sup>-1</sup>, которая является КР-полосой второго порядка в кремнии.

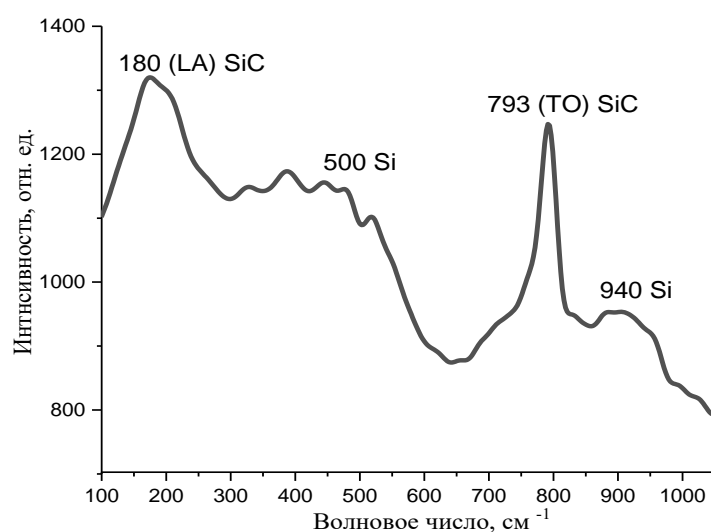


Рис. 1. – Спектр КРС структуры SiC/Si в области оптических колебаний.

На рис 2 показаны ИК спектры пропускания сформированной структуры SiC/Si и Si-пластины ориентации (100). В диапазоне 7000 до 4000 см<sup>-1</sup> специфических особенностей пропускания структуры SiC/Si не наблюдалось. Формирование SiC подтверждает присутствие на спектрах поперечной оптической (TO) 799 см<sup>-1</sup> и продольной оптической (LO) фоновые моды SiC [10]. Сильная полоса поглощения ~610 см<sup>-1</sup> от двухфононной моды Si-Si (TO+TA) поперечного оптического и акустического фононов с одинаковыми волновыми векторами, но принадлежащих разным линиям колебательного спектра [9], является единственным заметным вкладом кремниевой подложки в измеряемом спектральном диапазоне.

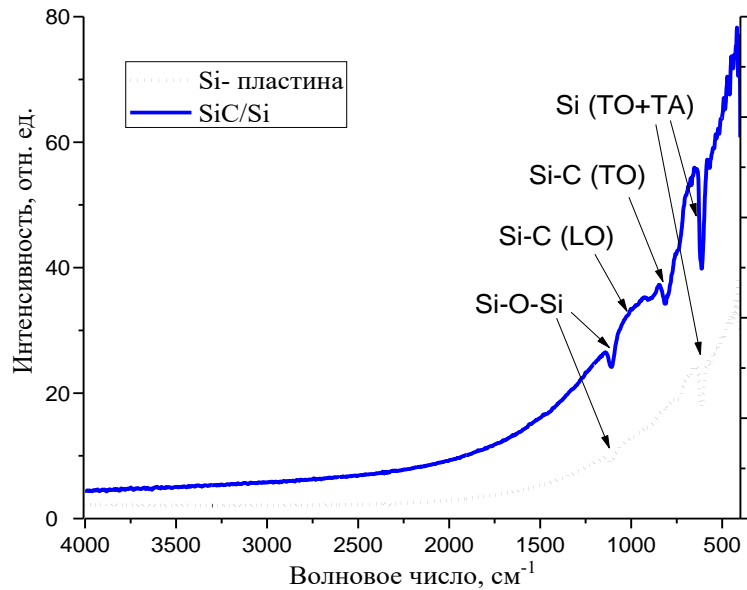


Рис. 2. – ИК спектры пропускания структуры SiC/Si и Si-подложки.

Ширина полосы поглощения  $798\text{ см}^{-1}$ , которая предположительно связана с дилатационным диполем, на полувысоте составляет  $39\text{ см}^{-1}$ . Согласно данным исследований [10], небольшая ширина полосы поглощения может свидетельствовать о формировании кристаллического SiC с дефектами. В соответствии с работой [11], слабый сигнал продольной оптической моды  $970\text{ см}^{-1}$  можно объяснить тем, что вследствие поперечности электромагнитных волн при их взаимодействии с кристаллической решеткой в решетке возбуждаются в основном поперечные оптические колебания атомов (ТО-фононы).

В структуре SiC/Si обнаружена полоса поглощения  $1100\text{ см}^{-1}$  соответствующая валентным симметричным колебаниям Si-O-Si. Соответствующая полоса поглощения  $1100\text{ см}^{-1}$  присутствует на спектре Si-пластины и вероятно связана с естественным окислом кремния. Присутствие связей кислорода можно объяснить недостаточной очисткой Si-пластины перед процессом карбидизации, достигаемой посредством обработки в растворе плавиковой кислоты. Однако, согласно исследованию влияния химической подготовки поверхности Si на структурные качества формируемого SiC [12], имеется благоприятный прогноз на улучшение структурного качества SiC.

Известно, что коэффициент пропускания  $T$  связан с оптической плотностью  $D$  соотношением (1):

$$T = 10^{-D}, \quad (1)$$

Применив соотношение (1) к данным спектра оптической плотности структуры SiC/Si (рисунок не приведен), можно сделать вывод, о низком коэффициенте пропускания структуры ( $T < 0.1$  в диапазоне от  $3000\text{ см}^{-1}$  до  $700\text{ см}^{-1}$ , и  $0.1 < T < 0.6$  в диапазоне от  $500\text{ см}^{-1}$  до  $3000\text{ см}^{-1}$ ). Стоит отметить резкое проседание коэффициента пропускания в структурах SiC/Si до 0.1 на  $780\text{ см}^{-1}$  ( $12,5\text{ мкм}$ ), которое связано с поглощением на фонах 3C-SiC.

### Заключение

С использованием методов КР и ИК спектроскопии показано, что при быстрой вакуумно-термической обработке Si-пластины происходит формирование гетероструктур SiC/Si.

Полоса ИК спектра пропускания при  $798\text{ см}^{-1}$  валентного колебания Si-C и пик КР спектра  $793\text{ см}^{-1}$  поперечной оптической (ТО) фононной моды SiC подтверждают формирование кубического политипа SiC. Обнаружена полоса ИК поглощения Si-O-Si  $1100\text{ см}^{-1}$ . Получена зависимость коэффициента пропускания от волнового числа.

### Благодарности

Исследования выполнены в рамках проекта государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

### Литература

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Rev. in Solid State and Materials Sciences*. 2015. No. 40. P. 56–76.
2. Chang, W.R. et al. The hetero-epitaxial SiCN/Si MSM photodetector for high-temperature deep-UV detecting applications. *IEEE Electron. Dev. Lett.* 2003. Vol. 24. No. 9, P.565–567.
3. Aldalbahi A., Li E., Rivera M. et al. A new approach for fabrications of SiC based photodetectors. *Sci Rep* 6. 2016. 23457.
4. Pefitsis D., Tolstoy G., Antonopoulos A, Rabkowski, J., Lim J.K, Bakowski M, Anquist L., Nee H.P. High-Power Modular Multilevel Converters with SiC JFETs, *IEEE Transaction on Power Electronics*. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. No. 27. P. 28–36.
5. Skibarko I.A., Milchanin O.V., Gaiduk P.I., [et al.]. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. *Inst.Phys.Conf.Ser.* 1999 No. 166. P.465–469.
6. Кукушкин С.А, Осипов А.В. Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии: модель и эксперимент. *Физика тв. тела*. 2008. Т. 50. Вып. 7. С. 1188–1195.
7. Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L., Wendler E., Wesch W. Temperature effect on defect evolution in 800 keV Ge-implanted Si/SiGe multi-layered structure. *Physica B*. 2003. Vol. 340–342. P. 813–817.
8. Falkovsky L.A., Bluet J.M., Camassel J. Strain relaxation at the 3C–SiC/Si interface: Raman scattering experiments. *Phys. Rev. B*, 1998. Vol. 57. 11283.
9. Johnson F.A. Lattice Absorption Bands in Silicon. *Proc. Phys. Soc.* 1959. Vol. 73, 265
10. Campbell I.H, Fauchet P.M. The effects of microcrystal size and shape on the one phonon Raman spectra of crystalline semiconductors. *Solid State Commun.* 1986. No. 58. P. 739
11. Ziman J.M. *Electrons and phonons*. Oxford: Clarendon Press, 1960. 209
12. Калинин И.П., Кукушкин С.А., Осипов А.В. Влияние химической подготовки поверхности кремния на качество и структуру эпитаксиальных пленок карбида кремния, синтезированных методом замещения атомов. *ФТП*. 2018. Vol. 52. No. 6. P. 656-663.

## Optical properties of rapid vacuum-thermal carbidization SiC/Si heterostructure

M.V. Lobanok, A.I. Mukhammad, P.I. Gaiduk

*Belarusian State University, Minsk, e-mail: mishalobanok@gmail.com*

Raman scattering and FT-IR spectroscopy measurements showed a SiC / Si heterostructure. The  $798\text{ см}^{-1}$  band corresponds to the transverse optical (TO) phonon mode in the lattice of cubic silicon carbide. The Si-O-Si peak ( $1100\text{ см}^{-1}$ ) was found in the IR absorption spectrum.

**Keywords:** SiC, FTIR, Raman spectroscopy.