

## РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Рекристаллизация структуры карбида кремния при ионном облучении**

А. А. Шемухин,<sup>1,2,3,а</sup> А. М. Смирнов,<sup>4</sup> А. П. Евсеев,<sup>1,3</sup> Е. А. Воробьева,<sup>3</sup> А. В. Кожемяко,<sup>1</sup>  
Д. К. Миннебаев,<sup>1,3</sup> Ю. В. Балакшин,<sup>2,3</sup> А. В. Назаров,<sup>3</sup> В. С. Черныш<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup> Центр квантовых технологий Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва.

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики полупроводников и криоэлектроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 10.12.2019, после доработки 14.01.2020, принята к публикации 20.01.2020.

Было проведено облучение карбида кремния ионами алюминия при энергии 190 кэВ с флюенсами  $2 \times 10^{13}$ – $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Температура мишени в процессе облучения составляла 300–500°С или имела комнатные значения. Показано, что наличие азота в структуре карбида кремния размывает край межзонного поглощения. После облучения при комнатной температуре структура разупорядочивается с образованием Si–Si- и C–C-соединений, а также 3C–SiC. Согласно спектрам поглощения при увеличении температуры мишени во время облучения до 500°С происходит рекристаллизация структуры карбида кремния вплоть до исходного состояния.

**Ключевые слова:** карбид кремния, ионная имплантация, комбинационное рассеяние, образование дефектов.

УДК: 539.534.9, 538.971. PACS: 79.20.Rf.

**ВВЕДЕНИЕ**

Карбид кремния (SiC) представляет собой соединение элементов группы IV — кремния и углерода. В области физики полупроводников SiC известен как материал с широкой запрещенной зоной по сравнению с кремнием. Ряд выгодных отличий в свойствах карбида кремния по сравнению с кремнием делают его предпочтительным материалом для силовых полупроводниковых приборов, способных работать с большими мощностями токов при высоких температурах [1].

Широкая запрещенная зона и высокая температурная стабильность позволяют эксплуатировать определенные типы устройств SiC при температурах 300°С или выше в течение длительных периодов без ухудшения характеристик. Сопrotивление силовых устройств на основе SiC во включенном состоянии на порядки ниже, чем у кремниевых устройств при данном напряжении блокировки, что приводит к гораздо более высокой эффективности преобразования электроэнергии. Кроме того, SiC является единственным составным полупроводником, чей собственный оксид SiO<sub>2</sub>. Это позволяет изготавливать все семейство электронных устройств на основе МОП-структур в случае SiC [2].

Также стоит отметить, что материалы с широкой запрещенной зоной обладают более высокой степенью устойчивости к воздействию частиц с высокой энергией, что снижает сложность создания устройств, необходимых для работы в среде, подверженной воздействию радиации [3]. Изучение влияния облучения протонами на свойства различных форм карбида кремния в сравнении их друг

с другом представлено в [4]. Так, например, было продемонстрировано, что выращенные в исследовании эпитаксиальные слои 3C–SiC имеют примерно такую же радиационную стойкость при облучении протонами, как и 6H– и 4H–SiC.

Для большинства этапов производства необходимы модификации и разработка новых технологий, поскольку SiC является гораздо более жестким материалом, чем кремний. Однако поскольку ионная имплантация обеспечивает превосходный контроль распределения легирующей примеси как латерально, при помощи литографии, так и по глубине, путем выбора энергии и дозы ионов, то ионная имплантация по-прежнему широко используется для производства устройств SiC. Более того, так как ионная имплантация не является термодинамически равновесным процессом, имплантированная концентрация легирующей примеси на единицу объема может превышать твердотельную растворимость имплантированных примесных видов в 4H–SiC. Однако при проведении имплантации следует учесть, что характер дефектообразования в приповерхностных слоях с увеличением флюенса становится немонотонным, а при ориентации пучка по нормали к поверхности часть имплантированных ионов может быть захвачена в режим каналирования, что приводит к увеличению средних проективных пробегов [5].

При движении в твердом теле внедренный ион, сталкиваясь с атомами, передает им часть своей энергии. Если энергия, переданная атому при упругом столкновении, превышает энергию связи атомов в решетке, то атом покидает узел. Обычно энергия атомов отдачи велика, поэтому в результате своего движения эти атомы образуют большой каскад столкновений, разрушая кристаллическую

<sup>а</sup> E-mail: shemuhin@gmail.com

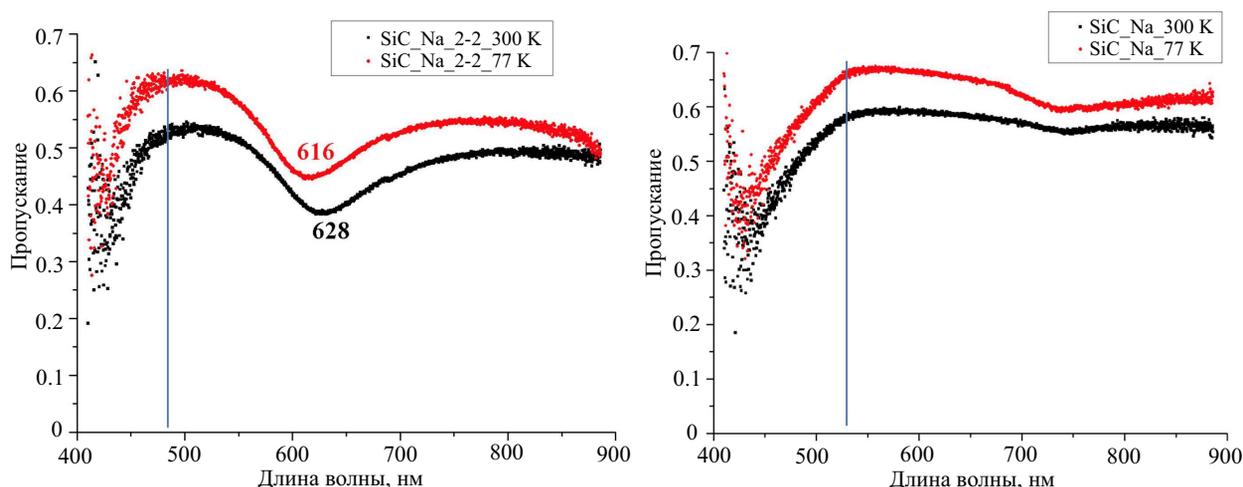


Рис. 1. Спектры пропускания образцов карбида кремния

структуру. Для решения этой проблемы [6] необходимо снизить концентрацию легирующей примеси и максимально увеличить эффективность процесса постимплантационного отжига, что достигается за счет увеличения температуры отжига. При этом для контроля процесса рекристаллизации необходимо контролировать не только температуру в процессе ионного облучения, но и такие параметры, как энергия, доза и плотность потока [7]

При этом с помощью численного моделирования [8] показано, что на основе легированных алюминием 4Н—SiC можно получать *p-i-n*-диоды с отличными выпрямительными характеристиками в широком диапазоне токов и температур (298–523 К). При варьировании температуры постимплантационного отжига [9] можно получать структуры с почти стабильным прямым током в диапазоне температур 25°C–290°C. Однако необходимо строго контролировать процесс отжига, иначе могут образовываться ступенчатые структуры [10] либо может происходить уширение профиля распределения легирующей примеси с появлением дополнительного максимума вблизи поверхности даже при нагреве до 500°C [11].

В данной работе показано влияние температуры мишени на рекристаллизацию при ионном облучении.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Ионно-пучковые методики [12–14], применяемые для модификации структуры [15–17] и свойств различных материалов [18, 19], в нашей лаборатории реализованы на базе ускорителя ионов на энергии до 500 кэВ [20]. Облучение карбида кремния ионами алюминия проводилось при энергии 190 кэВ с флюенсами  $2 \times 10^{13}$ – $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Температура мишени в процессе облучения при повышенных температурах составляла 300, 400 и 500°C. Давление в экспериментальной камере составляло  $10^{-7}$  мбар. При имплантации ионов алюминия угол между нормалью к поверхности образца и направлением распространения пучка составлял 7° для устранения эффектов, связанных с явлением каналирования.

После облучения ионами Al<sup>+</sup> каждый образец охлаждался до комнатной температуры и исследовался методом комбинационного рассеяния света.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) были получены при комнатной температуре на установке «Зондовая нанолaborатория ИНТЕГРА Спектра» с использованием лазера с длиной волны излучения 632.8 нм; мощность лазера при измерении составляла 7 мВт/см<sup>2</sup>.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения экспериментов по влиянию типа карбида кремния на образование дефектов были изучены два типа образцов, полученные CVD-методом: азотированные азотом при росте кристалла и нет. Для анализа структуры обеих серий образцов были сняты спектры пропускания при 300 К и 77 К (рис. 1, а).

Для первого типа образцов карбида кремния (SiC-1) был определен край межзонного поглощения — 470 нм (2.64 эВ) при 300 К и 450 нм (2.75 эВ) при 77 К, а также обнаружено наличие поглощения в запрещенной зоне с максимумом на длине волны 626–628 нм (1.97–1.98 эВ) при 300 К и на длине волны 616 нм (2.01 эВ) при 77 К. Данное поглощение было объяснено наличием глубоких примесных уровней в запрещенной зоне, предположительно уровней азота, который мог внедряться в решетку карбида кремния при росте кристалла. Максимум полосы поглощения примесных уровней в запрещенной зоне отстроен от края межзонного поглощения карбида кремния на 0.67 эВ и на 0.74 эВ при 300 К и 77 К соответственно. Измеренная ширина полосы поглощения на примесных уровнях составила 162 нм (0.513 эВ) и 136 нм (0.447 эВ) при 300 К и 77 К соответственно.

Для второго типа образцов (рис. 1, б) карбида кремния глубоких примесных уровней в запрещенной зоне не обнаружено. Однако край межзонного поглощения смещен в длинноволновую область исследуемых образцов (SiC-2) — 520 нм (2.38 эВ) и 510 нм (2.43 эВ) при 300 К и 77 К соответственно, по сравнению с образцами первого типа, где край

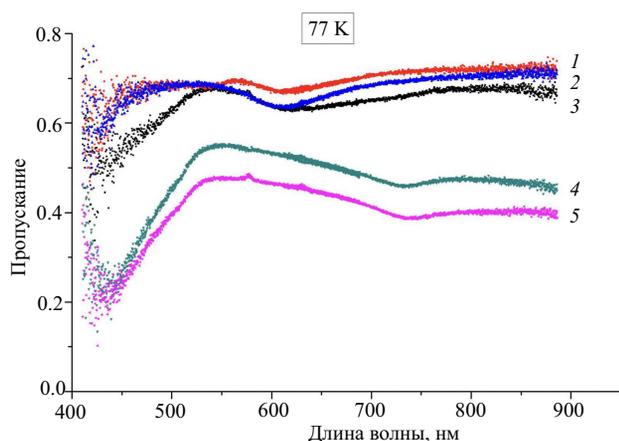


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния света образцов карбида кремния до и после облучения

межзонного поглощения наблюдался при 470 нм (2.64 эВ) при 300 К и 450 нм (2.75 эВ) при 77 К. Данный красный сдвиг межзонного поглощения может свидетельствовать о наличии мелких примесных уровней в запрещенной зоне.

Ввиду того, что примесное поглощение размывает край межзонного поглощения в первой серии образцов, дальнейшие эксперименты было решено проводить на серии образцов без внедренных примесей азота.

Спектры комбинационного рассеяния, полученные на необлученных образцах (рис. 2) содержат интенсивные пики на  $773 \text{ см}^{-1}$  и на  $975 \text{ см}^{-1}$ , которые, согласно [21], соответствуют поперечной (TO) и продольной (LO) оптическим модам. После облучения с указанными параметрами на спектре возникают пики в районе  $520 \text{ см}^{-1}$  и  $1400 \text{ см}^{-1}$ , соответствующие колебаниям связей Si—Si и C—C [22]. В области частот  $850\text{--}950 \text{ см}^{-1}$  после ионного облучения появляется широкий, который, согласно [21], является суперпозицией пиков на  $864, 891, 918$  и  $948 \text{ см}^{-1}$ , соответствующих разупорядоченной структуре SiC. Также становится заметным пик примерно на  $760 \text{ см}^{-1}$ , соответствующих поперечной оптической моде SiC. Кроме того, ионное облучение вызывает сдвиг пика, соответствующего LO-моду, влево, что может объясняться формированием в аморфной области SiC небольших кристаллитов [23].

Для удобства из спектров пропускания перестроены спектры поглощения образцов карбида кремния и по оси абсцисс — энергия (рис. 3). Определено примерное значение ширины запрещенной зоны — 3,14 эВ (395 нм). Для карбида кремния френелевское отражение от каждой границы 19%, поэтому спектр пропускания в области прозрачности существенно меньше 1. Для одного образца, для проверки измерений было измерено пропускание на фиксированных длинах волн — фиолетовая ломаная кривая. Дополнительно с помощью спектрофотометра измерены точки в области, где спектрометр «не видит».

На длине волны 463 нм ( $\hbar\omega \approx 2.68$  эВ), независимо от того, чистый образец или с алюминием, есть сильное поглощение в запрещенной зоне, что соответствует примеси или дефектам. Глубина от зоны проводимости —  $\Delta E = 0.46$  эВ.

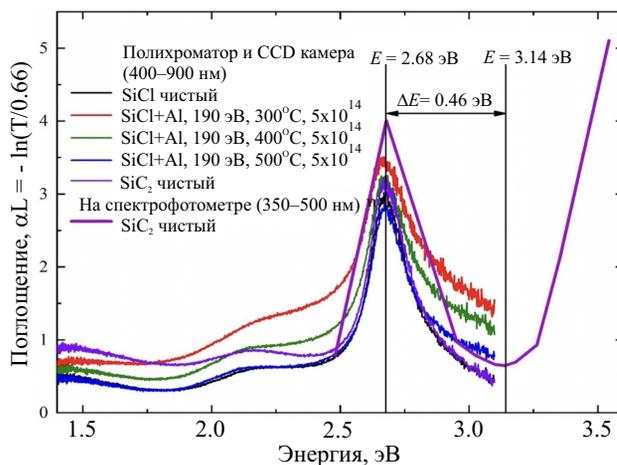


Рис. 3. Спектры поглощения образцов карбида кремния, построенные из спектров пропускания.  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $L$  — толщина образца

Согласно представленным спектрам поглощения видно, что с увеличением температуры мишени при проведении ионного облучения в образцах становится значительно меньше радиационно-индуцированных дефектов. При имплантации в мишень, нагретую до  $500^\circ\text{C}$ , спектры поглощения после проведения имплантации близки к исходным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было изучено два типа образцов, полученных CVD-методом: с азотной примесью и без. С помощью спектров пропускания показано, что примесное поглощение размывает край межзонного поглощения при наличии азотных примесей.

Согласно данным комбинационного рассеяния света после облучения ионами  $\text{Al}^+$  при комнатных температурах усиливается интенсивность пика, соответствующего соединению Si—Si, и возникают пики, соответствующие разупорядоченному SiC и C—C. Структура значительно разрушается даже при низких дозах облучения.

С увеличением температуры мишени при проведении ионного облучения в образцах становится значительно меньше радиационно-индуцированных дефектов. При имплантации в мишень с температурой  $500^\circ\text{C}$  спектры поглощения после проведения имплантации близки к исходным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-00072).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pushpakaran B. N., Subburaj A. S., Bayne S. B. et al. // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. **55**. P. 971.
2. Kimoto T. // *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2016. **62**. P. 329.
3. Shinobu T. O., Naoya O., Takahiro I. et al. // *Physics and technology of silicon carbide devices. InTech, Rijeka, Croatia, 2012*. ISBN: 978-953-51-0917-4.
4. Lebedev A. A., Oganessian G. A., Kozlovski V. V. // *Crystals*. 2019. **9**. P. 115.
5. Chechenin N. G., Bourdelle K. K., Suvorov A. V. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* 1992. **65**. P. 341.

6. Nipoti R., Ayedh H.M., Svensson B.G. // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018. **78**. P. 13.
7. Shemukhin A.A., Balakshin Y.V., Chernysh V.S. et al. // *Semiconductors*. 2014. **48**. N 4. P. 517.
8. Megherbi M.L., Pezzimenti F., Dehimi L. et al. // *Solid. State. Electron.* 2015. **109**. P. 12.
9. Nipoti R., Moscatelli F., Nicola P. // *IEEE Electron Device Lett.* 2013. **34**. P. 966.
10. Aleksandrov O.V., Kalinina E.V. // *Phys. B Condens. Matter.* 2009. **404**. P. 4764.
11. Шемухин А.А., Евсеев А.П., Кожемяко А.В. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 2019. **6**. С. 48. (Shemukhin A.A., Evseev A.P., Kozhemiako A.V. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2019. **74**, N 6. P. 620.)
12. Hallen A., Moschetti G. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* 2014. **332**. P. 172.
13. Kozlovskiy A., Kenzhina I, Zdorovets M. et al. // *M. Mater. Res. Express.* 2019. **6**. 075072.
14. Gainullin I.K. // *Phys. Rev. A.* 2019. **100**. 032712.
15. Kutuzau M., Shumskaya A., Kaniukov E. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* 2019. **460**. P. 212.
16. Taguchi T., Yamamoto S., Ohba H. // *Acta Materialia.* 2018. **154**. 90.
17. Kozlovskiy A., Zdorovets M. // *Materials Research Express.* 2019. **6**. 075066.
18. Kushkina K.D., Shemukhin A.A., Vorobyeva E.A. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* 2018. **430**. P. 11.
19. Garcia-Betancourt ML, Magaca-Zavala C, Crespo-Sosa A. // *J Microsc Ultrastruct.* 2018. **6**, N 2. P. 72.
20. Balakshin Yu. V., Shemukhin A.A., Nazarov A.V. et al. // *Tech. Phys.* 2018. **63**, N 12. P. 1861.
21. Madito M.J., Hlatshwayo T.T., Skuratov V.A. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2019. **493**. P. 1291.
22. Agarwal S., Chen Q., Koyanagi T. et al. // *J. Nucl. Mater.* 2019. **526**. 151778.
23. Abdelbagi H.A.A., Skuratov V.A., Motloung S.V. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* 2019. **451**. P. 113.

### Recrystallization of the Structure of Silicon Carbide under Ion Irradiation

A. A. Shemukhin<sup>1,3,4,a</sup>, A. M. Smirnov<sup>2</sup>, A. P. Evseev<sup>1,4</sup>, E. A. Vorobyeva<sup>4</sup>, A. V. Kozhemiako<sup>1</sup>, D. K. Minnebaev<sup>1,4</sup>, Yu. V. Balakshin<sup>3,4</sup>, A. V. Nazarov<sup>4</sup>, V. S. Chernysh<sup>1,4</sup>.

<sup>1</sup>Department of physical electronics; <sup>2</sup>Department of Semiconductors and Cryoelectronics, Faculty of Physics;

<sup>3</sup>Center for Quantum Technologies; <sup>4</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,

Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>shemukhin@gmail.com.

Silicon carbide was irradiated with aluminum ions at an energy of 190 keV with fluences of  $2 \times 10^{13}$ – $5 \times 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup>. The temperature of the target during irradiation was 300–500°C or it was kept at room temperature. It is shown that the presence of nitrogen in the structure of silicon carbide erodes the edge of the interband absorption. After irradiation at room temperature, the structure is disordered to form Si–Si and C–C compounds, as well as 3C–SiC. According to the absorption spectra, when the target temperature is increased during irradiation to 500°C, the structure of silicon carbide recrystallizes up to the initial state.

**Keywords:** silicon carbide, ion implantation, Raman scattering, defect formation.

PACS: 79.20.Rf.

Received 10 December 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2020. **75**, No. 2. Pp. 133–136.

#### Сведения об авторах

1. Шемухин Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-37-70, e-mail: shemuhin@gmail.com.
2. Смирнов Александр Михайлович — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник.
3. Евсеев Александр Павлович — аспирант.
4. Воробьева Екатерина Андреевна — науч. сотрудник.
5. Кожемяко Анастасия Владимировна — аспирант.
6. Миннебаев Дамир Кашифович — вед. инженер.
7. Балакшин Юрий Викторович — науч. сотрудник.
8. Назаров Антон Викторович — мл. науч. сотрудник.
9. Черныш Владимир Савельевич — доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой.