
ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

УДК 539.23,539.24

ФОРМИРОВАНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ 3C-SiC НА Si МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**М. В. ЛОБАНОК¹⁾, С. Л. ПРОКОПЬЕВ¹⁾,
М. А. МОХОВИКОВ²⁾, О. В. КОРОЛИК¹⁾, П. И. ГАЙДУК¹⁾**

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования структуры и фазового состава эпитаксиальных слоев карбида кремния (SiC), сформированных на кремниевых подложках с ориентацией (100) при быстрой вакуумно-термической обработке. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено образование эпитаксиальных слоев

Образец цитирования:

Лобанок МВ, Прокопьев СЛ, Моховиков МА, Королик ОВ, Гайдук ПИ. Формирование эпитаксиальных слоев 3C-SiC на Si методом быстрой вакуумно-термической обработки. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2022;2:79–86.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-79-86>

For citation:

Lobanok MV, Prakopyeu SL, Makhavikou MA, Korolik OV, Gaiduk PI. Formation of epitaxial 3C-SiC layers on Si by rapid vacuum thermal processing. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2022;2:79–86. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-79-86>

Авторы:

Михаил Владимирович Лобанок – аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий. Научный руководитель – П. И. Гайдук.

Станислав Леонидович Прокопьев – старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Максим Александрович Моховиков – научный сотрудник лаборатории элионики.

Ольга Васильевна Королик – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией энергоэффективных материалов и технологий кафедры энергофизики физического факультета.

Петр Иванович Гайдук – доктор физико-математических наук; профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:

Mikhail V. Lobanok, postgraduate student at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

lobanokmv@bsu.by

Stanislau L. Prakopyeu, senior lecturer at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

prokopyev@bsu.by

Maksim A. Makhavikou, researcher at the laboratory of elionics.

m.mohovikov@gmail.com

Olga V. Korolik, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of energy-efficient materials and technologies, department of energy physics, faculty of physics.

olga_zinchuk@tut.by

Peter I. Gaiduk, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of physical electronics and nanotechnologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

gaiduk@bsu.by

кубического политаипа SiC (3C-SiC) на кремнии в процессе карбидизации при 1100 °C в течение 30 с при использовании в качестве источника углерода газовой смеси пропана (10 %) и аргона (90 %). Обнаружено формирование монокристаллического 3C-SiC с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным плоскостям {111}. Достаточно узкая полоса 793 см⁻¹ поперечной оптической фононной моды SiC в спектре комбинационного рассеяния света подтверждает образование 3C-SiC. Отмечено, что наличие спектральной линии 180 см⁻¹ и полуширина полосы 793 см⁻¹ в спектре комбинационного рассеяния света свидетельствуют о присутствии дефектов деформации в SiC.

Ключевые слова: эпитаксиальные структуры SiC/Si; вакуумная карбидизация; быстрая термическая обработка; тонкие пленки.

Благодарность. Исследование выполнено в рамках проекта T22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также частично проекта 3.1.2 государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (№ гос. регистрации 20212702).

FORMATION OF EPITAXIAL 3C-SiC LAYERS ON Si BY RAPID VACUUM THERMAL PROCESSING

M. V. LOBANOК^a, S. L. PRAKOPYEU^a,
M. A. MAKHAVIKOU^b, O. V. KOROLIK^a, P. I. GAIDUK^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

Corresponding author: M. V. Lobanok (lobanokmv@bsu.by)

The results of a study of the structure and phase composition of epitaxial layers of silicon carbide (SiC) formed on silicon substrate with orientation (100) under rapid vacuum thermal processing are presented. Planar-view transmission electron microscopy investigation revealed the formation of epitaxial layers of cubic polytype SiC (3C-SiC) on silicon in the process of carbidisation at 1100 °C during 30 s, using a gas mixture of propane (10 %) and argon (90 %) as a carbon source. The formation of a monocrystalline 3C-SiC with polycrystalline inclusions and twins on all possible planes {111} was found. A rather narrow band of 793 cm⁻¹ transverse optical phonon mode SiC on Raman spectra confirms the formation of a cubic polytype SiC. It is noted that the presence of a 180 cm⁻¹ spectral line and a 793 cm⁻¹ half-width band on Raman spectra indicate the presence of deformation defects in SiC.

Keywords: epitaxial structures SiC/Si; vacuum carbidisation; rapid thermal processing; thin films.

Acknowledgements. This work was supported by the framework of the project T22-030 of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, as well as, in part, the project 3.1.2 of the state program of scientific research «Photonics and electronics for innovation» (No. 20212702).

Введение

Эпитаксиальные слои SiC на кремниевых подложках представляют интерес для разработки приборных структур микро- и оптоэлектроники, работающих при повышенных температурах и уровнях радиационного фона [1; 2]. В настоящее время слои SiC на кремниевых подложках используются при разработке фотодетекторов [3] и в качестве буферов для роста активных структур на основе GaN [4], AlN, ZnO [1]. Однако слои SiC, выращенные непосредственно на кремнии, имеют большое количество структурных дефектов [1; 5], связанных с несоответствием параметров кристаллических решеток SiC и Si (19,72 %), а также с различием коэффициентов термического расширения (~8 %) [1]. Для улучшения структурного качества SiC используют буферные слои, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, обусловленных несоответствием параметров кристаллических решеток и различием коэффициентов термического расширения [6–9].

В качестве буфера могут применяться тонкие слои SiC, сформированные при карбидизации кремния [5–8]. Согласно исследованиям [6; 7] подобные буферные слои в значительной степени определяют структурное качество пленок SiC. В связи с этим получение низкодефектных гетероэпитаксиальных слоев 3C-SiC на поверхности пластин монокристаллического кремния является важной задачей для развития компонентной базы микро- и оптоэлектроники нового поколения.

В настоящее время ведутся исследования режимов карбидизации кремния для формирования эпитаксиальных слоев SiC. Для снижения напряжений авторы работ [7; 8; 10] используют высокотемпературные режимы карбидизации, а также вводят в реакционную камеру дополнительные газы, содержащие силан. Однако высокие температуры карбидизации (свыше 1300 °С) в большинстве случаев несовместимы с режимами формирования полупроводниковых структур для кремниевых приборов. Осуществить процесс карбидизации кремниевой пластины в заданных условиях за короткий интервал времени позволяет сочетание относительно низких температур карбидизации (1000–1200 °С) и вакуумной среды в установке быстрой термической обработки (БТО). В основном установки БТО применяются для термообработки имплантированных слоев [11], формирования омических контактов [12] и контактов Шоттки [13], карбидизации кремниевых подложек и эпитаксиального роста SiC на Si путем быстрого термического химического осаждения из паровой фазы [10; 14]. Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования тонких слоев SiC в процессе быстрой вакуумно-термической обработки кремния.

Материалы и методы исследования

В качестве подложек для формирования слоев SiC использовали пластины монокристаллического кремния марки КДБ-12/24 с ориентацией (100). Перед проведением карбидизации все подложки очищали в 5 % водном растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой в деионизированной воде. Далее образцы осушали сжатым азотом и переносили в реакционную камеру. Система БТО, используемая в данном исследовании, представляла собой модифицированную установку JetFirst 100 (*Jipelec*, Франция). Реакционная камера позволила работать в вакууме и осуществлять БТО больших площадей (диаметром до 100 мм) с использованием ксеноновых ламп на верхней стороне камеры. Типичное рабочее давление в камере на этапе карбидизации кремния составляло $\sim 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Процесс формирования слоев SiC методом быстрой вакуумно-термической обработки кремниевых пластин изображен на рис. 1.

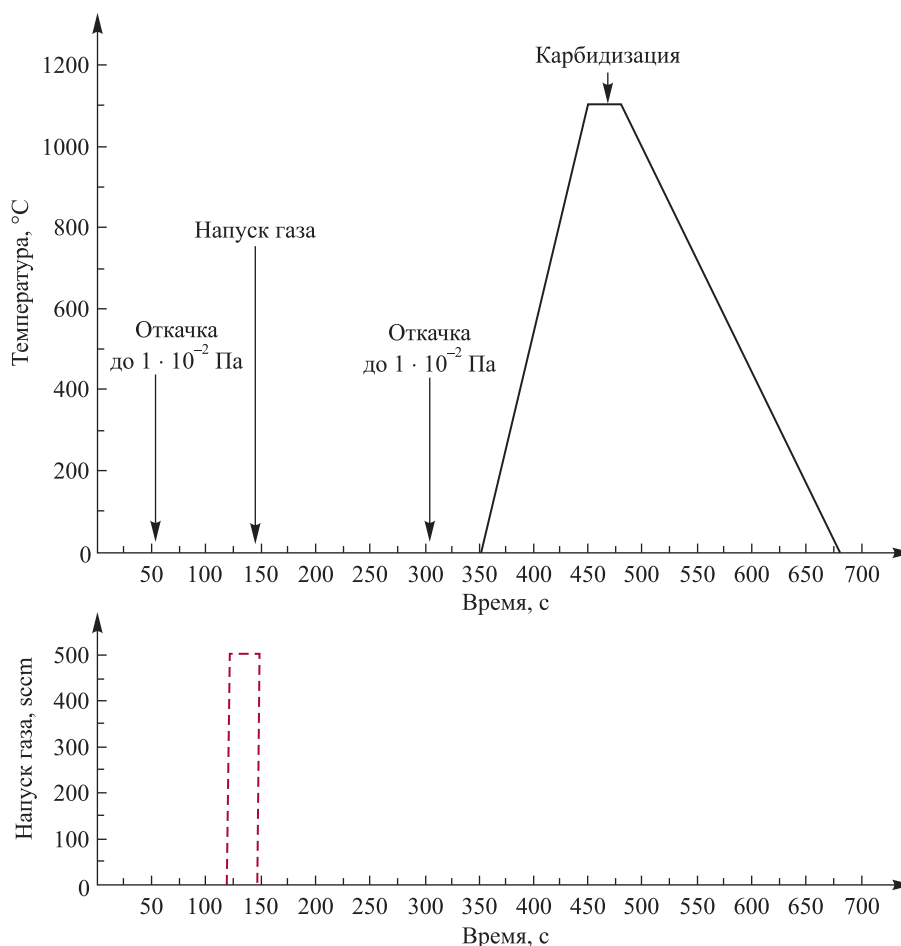


Рис. 1. График процесса карбидизации кремниевой пластины методом быстрой вакуумно-термической обработки

Fig. 1. Graph of silicon wafer carbonisation process by rapid vacuum thermal processing

Формирование слоев SiC на кремнии методом быстрой вакуумно-термической обработки включало следующие последовательные стадии: создание высоковакуумной реакционной газовой среды, нагрев до рабочей температуры, карбидизацию и охлаждение до комнатной температуры. Создание высоковакуумной реакционной газовой среды предполагало откачку атмосферного воздуха из камеры реактора до давления $1 \cdot 10^{-2}$ Па, напуск в камеру чистой газовой смеси пропана (10 %) и аргона (90 %) до атмосферного давления и повторную откачку газовой смеси до давления $1 \cdot 10^{-2}$ Па, в результате чего из вакуумной камеры удалялись кислород и другие газовые составляющие воздуха, а рабочая атмосфера содержала лишь остаточные пары пропан-аргоновой смеси с парциальным давлением менее $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Нагрев до температуры карбидизации осуществлялся с достаточно высокой скоростью (~ 20 °C/c), после чего проводилась карбидизация при 1100 °C в течение 30 с. На протяжении всей процедуры нагрева и карбидизации в камере поддерживалось указанное выше давление остаточных паров пропан-аргоновой смеси. Компьютерное управление температурно-временными условиями нагрева и карбидизации осуществлялось с помощью термопарного (до 400 °C) и пирометрического (400–1100 °C) контроля температуры, при этом термопара и пирометр являлись элементами соответствующей обратной связи.

Структурно-фазовые характеристики сформированных слоев SiC изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) с использованием микроскопа Hitachi H-800 (Hitachi, Япония) при ускоряющем напряжении 150 кэВ. Кроме того, химический и фазовый состав образцов исследовался методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) на установке Nanofinder High End (LOTIS III, Беларусь – Япония). Источником излучения служил твердотельный лазер с диодной накачкой, работающий на длине волны возбуждения 532 нм. Мощность и время накопления составляли 2 мВт и 30 с соответственно. 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. Спектральное разрешение было не хуже 3 см^{-1} . Образцы для исследований утонялись в планарном виде химико-динамическим методом в смеси концентрированных плавиковой и азотной кислот ($\text{HF} : \text{HNO}_3 = 1 : 5$) со стороны кремниевой подложки.

Результаты и их обсуждение

Методами ПЭМ и ПЭД установлено, что высоковакуумная карбидизация кремния при 1100 °C в течение 30 с приводит к формированию слоев SiC достаточно высокого кристаллического качества (рис. 2, а и б). Так, на ПЭД-изображении (см. рис. 2, а) можно выделить две группы точечных рефлексов, которые обусловлены дифракцией электронов: рефлексы кремниевой подложки ($a = 0,543 \text{ нм}$) типа $\{220\}$ и рефлексы слоя 3C-SiC ($a = 0,435 \text{ нм}$) типа $\{111\}$, $\{220\}$, $\{311\}$. Присутствие точечных рефлексов Si и 3C-SiC на дифракционной картине свидетельствует о наличии монокристаллической фазы в приграничном слое кремния и в сформированном слое SiC, а упорядоченное расположение рефлексов Si $\{220\}$ и SiC $\{220\}$ говорит о формировании эпитаксиального слоя SiC. В свою очередь, наблюдаемые концентрические кольца на ПЭД-изображении (см. рис. 2, а) указывают на наличие поликристаллической фазы в слое SiC. Расчетные значения параметров гранецентрированных кубических решеток 3C-SiC хорошо совпадают с измеренными расстояниями между рефлексами и диаметрами колец на электронограмме образца сформированной структуры SiC/Si. С учетом значительно более низкой относительной интенсивности колец по сравнению с интенсивностью точечных рефлексов можно сказать, что в процессе карбидизации происходит преимущественное образование монокристаллического SiC. Однако на наличие двумерных дефектов во всех возможных плоскостях $\{111\}$ указывают экстрарефлексы, обозначенные как вторичные двойники SiC (см. рис. 2, а). Эти рефлексы являются результатом дифракции на вторичных двойниках SiC и имеют индексы типа $\frac{1}{9}\{\bar{7} \bar{5} 13\}$ и $\frac{1}{9}\{\bar{1} 1 1 1\}$.

На рис. 2, б, представлено ПЭМ-изображение в темном поле структуры SiC/Si. Темнопольное планарное изображение получено на дифракционном кольце 3C-SiC $\{111\}$. На изображении можно выделить яркие светлые пятна двух типов. К первому типу относятся области с полосчатым контрастом (указаны стрелками). В качестве примера в правом верхнем углу на рис. 2, б, приведено увеличенное изображение. Согласно исследованиям дефектов в эпитаксиальных слоях кремния [15] подобные области с характерным контрастом, вероятно, являются микродвойниковыми ламелями SiC. Пятна второго типа представляют собой поликристаллические включения 3C-SiC $\{111\}$ и имеют размер от 10 до 80 нм.

Результаты анализа спектров КРС хорошо коррелируют с данными ПЭД. Так, на спектре КРС, представленном на рис. 3, а, можно выделить пики 793 и 180 см^{-1} , а также широкую полосу в районе

850–1000 см^{-1} . Достаточно узкий пик 793 см^{-1} соответствует поперечному оптическому (*transverse optical*, TO) фонону 3C-SiC. Согласно исследованиям релаксации деформации в гетероструктуре SiC/Si [16] относительно большую (30 см^{-1}) полуширину пика 793 см^{-1} можно объяснить наличием дефектов деформации в слоях SiC. В свою очередь, пик 180 см^{-1} соответствует продольной акустической (*longitudinal acoustic*, LA) фононной моде SiC, которая проявляется только при гексагональной ориентации кристалла SiC [17]. Вероятно, появление подобного пика связано с наличием двойников деформации в сформированном слое SiC [17]. Широкая полоса в области 850–1000 см^{-1} обусловлена КРС-полосой второго порядка 940 см^{-1} в кремнии и продольным оптическим (*longitudinal optical*, LO) фононом SiC, который в монокристалле расположен между 965 и 972 см^{-1} . Две полосы с максимумами вблизи 480 и 520 см^{-1} принадлежат кремниевой подложке (480 см^{-1} – аморфный Si, 520 см^{-1} – кристаллический Si). Появление в спектре КРС наряду с пиком 520 см^{-1} пиков в области 480–500 см^{-1} может быть связано с нарушением структуры и уменьшением толщины кремниевой подложки в результате химического травления. В свою очередь, спектр КРС, представленный на рис. 3, б, содержит пики в области 1300–1600 см^{-1} , обусловленные колебаниями атомов углерода и связей C—H. Широкую полосу 1310 см^{-1} можно отнести к связям C—C. Достаточно узкий пик 1450 см^{-1} соответствует колебаниям связей C—H. Полоса в спектре КРС в области 1530 см^{-1} может быть связана как с полосой второго порядка SiC [18], так и с аморфной фазой углерода [19].

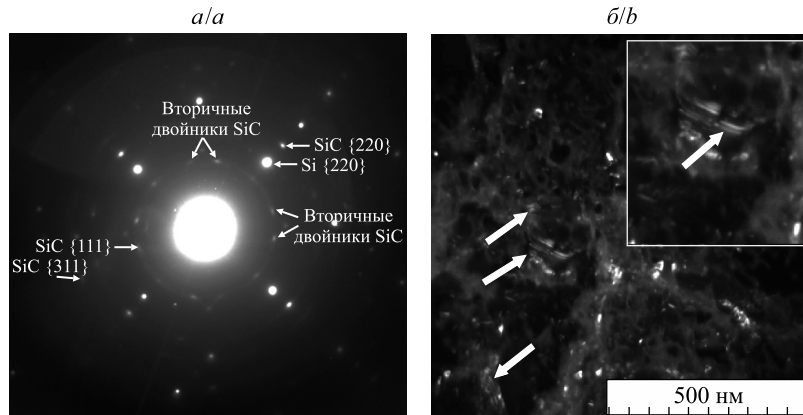


Рис. 2. ПЭД-микрофотография (а) и ПЭМ-изображение в темном поле (б) эпитаксиального слоя SiC, выращенного на лицевой стороне подложки Si (100) при 1100 °C в течение 30 с

Fig. 2. Transmission electron diffraction pattern (a) and transmission electron microscopy image in dark field mode (b) of epitaxial SiC layer grown on the front side of a Si (100) substrate at 1100 °C during 30 s

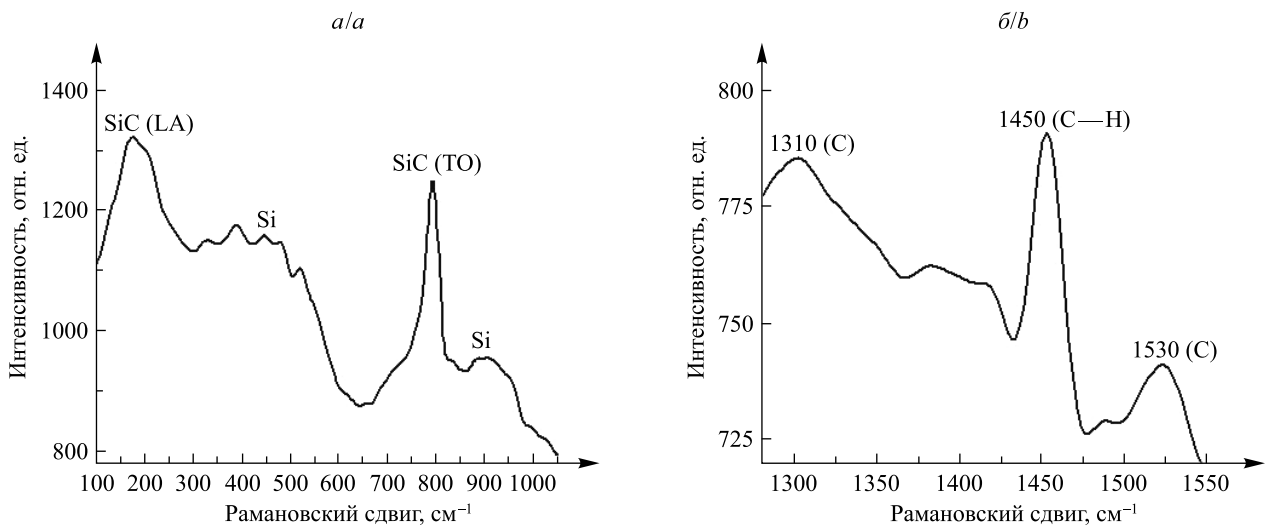


Рис. 3. Спектр КРС структуры SiC/Si, измеренный в области частот колебаний: а – связей Si—C; б – связей C—C

Fig. 3. Raman spectra of the SiC/Si structure measured in the range of vibration frequencies: a – of Si—C bonds; b – of C—C bonds

Спектральная линия 180 см^{-1} соответствует линии достаточно редкого гексагонального поли типа 8H-SiC со сдвигом 7 см^{-1} . Однако дифракционный анализ не выявил рефлексов, свидетельствующих о наличии 8H-SiC в сформированной структуре. Возникновение линии 180 см^{-1} в спектре КРС обусловлено наличием двойников деформации в сформированном слое SiC [17]. Образование дефектов деформации, вероятно, вызвано тем, что слой SiC принимает на себя часть деформации рассогласования [1; 6]. Такой вывод согласуется с исследованием пленок SiC, выращенных методом твердофазной эпитаксии [17]. Вместе с тем, согласно данным исследования твердофазной эпитаксиальной кристаллизации аморфизованных ионной имплантацией слоев кремния [16], вторичному двойникованию в кристаллизованных слоях может способствовать образование включений второй фазы и примесей.

В настоящее время продолжают исследования, посвященные относительно низкотемпературной ($1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) карбидизации кремния [7; 8]. Согласно работе [20] при секундных режимах карбидизации происходит формирование нанокристаллического слоя SiC. Для данных режимов формирования слоя SiC характерно интенсивное образование микродвойников и дефектов упаковки [20]. Проведенные авторами исследования методами ПЭМ и ПЭД показали, что получаемые при карбидизации в течение 30 с слои SiC являются преимущественно монокристаллическими и эпитаксиальными подложке, однако содержат поликристаллические включения и микродвойники. Структурные различия, возможно, обусловлены скоростью нагрева до температуры карбидизации. Согласно данным работ [1; 10] при большой скорости нагрева (свыше $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$) в результате карбидизации формируются слои SiC с крупными и разориентированными зернами. В этом случае двойникование SiC, вероятно, связано с напряжением несоответствия на границе раздела SiC/Si. Благодаря случайной ориентации соседних зерен и большой скорости роста зерен напряжения несоответствия становятся настолько высокими, что их релаксация будет осуществляться при зарождении и последующем росте микродвойников вблизи межзеренной границы.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты структурно-фазовых исследований эпитаксии слоев SiC путем быстрой вакуумно-термической обработки кремния. Методами электронной микроскопии установлено образование эпитаксиальных слоев 3C-SiC в процессе карбидизации при $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 с в остаточной атмосфере пропан-аргоновой смеси. Анализ дифракционных картин позволил установить формирование монокристаллического 3C-SiC с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным плоскостям $\{111\}$. Анализ спектров КРС подтвердил образование структуры SiC/Si, а также присутствие дефектов деформации в SiC.

Библиографические ссылки

1. Ferro G. 3C-SiC heteroepitaxial growth on silicon: the quest for holy grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40(1):56–76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Shenai K, Scott RS, Baliga BJ. Optimum semiconductors for high-power electronics. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1989;36(9):1811–1823. DOI: 10.1109/16.34247.
3. Aldalbahi A, Li E, Rivera M, Velazquez R. A new approach for fabrications of SiC based photodetectors. *Scientific Reports*. 2016;6(1):23457. DOI: 10.1038/srep23457.
4. Skibarko IA, Milchanin OV, Gaiduk PI, Komarov FF, Marks J, Pastuszka B, et al. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. In: Ploog KH, Tränkle G, Weimann G, editors. *Compound semiconductors – 1999. Proceedings of the 26th International symposium on compound semiconductors; 1999 August 22–26; Berlin, Germany*. Bristol: IOP Publishing; 2000. p. 465–469 (Institute of Physics conference series; No. 166).
5. Shakir M, Hou S, Hedayati R, Malm BG, Östling M, Zetterling C-M. Towards silicon carbide VLSI circuits for extreme environment applications. *Electronics*. 2019;8(5):496. DOI: 10.3390/electronics8050496.
6. Zimbone M, Sarikov A, Bongiorno C, Marzegalli A, Scuderi V, Calabretta C, et al. Extended defects in 3C-SiC: stacking faults, threading partial dislocations, and inverted domain boundaries. *Acta Materialia*. 2021;213:116915. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116915.
7. Bosi M, Ferrari C, Nilsson D, Ward PJ. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *CrystEngComm*. 2016;18(39):7478–7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
8. Zimbone M, Mauceri M, Litrico G, Barbagiovanni EG, Bongiorno C, La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *Journal of Crystal Growth*. 2018;498:248–257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
9. Cimalla V, Pezoldt J, Eicke G, Eichhorn G. The buffer layer in RTCVD of SiC. In: Nakashima S, Matsunami H, Yoshida S, Harima H, editors. *Silicon carbide and related materials – 1995. Proceedings of the 6th International conference on silicon carbide and related materials; 1995 September 18–21; Kyoto, Japan*. Bristol: IOP Publishing; 1996. p. 153–156 (Institute of Physics conference series; No. 142).
10. Steckl AJ, Li JP. Epitaxial growth of beta-SiC on Si by RTCVD with C_3H_8 and SiH_4 . *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1992;39:64–74. DOI: 10.1109/16.108213.
11. Ottaviani L, Lazar M, Locatelli ML, Chante JP, Heera V, Skorupa W, et al. Annealing studies of Al-implanted 6H-SiC in an induction furnace. *Materials Science and Engineering: B*. 2002;91–92:325–328. DOI: 10.1016/S0921-5107(01)01043-1.

12. Wang Z, Liu W, Wang C. Recent progress in ohmic contacts to silicon carbide for high-temperature applications. *Journal of Electronic Materials*. 2016;45:267–284. DOI: 10.1007/s11664-015-4107-8.
13. Roccaforte F, Brezeanu G, Ganmon PM, Giannazzo F, Rascuna S, Saggio M. Schottky contacts to silicon carbide: physics, technology and applications. In: Zekentes K, Vasilevskiy K, editors. *Advancing silicon carbide electronics technology I. Metal contacts to silicon carbide: physics, technology, applications. Chapter 3*. Millersville: Materials Research Forum LLC; 2018. p. 127–190. DOI: 10.21741/9781945291852-3.
14. Skorupa W, Panknin D, Anwand W, Voelskow M, Ferro G, Monteil Y, et al. Flash lamp supported deposition of 3C-SiC (FLASiC) – a promising technique to produce high quality cubic SiC layers. *Materials Science Forum*. 2004;457–460:175–180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.457-460.175.
15. Booker GR. Crystallographic imperfections in silicon. *Discussions of the Faraday Society*. 1964;38:298–304. DOI: 10.1039/DF9643800298.
16. Komarov FF, Solov'yev VS, Tishkov VS, Shiryayev SY. Thermal recrystallization of silicon amorphous layers after argon, oxygen and nitrogen ion implantation. *Radiation Effects*. 1983;69(3–4):179–189. DOI: 10.1080/00337578308217822.
17. Аксянов ИГ, Компан МЕ, Кулькова ИВ. Комбинационное рассеяние света в мозаичных пленках карбида кремния. *Физика твердого тела*. 2010;52(9):1724–1728.
18. Sorieul S, Costantini J-M, Gosmain L, Thomé L, Grob J-J. Raman spectroscopy study of heavy-ion-irradiated α -SiC. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2006;18(22):5235–5251. DOI: 10.1088/0953-8984/18/22/022.
19. Kazuchits NM, Korolik OV, Rusetsky MS, Kazuchits VN, Kirilkin NS, Skuratov VA. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2020;472:19–23. DOI: 10.1016/j.nimb.2020.03.034.
20. Солдагенко СА, Кузьмина ВО. Субструктура эпитаксиальной пленки β -SiC, синтезированной пиролизом метана на (111) Si методом ИФО [Интернет]. В: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Материалы XIII Международной научно-технической конференции; 12–14 сентября 2018 г.; Минск, Беларусь*. Минск: [б. и.]; 2018 [протитировано 21 марта 2022 г.]. с. 169–175. Доступно по: <https://rep.bntu.by/handle/data/51257>.

References

1. Ferro G. 3C-SiC heteroepitaxial growth on silicon: the quest for holy grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40(1):56–76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Shenai K, Scott RS, Baliga BJ. Optimum semiconductors for high-power electronics. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1989;36(9):1811–1823. DOI: 10.1109/16.34247.
3. Aldalbahi A, Li E, Rivera M, Velazquez R. A new approach for fabrications of SiC based photodetectors. *Scientific Reports*. 2016;6(1):23457. DOI: 10.1038/srep23457.
4. Skibarko IA, Milchanin OV, Gaiduk PI, Komarov FF, Marks J, Pastuszka B, et al. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. In: Ploog KH, Tränkle G, Weimann G, editors. *Compound semiconductors – 1999. Proceedings of the 26th International symposium on compound semiconductors; 1999 August 22–26; Berlin, Germany*. Bristol: IOP Publishing; 2000. p. 465–469 (Institute of Physics conference series; No. 166).
5. Shakir M, Hou S, Hedayati R, Malm BG, Östling M, Zetterling C-M. Towards silicon carbide VLSI circuits for extreme environment applications. *Electronics*. 2019;8(5):496. DOI: 10.3390/electronics8050496.
6. Zimbone M, Sarikov A, Bongiorno C, Marzegalli A, Scuderi V, Calabretta C, et al. Extended defects in 3C-SiC: stacking faults, threading partial dislocations, and inverted domain boundaries. *Acta Materialia*. 2021;213:116915. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116915.
7. Bosi M, Ferrari C, Nilsson D, Ward PJ. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *CrystEngComm*. 2016;18(39):7478–7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
8. Zimbone M, Mauceri M, Litrico G, Barbagiovanni EG, Bongiorno C, La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *Journal of Crystal Growth*. 2018;498:248–257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
9. Cimalla V, Pezoldt J, Ecke G, Eichhorn G. The buffer layer in RTCVD of SiC. In: Nakashima S, Matsunami H, Yoshida S, Harima H, editors. *Silicon carbide and related materials – 1995. Proceedings of the 6th International conference on silicon carbide and related materials; 1995 September 18–21; Kyoto, Japan*. Bristol: IOP Publishing; 1996. p. 153–156 (Institute of Physics conference series; No. 142).
10. Steckl AJ, Li JP. Epitaxial growth of beta-SiC on Si by RTCVD with C_3H_8 and SiH_4 . *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1992;39:64–74. DOI: 10.1109/16.108213.
11. Ottaviani L, Lazar M, Locatelli ML, Chante JP, Heera V, Skorupa W, et al. Annealing studies of Al-implanted 6H-SiC in an induction furnace. *Materials Science and Engineering: B*. 2002;91–92:325–328. DOI: 10.1016/S0921-5107(01)01043-1.
12. Wang Z, Liu W, Wang C. Recent progress in ohmic contacts to silicon carbide for high-temperature applications. *Journal of Electronic Materials*. 2016;45:267–284. DOI: 10.1007/s11664-015-4107-8.
13. Roccaforte F, Brezeanu G, Ganmon PM, Giannazzo F, Rascuna S, Saggio M. Schottky contacts to silicon carbide: physics, technology and applications. In: Zekentes K, Vasilevskiy K, editors. *Advancing silicon carbide electronics technology I. Metal contacts to silicon carbide: physics, technology, applications. Chapter 3*. Millersville: Materials Research Forum LLC; 2018. p. 127–190. DOI: 10.21741/9781945291852-3.
14. Skorupa W, Panknin D, Anwand W, Voelskow M, Ferro G, Monteil Y, et al. Flash lamp supported deposition of 3C-SiC (FLASiC) – a promising technique to produce high quality cubic SiC layers. *Materials Science Forum*. 2004;457–460:175–180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.457-460.175.
15. Booker GR. Crystallographic imperfections in silicon. *Discussions of the Faraday Society*. 1964;38:298–304. DOI: 10.1039/DF9643800298.
16. Komarov FF, Solov'yev VS, Tishkov VS, Shiryayev SY. Thermal recrystallization of silicon amorphous layers after argon, oxygen and nitrogen ion implantation. *Radiation Effects*. 1983;69(3–4):179–189. DOI: 10.1080/00337578308217822.
17. Aksyanov IG, Компан МЕ, Кул'кова ИВ. [Raman scattering in mosaic silicon carbide films]. *Fizika tverdogo tela*. 2010;52(9):1724–1728. Russian.

18. Sorieul S, Costantini J-M, Gosmain L, Thomé L, Grob J-J. Raman spectroscopy study of heavy-ion-irradiated α -SiC. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2006;18(22):5235–5251. DOI: 10.1088/0953-8984/18/22/022.

19. Kazuchits NM, Korolik OV, Rusetsky MS, Kazuchits VN, Kirilkin NS, Skuratov VA. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2020;472:19–23. DOI: 10.1016/j.nimb.2020.03.034.

20. Soldatenko SA, Kuzmina VO. Substructure of the epitaxial film of β -SiC synthesized by pyrolysis of methane on (111) Si by the method of PPT [Internet]. In: *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Materialy XIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; 12–14 sentyabrya 2018 g.; Minsk, Belarus'* [Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. Proceedings of the 13th International scientific and technical conference; 2018 September 12–14; Minsk, Belarus]. Minsk: [s. n.]; 2018 [cited 2022 March 21]. p. 169–175. Russian. Available from: <https://rep.bntu.by/handle/data/51257>.

Получена 22.04.2022 / исправлена 29.04.2022 / принята 06.05.2022.
Received 22.04.2022 / revised 29.04.2022 / accepted 06.05.2022.