



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-14-22>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.23, 539.24

ФОРМИРОВАНИЕ SiC МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ КАРБИДИЗАЦИИ НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

М.В. ЛОБАНОК¹, С.Л. ПРОКОПЬЕВ¹, С.А. ЗАВАЦКИЙ², В.П. БОНДАРЕНКО²,
П.И. ГАЙДУК¹

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 17 июня 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что вакуумная карбидизация пористого кремния при 1100°C приводит к формированию слоев кубического карбида кремния. Обнаружено формирование слоев кубического SiC в виде двухфазной системы. При этом сформированные слои SiC на мезопористом буферном слое являются преимущественно поликристаллическими. Методом резерфордовского обратного рассеяния установлено, что использование буферных слоев пористого кремния позволяет получать слои SiC большей толщины, чем на чистой кремниевой подложке при аналогичных условиях вакуумной карбидизации. Показано, что увеличение размера пор в слоях пористого кремния приводит к увеличению толщины формируемых слоев SiC. С помощью метода растровой электронной микроскопии показано, что вакуумная карбидизация пористого кремния приводит к формированию зерен SiC в порах, частичному зарастанию и спеканию пор. Установлена зависимость размера зерен SiC от размера пор.

Ключевые слова: карбид кремния, пористый кремний, вакуумная карбидизация, тонкие пленки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках заданий 3.1.2 (№ ГР 20212702) и 3.1.4 (№ ГР 20212866) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций». Авторы выражают благодарность А.Л. Долгому за помощь в формировании слоев пористого кремния.

Для цитирования. Лобанок М.В., Прокопьев С.Л., Завацкий С.А., Бондаренко В.П., Гайдук П.И. Формирование SiC методом вакуумной карбидизации на пористом кремнии. Доклады БГУИР. 2022; 20(6): 14-22.

FORMATION OF SiC BY VACUUM CARBIDIZATION ON POROUS SILICON

MIKHAIL V. LOBANOK¹, STANISLAU L. PRAKOPYEU¹, SIARHEI A. ZAVATSKI²,
VITALY P. BONDARENKO², PETER I. GAIDUK¹

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17 June 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Planar-view TEM investigation revealed the formation of cubic silicon carbide layers on porous silicon by vacuum carbidization. The formation of cubic silicon layers in the form of a two-phase system was found. At the same time, the formed SiC layers on the mesoporous buffer layer are predominantly polycrystalline. Using the Rutherford backscattering method, it was found that the use of buffer layers of porous silicon makes it possible to obtain SiC layers of greater thickness than on a pure silicon substrate under similar conditions of vacuum carbidization. It is shown that an increase in the pore size in porous silicon layers leads to an increase in the thickness of the formed SiC layers. It has been shown by scanning electron microscopy that vacuum carbideization of porous silicon leads to formation of SiC grains in pores, partial overgrowth and sintering of pores. The dependence of the SiC grain size on the pore size was established.

Keywords: silicon carbide, porous silicon, vacuum carbidization, thin films.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. Studies carried out within the framework of SARP project “Photonics and Electronics for Innovation” (Projects 3.1.2, № GR 20212702 and 3.1.4 № GR 20212866).

For citation. Lobanok M.V., Prakopyeu S.L., Zavatski S.A., Bondarenko V.P., Gaiduk P.I. Formation of SiC by Vacuum Carbidization on Porous Silicon. Doklady BGUIR. 2022; 20(6): 14-22.

Введение

Карбид кремния (SiC) обладает большим потенциалом для создания приборов и интегральных схем, предназначенных для работы в экстремальных условиях. Это связано с большой шириной запрещенной зоны SiC, хорошей теплопроводностью, высокими пробивными полями и скоростью насыщения электронов, а также значительной радиационной и термической устойчивостью. Альтернативным решением, замещающим дорогие в производстве монокристаллические пластины SiC, являются гетероэпитаксиальные слои SiC на кремнии (Si) [1, 2]. Кроме того, слои SiC можно использовать в качестве буферных промежуточных слоев между Si и GaN для уменьшения механических напряжений в гетероэпитаксиальных структурах и вероятности возникновения связанных с ними деформаций [1, 3].

Основными методами формирования SiC на Si являются молекулярно-лучевая эпитаксия [4] и химическое осаждение из газовой фазы [1, 2, 5]. Формирование SiC на Si является сложной задачей из-за большого различия коэффициентов термического расширения Si и SiC (8 %). Несмотря на то, что для Si и SiC существует несоответствие параметров кристаллической решетки (19,75 %), которое приводит к возникновению механических напряжений и протяженных дефектов [2], в ряде исследований было установлено, что для получения SiC эпитаксиального качества можно использовать буферный слой SiC, сформированный карбидизацией кремния [5–8].

Пористый кремний (por-Si), получаемый методом электрохимического анодирования, может применяться как буферный слой для наращивания на кремниевых подложках пленок других полупроводниковых материалов. Использование пористого кремния в качестве

буферного слоя позволит уменьшить возникающие в процессе карбидизации механические напряжения, уменьшить вероятность образования трещин и в целом избежать искривления пластин. Благоприятное влияние буферных слоев por-Si на качество кристаллов было продемонстрировано для гетероэпитаксиальных пленок PbS, PbSe, ZnSe, ZnO и GaAs [9]. Варьируя режимы анодирования, можно изменять толщину, пористость и структуру слоев por-Si. Процессы гомоэпитаксиального роста пленок кремния на por-Si применяются как часть технологии переноса слоев, используемой при промышленном производстве SOI-структур (ELTRAN) [9], тонкопленочных кремниевых солнечных элементов и сенсоров.

В настоящей работе исследованы особенности формирования слоев SiC в процессе вакуумной карбидизации кремниевых пластин с буферным слоем por-Si. Изучается влияние размера пор на структурные характеристики выращиваемых пленок SiC.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложек для формирования SiC использовали монокристаллические пластины кремния марки КЭС-0,01 и КДБ-12 с ориентациями (111) и (100). Буферные слои por-Si на пластинах формировали методом анодирования в водно-спиртовом растворе фтористоводородной кислоты (HF:H₂O:C₂H₅OH) в объемном соотношении 1:3:1). Анодирование проводили в гальваностатическом режиме и использовали фторопластовую ячейку с графитовым электродом для контакта к образцам. Плотность тока анодирования варьировали для получения пор диаметра 20–100 нм и 1,5 мкм. Для формирования слоев мезопористого (диаметр пор 50 и 100 нм) и нанопористого (20 нм) кремния использовали пластины марки КЭС-0,01. В свою очередь, пластины марки КДБ-12 использовали для формирования макропористого кремния с диаметром пор 1,5 мкм. Толщина всех сформированных слоев пористого кремния составляла примерно 1 мкм, а для макропористого слоя равнялась 10 мкм. В зависимости от ориентации подложки и условий анодирования были получены слои пористого кремния с древовидной или губчатой структурой [13].

Перед проведением процесса карбидизации все подложки разрезали на образцы прямоугольной формы со стороной не более 1 см, которые затем очищали в 5 % водном растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой в деионизированной воде. Затем образцы загружали в камеру ВУП-5 с последующей откачкой до рабочего давления. Выбор вакуумного поста обусловлен возможностью откачки рабочей камеры на высокий вакуум с использованием диффузионного паромасляного насоса и, как следствие, присутствием остаточных паров углеводородных соединений в камере. Карбидизация образцов производилась в нагревательной ячейке на основе вольфрамовой фольги. Типичное рабочее давление в камере при карбидизации кремния составляло $P \sim 1 \times 10^{-2}$ Па. Контроль температуры образцов осуществлялся термопарой платинородий-платина типа ПП-1. Процесс формирования слоев SiC методом вакуумной карбидизации заключался в нагреве до 1100 °С в течение нескольких минут и выдерживании образцов при данной температуре в течение 10 мин.

Химические профили атомов (состав) и толщину слоев в структурах SiC/Si и SiC/por-Si определяли из спектров резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов He⁺ с энергией 1,2 МэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. При преобразовании шкалы энергий в шкалу глубин, для полной обработки экспериментальных спектров РОР, а также для сравнения с теоретически моделированными спектрами использовали пакет расчетных программ HEAD6. Структурные свойства сформированных слоев SiC изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) с использованием микроскопа Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении 150 кэВ. Образцы для исследований утоняли в планарном виде химико-динамическим методом в смеси концентрированных кислот HF:HNO₃ = 1:5 со стороны кремниевой подложки. Исследования поверхностного микрорельефа образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа Hitachi S-4800. Типичное значение ускоряющего напряжения составляло 10 кВ. Регистрация РЭМ изображений выполнялась в режиме отраженных электронов, а также в режиме вторичных электронов.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры RBS образцов SiC, сформированных при карбидизации в течение 10 мин и температуре 1100 °С. Вид спектра SiC/Si является типичным для кремниевой подложки, содержащей на поверхности слой SiC. Наклон в диапазоне каналов 280 – 300 и увеличение интенсивности выхода обратно-рассеянных ионов в области каналов 120 – 140, связанных с наличием атомов углерода в структуре, свидетельствует о формировании слоев SiC. Небольшое увеличение пикового выхода в области каналов 100 – 150 связано, вероятно, с изменением концентрации углерода при увеличении размера пор в подложке. Изменения спектров в области каналов 220 – 300 свидетельствуют об увеличении толщины слоя SiC при использовании подложек с буферным пористым кремнием. При анализе спектров RBS образцов было установлено, что в зависимости от морфологии приповерхностных слоев Si подложки толщина пленки карбида кремния варьируется от 50 до 350 нм.

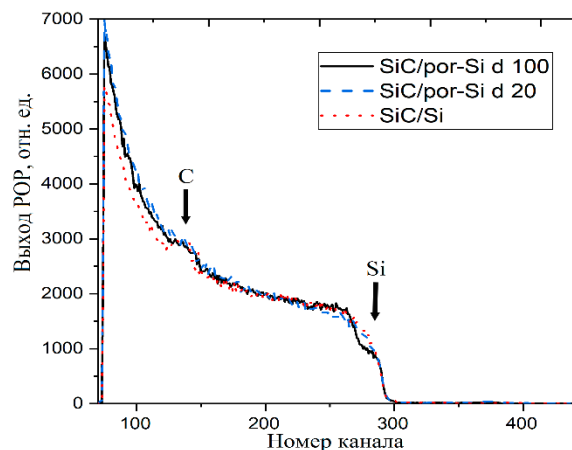


Рис. 1. Спектры RBS структур SiC/Si, сформированных вакуумной карбидизацией при температуре 1100 °С в течение 10 мин

Fig. 1. RBS spectra of SiC/Si structures, formed by vacuum carbidization at temperature 1100 °С for 10 min

Методами ПЭМ и ПЭД было установлено, что вакуумная карбидизация кремния с буферными слоями пористого кремния при 1100 °С в течение 10 мин приводит к формированию слоев SiC. Так, на ПЭД изображении, представленном на рис. 2, а, можно выделить рефлексы {111} и {220}, обусловленные дифракцией электронов на кубическом полиците (3С-SiC) карбида кремния ($a = 0,435$ нм). Однако присутствие концентрических колец (111), (220), (311) свидетельствует о наличии поликристаллической фазы SiC. Из анализа дифракционных картин структур SiC/por-Si можно сделать вывод о том, что сформированные слои SiC представляют собой смесь моно- и поликристаллических фаз 3С-SiC. На присутствие двумерных дефектов во всех возможных (111) плоскостях указывают экстрарефлексы, обозначенные как «двойники SiC» на рис. 2. Эти рефлексы являются результатом дифракции на вторичных двойниках и имеют индексы типа $1/3\{422\}$ и $1/3\{115\}$.

На рис. 2, б приведено ПЭМ изображение, полученное в светлом поле на структуре SiC/por-Si. На изображении можно выделить области с полосчатым контрастом (указаны стрелками). Согласно исследованиям дефектов в эпитаксиальных слоях кремния [10], подобные области с характерным контрастом, вероятно, являются микродвойниковыми ламелями SiC.

На рис. 3 представлены РЭМ изображения образцов SiC/por-Si в поперечном сечении. В некоторых порах произошло образование так называемого «бутылочного горла». Вблизи поверхности поры имеют меньший диаметр, чем в глубине подложки [9]. Данный эффект можно объяснить спеканием поры при термической обработке в вакууме. При этом в поре происходит образование зерен карбида кремния с последующим зарастанием поры, что согласуется с механизмом зародышеобразования карбида кремния в por-Si, предложенном в [11].

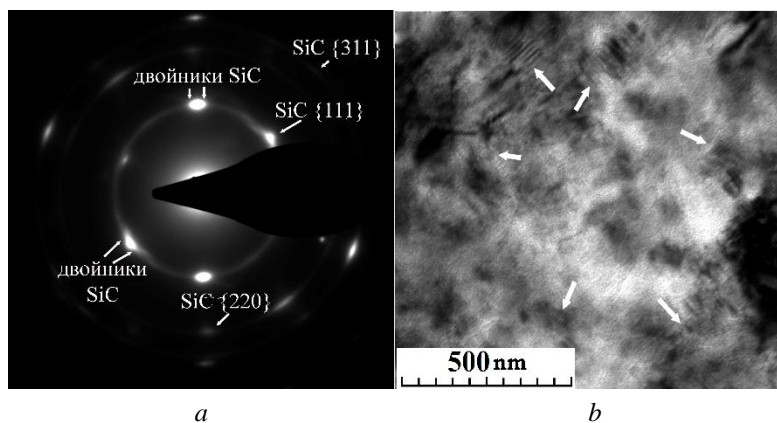


Рис. 2. Структура SiC/Si, сформированная вакуумной карбидизацией при температуре 1100 °С в течение 10 мин: *a* – дифракционная картина ПЭД; *b* – снимок ПЭМ в режиме светлого поля
Fig. 2. SiC / Si structure formed by vacuum carbidization at 1100 °C for 10 min: *a* – PED diffraction pattern; *b* – TEM image in bright field mode

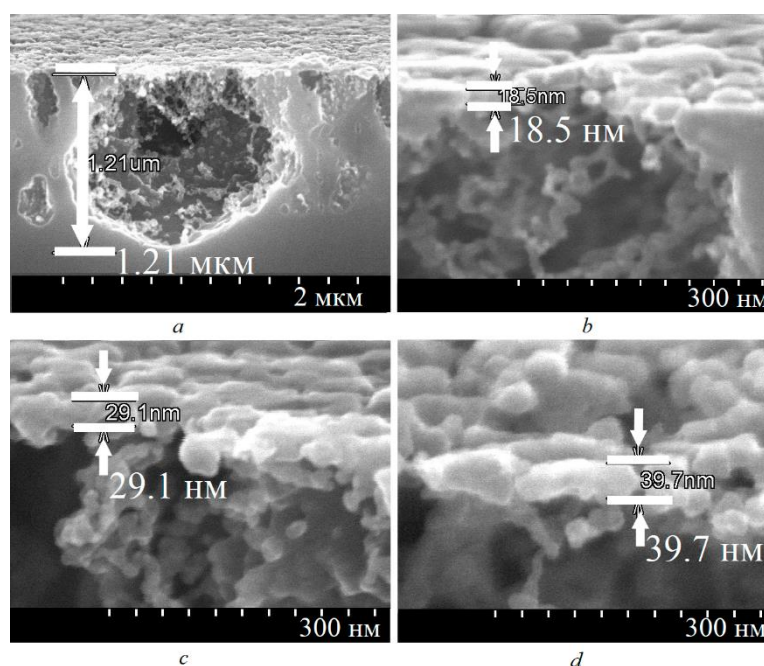


Рис. 3. Микрофотографии РЭМ структур SiC/por-Si: *a* – изображение поры после карбидизации; *b* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 20 нм; *c* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 50 нм; *d* – изображение зерен SiC на буферном слое por-Si с диаметром пор 100 нм

Fig. 3. SEM micrographs of SiC / por-Si structures: *a* – pore image after carbidization; *b* – image of SiC grains on por-Si buffer layer with a pore diameter of 20 nm; *c* – image of SiC grains on a por-Si buffer layer with a pore diameter of 50 nm; *d* – image of SiC grains on a por-Si buffer layer with a pore diameter of 100 nm

Слои SiC, сформированные на пористом кремнии, имеют выраженную зернистую структуру. Размер зерен SiC изменяется с увеличением диаметра пор буферного слоя. Вероятно, это связано с диффузионными процессами перестройки поверхности пористой структуры [11]. Толщина зерен для структур с семейством пор заданного размера варьируется от 18 до 40 нм. При этом размер зерен, при прочих одинаковых условиях, зависит и от ориентации подложки. Так, на кремниевой подложке с буферным слоем пористого кремния и с ориентацией (100) размер сформированных зерен SiC составляет 29,1 нм, а на подложке с ориентацией (111) размер зерен равен 54,2 нм.

На рис. 4 представлено РЭМ изображение образца, сформированного при вакуумной карбидизации макропористого кремния с диаметром пор 1,5 мкм. Глубина пористого слоя при карбидизации уменьшилась с 10 до 4,94 мкм. Вероятно, это связано с диффузией кремния из слоя por-Si при формировании SiC и зарастанием пор. При карбидизации в слое пористого

кремния произошло зарастание пор сверху. Согласно данным исследования термодинамического расчета роста SiC [12], в результате увеличения концентрации углерода в слое пористого кремния в порах происходит формирование зерен. Постепенно сформированные в порах зерна перерастают в сплошные слои SiC. Размер зерен SiC на поверхности сформированной структуры SiC/por-Si составляет 45,6 нм.

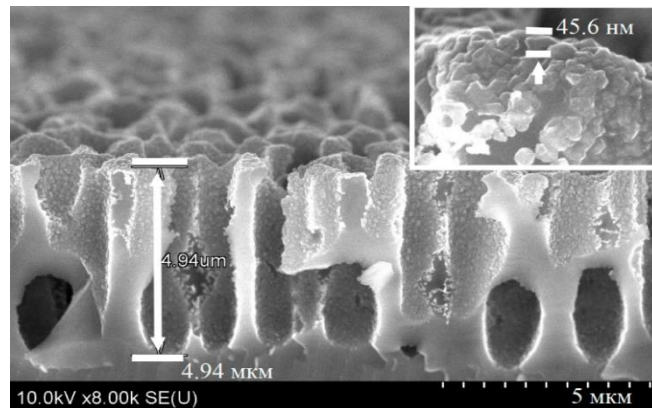


Рис. 4. Изображение РЭМ структуры SiC/por-Si с диаметром пор 1,5 мкм, сформированной вакуумной карбидизацией при 1100 °С в течение 10 мин

Fig. 4. SEM image of SiC/por-Si structure with a pore diameter of 1.5 μm formed by vacuum carbidization at 1100 °C for 10 min

Из анализа спектров POP (рис. 1) и оценки размеров зерен на РЭМ-изображениях (рис. 3, 4) следует, что при увеличении размера пор в буферном слое por-Si происходит увеличение толщины сформированного слоя SiC. При аналогичном режиме вакуумной карбидизации кремния без буферных слоев происходит формирование слоев SiC толщиной не более 70 нм. Вероятно, это связано с увеличением коэффициентов диффузии [12] и уменьшением энергии активации роста зерен SiC при увеличении размеров пор в буферном слое [11]. Согласно исследованию термодинамики зародышеобразования SiC [11], увеличение площади стенок пористого слоя влияет на скорость образования SiC. Согласно данным исследования [13], древовидная форма пор с большим количеством боковых ответвлений от центральных каналов пор является отличительной особенностью мезопористого слоя, сформированного на кремнии с ориентацией (111). В свою очередь, нанопористый кремний с диаметром пор 20 нм имеет губчатую структуру. Полученные данные позволяют предположить, что при карбидизации пористого кремния с древовидной формой пор, вероятно, на первых этапах происходит формирование зародышей SiC, в том числе и в боковых ответвлениях пор. С другой стороны, размер пор влияет на время, необходимое для полного зарастания пористого кремния слоями SiC. Так, образцы, сформированные на мезопористом кремнии (рис. 3), практически полностью покрыты слоем SiC. В свою очередь, на макропористом кремнии (рис. 4) за то же время карбидизации (10 мин) зарастание пор на поверхности сплошным слоем не происходит.

Толщина сформированных слоев SiC зависит и от ориентации подложки. Так, методом РЭМ установлено, что при вакуумной карбидизации на пористом буферном слое размер зерен SiC на подложке с ориентацией (111) равен 54,2 нм, в то время как для образца, сформированного на подложке с ориентацией (100), равен 18,5 нм. Разница в скорости роста SiC в зависимости от ориентации Si подложки с буферным слоем por-Si коррелирует с данными исследования [14]. Такую существенную разницу в размере сформированных зерен SiC можно объяснить разницей коэффициентов диффузии кремния.

Другой особенностью карбидизации por-Si является изменение размеров и коагуляция новых пор. Согласно исследованию карбидизации пористого кремния [11], поры подвержены зарастанию и коагуляции. При термической карбидизации происходит уменьшение размеров поры (рис. 3, а), что связано с формированием слоев SiC, спеканием кремния с образованием «бутылочного горла», а также с образованием в поре нанокристаллов SiC. Формирование в порах нанокристаллов SiC является интересной особенностью карбидизации пористого кремния, которая наблюдается только в образцах с буферным слоем por-Si, что согласуется с данными теоретических исследований зародышеобразования SiC [11].

Заключение

В работе исследованы особенности формирования слоев SiC на буферных слоях пористого кремния при вакуумной карбидизации в течение 10 мин при 1100 °С в остаточной атмосфере углеводородов. Результаты исследований показали, что использование буферных слоев пористого кремния позволяет получать слои SiC большей толщины, чем на чистом Si при аналогичных условиях вакуумной карбидизации. Методом РОР установлено, что при карбидизации кремния с буферным пористым слоем происходит формирование слоев SiC с толщиной от 50 до 350 нм. Методом ПЭД установлено формирование кубического кремния в виде двухфазной системы. Сформированная пленка SiC на мезопористом буферном слое является преимущественно поликристаллической. Методом РЭМ установлено, что в результате карбидизации в пористом слое образовались зерна карбида кремния и произошло частичное зарастание пор пленкой SiC. Размер пор в буферном слое влияет на размер образующихся кристаллических зерен карбида кремния и варьируется от 18 до 60 нм.

Список литературы

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40:56-76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Severino A., Locke C., Anzalone R. 3C-SiC Film Growth on Si Substrates. *ECS Transactions*. 2011;35(6):99. DOI: 10.1149/1.3570851.
3. Skibarko I.A., Milchanin O.V., Gaiduk P.I. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1999;166:465-469.
4. Chen J., Steckl A.J. Molecular beam epitaxy growth of SiC on Si (111) from silacyclobutane. *J. of Vacuum Science & Technology. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1998;16:1305. DOI:10.1116/1.590006.
5. Zimbone M., Mauceri M., Litrico G., Barbagioanni E.G., Bongiorno C., La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *J. of Crystal Growth*. 2018;498:248-257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
6. Bosi M., Ferrari C., Nilsson D., Ward P.J. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *Cryst. Eng. Comm.* 2016;18:7478-7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
7. Anzalone R., Piluso N., Reitano R., Alberti A., Fiorenza P., Salaniti M., Severino A., Lorenti S., Arena G., Coffa S., La Via F. Voids-free 3C-SiC/Si interface for high quality epitaxial layer. *Materials Science Forum*. 2016.
8. Shimizu H., Hisada K. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates. *Materials Science Forum*. 2003;433-436:229-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.433-436.229.
9. Chubenko E., Redko S., Dolgiy A., Bandarenka H., Bondarenko V. Porous silicon as substrate for epitaxial films growth. Porous Silicon: From Formation to Applications. *Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2016;3:141-162.
10. Booker G.R Crystallographic imperfections in silicon. *Disc. Farad. Soc.* 1964;38:298-304.
11. Нагорнов Ю.С. Термодинамика зародышеобразования карбида кремния в процессе карбонизации нанопористого кремния. *Журнал технической физики*. 2015;85:5.
12. Чан Х.К., Поветкин А.Д., Кольцова Э.М., Петухов Д.И., Елисеев А.А. Математическая модель массопереноса в поре на основе молекулярной динамики с применением алгоритма параллельных вычислений. *Technical Sciences. Fundamental research*. 2012;3:432-436.
13. Долгий А.Л., Клышко А.А., Бондаренко В.П. Электрохимическое осаждение никеля на макро- и мезопористый кремний. *Доклады БГУИР*. 2009;1(39):65-70.
14. Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V., Grashchenko A.S., Soshnikov I.P., Boiko M.E., Sharkov M.D., Dyadenchuk A.F. Growth of SiC films by the method of substitution of atoms on porous Si (100) and (111) substrates. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;36:39-52.

References

1. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2015;40:56-76. DOI: 10.1080/10408436.2014.940440.
2. Severino A., Locke C., Anzalone R. 3C-SiC Film Growth on Si Substrates. *ECS Transactions*. 2011;35(6):99. DOI: 10.1149/1.3570851.
3. Skibarko I.A., Milchanin O.V., Gaiduk P.I. Structural and optical properties of GaN/SiC/Si heterostructures grown by MBE. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1999;166:465-469.

- Chen J., Steckl A.J. Molecular beam epitaxy growth of SiC on Si (111) from silacyclobutane. *J. of Vacuum Science & Technology. B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. 1998;16:1305. DOI:10.1116/1.590006.
- Zimbone M., Mauceci M., Litrico G., Barbagioanni E.G., Bongiorno C., La Via F. Protrusions reduction in 3C-SiC thin film on Si. *J. of Crystal Growth*. 2018;498:248-257. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.06.003.
- Bosi M., Ferrari C., Nilsson D., Ward P.J. 3C-SiC carbonization optimization and void reduction on misoriented Si substrates: from a research reactor to a production scale reactor. *Cryst. Eng. Comm.* 2016;18:7478-7486. DOI: 10.1039/c6ce01388k.
- Anzalone R., Piluso N., Reitano R., Alberti A., Fiorenza P., Salanitri M., Severino A., Lorenti S., Arena G., Coffa S., La Via F. Voids-free 3C-SiC/Si interface for high quality epitaxial layer. *Materials Science Forum*. 2016.
- Shimizu H., Hisada K. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates. *Materials Science Forum*. 2003;433-436:229-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.433-436.229.
- Chubenko E., Redko S., Dolgiy A., Bandarenka H., Bondarenko V. Porous silicon as substrate for epitaxial films growth. Porous Silicon: From Formation to Applications. *Optoelectronics, Microelectronics, and Energy Technology Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2016;3:141-162.
- Booker G.R. Crystallographic imperfections in silicon. *Disc. Farad. Soc.* 1964;38:298-304.
- Nagornov Yu.S. [Thermodynamics of silicon carbide nucleation during the carbonization of nanoporous silicon]. *Technical Physics*. 2015;85:5.
- Tran H.Q., Povetkin A.D., Koltsova E.M., Petukhov D.I., Eliseev A.A. [Mathematical model of mass transfer in the pore based on molecular dynamics using the algorithm of parallel computing]. *Technical Sciences. Fundamental research*. 2012;3:432-436.
- Douhi A.L., Klyshko A.A., Bondarenko V.P. [Electrochemical deposition of nickel on macro- and mesoporous silicon]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2009;1(39):65-70.
- Kidalov V.V., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V., Grashchenko A.S., Soshnikov I.P., Boiko M.E., Sharkov M.D., Dyadenchuk A.F. Growth of SiC films by the method of substitution of atoms on porous Si (100) and (111) substrates. *Materials Physics and Mechanics*. 2018;36:39-52.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лобанок М.В., аспирант кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Прокопьев С.Л., старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Завацкий С.А., аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гайдук П.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета.

Information about the authors

Labanok M.V., Postgraduate at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Prakopyeu S.L., Senior Lecturer at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Zavatski S.A., Postgraduate at the Micro- and Nanoelectronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of Laboratory 4.3 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gaiduk P.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department of the Belarusian State University.

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Курчатова, 5,
Белорусский государственный университет;
тел. +375 29 654-09-53;
e-mail: mishalobanok@gmail.com
Лобанок Михаил Владимирович

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 5,
Belarusian State University;
tel. +375 29 654-09-53;
e-mail: mishalobanok@gmail.com
Labanok Mikhail Vladimirovich