

На правах рукописи



**ТЕКУТЬЕВА** Вероника Олеговна

**ОРИЕНТАЦИЯ И СУБСТРУКТУРА  
ПЛЕНОК КАРБИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ,  
СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель

**Солдатенко Сергей Анатольевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры физики ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
технический университет»

Официальные оппоненты:

**Рябцев Станислав Викторович**,  
д. ф.-м. н., директор научно-  
исследовательского института физики  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный университет»

**Васильев Александр Леонидович**,  
к. ф.-м. н., в. н. с. Курчатовского комплекса  
НБИКС-природоподобных технологий  
ФГБУ Национальный исследовательский  
центр «Курчатовский институт»,

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
«Институт проблем машиноведения  
Российской академии наук»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «22» декабря 2026 г. в 13<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, Московский просп., 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «23» октября 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Стогней Олег Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В фундаментальном аспекте интерес к ориентационной, структурной и субструктурной организации тонких пленок карбида кремния, выращенных на монокристаллической подложке в ходе твердофазного синтеза, обусловлен решением одной из задач кристаллофизики и кристаллохимии – установление закономерностей ориентированного роста и формирования субструктуры в системах с большим структурным несоответствием.

В практическом аспекте интерес к данной тематике обусловлен возможностью использования в микроэлектронике эпитаксиальных гетероструктур  $\beta$ -SiC на кремниевой подложке в качестве альтернативы дорогостоящим монокристаллическим подложкам карбида кремния. (С.А. Кукушкин). Современные требования микроэлектроники к подобным гетероструктурам – высокое ориентационное совершенство эпитаксиального слоя и одновременно низкая шероховатость его поверхности. Выполнить в полной мере эти требования непростая задача. С одной стороны для достижения строгой ориентации необходимы высокие температуры и длительность синтеза, с другой, для уменьшения шероховатости поверхности необходимы пониженные температуры и малые времена синтеза.

Большинство исследований последних лет структурной и субструктурной организации тонких пленок карбида кремния в ходе твердофазного синтеза касались технологических аспектов проблемы. Проводился поиск прекурсоров и параметров, способных понизить температуру синтеза. Особое внимание уделялось методам подготовки поверхности кремниевой подложки. Основные положения такого подхода наиболее полно отражены в обзорах Северино, Ла Виа, Кукушкина и др. Значительно меньше внимания уделялось роли в структурообразовании тонких пленок процессам эпитаксии на начальных этапах карбидизации (формирование буферного слоя SiC). В настоящий момент очевиден явный недостаток системных данных о закономерностях сопряжения на межфазной границе пленка-подложка и особенностях субструктуры буферного слоя  $\beta$ -SiC.

Высокую эффективность в твердофазном синтезе широкого спектра тонкопленочных гетероструктур показал метод фотонной активации твердофазных процессов мощным излучением ксеноновых ламп. Внедрению метода фотонной обработки способствовали следующие его особенности:

- широкий спектр излучения;
- возможность обработки в различных средах (вакуум, воздух, инертные и активные газы);

- масштабируемость для обработки поверхностей большой площади;
- точное дозирование времени воздействия;
- пространственная локализация энергии;
- высокая скорость нагрева, обеспечивающая подавление побочных процессов с низкой температурной зависимостью.

Несмотря на успешное применение фотонной обработки (ФО) для синтеза широкого спектра материалов (В.М. Иевлев, С.А. Солдатенко и др.), механизм обработки и его ассистирование в процессе формирования эпитаксиальных пленок  $\beta$ -SiC на кремнии остаётся до конца не ясным.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных исследований, утвержденных Президиумом РАН (раздел 1.1 – «Физика конденсированных сред и материалы нового поколения»).

### **Объекты и предмет исследования**

Объектом исследования являются тонкие пленки  $\beta$ -SiC на кремниевой подложке, полученные карбидизацией поверхности подложки в углеродсодержащей среде при термической обработке (ТО) и ФО;

Предметом исследования является структурная и субструктурная организация тонких пленок  $\beta$ -SiC в зависимости от закономерностей эпитаксии и хемозепитаксии, а также от способов подвода энергии.

### **Методы исследований**

Достоверность результатов обеспечена применением высокоразрешающих методов:

- дифракции быстрых электронов (ДБЭ, ЭГ-100М);
- просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, ЭМВ-100 БР, Carl Zeiss Libra 120, Philips 420 ST EM);
- оже-электронной спектроскопии (РНИ-551, РНИ-660);
- ИК-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

**Основной целью диссертационной работы** является установление закономерностей и особенностей ориентированного роста плёнок карбида кремния на кремнии при фотонной обработке некогерентным излучением ксеноновых ламп в углеродсодержащей среде.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- установление основных закономерностей структурных, субструктурных и ориентационных превращений при твердофазном синтезе пленок карбида кремния, активированном фотонной обработкой;
- анализ ориентаций и зеренной структуры эпитаксиальных тонких пленок  $\beta$ -карбида кремния, с позиций кристаллогеометрических критериев;

– установление влияния подготовки поверхности подложки кремния в формировании эпитаксиальных пленок  $\beta$ -SiC при вакуумной конденсации углерода;

– оценка действия фотонной активации процессов в синтезе пленки  $\beta$ -SiC на кремниевой подложке.

#### **Научная новизна работы:**

Методами ПЭМ, ДБЭ и АСМ установлены особенности структурных и ориентационных превращений при твердофазном синтезе пленок SiC на кремнии. Впервые установлено, что:

1. При температуре 1125 К на поверхности вакуумного скола (111) Si в потоке углерода формируется сплошная эпитаксиальная пленка  $\beta$ -SiC с низкой шероховатостью, тогда как на поверхности скола в воздухе фаза  $\beta$ -SiC образуется локально в местах пробоя естественного оксида подложки.

2. При фотонной активации синтеза пленки  $\beta$ -SiC эффективная энергия активации процесса рекристаллизации зерен меньше, чем при термической активации синтеза в эквивалентных температурных условиях.

3. В процессе карбидизации подложки кремния первой образуется метастабильная фаза  $\text{Si}_5\text{C}_3$ . Последующий бездиффузионный фазовый переход  $\text{Si}_5\text{C}_3 \rightarrow \beta\text{-SiC}$  и действующие кристаллогеометрические критерии эпитаксии обуславливают блочно-мозаичную структуру пленок  $\beta$ -SiC с высокой плотностью дефектов упаковки.

4. Основное ориентационное соотношение отвечает одновременно двум кристаллогеометрическим критериям эпитаксии и обусловлено ростовой природой. Дополнительные ориентации образуются в результате механического двойникования при релаксации термических напряжений.

#### **Практическая значимость работы**

Показана возможность формирования сплошных эпитаксиальных пленок  $\beta$ -SiC на (111) Si с низкой шероховатостью для создания высококачественных гетероструктур широкозонных полупроводников.

– разработан способ получения нанокристаллических эпитаксиальных пленок SiC на кремнии для использования в микроэлектронике (запатентовано);

– определены оптимальные технологические режимы синтеза тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния методом ФО.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Влияние ювенильной поверхности подложки в процессе ее карбидизации проявляется в том, что на поверхности скола в вакууме формируется сплошная эпитаксиальная пленка  $\beta$ -SiC, тогда как на поверхности скола на воздухе карбидообразование происходит при той же температуре в местах пробоя естественного оксида в виде островков  $\beta$ -SiC.

2. Эффект фотонной активации твердофазного синтеза пленок  $\beta$ -SiC на кремниевой подложке проявляется в меньшем значении эффективной

энергии активации процесса рекристаллизации зёрен при ФО по сравнению с БТО (1,3 эВ при ФО и 1,8 эВ при БТО).

3. Пороговые значения температуры при ТО и плотности энергии импульса при ФО для начала образования фазы карбида кремния на кремниевой подложке (111) Si составляют:  $T = 1125 \text{ K}$  и  $E_{\text{и}} = 240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-1}$  соответственно.

4. Многоориентационный характер хемозпитаксии при твердофазном синтезе эпитаксиальных пленок  $\beta\text{-SiC}$  на (111) Si предопределяет их высокую дисперсность. Основные ориентационные соотношения соответствуют двухосной текстуре в параллельной и двойниковой ориентации. Дополнительные ориентации возникают вследствие релаксации термического напряжения в гетероструктуре путем механического двойниковогоания.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов обеспечена проведением исследований с использованием высокоразрешающих методик дифракции быстрых электронов, просвечивающей электронной микроскопии, а также современных взаимодополняющих методов анализа: оже-электронной спектроскопии, ИК-спектрометрии и атомно-силовой микроскопии.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж, 2015), «Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования» (Воронеж, 2015), «Развитие личности – как стратегия современной системы образования» (Воронеж, 2016), «Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона» (Воронеж, 2016), «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» (Тамбов, 2016), «Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация и материалы будущего» (Иваново, 2016), «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2016), «Актуальные проблемы вооруженной борьбы войск (Коллективных сил) Организации Договора о коллективной безопасности в воздушно-космической сфере» (Воронеж, 2016), «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2016), «НАНО-2016» (Москва, 2016), «Современное состояние, актуальные проблемы и перспективные направления развития авиационного радиоэлектронного оборудования» (Воронеж, 2016), «Новая наука: стратегии и векторы развития» (Магнитогорск, 2017), «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2017), «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2017), «Авиакосмические технологии» «АКТ-2017» (Воронеж, 2017), «Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования» (Воронеж, 2017), «19-я Всероссийская молодежная

конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике»(Санкт-Петербург, 2017), «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, 2018), «Химические проблемы современности»(Донецк, 2018), «Молодежные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина» (Воронеж, 2018), «Современные методы и технологии создания и обработки материалов»(Минск, 2018), «Авиакосмические технологии» «АКТ-2018» (Воронеж, 2018), «VIII Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 100-летию Воронежского государственного университета. Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах» «ФАГРАН-2018» (Воронеж, 2018), «Взгляд молодых на проблемы региональной экономики - 2018» (Тамбов, 2018), «Устойчивое развитие науки и образования» (Москва, 2020), «Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ» (Воронеж, 2023), «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2023), «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике, КЭЛТ – 2023» (Черноголовка, 2023).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 29 работ, **4 статьи** из которых – в ведущих рецензируемых изданиях.

В том числе **3 статьи**, индексируемые в базах данных Web of Science:

1. Kuz'mina V.O. (Tekutyeva V.O.) Influence Sputtering Conditions on Electrical Characteristics of Si-LiNbO<sub>3</sub> Heterostructures Formed by Radio-Frequency Magnetron Sputtering / M. Sumets, V. Ievlev, A. Kostyuchenko // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2014. – V.603:1. – pp. 202-215.

2. Tekutyeva V.O. Activation energy of subgrain growth process and morphology evolution in  $\beta$ -SiC/Si(111) heterostructures synthesized by pulse photon treatment method in a methane atmosphere / A.A. Sinelnikov, S.A. Soldatenko, M. Sumets // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2018. – V.29. – P. 20097-20103.

3. Tekutyeva V.O. Substructure of  $\beta$ -SiC Films Synthesized on the Surface of Vacuum and Air Cleavage of Mono-Si / S. A. Soldatenko, A. A. Lukin // Surface Engineering and Applied Electrochemistry – 2025. – V.61. – No. 3. – pp. 385–392.

**1 работа** в научном издании, рекомендованном ВАК:

4. Текутьева В.О. Процессы роста субзерен и развитие морфологии при синтезе пленок  $\beta$ -SiC на Si(111) в атмосфере метана / С.А. Солдатенко, А.А. Синельников // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2018. – № 22-24 (270-272). – С. 96–106.

**1 патент РФ** – «Способ синтеза нанокристаллического карбида кремния на кремниевой подложке» Патент № 2022110697 от 07.02.2023г.

### **Личный вклад автора**

Определение направления исследования и постановка задач выполнены первым научным руководителем – академиком РАН, д.ф.-м.н., профессором В. М. Иевлевым. Синтез гетероструктур  $\beta$ -SiC/Si осуществляли методом ИФО на установке УОЛП-1М в ВГТУ под руководством доцента С.А. Солдатенко. Ориентацию, структуру и субструктуру пленок SiC исследовали методами ПЭМ, ДБЭ и ДБЭО на электронном микроскопе Carl Zeiss Libra 120 (ЦКП НО ВГУ, к.ф.-м.н. А. А. Синельников) и электронографе ЭГ-100 (ВГТУ, к.ф.-м.н. С. А. Солдатенко). Анализ и обработка данных проведена автором. Элементный состав карбидизированной поверхности кремния определяли методом Оже-электронной спектроскопии (ЭОС) на спектрометре ЭСО-3 с анализатором DESA-100 (ВГУ, к.ф.-м.н., доцент А. И. Донцов). Рельеф и шероховатость поверхности образцов исследовали методами АСМ на атомно-силовом микроскопе (NT-MDT Solver P47, ВГТУ, к.ф.-м.н. А. В. Костюченко) с последующим моделированием экспериментальных данных лично автором. Моделирование и оценка эффекта фотонной активации диффузионных процессов проведена под руководством д.ф.-м.н., профессора ВГУ Б. М. Даринского. Данные по ИК-спектроскопии получены совместно с доцентом А. Н. Лукиным в ЦКП НО ВГУ. Обсуждение результатов и написание статей проводилось совместно с к.ф.-м.н., С. А. Солдатенко. Формулировка выводов по итогам проделанной работы, а также представление результатов на международных и всероссийских научных конференциях осуществлялись лично автором.

Настоящая работа была выполнена на кафедре физики твердого тела ФГБОУ Воронежского государственного технического университета и лаборатории электронной микроскопии на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 41 рисунок, 4 таблицы, список литературы, который содержит 136 наименований, включая публикации по теме диссертации.

Работа выполнена в рамках проектов Ведомственной научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 37885), Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (контракт № 02.513.11.3159), тематического плана НИР Воронежского государственного технического университета по научному направлению «Физика, химия и технология конструкционных и функциональных материалов различного назначения» по темам «Электронно-микроскопические исследования структуры элементной базы интегральных схем и исследование перспективных

схемотехнических решений нескоммутированных логических матриц” (№ГР01840016744), “Электронно-микроскопические исследования влияния ионной имплантации, термического и импульсного отжига на структуру и свойства элементов БИС” (№ГР01850031032), “Перспективные тонкопленочные материалы для электронной техники” (№ГР01960009745) и поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (№ 11-03-12140-офи-м), программой грантов Президента для поддержки научных школ (ШН-7098.2006.3 и НШ-4828.2010.3).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** к диссертационной работе обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, определена её научная новизна, описана теоретическая и практическая значимость полученных результатов и представлены научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит аналитический обзор закономерностей структурной и субструктурной организации тонких пленок карбида кремния на кремниевой подложке. Анализ исследований в области синтеза тонких плёнок  $\beta$ -SiC на Si показал, что к настоящему моменту вследствие большого размерного несоответствия при карбидизации монокристалла кремния в независимости от методов синтеза на поверхности формируется нанокристаллическая ориентированная пленка  $\beta$ -SiC с высокой плотностью дефектов упаковки, механизм образования которых не исследован. Практически отсутствуют данные об эффективности синтеза тонких пленок  $\beta$ -SiC на Si методом ФО.

**Во второй главе** дано описание предварительной подготовки поверхности подложки (111)Si и параметрам импульсной фотонной обработки поверхности пластин Si (111) карбидизацией в газовой атмосфере метана.

Во второй части главы даётся краткое описание методов и оборудования, которые использовались для исследования структуры и субструктуры гетероструктур  $\beta$ -SiC/Si. Приводятся основные характеристики и параметры подготовки образцов для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и Оже-электронной спектроскопии.

Для оценки эффекта ФО в активации процессов карбидообразования на поверхности кремния облучение проводилось только с одной стороны, при этом исходили из того, что в режиме теплового баланса температурные режимы на обеих сторонах практически идентичны (температурное поле по толщине пластины кремния однородно, разница температур не превышает 5 К). В этом случае на облучаемой стороне реализуется фотонная активация синтеза, в то время как на обратной стороне – термическая активация при быстром отжиге (БТО).

Температуры синтеза на облучаемой стороне пластины для всех значений  $E_p$  рассчитывали методом интерполяции по двум известным точкам: температуры плавления эвтектики в системе Si-C ( $T_m = 1677$  К) при  $E_p = 284$  Дж·см<sup>-2</sup> и пороговой температуры синтеза ( $T = 1273$  К) при  $E_p = 240$  Дж·см<sup>-2</sup>. В этом температурном интервале для кремниевых пластин толщиной менее 1 мм при ИФО секундного диапазона функция  $T(E_p)$  хорошо интерполируется зависимостью  $T = T_m(1 - \beta(1 - E_p/E_{pm}))^{1/4}$ , где  $T_p$  – температура плавления эвтектики Si-C,  $E_p$  – плотность энергии излучения в пакете импульсов,  $E_{pm}$  – плотность энергии излучения при достижении температуры плавления, коэффициент пропорциональности  $\beta = 4.31$  (определяется из условия  $T = 1273$  К при  $E_p = 240$  Дж·см<sup>-1</sup>). Температуры на не облучаемой стороне в этом же диапазоне  $E_p$  принимали на 5 К ниже.

Эффективную энергию активации рекристаллизации и роста субзерен пленки SiC оценивали по температурной зависимости среднего размера зерна ( $R(T)$ ) и ( $D(T)$ ). Время обработки во всех случаях одинаково.

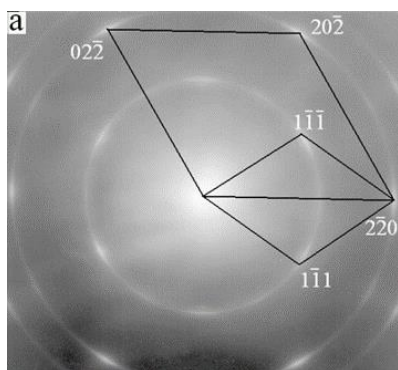
В третьей главе представлены результаты синтеза пленок  $\beta$ -SiC на (111)Si методом ТО и ФО.

Синтез методом ТО. Установлено пороговое значение образования SiC на моно-Si в атмосфере метана, которое составляет 1125 К. Для выявления влияния ювенильной поверхности проведен сравнительный эксперимент синтеза пленки  $\beta$ -SiC на (111)Si в потоке углерода на поверхности скола (111)Si в вакууме (ювенильная поверхность) и поверхности скола, предварительно произведенного на воздухе.

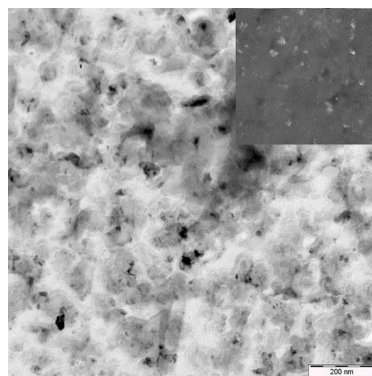
Поверхность вакуумного скола На рисунке 1а, б представлены электронограмма общей дифракции и ПЭМ-изображения, характеризующие фазовый состав и субструктуру пленки, сформированной на ювенильной поверхности (111)Si при  $T = 1125$  К. Анализ электронограммы показывает, что на поверхности образуется ориентированная пленка фазы  $\beta$ -SiC с параметрами кристаллической решетки  $a = 0.436 \pm 0.005$  нм. Субструктура пленки представляет собой нанокристаллическую плёнку с двухосной текстурой, отвечающей основному ориентационному соотношению:

$$(111), [1\bar{1}0] \text{ SiC} \parallel (111), [1\bar{1}0] \text{ Si} \quad (1)$$

Наряду с ориентацией (1) определены дополнительные двухосные текстуры  $\langle 115 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$ . Азимутальное размытие текстур составляет около  $10^\circ$ .



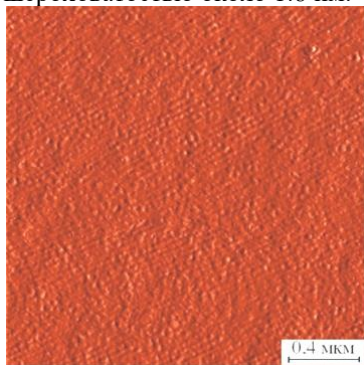
**а**



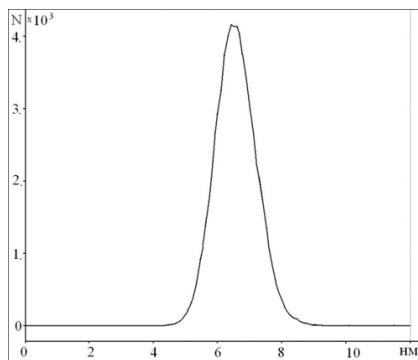
**б**

Рисунок 1 – Электронограмма общей дифракции (а). Светлопольное и темнопольное (в отражении 111) ПЭМ-изображения (б) от пленки, сформированной на ювенильной поверхности (111) Si при  $T = 1125$  K

Результаты АСМ-исследования морфологии карбидизированной ювенильной поверхности скола (рисунок 2) хорошо согласуются с результатами ПЭМ и показывают, что при  $T = 1125$  K на поверхности раскола формируется сплошная пленка со средним перепадом высот 6.5 нм и шероховатостью около 1.8 нм.



**а**



**б**

Рисунок 2 – АСМ-скан (а) и гистограмма распределения высот (б) поверхности вакуумного скола, карбидизированной при  $T = 1125$  K

### Поверхность скола (111)Si на воздухе

На рисунке 3 представлено СЭМ-изображение, характеризующее морфологию поверхности скола (111)Si на воздухе, карбидизированной при  $T = 1125$  K.

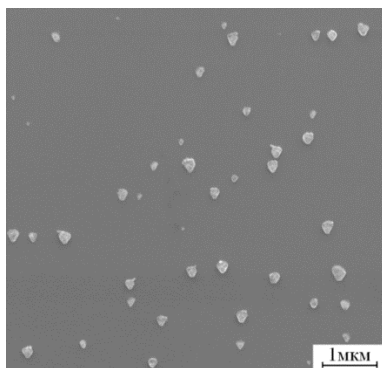


Рисунок 3 – СЭМ-изображения пленок  $\beta$ -SiC на поверхности раскола (111) Si на воздухе, сформированных при  $T = 1125$  К.

При  $T = 1125$  К карбидная фаза представлена островками с поперечным размером 150 нм с заметной кристаллографической огранкой.

Островки высотой до 110 нм зарождаются на террасах в местах пробоя тонкой пленки естественного оксида ( $\text{SiO}_2$ ). Точки пробоя оксида хорошо видны на АСМ-скане в режиме DFL (рисунок 4). Глубина ямок составляет около 2 нм, ширина террас – около 2 мкм, высота террас достигает 18 нм.

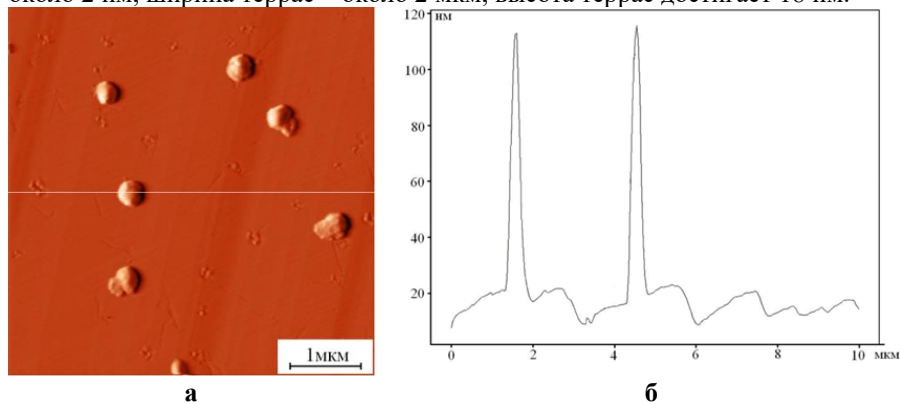
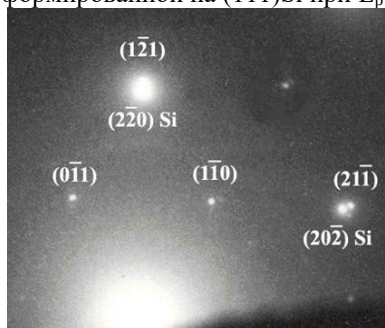


Рисунок 4 – АСМ-скан в режиме постоянной силы (DFL) (а) и перепад высот по линии скана (б) поверхности, карбидизированной при  $T = 1123$  К

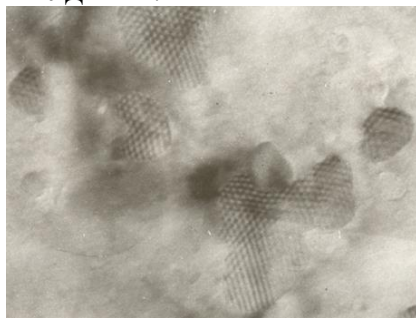
Присутствие на поверхности слоя естественного оксида подтверждается анализом Оже-спектра. Так, в приповерхностных слоях скола (111)Si (глубина около 1 нм) содержится: 60% – углерода, 35% – кремния и около 5% – кислорода. Пик OKLL (503 эВ) соответствует аморфной форме  $\text{SiO}_2$ . Положение и вид пиков C KLL (269 эВ) и Si LMM (93 эВ) свидетельствует об аморфной форме углерода и кремния. Таким образом, по данным

Оже-спектоскопии поверхность скола на воздухе покрыта слоем естественного оксида, аморфным углеродом и аморфным кремнием. Последний вероятно поступает из окон пробоя оксида кремниевой подложки.

**Синтез методом фотонной обработки** Методами дифракции электронов, СЭМ и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа поверхности установлено, что до  $E_p = 240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$  на поверхности пластин кремния образуется тонкая аморфная пленка углерода. Пороговая величина  $E_p$  для синтеза SiC составила около  $240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . На рисунке 5 представлены микроэлектроннограмма (а) и электронномикроскопическое изображение (б) гетероструктуры, сформированной на (111)Si при  $E_p$  около  $240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ .



**а**



**б**

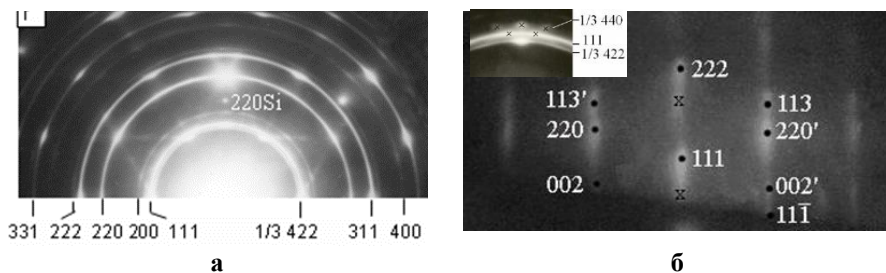
Рисунок 5 – Фрагмент микроэлектроннограммы (а) и ПЭМ-изображение (б) гетероструктуры, сформированной на (111) Si при  $E_p$  около  $240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$

На рисунке 5 видно, что вблизи порогового значения  $E_p$  образуется карбидная фаза  $\text{Si}_5\text{C}_3$  (кубическая решетка  $P2_13$ ,  $a = 0,4523 \text{ нм}$ ) в виде островков размером от 20 нм до 100 нм сопряженных с подложкой Si по соотношению:

$$(111), (1\bar{2}1)\text{Si}_5\text{C}_3 \parallel (111), [1\bar{1}0]\text{Si}. \quad (2)$$

Период муара (5,6 нм) на ПЭМ изображении отвечает двойной дифракции на плоскостях  $\{220\}\text{Si}$  и  $\{112\}\text{Si}_5\text{C}_3$  при размерном несоответствии кристаллических решеток  $f = -0,03$ .

Электроннограммы на рисунке 6 характеризуют фазовый состав, структуру и ориентацию пленок, полученных при  $261 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$ . Из электроннограмм следует, что в этом интервале величин  $E_p$  формируется пленка, соответствующая SiC кубической модификации (3C) с параметрами кристаллической решетки  $a = 0,436 \text{ нм}$ . Кроме того, наряду с параллельной ориентацией (1) имеются зерна в двойниковой ( $180^\circ$  – градусной) ориентации и произвольно ориентированные зерна.



х – рефлексы двойной дифракции на сдвойникованных кристаллитах, hkl' – отражения от кристаллитов в двойниковой 180 – градусной позиции

Рисунок 6 – Фрагменты электронограмм на просвет (а) и на отражение (б) пленок SiC, полученных при  $260 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$  (а, б)

Хорошо проявляющиеся рефлексы типа  $\frac{1}{3}(422)$  свидетельствуют о дефектной упаковке зерен, то есть о наличии слоев гексагональной фазы. Помеченные на выделенном фрагменте пучности (рисунок 6 а) образуются вследствие дифракции на плоскостях  $\{111\}$  двойников второго порядка. Из картины ДБЭО (рис.6б, зона съемки  $\langle 110 \rangle \text{Si}$ ) следует, что зерна, образующие двухосную текстуру, достигают приповерхностной области.

Профиль распределения элементов по толщине (рисунок 7) свидетельствует, что в объеме пленки элементный состав однороден и соответствует стехиометрии SiC. В приповерхностной области содержится 53 % углерода, 37 % кремния и 10 % кислорода.

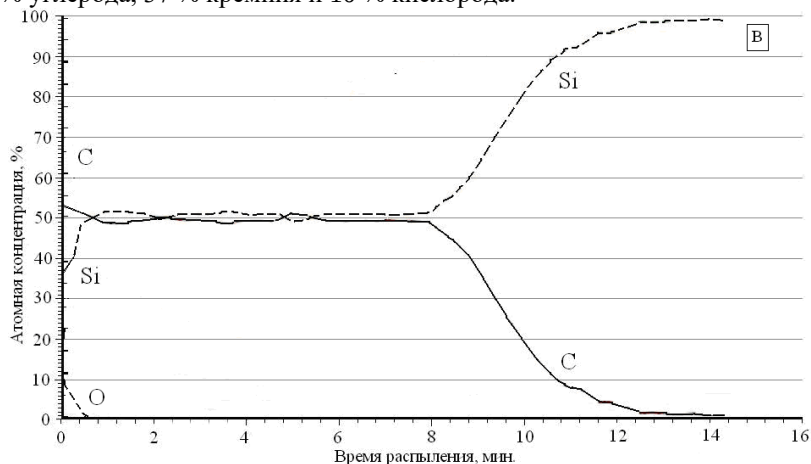


Рисунок 7 – Распределение элементов по толщине (по данным оже-спектроскопии) пленки  $\beta\text{-SiC}$ , синтезированной на стороне (111)Si при  $E_p = 269 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}$

Результаты ПЭМ-исследований подтверждены анализом ИК–спектров поглощения. Кроме того, показана возможность формирования нанокристаллических пленок  $\beta$ -SiC в многослойной гетероструктуре Si/C методом ИФО.

**В четвертой главе** подробно исследованы ориентация, структура и субструктура пленок SiC, синтезированных на подложке (111)Si при ИФО.

**Ориентация, структура и субструктура пленок SiC.** Определена основная двухосная текстура в трех симметрично эквивалентных позициях по ориентационному соотношению (1):

Кроме того, наряду с параллельной ориентацией (1) обнаружено, что в плёнке имеются зерна в двойниковой (180 – градусной) ориентации и произвольно ориентированные зерна.

Из анализа электронограммы, представленной на рисунке 9 а, следует, что кроме основной ориентации по ОС (1) в пленке присутствуют зерна, отвечающие дополнительным ОС:

$$(115), [1\bar{1}0]\text{SiC} \parallel (111), [1\bar{1}0]\text{Si} \quad (3)$$

$$(110), [1\bar{1}0]\text{SiC} \parallel (111), [1\bar{1}0]\text{Si} \quad (4)$$

$$(121), [10\bar{1}]\text{SiC} \parallel (111), [10\bar{1}]\text{Si} \quad (5)$$

Как видно из ПЭМ изображений (рисунок 9 б, в), пленки  $\beta$ -SiC – нанокристаллические, имеющие блочную мозаичную субструктуру. Размер блоков субзерен составляет около 30 нм. Средний размер субзерна, определенный из статистической обработки размеров областей когерентного рассеяния на темнопольных изображениях, составляет 5 нм. Анализ ОС показал, что на межфазных границах при сопряжении по плоскостям (111)SiC  $\parallel$  (111)Si и (121)SiC  $\parallel$  (111)Si реализуются ориентации, характеризующиеся наиболее высокой плотностью совпадающих узлов с  $\Sigma_1/\Sigma_2 = 16/25$  для ОС (1),  $\Sigma_1/\Sigma_2 = 36/20$  для ОС (5). Элементарные ячейки РСУ показаны на схемах сопряжения (рисунок 9 г, д). Очевидно, более низкие значения  $\Sigma_1/\Sigma_2$  и совпадение симметрии сопрягаемых решеток для ОС (1) обуславливают преимущество этой текстуры над текстурой по (5).

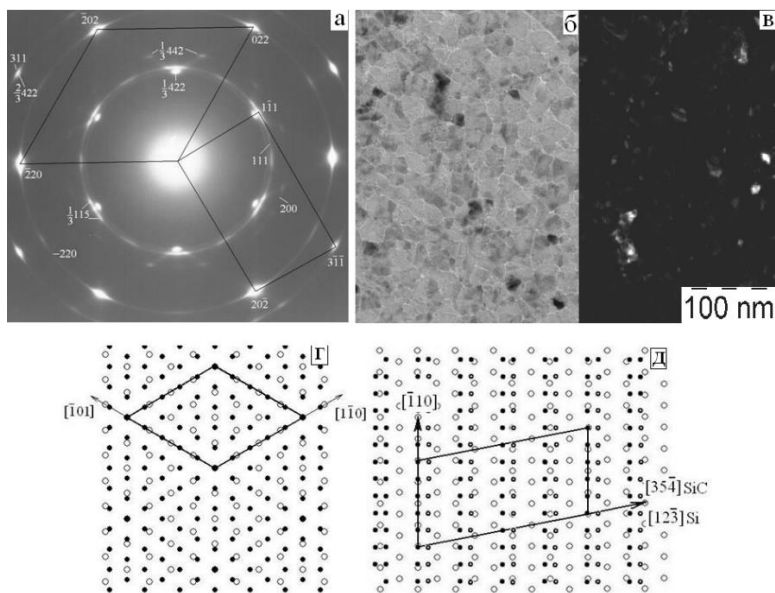


Рисунок 8 – Электронограмма (а), светлопольное и темнопольное ПЭМ-изображения пленки  $\beta$ -SiC, синтезированной на (111)Si, и картины сопряжения решеток по ОС (1) – (б) и (2) – (в)

Развернутую информацию о гетероструктуре  $\beta$ -SiC/(111)Si дает ПЭМ-изображение ее поперечного сечения по оси  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ .

На рисунке 9 представлено ПЭМ-изображение высокого разрешения участка гетероструктуры  $\beta$ -SiC/(111)Si, характеризующая субструктуру пленки SiC и межфазной границы. Согласно Фурье преобразованиям от выделенных областей (рисунок 11 в, г, д), субзерно А находится в параллельной позиции, субзерна В и С – в  $180^\circ$ -позиции, субзерно D является микродвойником по отношению к А по плоскости  $(11\bar{1})$ .

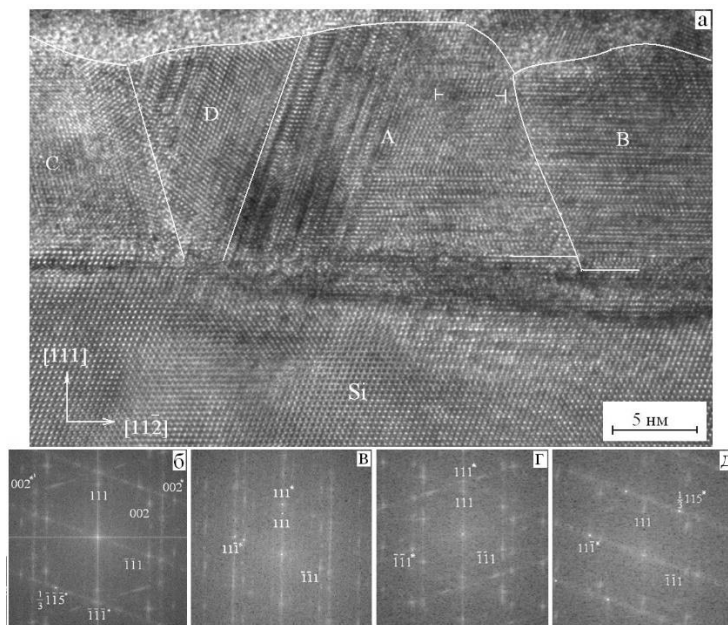


Рисунок 9 – ПЭМ-изображение высокого разрешения гетероструктуры  $\beta$ -SiC/(111)Si (а), Фурье-преобразования от всего изображения (б), правой части субзерна А (в), субзерен В и С (г), субзерна D (д) (рефлексы  $hkl$  принадлежат Si,  $hkl^*$  – SiC)

Соответственно все межзеренные границы ( $\Gamma 3$ ) на данном участке относятся к специальному типу:  $\Gamma 3$  между А и В –  $180^\circ$ -типа, почти параллельна плоскостям  $(11\bar{1})$  зерна В,  $\Gamma 3$  между А и D – двойниковая граница по плоскости  $(11\bar{1})$  зерна А,  $\Gamma 3$  между С и D – высокоугловая граница совпадения.

Межфазная граница  $\beta$ -SiC/(111)Si является некогерентной и характеризуется отсутствием дислокации несоответствия.

В соответствии с данными, полученными из анализа картины общей дифракции, было показано, что субзерна пленки содержат высокую плотность дефектов упаковки (не менее  $10^7 \text{ см}^{-1}$ ) по  $\{111\}$  с векторами сдвига типа  $1/6 \langle 112 \rangle$ , а также выявлены многочисленные микродвойниковые прослойки по  $\{11\bar{1}\}$ , снимающие локальные напряжения. Субзерна состоят из блоков с пакетной структурой дефектов упаковки и микродвойников.

Ориентация пленки по соотношению (1) очевидна в силу выполнения в этом случае одновременно двух кристаллогеометрических критериев эпитаксии (параллельность плотноупакованных рядов решеток SiC и Si,

высокая плотность совпадающих узлов на межфазной границе SiC/Si. Ориентация (3) образуется в результате двойникования по плоскостям  $\{1\bar{1}1\}$  в зернах по (1). Ориентация (4) есть результат двойникования второго порядка, при этом ось  $\langle 110 \rangle_{\text{SiC}}$  разориентирована от  $\langle 111 \rangle_{\text{Si}}$  на  $3.7^\circ$ . Схема текстурированной поликристаллической пленки  $\beta\text{-SiC}$  в проекции  $(1\bar{1}0)$  показана на рисунке 10. Образование зерен по (1) в параллельной и двойниковых ( $60^\circ$  и  $180^\circ$ ) позициях обусловлено закономерностями эпитаксиального роста. Образование микродвойников первого и второго порядка по (3) и (4) происходит, по-видимому, вследствие релаксации термических напряжений сжатия.

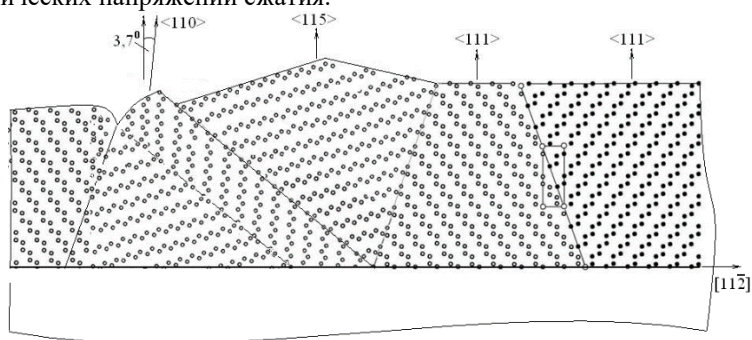


Рисунок 10 – Схема формирования текстурированной поликристаллической структуры пленки  $\beta\text{-SiC}$  в проекции  $(1\bar{1}0)$  (6)

Модель образования пакетной структуры дефектов упаковки. Как правило, в большинстве исследований высокую дисперсность ориентированных пленок  $\beta\text{-SiC}$  на  $(111)\text{Si}$  объясняют большим структурным несоответствием пленки и подложки. В данной работе установлено, что субзерна разбиты на блоки с пакетной структурой дефектов упаковки и микродвойников. Объяснить такую особенность возможно в предположении, что первой карбидной фазой образуется фаза  $\text{Si}_5\text{C}_3$  в виде островков размером от 20 нм до 100 нм сопряженных с подложкой Si по соотношению:

$$(111), [1\bar{1}2]_{\text{Si}_5\text{C}_3} \parallel (111), [1\bar{1}0]_{\text{Si}} \quad (6)$$

На межфазной границе Si/SiC(B20) реализуется  $30^\circ$  ориентация совпадения с  $\Sigma_1/\Sigma_2 = 3/3$  с несоответствием с решеток  $f = -0,038$ . При достижении некоторой критической толщины пленки фаза  $\text{Si}_5\text{C}_3$  в стехиометрии SiC превращается через бездиффузионное превращение в  $\beta\text{-SiC}$ . Так, что выполняется ориентационное соотношение (6).

Несоответствие решеток SiC(B20) и  $\beta$ -SiC составляет  $f = -0,16$ . Это несоответствие компенсируется дефектами упаковки по  $\{111\}$  SiC.

Согласно оценке, плотность дефектов упаковки должна составлять  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-1}$ , что согласуется с ПЭМ-изображением. В других плоскостях типа  $\{111\}$  несоответствие может устраняться образованием микродвойников деформации. В итоге, зеренная структура  $\beta$ -SiC наследует зеренную структуру  $\text{Si}_5\text{C}_3$

**В пятой главе** для оценки эффективной энергии активации рекристаллизации и роста субзерен при синтезе пленок  $\beta$ -SiC методом ИФО проведены исследования их субструктуры и морфологии в зависимости от плотности энергии излучения.

Облучение проводили с одной стороны, при этом исходили из того, что на облучаемой стороне синтез происходит при участии фотонной активации процессов, на не облучаемой стороне только за счет термической активации.

На рисунке 11 представлены светлопольные и темнопольные ПЭМ-изображения, характеризующие субструктуру пленок  $\beta$ -SiC, синтезированных на обеих сторонах пластины кремния при  $E_p = 269$  и  $284 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ . Как видно из рисунков, размеры субструктурных элементов пленки (блоки субзерен, субзерна) монотонно возрастают с увеличением плотности энергии ИФО.

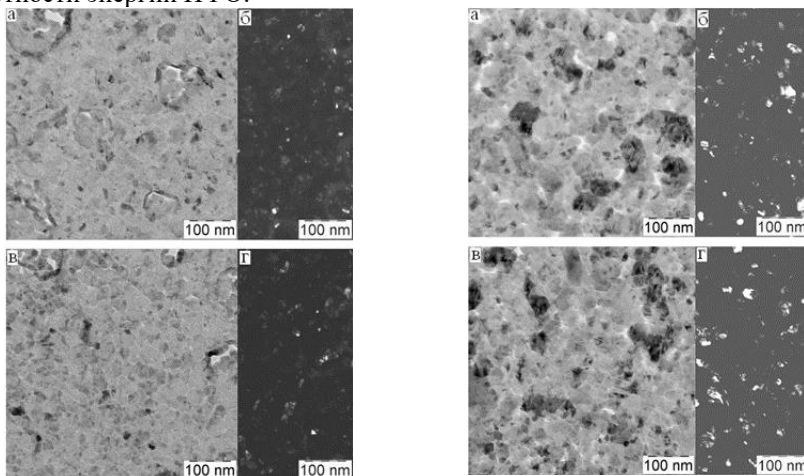


Рисунок 11 – ПЭМ-изображения пленок  $\beta$ -SiC, синтезированных на облучаемой (а, б, д, е) и на не облучаемой (в, г, ж, з) сторонах пластины кремния при  $E_p = 269 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  и  $E_p = 284 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  (светлопольные (а, в, д, ж) и темнопольные (б, г, е, з) изображения)

На рисунке 12 представлены АСМ изображения поверхности пленок, синтезированных на обеих сторонах пластины кремния при  $E_p = 269$  и  $284 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ .

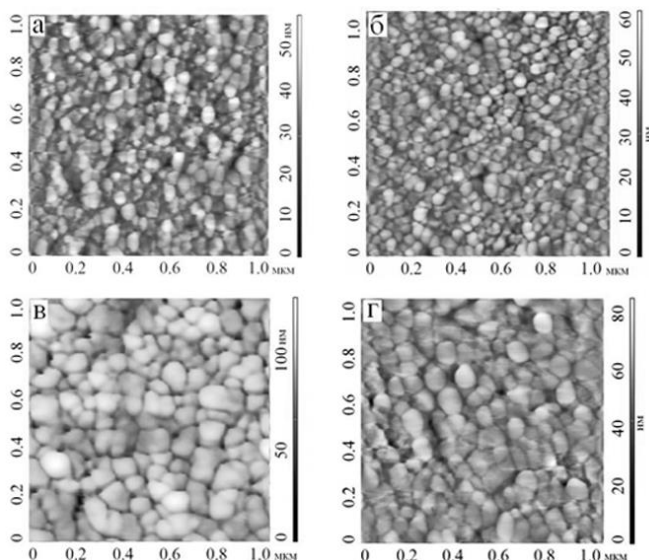


Рисунок 12 – АСМ-изображения поверхности пленок  $\beta$ -SiC, синтезированных на облучаемой (а, в) и на не облучаемой (б, г) сторонах пластины кремния при  $E_p = 269 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  (а, б) и  $E_p = 284 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  (в, г)

На рисунке 13 построены графические зависимости логарифма  $D$  и  $R$  от обратной приведенной температуры  $1/\theta$  ( $\text{эВ}^{-1}$ ). Как видно из графиков, точки укладываются в линейные зависимости, соответствующие следующим значениям эффективной энергии активации процессов: рекристаллизации  $\beta$ -SiC – 1,3 эВ при ИФО и – 1,8 эВ при БТО; роста субзерен пленки  $\beta$ -SiC – 1,4 эВ одинаковой для ИФО и БТО. Таким образом, количественно эффект фотонной активации проявляется и в снижении эффективной энергии активации рекристаллизации пленок.

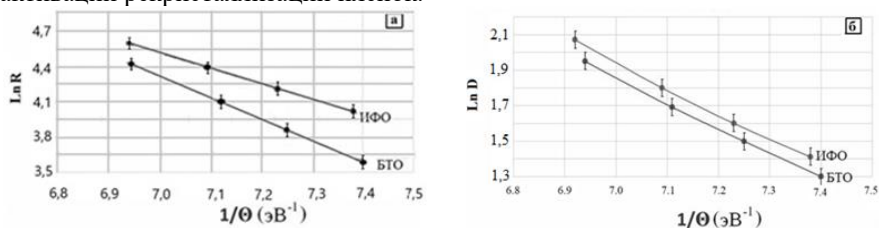


Рисунок 13 – Графические зависимости: а – логарифма квадрата среднего размера зерна ( $R$ ) от обратной приведенной температуры  $1/\theta$  ( $\text{эВ}^{-1}$ ), б – среднего размера субзерна от обратной приведенной температуры  $1/\theta$  ( $\text{эВ}^{-1}$ )

Основные выводы, сформулированные на основе результатов комплексных исследований закономерностей субструктурных, структурных и ориентационных превращений при твердофазном синтезе, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, представлены в **заключении и выводах из работы**.

### **ВЫВОДЫ:**

1. Влияние ювенильности поверхности подложки в процессе ее карбидизации проявляется в том, что на ювенильной поверхности формируется сплошная эпитаксиальная пленки  $\beta$ -SiC, тогда как на неювенильной поверхности (скол на воздухе) карбидообразование происходит при той же температуре в местах пробоя естественного оксида в виде островков  $\beta$ -SiC.

2. В твердофазной реакции карбидообразования на подложке Si первой образуется метастабильная фаза  $\text{Si}_5\text{C}_3$  структурного типа B20, устойчивость которой обусловлена когерентным сопряжением с решеткой кремния. Фазовый переход B20 в  $\beta$ -SiC осуществляется путем бездиффузионного превращения.

3. Эффект фотонной активации твердофазного синтеза пленок карбида кремния на кремниевой подложке проявляется в снижении эффективной энергии активации процесса рекристаллизации зёрен при ИФО на 0,5 эВ по сравнению с синтезом в эквивалентном режиме БТО.

4. Многоориентационный характер хемоэпитаксии при твердофазном синтезе эпитаксиальных пленок  $\beta$ -SiC на (111)Si предопределяет их высокую дисперсность. Основные ориентационные соотношения соответствуют двухосной текстуре в параллельной и двойниковой ориентации, дополнительные ориентации возникают путем механического двойниковогоания, снимающего термические напряжения.

5. Межфазная граница  $\beta$ -SiC/(111)Si – некогерентная. Зеренная структура пленки  $\beta$ -SiC наследуется от субструктуры первой карбидной фазы  $\text{Si}_5\text{C}_3$ (B20). Несоответствие решеток и особенности бездиффузионного превращения обуславливают высокую плотность дефектов упаковки и их пакетную структуру в субзернах пленки  $\beta$ -SiC.

6. Пороговые значения температуры при ТО и плотности энергии импульса при ФО для начала образования фазы карбида кремния на кремниевой подложке (111) Si составляют:  $T = 1125 \text{ K}$  и  $E = 240 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-1}$  (для пластин Si толщиной 0,45 мм) соответственно.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Статьи, индексируемые в базах данных Web of Science**

1. Influence Sputtering Conditions on Electrical Characteristics of Si-LiNbO<sub>3</sub> Heterostructures Formed by Radio-Frequency Magnetron Sputtering/V.O. Kuz'mina, V M. Sumets, V. Ievlev, A. Kostyuchenko // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2014. – 603:1. – pp. 202-215.

2. Substructure of  $\beta$ -SiC Films Synthesized on the Surface of Vacuum and Air Cleavage of Mono-Si/ **V.O. Tekutyeva**, S.A. Soldatenko, A.A. Lukin // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – V. 61. – No. 3. – pp. 385–392.

3. Activation energy of subgrain growth process and morphology evolution in  $\beta$ -SiC/Si(111) heterostructures synthesized by pulse photon treatment method in a methane atmosphere / **V.O.Kuzmina**, A.A. Sinelnikov, S.A. Soldatenko, M. Sumets // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2018. – Т. 29. – № 23. – С. 20097-20103.

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

4. Процессы роста субзерен и развитие морфологии при синтезе плёнок  $\beta$ -SiC на (111)Si в атмосфере метана / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко, А.А. Синельников // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 22-24 (270-272). С. 96-106.

#### **Статьи и материалы международных и всероссийских конференций**

5. Перспективный метод формирования тонких пленок карбида кремния / **В.О. Кузьмина** // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы Международной науч.-практ. конф.; Воронеж, 12 ноября 2015 г. / Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2015. – Ч.1. – С.63-68.

6. Synthesis of epitaxial silicon carbide films / **В.О. Кузьмина**// Развитие личности – как стратегия современной системы образования: сб. мат.-лов тез. докл. II Международной науч.-практ. конф.; Воронеж, 12 мая 2016 г. / Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2016. – С.72-76.

7. Разработка технологического процесса синтеза эпитаксиального слоя  $\beta$ -SiC на монокристаллической кремниевой пластине / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко // Инновационные разработки молодых ученых воронежской области на службу региона: сборник докладов Региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых; Воронеж, 22-23 ноября 2016 года / Воронежский инновационно-технологический центр, 2016 – С. 54-59.

8. Перспективы применения импульсной фотонной обработки с целью карбидизации кремния / **В.О. Кузьмина** // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах: сб. мат.-лов тез. докл. III Международной конф. с элементами научной школы; Тамбов, 25-27 апреля 2016г. / ТГТУ, – Тамбов, 2016. – С. 187-188.

9. Синтез нанокристаллических пленок алмазоподобного углерода и пленок  $\beta$ -SiC методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко, О.В. Сербин// Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация и материалы будущего: сб. мат.-лов тез. докл. IX Международной научной конф.; Иваново, 13–16 сентября 2016 г. – С. 76-78.

10. Синтез нанокристаллических пленок алмазоподобного углерода методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина** // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. мат.-лов тез. докл. XIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов (с международным участием); Москва, 18-21 октября 2016 г. - С. 279-280.

11. Синтез эпитаксиальных нанокристаллических пленок  $\beta$ -SiC методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина** // НАНО-2016: сб. мат.-лов тез. докл. VI Всероссийской конференции по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи; Москва, 22-25 ноября 2016 г. – С. 243-244.

12. Синтез нанокристаллических пленок алмазоподобного углерода методом

импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина** // Новая наука: стратегии и векторы развития: сб. науч. ст. по материалам Международной научно-практической конф.; Магнитогорск, 8 февраля 2017 г. – С. 62-65.

13. Твердофазный синтез пленок карбида кремния / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов VII Международной конференции; Москва, 7-10 ноября 2017 г. – М: ИМЕТ РАН, 2017.– С.456-457.

14. Синтез эпитаксиальных демпфирующих гетероструктур ( $\beta$ -SiC/Si) методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина** // Физико-химия и технология неорганических материалов (с международным участием): сб. трудов XIV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов; Москва, 17-20 октября 2017 г., - М: ИМЕТ РАН, 2017. – С.460-462.

15. Эпитаксиальные гетероструктуры  $\beta$ -SiC/Si для создания чувствительных элементов высокотемпературных датчиков давления / **В.О. Кузьмина** // Авиакосмические технологии (АКТ-2017): труды XVIII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов; Воронеж: ООО Фирма «Элист»; 2017. – С. 179-183.

16. Твердофазный синтез пленок карбида кремния методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко // Сборник материалов 19-я Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике; г. Санкт-Петербург, 27 ноября – 1 декабря 2017 г. – С.61.

17. Синтез нанокристаллических пленок алмазоподобного углерода для авиационных конструкций методом импульсной фотонной обработки / **В.О. Кузьмина** // Воздушно-космические силы. Теория и практика – 2017. – № 1. – С. 71-77.

18. Твердофазный синтез пленок карбида кремния для создания чувствительных элементов / **В.О. Кузьмина**, М.В. Текутьев, В.П. Габрусевич // Сборник тезисов докладов III Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых „Химические проблемы современности“ / Редколлегия: А.В. Белый (отв. ред.) и др. – Донецк: ДонНУ, 2018.– С. 84-86.

19. Субструктура эпитаксиальной пленки  $\beta$ -SiC, синтезированной пиролизом метана на (111)Si методом ИФО / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов XIII МНТК. - 12–14 сентября 2018 г. – г. Минск.– С.168-175.

20. Энергии активации процессов роста субзерен и развития морфологии при синтезе пленок  $\beta$ -SiC на (111)Si в атмосфере метана / **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко, Т.Л. Тураева// Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов XIII МНТК. – 12–14 сентября 2018 г. -г. Минск.-С.176-187.

21. Совершенствование контроля расходования топлива в авиационных двигателях путем создания чувствительного элемента на основе карбида кремния / **В.О. Кузьмина**, Д.Н. Тесля, В.П. Габрусевич // Авиакосмические технологии (АКТ-2018): тезисы XIX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. -Воронеж: ООО Фирма «Элист»; 2018. – С. 81-86.

22. Синтез эпитаксиальной пленки  $\beta$ -SiC в процессе фотонной обработки поверхности (111)Si в среде газообразного метана / **В.О. Кузьмина** // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах

(ФАГРАН—2018) [Текст]: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию Воронежского государственного университета (г. Воронеж, 8—11 октября 2018 г.). — Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2018. — 628 с. ISBN 978-5-4446-1166-1

23. Тонкие эпитаксиальные пленки кубического карбида кремния: шаг к возрождению отечественной электроники/ **В.О. Кузьмина**, С.А. Солдатенко // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики - 2018 Материалы Всероссийского открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. Тамбов, 2018. С. 53-58.

24. Субструктура и ориентация пленок  $\beta$ -SiC на (111) Si, полученных при пиролизе метана на кремнии / **В.О. Текутьева**, В.Ю. Семенов, И.А. Черноиваненко // Устойчивое развитие науки и образования – 2020. – № 8 (47). С. 75-77.

25. Эффект ювенильной поверхности Si(111) при карбидизации подложки кремния / **В.О. Текутьева**, С.А. Солдатенко, К.Р. Фирсов // Сборник тезисов докладов II Объединённой конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике». КЭЛТ. – 2023. С.16-18.

26. Субструктура пленок  $\beta$ -SiC, синтезированных на поверхности вакуумного и воздушного скола моно-Si / **В.О. Текутьева**, С.А. Солдатенко, А.А. Лукин // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. Кн. 1. Материаловедение – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2023. – С.269-278.

27. Синтез и тензорезистивные свойства покрытий SiC на кремниевой подложке / **В.О. Текутьева**, С.А. Солдатенко, С.Б. Кушев, Н.А. Семилетов // Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ. Секции «Физика твёрдого тела», «Материалы и технология полупроводниковых приборов», «Проектирование и надёжность полупроводниковых приборов ИС», «Микроэлектромеханические системы». Тезисы докладов. Электронный ресурс. Воронеж, 2023. – С. 22.

28. Субструктура плёнок  $\beta$ -SiC, синтезированных на поверхности скола моно-Si в вакууме и на воздухе/ **В. О. Текутьева**, С. А. Солдатенко // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. — 2024. —№ 13. — С. 11–19.

#### **Объекты интеллектуальной собственности**

29. Способ синтеза нанокристаллического карбида кремния на кремниевой подложке/ **В.О. Текутьева**, С.А. Солдатенко, С.Б. Кушев, Т.Л. Тураева // Патент № 2022110697 от 07.02.2023г.

Подписано в печать 14.10. 2026

Формат А5. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
Отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ. 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84