

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 621.315.592; 539.23

**ЛОБАНОК**

**Михаил Владимирович**

**БЫСТРОЕ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ 3С-SiC И БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР НА  
ИХ ОСНОВЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

МИНСК, 2025

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель

**Гайдук Петр Иванович,**

доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры физической электроники и  
нанотехнологий Белорусского государственного  
университета

Официальные оппоненты:

**Гасенкова Ирина Владимировна,**

доктор физико-математических наук, доцент,  
главный научный сотрудник лаборатории  
микро- и наносенсорики государственного  
научно-производственного объединения  
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

**Луценко Евгений Викторович,**

кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий лабораторией физики и техники  
полупроводников ГНУ «Институт физики  
им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Оппонирующая организация

Государственное научно-производственное  
объединение «Научно-практический центр  
Национальной академии наук Беларуси по  
материаловедению»

Защита состоится 14 марта 2025 года в 14:00 на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по  
адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического  
факультета), ауд. 407. Телефон ученого секретаря: 209-55-58; e-mail:  
[Fedotov@bsu.by](mailto:Fedotov@bsu.by).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке  
Белорусского государственного университета

Автореферат разослан « 12 » февраля 2025 года

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций



А.К. Федотов

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается повышенный интерес к синтезу материалов с новыми функциональными свойствами для создания устройств микроэлектроники нового поколения. Внедрение ряда широкозонных полупроводников, таких как карбид кремния (SiC), оксид цинка (ZnO), нитрид галлия (GaN) и нитрид алюминия (AlN), позволило значительно снизить размеры силовых устройств и увеличить надёжность работы приборов на их основе за счёт открывшейся возможности работать на более высоких частотах и при более высоких температурах, а также упрощения систем охлаждения.

Сдерживающим фактором для использования широкозонных полупроводников является технологическая сложность выращивания массивных кристаллов и изготовления из них подложек, что приводит к их неоправданно высокой стоимости. Вследствие этого, вырос интерес к слоям карбида кремния, эпитаксиально выращенным на пластинах кремния. Слои 3C-SiC сочетают ряд уникальных радиационных, термомеханических характеристик SiC и возможность использования сформированных слоёв 3C-SiC в качестве буфера для выращивания активных структур на основе широкозонных полупроводников. Эпитаксиальные слои 3C-SiC на кремнии можно использовать для создания гибридных устройств силовой электроники, состоящих из быстрого Si-IGBT с малым прямым током и вспомогательного силового SiC-MOS с большим прямым током. Помимо этого, слои 3C-SiC на кремнии использовались в разработках фотодетекторов и солнечных элементов, применялись в качестве нанорезонаторов приборов оптоэлектроники, работающих в инфракрасном диапазоне.

Стоит отметить, что промышленное изготовление структур на основе SiC с необходимыми характеристиками осложнено тем, что SiC, выращенный непосредственно на Si, имеет большое количество структурных дефектов, связанных с несоответствием параметров кристаллических решёток SiC и Si (19,72%), а также с различием коэффициентов термического расширения (~8%). До сих пор формирование слоёв SiC с малым содержанием дефектов является достаточно дорогой и сложной научно-технической задачей. Для улучшения структурного качества SiC используют буферные слои, которые принимают на себя нагрузку по релаксации механических напряжений, связанных с несоответствием параметров решётки и различием коэффициентов теплового расширения. При этом, в качестве буфера можно использовать тонкие слои SiC, сформированные при карбидизации кремния.

Таким образом, представленная диссертационная работа посвящена актуальной проблеме – установлению закономерностей быстрого вакуумно-термического формирования эпитаксиальных слоёв кубического карбида кремния на кремнии и изучению их структурных, оптических и электрофизических характеристик.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Исследования по теме диссертации выполнялись на кафедре физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета в рамках плана НИР БГУ. Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы», в частности, пункту 4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы (подпункты: «микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика»; «радиоэлектронные системы и технологии, приборостроение»; «наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика»).

Основные результаты диссертационной работы получены в ходе выполнения следующих научно-исследовательских работ: 1) ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 3.3.02 «Разработать и исследовать физико-технологические режимы роста тонких и сверхтонких слоёв SiC на кремниевых пластинах для перспективных приборных структур микро- и оптоэлектроники» (№ гос. рег. 20162098, сроки выполнения 2016 – 2018 гг.); 2) ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задание 3.2.04 «Разработать технологические режимы выращивания тонких слоёв SiC на пластинах Si диаметром 100 мм для перспективных приборных структур силовой и оптоэлектроники», (№ гос. рег. 20190644, сроки выполнения 2019 – 2020 гг.); 3) ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 3.1.2 «Разработка физических основ быстрого термического выращивания слоёв SiC из газовой фазы на кремниевых пластинах для приборных структур микро- и оптоэлектроники» (№ гос. рег. 20212702, сроки выполнения 2021 – 2025 гг.); 4) БРФФИ «Импульсное лазерное формирование выпрямляющих гетероструктур Me/SiC/poly-Si для микроболометров» (№ гос. рег. 20221052, сроки выполнения 2022-2024); 5) НИР «Выращивание тонких пленок гетероэпитаксиального карбида кремния на кремниевых пластинах с буферными слоями различного состава» (НИР № гос. рег. 20180481, сроки выполнения 2018); 6) грант студентов и аспирантов БГУ «Исследование электрофизических свойств контактов к гетероструктуре SiC/Si» (сроки выполнения 2021г.).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

**Целью** являлось установление основных закономерностей быстрого вакуумно-термического выращивания эпитаксиальных слоёв 3C-SiC на кремнии, а также исследование структурно-фазовых состояний, оптических и электрофизических характеристик гетероструктур SiC/Si и барьерных структур Pt/SiC/Si.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) сформировать эпитаксиальные слои 3C-SiC на кремнии, в том числе на подложках с буферными слоями; 2) исследовать структурно-фазовые превращения в гетероструктурах SiC/Si в зависимости от условий вакуумно-термической карбидизации и типа подложки; 3) сформировать контакты к гетероструктурам SiC/Si и исследовать их электрофизические характеристики последних; 4) исследовать оптические и фотоэлектрические свойства структур SiC/Si и Pt/SiC/Si.

**Объект исследования** – слои кубического карбида кремния, выращенные при быстрой вакуумно-термической обработке пластин кремния, а также барьерные структуры на основе SiC/Si.

**Предметом исследования** – элементный состав, структурно-фазовые состояния, оптические и электрофизические характеристики гетероэпитаксиальных слоёв SiC на Si, а также барьерных структур на их основе.

### **Научная новизна**

Диссертационная работа содержит новые результаты, заключающиеся в установлении закономерностей изменения структурных, фазовых, электрофизических и оптических характеристик слоёв 3C-SiC, сформированных при быстрой вакуумно-термической обработке кремния, в зависимости от параметров карбидизации и структурных характеристик подложки.

Впервые исследованы процессы быстрого вакуумно-термического формирования эпитаксиальных слоёв 3C-SiC на кремнии. Разработан метод быстрого вакуумно-термического формирования слоёв 3C-SiC на Si, при котором в газовой смеси (10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Ar) при давлении  $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па и температурах 1100÷1300 °С, формируются тонкие эпитаксиальные слои монокристаллического 3C-SiC с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным {111} плоскостям.

Из экспериментальных кривых Аррениуса зависимости толщины SiC от температуры установлено, что при быстрой вакуумно-термической обработке кремния эпитаксиальный рост слоёв SiC на кремнии проходит в две стадии, которые характеризуются различной энергией активации. На начальной стадии, более тонкие слои SiC не являются сплошными, а их рост лимитируется диффузией атомов Si и C по поверхности подложки (низкое значение  $E_A \sim 0.6 \pm 0.05$  эВ). Увеличение толщины приводит к заращиванию несплошностей в слоях SiC и смене доминирующего диффузионного механизма на объёмный (диффузии Si из подложки по вакансионному механизму), что сопровождается существенным увеличением энергии активации роста SiC до  $6,3 \pm 0.4$  эВ. Результаты исследований интерпретированы в рамках модифицированной

модели Дила-Гроува, учитывающей доминирующую диффузию атомов кремния на внешнюю поверхность с последующей реакцией синтеза SiC.

Обнаружено, что на толщину сформированных слоёв SiC оказывают влияние тип проводимости, ориентация подложки, а также применение буферных слоёв пористого кремния. В свою очередь, наибольшая толщина слоёв SiC, сформированных на монокристаллическом кремнии, достигается на кремниевых подложках р-типа проводимости с ориентацией поверхности (111).

Показано, что, варьируя режимы термообработки структур Pt/SiC/Si и Pt/Si/SiC/Si, можно получить выпрямляющие контакты к 3C-SiC с коэффициентом идеальности в диапазоне  $2,92 \div 1,76$  и высотой барьера от 0,75 до 0,79 эВ, что позволяет уменьшить плотность тока утечки выпрямляющих контактов на порядок от  $2,5 \cdot 10^{-4}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> при обратном смещении 10 В.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод быстрого вакуумно-термического формирования слоёв 3C-SiC на Si, заключающийся в обработке кремния в газовой смеси (10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Ar) при давлении  $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па и температурах  $1100 \div 1300$  °С в течении 5÷60 секунд, и позволяющий выращивать тонкие (до 150 нм) эпитаксиальные слои монокристаллического 3C-SiC с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным {111} плоскостям.

2. При быстрой (5÷60 секунд) вакуумно-термической обработке кремния в газовой смеси (10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Ar) при давлении  $10^{-2} \div 10^{-4}$  эпитаксиальный рост слоёв SiC проходит в две стадии, характеризующихся энергиями активации  $0,67 \pm 0,05$  и  $6,3 \pm 0,4$  эВ, в температурных диапазонах  $1000 \div 1150$  °С и  $1150 \div 1300$  °С соответственно, что обусловлено сменой доминирующего процесса поверхностной диффузии атомов Si и C на процесс объемной диффузии атомов Si по вакансионному механизму.

3. Термообработка структур Pt/SiC/Si и Pt/Si/SiC/Si при 350 °С и 500 °С приводит к формированию слоев, содержащих силициды платины PtSi, Pt<sub>2</sub>Si, Pt<sub>3</sub>Si и выпрямляющих контактов с коэффициентом идеальности в диапазоне  $2,92 \div 1,76$  и высотой барьера от 0,75 до 0,79 эВ, что позволяет уменьшить плотность тока утечки выпрямляющих контактов на порядок от  $2,5 \cdot 10^{-4}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> при обратном смещении 10 В.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Представленные в диссертации основные результаты, определяющие научную и практическую значимость работы, получены и обработаны соискателем лично или при его непосредственном участии. Научным руководителем, доктором физико-математических наук, доцентом П.И. Гайдуком была сформулирована тематика и определены направления

исследований, совместно с ним проводился выбор методов и режимов формирования структур, интерпретация экспериментальных результатов.

В проведении части исследований методом просвечивающей электронной микроскопии участвовал М.А. Моховиков. Анализ структуры образцов проводился при участии С.Л. Прокопьева и Д.В. Жигулина. Исследования температурной зависимости электрофизических характеристик барьерных структур были выполнены совместно с Н.В. Полонским и С.В. Козодоевым. Оптические свойства изучались при участии О.В. Королик и А.И. Мухаммад.

Материалы совместных публикаций использовались соискателем в объеме авторского вклада.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных научно-практических конференциях: 9-я (2020 г.), 10-я (2022 г.) Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» (Минск); 60-th (2017 г.), 61-th (2018 г.), 63-th (2020 г.), 64-th (2021 г.) International conference «Open Readings» (Vilnius, Lithuania); 28-й международный симпозиум «Nanostructures: Physics and Technology» (Минск, 2020); 8-я Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 2021); 2-я Международная научно-техническая конференция «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА» (Минск, 2022); 7-я Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2023).

Результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс на факультете радиофизики и компьютерных технологий БГУ (имеется 3 акта о внедрении).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 27 научных работах, в том числе в 6 статьях в научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 3,4 авторского листа), в 2 статьях в других научных изданиях, в 12 статьях в сборниках материалов научных конференций и в 7 тезисах докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав,

заклучения, библиографического списка, и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 147 страницы, включая 68 рисунков на 18 страницах, 7 таблиц на 4 страницах, 1 приложение на 6 страницах. Библиографический список содержит 180 наименований (на 16 страницах), включая список публикаций соискателя из 27 наименований.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** приведён аналитический обзор научно-технической литературы по тематике исследования, в рамках которого рассмотрены основные свойства и методы роста 3C-SiC. Проведён анализ влияния режимов химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на структурно-фазовые свойства слоёв SiC. Сформулированы основные технологические требования для формирования карбида кремния на пластинах кремния. Особое внимание уделено физико-технологическим приёмам преодоления рассогласования кристаллических решёток, основанным на применении буферных слоёв. Рассмотрены основные проблемы формирования контактов к структурам SiC/Si. Поставлена цель и определены задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** описаны методы формирования объектов исследования и используемые в работе методы исследования характеристик. В качестве подложек для формирования слоёв SiC использовали монокристаллические пластины кремния: дырочного типа проводимости марки КДБ с удельным сопротивлением  $4 \div 12$  Ом·см, электронного типа проводимости марок КЭФ и КЭС с удельным сопротивлением  $0,01 \div 10$  Ом·см с ориентацией поверхности вдоль (100) и (111) соответственно. Описана методика предварительной очистки, включающая очистку в перекисно-аммиачном растворе и 5% HF с промывкой в деионизированной воде и сушке обдувом азота.

Для проведения быстрой вакуумно-термической обработки кремниевых пластин была модифицирована установка Jipelec JetFirst-100. В результате усовершенствования реакционная камера установки позволила работать в вакууме ( $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па) и обрабатывать большие площади (диаметром до 100 мм) с использованием ксеноновых ламп на верхней стороне камеры. Контроль температуры осуществлялся с помощью пирометра и термопары. Метод выращивания слоёв карбида кремния при быстрой вакуумно-термической обработке кремния заключался в формировании высоковакуумной реакционной газовой среды, быстрого нагрева ( $\sim 20$  °C/c) до рабочей температуры ( $950 \div 1300$  °C), карбидизации (в течении  $30 \div 600$  секунд) и охлаждения до комнатной температуры. Формирование высоковакуумной реакционной газовой среды включало откачку атмосферного воздуха из камеры реактора до давления не хуже  $1 \cdot 10^{-2}$  Па; напуск в камеру чистой газовой смеси пропан-аргона (10%

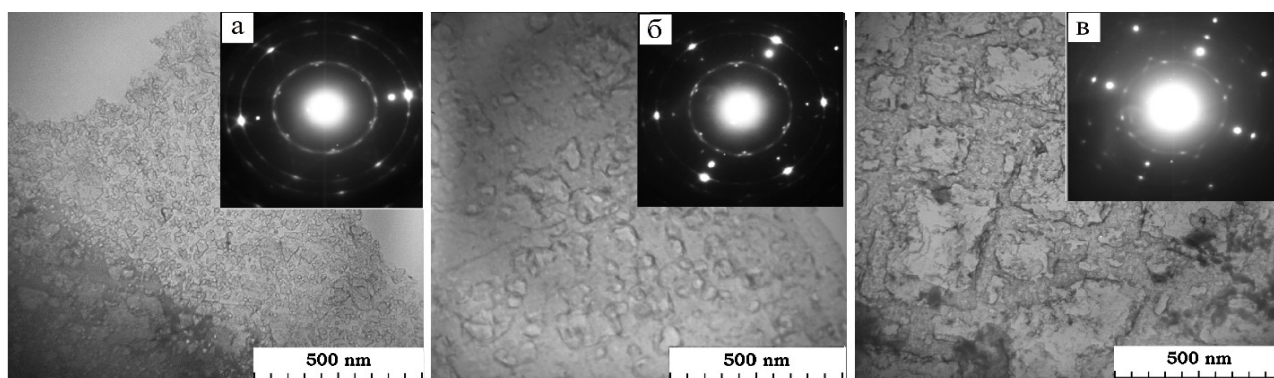
C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Ar) до атмосферного давления, а также повторную откачку газовой смеси до рабочего давления ( $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па), в результате чего из вакуумной камеры удалялись кислород и другие газовые составляющие воздуха, а рабочая атмосфера содержала лишь остаточные пары пропан-аргонной смеси (10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/Ar) с парциальным давлением менее  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Помимо этого, на пластинах с буферным слоем SiC, сформированным при быстрой вакуумно-термической обработки кремния были изготовлены структуры SiC/Si и Si/SiC/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Semicon VG-80 ( $T_{\text{роста}} = 950$  °C). Формирование слоёв SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния проводилось в Белорусском государственном университете на кафедре физической электроники и нанотехнологий. Молекулярно-лучевая эпитаксия проводилась в Институте физики и астрономии Орхусского университета (Орхус, Дания). Для формирования выпрямляющих и омических контактов проводился равновесный печной отжиг плёнок Pt, Al на структурах SiC/Si и Si/SiC/Si в инертной среде в температурном интервале  $350 \div 900$  °C для выпрямляющих контактов и  $1000$  °C для омических контактов длительностью 10 минут.

Структурно-фазовые состояния слоёв SiC изучались с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) на микроскопе Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении  $100 \div 150$  кэВ в геометрии «plan-view». Морфология поверхности и структура образцов изучались с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Hitachi S-4800 при ускоряющем напряжении  $10 \div 20$  кВ и с применением приставки для EDX-спектроскопии. Профили распределения атомов по глубине слоев в образцах структур SiC/Si измеряли с помощью резерфордского обратного рассеяния (ROR) с использованием ионов He<sup>+</sup> с энергией  $1 \div 2$  МэВ на ускорительном комплексе AN2500, High Voltage Engineering Europe B.V. в лаборатории элионики НИИ ПФП БГУ им. А.Н. Севченко. Анализ химического и фазового состава структур проводился методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) в геометрии обратного рассеяния. Спектры КРС получены с помощью конфокального КРС-спектрометра Nanofinder HighEnd (LOTIS TII) со спектральным разрешением не более  $3 \text{ см}^{-1}$ . Измерения проводились в нормальных условиях с использованием лазерного излучения мощностью 2 мВт на длине волны 532 нм и диаметром пятна 0,6 мкм. Спектры пропускания и оптической плотности измерялись с помощью Фурье-спектрометра PerkinElmer Spectrum 3 Optica в инфракрасном диапазоне спектра при нормальном падении излучения на образец. Спектры отражения измерялись на спектрометре PerkinElmer Lambda 1050 WB, в диапазоне  $\lambda \sim 190 \div 1500$  нм со спектральным разрешением 1 нм. Электрофизические и фотоэлектрические характеристики

изучались методом измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов МНИПИ ИППП-1, четырёхзондовым методом измерения поверхностного сопротивления с помощью установки ИУС-3, монохроматором МДР23 и пикоамперметром МНИПИ А2-4.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследований структурных и оптических характеристик слоёв SiC, сформированных путём быстрой вакуумно-термической обработки кремния.

Методами ПЭМ и ПЭД (рисунок 1) установлено, что при давлении  $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па (в среде пропан-аргона 10%  $C_3H_8/Ar$ ) и температурах  $1000 \div 1300$  °С, формируются кристаллические слои кубического поли типа SiC (3C-SiC) на кремнии.



На вставках представлены картины электронной дифракции  
Рисунок 1 – Светлопольные ПЭМ-микрофотографии в режиме  
«plan-view» структур SiC/Si, сформированных при различных  
температурах: (а) – 1000 °С, (б) – 1100 °С, (в) – 1200 °С

На вставках рисунка 1 представлены ПЭД-картины, на которых можно выделить две группы точечных рефлексов, которые обусловлены дифракцией электронов на кремниевой подложке ( $a = 0,543$  нм) рефлексы  $\{220\}$  и кубического поли типа 3C-SiC ( $a = 0,435$  нм) рефлексы  $\{111\}$ ,  $\{220\}$ ,  $\{311\}$ . При этом, относительная интенсивность колец и рефлексов изменяется в зависимости от температуры вакуумно-термической обработки кремния. Так, на ПЭД-микрофотографии структуры SiC/Si, сформированной при температуре 1000 °С (рисунок 1, а), отчётливо видны кольца, обусловленные наличием заметного количества зёрен поликристаллического SiC, а структура колец указывает на малый средний размер зёрен SiC. Кроме того, выявлены экстра-рефлексы типа  $1/9 \{7 \bar{5} 13\}$  и  $1/9 \{\bar{1}1 11 1\}$ , которые являются результатом дифракции на вторичных двойниках SiC. При температуре 1100 °С и 1200 °С (рисунок 1, б–в) интенсивность колец по сравнению с интенсивностью точечных рефлексов существенно снижается, что свидетельствует о том, что формируется слой

монокристаллического 3C-SiC с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным {111} плоскостям. Анализ КРС спектров хорошо коррелирует с данными ПЭД. На спектрах КРС выделить пики  $793\text{ см}^{-1}$  и  $180\text{ см}^{-1}$ , а также широкую полосу в районе  $850\div1000\text{ см}^{-1}$  свидетельствующие о формировании слоя 3C-SiC содержащего дефекты деформации. Из анализа данных инфракрасной Фурье-спектроскопии следует, что эпитаксиальные слои SiC сформированные при быстрой вакуумно-термической обработке кремния содержат дефекты деформации и комплексы Si-O-Si, количество которых уменьшается при использовании предварительной обработки в атмосфере водорода при температурах  $700\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$  длительностью 10 минут.

Методами РОР и РЭМ (рисунок 2) выявлено, что быстрая вакуумно-термическая обработка кремния приводит к формированию слоёв SiC толщиной  $20\div150\text{ нм}$ , в зависимости от температурных и вакуумных условий. На вставке рисунка 2а представлена РЭМ микрофотография структуры SiC/Si сформированной при  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Видно, что сформирован сплошной слой SiC, полностью покрывающий поверхность подложки. Одновременно в Si-подложке хорошо различаются поры микронных размеров, формирование которых, обусловлено эффектом Киркендалла. Вакуумно-термическая обработка кремния при  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к зарастанию слоя SiC над порами и созданию свободно нависающих мостиковых структур без признаков их заметного провисания.

При анализе спектров РОР образцов, полученных при быстрой вакуумной карбидизации в диапазоне температур  $1000\div1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , было установлено, что при увеличении температуры вакуумной карбидизации толщина SiC непрерывно возрастает и изменяется от 20 до 150 нм, однако при этом можно выделить два температурных интервала, в пределах которых рост SiC существенно различается. Экспериментально полученные зависимости Аррениуса для толщины SiC от температуры представлены на рисунке 2б. Коэффициент диффузии и энергия активации могут быть определены классическими выражениями:

$$X^2 = D * t$$

$$D = D_0 * e^{-E_A/kT}$$

где X– толщина слоя SiC;

$D_0$  – предэкспоненциальный фактор;

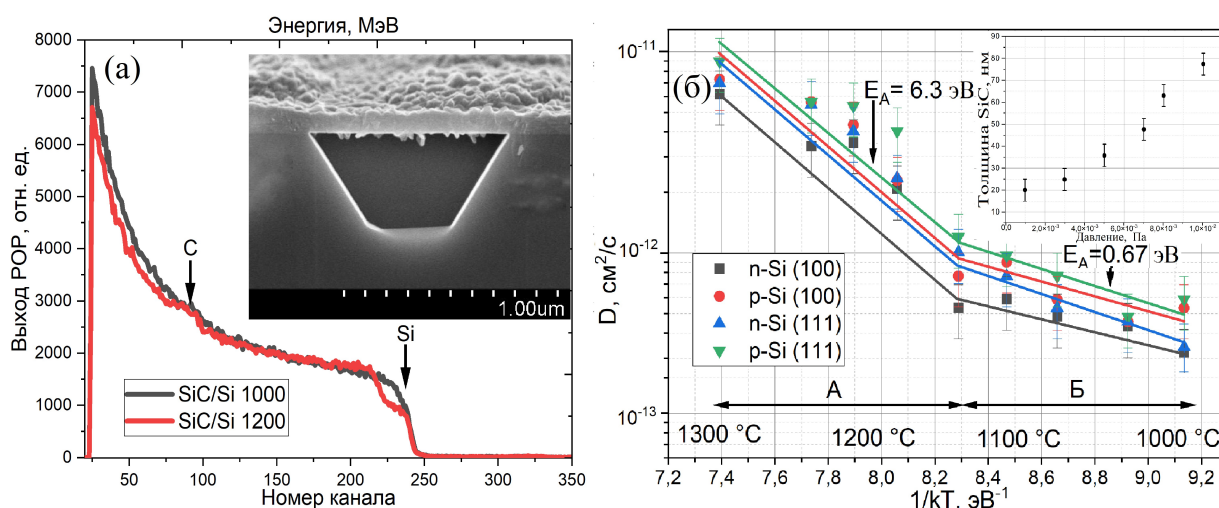
$E_A$  – энергия активации;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

Анализ результатов измерения толщины слоёв SiC методами РЭМ и РОР (рисунок 2) в виде линий Аррениуса для величин D в сочетании с результатами

структурных исследований (рисунок 1), позволяет интерпретировать различие в энергиях активации с точки зрения диффузионно-лимитированного процесса роста слоёв SiC. При низкотемпературной карбидизации сформированы более тонкие слои SiC, которые к тому же не являются сплошными, поэтому их рост, предположительно, лимитируется поверхностной диффузией атомов (низкое значение  $E_A$ ). В низкотемпературном процессе, с энергией активации  $E_A = 0,67 \pm 0,05$  эВ, доминирующим механизмом является поверхностная реакция кремния и углерода. Согласно данным, представленным на вставке рисунка 2б, в этом режиме толщина сформированного слоя SiC практически линейно зависит от давления в реакционной камере. В высокотемпературной области существенное увеличение энергии активации до  $E_A = 6,3 \pm 0,4$  эВ можно объяснить заращиванием большей части несплошностей в слоях SiC и сменой диффузионного механизма. В соответствии с экспериментальными результатами и литературными данными предполагается, что в высокотемпературной области вакуумной карбидизации лимитирующим механизмом является объёмная диффузия вакансий. Результаты исследований интерпретированы в рамках модифицированной модели Дила-Гроува, учитывающей доминирующую диффузию атомов кремния на внешнюю поверхность слоя SiC с последующей реакцией синтеза SiC, лимитированной объёмной диффузией атомов Si по вакансионному механизму на высокотемпературной стадии.

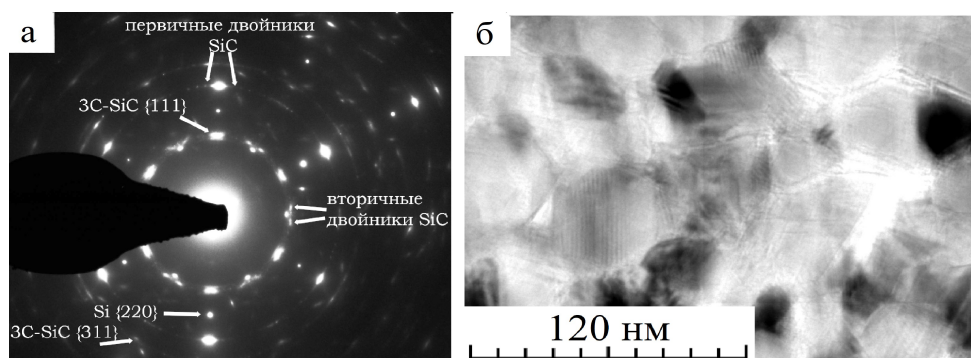


**На вставках микрофотография РЭМ структуры SiC/Si и зависимость толщины слоёв SiC от давления в реакторе**

**Рисунок 2 – Спектры ROP структур SiC/Si (а), сформированных при температурах 1000 °С и 1200 °С; Линии Аррениуса структур SiC/Si (б)**

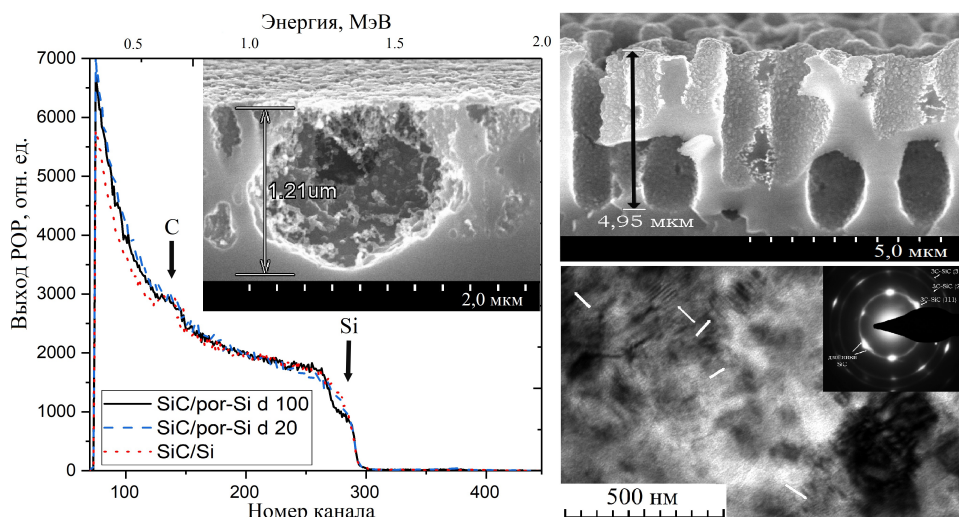
Молекулярно-лучевой эпитаксией на кремниевых пластинах с буферным слоем SiC были изготовлены структуры SiC/Si и Si/SiC/Si. Методами ПЭМ и

ЭД (рисунок 3) показано, что на буферных слоях SiC, полученных при быстрой вакуумно-термической обработке кремния, сформированы эпитаксиальные слои 3C-SiC.



**Рисунок 3 – ПЭМ-изображения структуры SiC/Si (а) дифракционная картина; (б) ПЭМ-микрофотография**

Исследованы особенности формирования слоёв SiC на пористом кремнии. Выявлено, что вакуумно-термическая обработка пористого кремния приводит к формированию смеси фаз 3C-SiC (рисунок 4), при этом, формируется слой SiC большей толщины, чем на подложках монокристаллического кремния в тех же условиях (47,1 нм на монокристаллическом Si и 60 нм на por-Si).



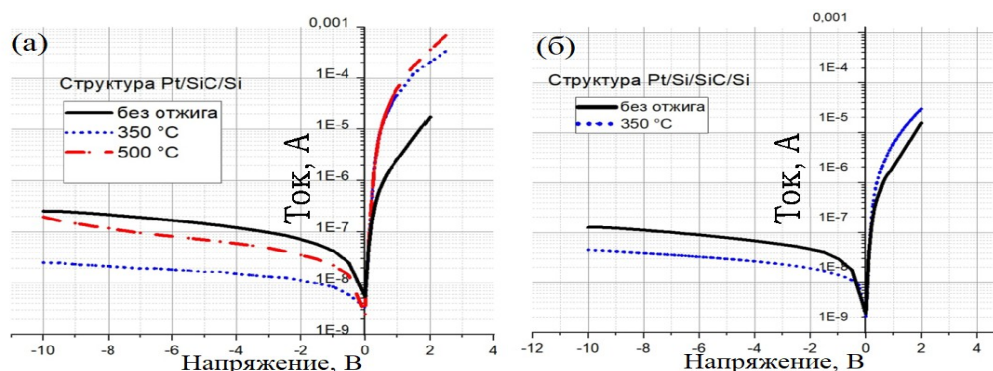
**На вставках микрофотография РЭМ структуры SiC/ por-Si и картина электронной дифракции**

**Рисунок 4 – Спектры Raman структур SiC/Si и SiC/por-Si (а); РЭМ-микрофотография (б) и ПЭМ-изображение (в) структуры SiC/por-Si**

Методом РЭМ обнаружено, что при вакуумно-термической обработке происходит нарастание слоя SiC поверх пор, а в пустотах внутри пористого слоя формируются нанокристаллы SiC.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты по формированию и исследованию электрофизических характеристик барьерных структур металл-карбид кремния.

Методами просвечивающей электронной микроскопии, резерфордовского обратного рассеяния и рентеноструктурного анализа установлено, что термообработка структур Pt/SiC/Si и Pt/Si/SiC/Si в интервале температур 350÷900 °С приводит к формированию слоёв, содержащих силициды платины PtSi, Pt<sub>2</sub>Si, Pt<sub>3</sub>Si. Термообработка при 350 °С структур Pt/Si/SiC/Si и Pt/SiC/Si приводит к формированию слоев, содержащих Pt<sub>2</sub>Si, Pt<sub>3</sub>Si с удельным сопротивлением 36 и 48 мкОм·см соответственно. Установлено, что термообработка структур Pt/Si/SiC/Si и Pt/SiC/Si при 350 °С приводит к уменьшению обратных токов до уровня 40 нА у всех типов структур. Однако, в случае структуры Pt/SiC/Si, дальнейшее увеличение температуры обработки до 500 °С сопровождается увеличением тока утечки до 195 нА.



**Рисунок 5 – Вольт-амперные характеристики структур металл-карбид кремния до и после термообработки при 350 °С и 500 °С  
(а) – структура Pt/SiC/Si, (б) – структура Pt/Si/SiC/Si**

Параметры выпрямляющих контактов, такие как высота барьера и фактор идеальности, рассчитаны с использованием формул:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

где  $I_0$  – обратный ток;

$n$  – фактор идеальности;

$T$  – температура измерения.

Обратный ток насыщения выражается формулой:

$$I_0 = A^{**} S T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right)$$

где  $A^{**}$  – модифицированная постоянная Ричардсона;

$S$  – площадь контакта;

$\phi_B$  – высота барьера.

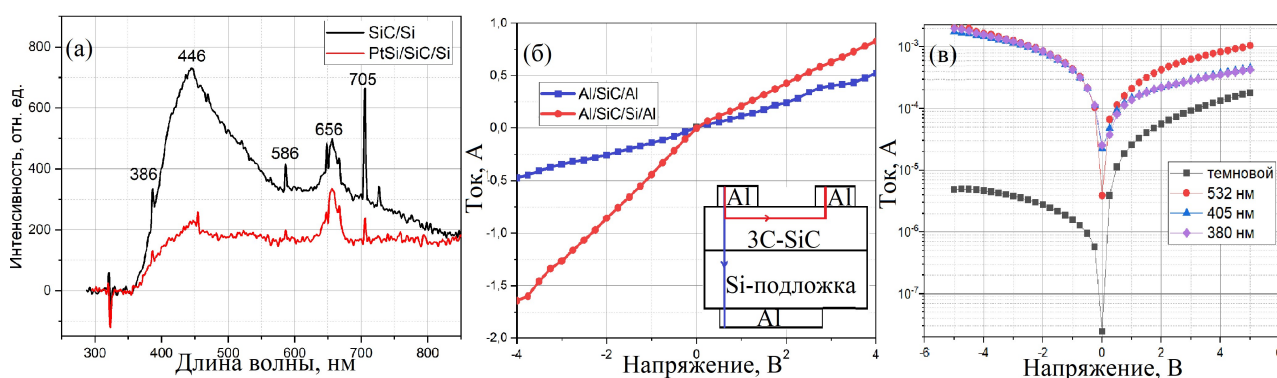
Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Контактные свойства сформированных структур при различных режимах термообработки

| Структура    | Термообработка, °C | Высота барьера, эВ | Фактор идеальности | Обратный ток, А (V <sub>R</sub> =10 В) |
|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------|
| Pt/SiC/Si    | -                  | 0.75               | 2.88               | $2.53 \cdot 10^{-7}$                   |
| Pt/Si/SiC/Si | -                  | 0.76               | 2.92               | $1.27 \cdot 10^{-7}$                   |
| Pt/SiC/Si    | 350                | 0.79               | 1.76               | $2.54 \cdot 10^{-8}$                   |
| Pt/SiC/Si    | 500                | 0.78               | 1.92               | $1.95 \cdot 10^{-7}$                   |
| Pt/Si/SiC/Si | 350                | 0.77               | 2.12               | $4.50 \cdot 10^{-8}$                   |

Таким образом, в результате термообработки при 350 °C в обоих типах структур происходит уменьшение тока утечки, коррелирующее с увеличением высоты барьера Шоттки. Также наблюдается уменьшение фактора идеальности, что возможно связано с улучшением условий прохождения тока через границу раздела. В свою очередь, термообработка при 500 °C приводит к уменьшению высоты барьера в структуре Pt/SiC/Si и, как следствие, к увеличению токов утечек. Установлено, что обработка меза-структур силицид/SiC/Si ультрафиолетовым излучением в спектральном диапазоне порядка 3,06 эВ в течении 1 часа позволяет уменьшить плотность токов утечки выпрямляющих контактов до  $7 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>.

Показано, что в спектрах фотолюминесценции структур SiC/Si и Pt<sub>2</sub>Si/SiC/Si проявляются широкие полосы с максимумом в синей (2,8 эВ) и красной (1,9 эВ) областях спектра (рисунок 6).



**Рисунок 6 – Спектр фотолюминесценции гетероструктур SiC/Si с контактом Pt<sub>2</sub>Si (а); вольт-амперные характеристики структур SiC/Si (б), (в) в темной комнате и при освещении лазером 380 нм, 405 нм и 532 нм**

Установлено, что максимумы фототока структур SiC/Si в спектральных полосах 1,1–1,23 эВ и 2,1–2,3 эВ связаны с шириной запрещенной зоны Si и SiC

соответственно, а увеличение фототока в областях спектра  $1,25 \div 1,4$  эВ и  $1,5 \div 2,0$  эВ вызвано дефектами, находящимися у границы раздела SiC/Si.

Структура SiC/Si с омическими контактами Al (рисунок 6) демонстрирует выпрямляющую ВАХ. Установлено, что темновой ток утечки составляет 0,4 мкА, а фактор идеальности прямого тока смещения составляет 1.3. Освещение структуры в видимом диапазоне и ближнем ультрафиолете приводит к увеличению тока утечки до 3,4 мА. Наблюдается влияние видимого (532 нм) и ультрафиолетового (380 нм) света на прямой ток гетероструктуры SiC/Si. Видимый свет проходит через слой SiC и поглощается в кремнии, что приводит к генерации фототока. С другой стороны, при освещении ультрафиолетовым излучением фотоны в основном поглощаются в слое 3C-SiC, и не достигают подложки кремния, что приводит к низкой эффективности фотопреобразования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

В настоящей работе исследованы физические закономерности формирования слоёв карбида кремния посредством быстрой термической обработки пластин кремния в углеродосодержащей вакуумной среде. В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Разработаны физико-технологические основы метода быстрого ( $5 \div 60$  секунд) вакуумно-термического синтеза слоёв 3C-SiC на Si, при котором в газовой смеси (10%  $C_3H_8/Ar$ ) при давлении  $10^{-2} \div 10^{-4}$  Па и температурах  $1100 \div 1300$  °C формируются тонкие эпитаксиальные слои 3C-SiC. Методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии в поперечном сечении, а также спектроскопии резерфордского обратного рассеяния установлено, что при изменении технологических условий формирования толщина SiC изменяется от 20 нм при температуре 1100 °C и длительности процесса 5 с до 150 нм при температуре 1300 °C и длительности процесса 60 с, при сохранении эпитаксиального качества слоев SiC [2–А; 6–А; 7–А; 8–А; 10–А; 11–А; 16–А; 17–А; 19–А].

2. Методами просвечивающей электронной микроскопии и электронной дифракции установлено, что быстрая ( $5 \div 60$  секунд) вакуумно-термическая обработка кремния при температурах  $1100 \div 1300$  °C приводит к формированию преимущественно монокристаллического кубического поли типа карбида кремния (3C-SiC) с поликристаллическими включениями и двойниками по всем возможным  $\{111\}$  плоскостям. Методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, инфракрасной Фурье-спектроскопии и фотолюминесценции установлено, что эпитаксиальные слои SiC сформированные при быстрой вакуумно-термической обработке кремния

содержат дефекты деформации и комплексы Si-O-Si. При этом, предварительная термообработка в атмосфере водорода позволяет полностью устранить комплексы Si-O-Si и снизить концентрацию дефектов деформации. Результаты исследований и изготовленные образцы структур используются в учебном процессе [2–А; 6–А; 8–А; 10–А; 11–А; 17–А; 19–А].

3. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что вакуумно-термическая обработка в углеродосодержащей среде кремния с буферными слоями пористого кремния приводит к формированию плёнки в виде смеси фаз поли- и монокристаллического 3C-SiC с преобладанием поликристаллической фазы. Методами растровой электронной микроскопии обнаружено, что при 10 минутной обработке в вакууме  $1 \cdot 10^{-3}$  Па при температуре 1100 °С происходит образование зерен SiC со средним размером 41,7 нм внутри пор, при одновременном спекании пор и зарастании поверхности пленкой SiC, толщина которой, в зависимости от температуры и размера пор, изменяется от 50 до 350 нм [3–А; 5–А; 9–А].

4. Из экспериментально полученных кривых Аррениуса зависимости толщины SiC от температуры процесса эпитаксиального роста установлено, что при быстрой вакуумно-термической обработке формирование слоев SiC на (111) кремнии р-типа проходит в две стадии, которые характеризуются энергиями активации  $E_A = 0,67 \pm 0,05$  эВ и  $E_A = 6,3 \pm 0,6$  эВ. На низкотемпературной стадии формируются более тонкие слои SiC с нарушением сплошности, рост которых лимитируется поверхностной диффузией атомов Si и C, что характеризуется низкими значениями  $E_A$ . Увеличение температуры приводит к формированию сплошных слоев SiC и, соответственно, смене доминирующего диффузионного механизма на объёмный (диффузии Si из подложки по вакансионному механизму), что сопровождается возможностью реализации более высокой энергии активации роста SiC до 6.3 эВ. Обнаружено, что энергия активации роста SiC зависит от проводимости и ориентации подложки. Результаты исследований интерпретированы в рамках модифицированной модели Дила-Гроува, учитывающей доминирующую диффузию атомов кремния на внешнюю поверхность слоя SiC с последующей реакцией синтеза SiC [6–А; 7–А; 11–А; 16–А].

5. В структурах SiC/Si обнаружена фотолюминесценция с преобладанием излучения в синей (2,8 эВ) области спектра и пика излучения в области спектра 1,75 эВ, которые свидетельствуют о формировании монокристаллического эпитаксиального SiC. В структурах PtSi/SiC/Si обнаружено преобладание излучения фотолюминесценции с преобладанием в красной (1,9 эВ) области спектра. Установлено, что максимумы фототока структур SiC/Si, соответствующие спектральным полосам 1,1–1,23 эВ и 2,1–2,3 эВ

связаны с шириной запрещенной зоны Si и SiC соответственно, а увеличение фототока в областях спектра  $1,25 \div 1,4$  эВ и  $1,5 \div 2,0$  эВ вызвано дефектами у границы раздела SiC/Si. Результаты исследований используются в учебном процессе [1–А; 2–А; 5–А; 8–А; 14–А; 16–А; 18–А; 20–А– 25–А; 27–А].

6. Методами просвечивающей электронной микроскопии, резерфордовского обратного рассеяния и рентеноструктурного анализа установлено, что термообработка структур Pt/SiC/Si и Pt/Si/SiC/Si в интервале температур  $350 \div 900$  °С приводит к формированию слоёв, содержащих силициды платины PtSi, Pt<sub>2</sub>Si, Pt<sub>3</sub>Si. Из измерения вольт-амперных характеристик указанных структур установлено, что их термообработка в интервале температур  $350 \div 500$  °С длительностью 10 минут в атмосфере аргона позволяет формировать выпрямляющие контакты с коэффициентом идеальности и высотой барьера изменяющимися в интервале от 2.92 до 1.76, высотой барьеров от 0.75 до 0.79 эВ, что позволило при обратном смещении 10 В уменьшить плотность токов утечки выпрямляющих контактов на порядок от  $2,5 \cdot 10^{-4}$  до  $2,5 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>. Установлено, что обработка меза-структур силицид/SiC/Si ультрафиолетовым излучением с длиной волны порядка 3,06 эВ позволяет уменьшить плотность токов утечки выпрямляющих контактов до  $7 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> [4–А; 5–А; 12–А; 13–А; 15–А; 22–А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке физико-технологических режимов формирования слоёв 3C-SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния для создания нового поколения приборов силовой электроники. Результаты представляют практический интерес для предприятий электронной промышленности Республики Беларусь.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры физической электроники и нанотехнологий факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета (получено 3 акта внедрения).

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТУПЕНИ**

### ***Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий***

1–А. Структурные и оптические характеристики гетероструктур SiC/Si, полученных методом быстрой вакуумно-термической карбидизации кремния / М.В. Лобанок, А.И. Мухаммад, П.И. Гайдук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т.89, №2. – С.204-209.

2–А. Формирование эпитаксиальных слоёв 3C-SiC на Si методом быстрой вакуумно-термической обработки / М.В. Лобанок, С.Л. Прокопьев, М.А. Моховиков, О.В. Королик, П.И. Гайдук // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 2. – С. 79-86.

3–А. Формирование SiC методом вакуумной карбидизации на пористом кремнии /М.В. Лобанок, С.Л. Прокопьев, С.А. Завацкий, В.П. Бондаренко, П.И. Гайдук // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, №6. – С.14-21.

4–А. Влияние термообработки на электрофизические характеристики контактов Pt к гетероструктурам SiC/Si / М.В. Лобанок, Н.В. Полонский, С.В. Козодоев, П.И. Гайдук // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2022. – №6 (135). – С.124-129.

5–А. Фотоэлектрические характеристики гетероструктур SiC/Si /М.В. Лобанок, Н.В. Полонский, П.И. Гайдук // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т.90, №5. – С.776-780.

6–А. Температурная зависимость роста 3C-SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния /М.В. Лобанок, П.И. Гайдук // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, №4. – С.12-18.

### ***Статьи в других научных изданиях***

7–А. Влияние пористого буферного слоя на рост карбида кремния на кремниевой подложке / М.В. Лобанок, А.Л. Долгий, С.Л. Прокопьев, В.П. Бондаренко, П.И. Гайдук // Электроника плюс. – 2018. – №4. – С. 60-62.

8–А. Формирование ячеистой профилированной поверхности SiGe для выращивания эпитаксиального SiC на Si / П.И. Гайдук, С.Л. Прокопьев, А.Г. Новиков, М.В. Лобанок // Электроника плюс. – 2018. – №4. – С. 57-59.

### ***Статьи в сборниках материалов научных конференций***

9–А. Влияние температуры на структуру слоёв SiC, сформированных при отжиге кремниевых пластин в вакууме / А.А. Батулев, М.В. Лобанок, С.Л. Прокопьев, А.Г. Новиков, О.В. Мильчанин, П.И. Гайдук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11–12

мая 2017 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: В.И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2017. – С. 228-230.

10–А. Effect of hydrogen pre-treatment on the structure of SiC films grown on (001) -Si-substrate / M.V. Lobanok, A.G. Novikau, S.L. Prakopyeu, P.I. Gaiduk // 26th International Symposium “Nanostructures: physics and technologies”– Minsk, 2018. – P. 125-126.

11–А. Влияние буферного слоя пористого кремния на рост карбида кремния на кремниевой подложке / М.В. Лобанок, С.Л. Прокопьев, А.Г. Новиков, О.В. Мильчанин, А.Л. Долгий, В.П. Бондаренко, П.И. Гайдук // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. 8-й Междунар. научн. конф., Минск, 2018 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.].– Минск, 2018. – С. 285–290.

12–А. Выращивание гетероструктур 3C-SiC / (100) Si при быстрой термической обработке / М.В. Лобанок, С.Л. Прокопьев, М.А. Моховиков, П.И. Гайдук // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. 9-й Междунар. научн. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол. : В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 362-365.

13–А. Growth of thin silicon carbide layers by rapid thermal treatment of silicon wafers / M.V. Lobanok, S.L. Prakopyeu, M.A. Makhavikou, P.I. Gaiduk // 28th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology” –2020. – P. 212-213.

14–А. Исследование электрофизических характеристик контактов Ti к эпитаксиальным слоям 3C-SiC/Si / Н.В. Полонский, С.В. Козодоев, М.В. Лобанок, И.А. Романов, П.И. Гайдук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы четвертой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2021 – С. 168-170.

15–А. Влияние импульсного лазерного отжига на электрофизические характеристики барьерной структуры Ni/3C-SiC/Si / Н.В. Полонский, С.В. Козодоев, М.В. Лобанок, П.И. Гайдук // Квантовая электроника: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 22–26 ноября 2021 г. / БГУ, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований / редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) А.А. Афоненко, А.В. Баркова]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 398-401.

16–А. Оптические характеристики гетероструктур SiC/Si, полученных методом быстрой вакуумно-термической карбидизации кремния / М.В. Лобанок, А.И. Мухаммад, П.И. Гайдук // Квантовая электроника:

материалы XIII Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 22–26 ноября 2021 г. / БГУ, НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, Ин-т физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований / редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) А.А. Афоненко, А. В. Баркова]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 232–235.

17–А. Сравнительное исследование барьерных структур SiC/Si и Pt<sub>2</sub>Si/SiC/Si / Н.В. Полонский, М.В. Лобанок, П.И. Гайдук // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. 10-й Междунар. научн. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 180-184.

18–А. Температурная зависимость роста SiC при быстрой вакуумно-термической обработке кремния / М.В. Лобанок, М.А. Моховиков, П.И. Гайдук // Материалы и структуры современной электроники: сб. научн. тр. 10-й Междунар. научн. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол. : В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 133-137.

19–А. Формирование слоёв SiC на структурах поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si / Н.В. Полонский, М.В. Лобанок, П.И. Гайдук // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» Белорус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2023 – С. 357-359.

### ***Тезисы докладов***

20–А. Growth of thin epitaxial silicon carbide layers on patterned substrates / A. Novikau, S. Prakopyeu, A. Batulev, M. Lobanok, P. Gaiduk // International Conference EMRS Fall Meeting 2017, Symposium M: Material and device integration on silicon for advanced applications. Warsaw University of Technology. Sept. 18-21, 2017. Program and Book of Abstracts. - p.M.4.4.

21–А. Growth of thin silicon carbide layers on silicon-germanium buffers / A. Novikau, M. Lobanok, S. Prakopyeu, P. Gaiduk // Book of abstracts: 60th International student conference «Open Readings 2017» – 2017. – P.312.

22–А. Raman spectroscopy of epitaxial SiC films grown on SiGe/Si substrates / M.V. Lobanok, M.A. Piatrou, A.G. Novikau, S.L. Prakopyeu, P.I. Gaiduk // Book of abstracts: 61<sup>th</sup> International student conference «Open Readings 2018» – 2018. – P.165.

23–А. Effect of hydrogen pre-treatment on SiC-on-Si epitaxial growth / M.V. Lobanok, A.G. Novikau, S.L. Prakopyeu, P.I. Gaiduk // Book of abstracts: 61<sup>th</sup> International student conference «Open Readings 2018» – 2018. – P.37.

24—A. Raman spectroscopy of SiC layers grown by rapid thermal carbonization of (100) Si / M.V. Lobanok, S.L. Prakopyeu, O.V. Korolik, P.I. Gaiduk // Book of abstracts: 63<sup>th</sup> International student conference «Open Readings 2020» – 2020. – P.57.

25—A. Raman spectroscopy of 3C-SiC / Si heterostructure grown by rapid thermal carbonization (100) Si / M.V. Lobanok, S.L. Prakopyeu, O.V. Korolik, P.I. Gaiduk // Book of abstracts: 64<sup>th</sup> International student conference «Open Readings 2021» – 2021. – P. 848.

26—А. Электрофизические характеристики структур Ni/3C-SiC/Si, модифицированных лазерными импульсами / Н.В. Полонский, М.В. Лобанок, П.И. Гайдук // сборник тезисов II международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА–2022». – Минск, 2022. – С.68.

27—А. Влияние водородной обработки на оптические характеристики гетероструктуры SiC/Si / М.В. Лобанок, А.И. Мухаммад, П.И. Гайдук // сборник тезисов II международной научно-технической конференции «ОПТО-, МИКРО- И СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА–2022». – Минск, 2022. – С.57.

Лабанок Міхаіл Ўладзіміравіч

**ХУТКАЕ ВАКУУМНА-ТЭРМІЧНАЕ ФАРМАВАННЕ  
ЭПІТАКСІЯЛЬНЫХ ПЛАСТОЎ 3C-SiC І ПРЫБОРНЫХ СТРУКТУР  
НА ІХ АСНОВЕ**

**Ключавыя словы:** вакуумна-тэрмічная апрацоўка, карбідызацыя, гетэраструктуры SiC/Si, тэрмаапрацоўка, сіліцыд плаціны, фоталюмінесцэнцыя, тонкія плёнкi.

**Мэта работы:** устанаўленне фізічных заканамернасцей фарміравання пластоў карбіду крэмнію з дапамогай хуткай тэрмічнай апрацоўкі пласцін крэмнію ў вугляродазмяшчальным вакуумным асяроддзі. Вызначэнне ўплыву тэмпературы, тыпу падкладкі і станы паверхні на структурна-фазавы склад, аптычныя і электрычныя ўласцівасці пластоў карбіду крэмнія.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** спектраскапія рэзерфордовскага зваротнага рассеявання, якая прасвечвае электронная мікраскапія, электронная дыфракцыя, растрвая электронная мікраскапія, камбінацыйнае рассеяванне святла, інфрачырвоная Фур'е-спектраскапія, фоталюмінесцэнцыя.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** Праведзена даследаванне элементнага складу, структурна-фазавых, аптычных і электрафізічных характарыстык пластоў кубічнага карбіду крэмнію, сфармаванага пры хуткай вакуумна-тэрмічнай апрацоўцы крэмнія, у залежнасці ад параметраў карбідызацыі і структурных уласцівасцяў падкладкі.

Выяўлена заканамернасць змены структурна-фазавых характарыстык пластоў SiC пры вар'іраванні рэжымаў вакуумна-тэрмічнай апрацоўкі крэмнія. Устаноўлена, што фарміраванне пластоў SiC праходзіць у два этапы, якія характарызуюцца рознымі энергіямі актывацыі, што паказвае на змену лімітуюча працэсу.

Выяўлена, што, вар'іруючы тэмпературу адпалу кантактаў Pt да пластоў SiC, можна атрымаць выпроствалыя кантакты сіліцыдаў плаціны PtSi і Pt<sub>2</sub>Si з рознымі электрафізічнымі характарыстыкамі. Пры гэтым, змяненне токаў уцечак структур пры павелічэнні тэмпературы тэрмаапрацоўкі звязана з адукацыяй вугляродных кластараў на межах падзелу сіліцыд-карбід крэмнію.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення:** Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы матэрыялаў сілавой электронікі і структур бачнага і ўльтрафіялетавага дыяпазонаў для новых прыбораў крамянёвай оптаэлектронікі.

**Лобанок Михаил Владимирович**

**БЫСТРОЕ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ  
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ 3C-SiC И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР  
НА ИХ ОСНОВЕ**

**Ключевые слова:** вакуумно-термическая обработка, карбидизация, гетероструктуры SiC/Si, структура, термообработка, силицид платины, фотолюминесценция, тонкие плёнки.

**Цель работы:** установление физических закономерностей формирования слоёв карбида кремния посредством быстрой термической обработки пластин кремния в углеродосодержащей вакуумной среде. Определение влияния температуры, типа подложки и состояния поверхности на структурно-фазовый состав, оптические и электрические свойства слоёв карбида кремния.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния, просвечивающая электронная микроскопия, электронная дифракция, растровая электронная микроскопия, комбинационное рассеяние света, инфракрасная Фурье-спектроскопия, фотолюминесценция.

**Полученные результаты и их новизна:** Проведено исследование элементного состава, структурно-фазовых, оптических и электрофизических характеристик слоёв кубического карбида кремния, сформированного при быстрой вакуумно-термической обработке кремния, в зависимости от параметров карбидизации и структурных свойств подложки.

Обнаружена закономерность изменения структурно-фазовых характеристик слоёв SiC при варьировании режимов вакуумно-термической обработки кремния. Установлено, что формирование слоёв SiC проходит в два этапа, характеризующихся различными энергиями активации, что указывает на смену лимитирующего процесса.

Обнаружено, что, варьируя температуру отжига контактов Pt к слоям SiC, можно получить выпрямляющие контакты силицидов платины PtSi и Pt<sub>2</sub>Si с различными электрофизическими характеристиками. При этом, изменение токов утечек структур при увеличении температуры термообработки связано с образованием углеродных кластеров на границах раздела силицид-карбид кремния.

**Рекомендации по использованию и область применения:** Полученные результаты могут быть использованы при разработке материалов силовой электроники и структур видимого и ультрафиолетового диапазонов для новых приборов кремниевой оптоэлектроники.

## SUMMARY

**Mikhail V. Labanok**

### **RAPID VACUUM-THERMAL FORMATION OF 3C-SiC EPITAXIAL LAYERS AND DEVICE STRUCTURES BASED ON THEM**

**Keywords:** vacuum heat treatment, carbonization, SiC/Si heterostructures, heat treatment, platinum silicide, photoluminescence, thin films.

**The aim of** this work is to establish the patterns of the formation of silicon carbide layers by means of rapid heat treatment of silicon wafers in a carbon-containing vacuum environment. Determination of the effect of temperature, substrate type and surface condition on the structural-phase composition, optical and electrical properties of silicon carbide layers.

**Research methods and equipment used:** Rutherford backscattering spectroscopy, transmission electron microscopy, electron diffraction, scanning electron microscopy, Raman scattering, infrared Fourier spectroscopy, photoluminescence.

**Obtained results and novelty:** A complex investigation of elemental composition, structural-phase, optical and electrophysical characteristics of the layers of cubic silicon carbide formed during the rapid vacuum-thermal treatment of silicon, depending on the parameters of carbidization and the structural properties of the substrate, have been carried out.

The regularities of changes in the structural-phase characteristics of SiC layers with varying modes of vacuum-thermal treatment of silicon is found. It has been established that the formation of SiC layers occurs in two stages, characterized by different activation energies, which indicates a change in the limiting process.

It was shown that by varying the annealing temperature of Pt contacts to SiC layers, it is possible to obtain rectifying contacts of PtSi and Pt<sub>2</sub>Si platinum silicides with different electrical characteristics. At the same time, the change in the leakage currents of the structures with an increase in the heat treatment temperature is associated with the formation of carbon clusters at the interfaces between silicide and silicon carbide.

**Recommendation for use and area of application:** The obtained results will be useful in the development of materials for power electronics and structures in the visible and ultraviolet ranges for new silicon optoelectronic devices.



Подписано в печать 07.02.2025. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,5.  
Тираж 60 экз. Заказ 8.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика  
в республиканском унитарном предприятии  
«Издательский центр Белорусского государственного университета».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.  
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.