

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Объект авторского права  
УДК 621.382.2

**СОЛОВЬЁВ**  
**Ярослав Александрович**

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ  
БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ  
С УЛУЧШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Минск 2024

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» .

Научный консультант **Гайдук Петр Иванович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Лабунов Владимир Архипович**, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси и иностранный член (академик) РАН, главный научный сотрудник НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Гусев Олег Константинович**, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе Белорусского национального технического университета

**Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Оппонирующая организация ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «05» декабря 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232. E-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «01» ноября 2024 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д 02.15.03  
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей современных энергосберегающих изделий и технологий является эффективное управление преобразованием электрической энергии и снижение ее потерь в технологической цепи «производство – преобразование – использование», что составляет основу такого направления электронной техники, как силовая электроника. Решение данной задачи обеспечивается путем применения разнообразных микроэлектронных устройств, составляющих ее элементную базу. В частности, важное место среди них занимают диоды Шоттки, которые широко используются в качестве выпрямителей тока в схемах управления электропитанием, где по сравнению с традиционными *p-n*-диодами характеризуются меньшим падением напряжения при прямом смещении и лучшим быстродействием, вызванным отсутствием неосновных носителей.

Требования к электрическим параметрам кремниевых диодов Шоттки предъявляются исходя из условий их эксплуатации и регулируются как структурно-топологическими решениями, так и контактно-барьерными свойствами выпрямляющего контакта металл – полупроводник. Ключевым параметром, влияющим на контактно-барьерные свойства, является высота барьера Шоттки, определяемая главным образом эмиссионными свойствами материала контакта. Кроме того, на контактно-барьерные свойства значительно влияет состояние границы раздела между металлом и полупроводником, включая ее микроморфологию, а также присутствие промежуточных слоев и различных примесных загрязнений.

В кремниевой технологии химически чистая граница контакта металл – кремний достигается при его формировании диффузионным синтезом силицидов – химических соединений металлов с кремнием, обладающих металлическим характером проводимости. При этом для получения гладкой микроморфологии границы раздела силицидов с кремнием необходимо уменьшать тепловую нагрузку на подложку в процессе их диффузионного синтеза. Данная задача эффективно решается путем использования быстрой термической обработки (БТО).

Анализ процессов показывает, что наиболее перспективными для диффузионного синтеза силицидов контактно-барьерных структур диодов Шоттки являются процессы БТО облучением кремниевой подложки импульсом некогерентного излучения постоянной мощности от кварцевых галогенных ламп.

Выбор материала для контактно-барьерных структур диодов Шоттки осуществляют исходя из требуемой высоты барьера Шоттки, обусловленной максимальным температурным диапазоном их эксплуатации. При этом анализ

литературных данных показывает, что на контактно-барьерные свойства силицидов, формируемых диффузионным синтезом БТО, существенное влияние оказывает не только выбранный материал контакта, но и температурно-временные параметры процесса. Большинство современных работ по диффузионному синтезу силицидов БТО посвящено формированию контактно-барьерных структур для КМОП интегральной технологии с субмикронными проектными нормами. В то же время линейные размеры контактно-барьерных структур для диодов Шоттки различного назначения могут достигать нескольких миллиметров.

На момент начала исследований в Республике Беларусь отсутствовала серийная технология формирования быстрой термообработкой протяженных силицидных слоев для диодов Шоттки, предназначенных для эксплуатации в различных температурных диапазонах, в то время как зарубежные технологии защищены многочисленными патентами и подпадают под жесткие лицензионные ограничения. Имевшиеся технологии формирования слоев силицидов осуществлялись путем стационарных термообработок с использованием длительных (более 1 ч) и многостадийных отжигов при различных температурах, которые, с одной стороны, являются энергозатратными, а с другой – не обеспечивают достаточной чистоты процесса, особенно при использовании силицидов металлов с высокой реакционной способностью по отношению к кислороду.

Таким образом, для создания кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью требуется разработка новых технологических процессов формирования БТО контактно-барьерных структур с заданными свойствами.

Актуальность настоящей работы, являющейся концептуальным развитием направления «фотонные технологии для создания микроэлектронных структур», обусловлена необходимостью разработки новых технологических процессов формирования быстрой термической обработкой контактно-барьерных структур с заданными свойствами для кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Исследования, проведенные в рамках диссертации, соответствуют приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденному Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156, п. 4 «Машиностроение,

машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика».

Диссертация выполнена на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета и в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» в рамках следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

1. Грант Президента Республики Беларусь в науке на 2019 г. (распоряжение от 08.01.2019 № 4рп).

2. «Разработка моделей и методов формирования многослойных самосовмещенных пленочных структур изделий силовой полупроводниковой электроники» ГПНИ «Электроника и фотоника» на 2011–2015 гг., № ГР 20115599.

3. «Разработать и освоить диоды Шоттки в малогабаритных корпусах поверхностного монтажа для радиоэлектронной аппаратуры специального и общего применения» ГНТП «Микроэлектроника», подпрограмма «Микроэлектроника электронной компонентной базы» на 2016–2017 гг., № ГР 20170051.

4. «Разработка методов создания, конструкции и исследование элементной базы кремниевых субмикронных интегрированных структур диодов Шоттки, высоковольтных и радиационно стойких биполярных аналоговых микросхем и базовых матричных кристаллов с повышенным уровнем интеграции, включая разработку физико-технологических методов управления статическими и динамическими характеристиками барьерных структур, физических моделей и методов анализа эксплуатационных параметров элементов в расширенном диапазоне температур» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2018 гг., № ГР 20161762.

5. «Разработка физико-технологических методов управления и контроля статическими и динамическими характеристиками барьерных полупроводниковых структур» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2019–2020 гг., № ГР 20191100.

6. План работ ОАО «ИНТЕГРАЛ» по новой технике: ОКР «Разработать и изготовить опытный образец установки быстрой термообработки кремниевых пластин и создать технологические процессы улучшения электрических параметров изделий интегральной электроники на их основе», срок реализации 2018–2020 гг., № ГР 20181322.

7. Грант БРФФИ в номинации «Микроэлектроника» на тему «Контроль структурно-морфологических и электрофизических свойств твердотельных материалов и тонкопленочных субмикронных структур зондовыми методами», срок 2023–2024 гг., № Т23МЭ-010.

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

Целью работы является установление основных особенностей и закономерностей формирования структурно-фазовых состояний при быстрых термообработках систем Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si и Ni/Pt/Si и разработка технологических процессов формирования барьерных слоев диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– разработать физико-математическую модель нагрева кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, прогнозирующую изменение температуры кремниевой пластины в зависимости от мощности источника излучения и времени нагрева;

– установить закономерности формирования структурно-фазовых состояний при быстрых термообработках системы Cr/Si и разработать на ее основе технологический процесс формирования контактно-барьерных структур для использования в кремниевых диодах Шоттки;

– исследовать влияние условий быстрой термической обработки на закономерности изменений электрофизических и структурно-фазовых свойств системы Ni/Si и разработать на ее основе технологии формирования контактно-барьерных структур кремниевых диодов Шоттки;

– выявить закономерности влияния быстрой термической обработки на электрофизические и структурно-фазовые свойства системы Ni-Pt/Si и разработать на ее основе процесс формирования контактно-барьерных структур для кремниевых диодов Шоттки;

– установить закономерности изменений электрофизических и структурно-фазовых свойств системы Ni/Pt/Si от условий ее быстрой термической обработки и разработать методы формирования контактно-барьерных структур кремниевых диодов Шоттки на ее основе.

*Объектом исследования* являются слои силицидов, сформированные на поверхности кремниевой подложки методом быстрой термической обработки, и контактно-барьерные структуры диодов Шоттки на их основе.

*Предметом исследования* являются закономерности структурно-фазовых изменений в системах Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si, Ni/Pt/Si при их быстрой термической обработке, а также влияние таких изменений на электрические параметры кремниевых диодов Шоттки.

## **Научная новизна**

1. Предложена физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, основанная на

уравнении нестационарной теплопроводности, прогнозирующая изменение температуры пластины от мощности источника излучения и времени при нагреве от начальной температуры до 960 °С с отклонением менее 2,5 %.

2. Установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Cr/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании при температуре более 400 °С слоя CrSi<sub>2</sub> с размерами кристаллических зерен от 200 до 500 нм и волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, а в диапазоне температур от 450 до 500 °С – в стабилизации удельного сопротивления слоя CrSi<sub>2</sub> в диапазоне от 2 до 4 мОм·см и формировании сглаженного микрорельефа границы CrSi<sub>2</sub>/Si, характеризующейся высотой барьера Шоттки ~ 0,61 В.

3. Выявлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni/Si, вызванные ее быстрой термообработкой (~ 7 с) некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в образовании фазы Ni<sub>2</sub>Si при температуре 200 °С, силицидного слоя, содержащего фазы Ni, Ni<sub>2</sub>Si и NiSi, при температуре 300 °С и структурно-однородного слоя орторомбической фазы NiSi в диапазоне температур от 350 до 550 °С, который в интервале температур обработки от 400 до 450 °С характеризуется размерами кристаллитов от 100 до 200 нм, сглаженной границей раздела с кремнием и высотой барьера ~ 0,63 В.

4. Обнаружены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni-Pt-V/Si, происходящие после ее быстрой термической обработки (~ 7 с) при температуре от 450 до 500 °С некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, заключающиеся в образовании орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальных к подложке доменах β-Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub>, содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией силицида платины на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, приводящие к формированию контакта с высотой барьера ~ 0,71 В.

5. Установлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni-V/Pt/Si при ее быстрой термообработке (~ 7 с) в интервале температур от 400 до 600 °С в атмосфере N<sub>2</sub>, приводящей за счет диффузии Si при температуре 400 °С, Ni при температуре 450 °С и Pt при температуре выше 500 °С в результате последовательности фазовых переходов PtSi → NiSi → Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si соответственно к формированию на границе раздела с кремнием структурно однородного слоя со сглаженной морфологией

и уменьшенной дефектностью границы раздела  $Ni_xPt_ySi/Si$ , в которой при температуре 550 °С увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм обуславливает уменьшение высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

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

1. Физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности мощности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности, которая при электрической мощности источника излучения от 700 до 2700 Вт и коэффициенте ее преобразования в плотность мощности потока излучения  $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$  прогнозирует изменение температуры кремниевой пластины от начальной до 960 °С с отклонением менее 2,5 %, что позволяет управлять температурно-временными параметрами процессов быстрой термообработки полупроводниковых структур.

2. Закономерности структурно-фазовых изменений в системе Cr/Si при быстрой термообработке за  $\sim 7$  с некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере  $N_2$ , заключающиеся в образовании при температуре от 400 до 450 °С слоя  $CrSi_2$  с размерами кристаллических зерен от 200 до 500 нм и волнообразной морфологией поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией, а в диапазоне температур от 450 до 550 °С – в формировании сглаженного микрорельефа границы  $CrSi_2/Si$ , характеризующейся высотой барьера Шоттки  $\sim 0,61$  В, что позволяет создавать барьерные слои с увеличенной в 1,4 раза плотностью прямого тока по сравнению с барьером Mo/Si.

3. Механизм формирования барьерных слоев для диодов Шоттки с уменьшением до 1,15 раза прямого напряжения по сравнению с молибденовым барьером посредством быстрой термообработки системы Ni/Si импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, вызывающей при нагреве до температуры от 400 до 450 °С за  $\sim 7$  с в среде  $N_2$  образование в результате фазовых переходов  $Ni \rightarrow Ni_2Si \rightarrow NiSi$  структурно-однородного слоя и сглаженной границы раздела  $NiSi/Si$  с уменьшенной плотностью дефектов и высотой барьера Шоттки  $\sim 0,63$  В.

4. Закономерности изменений контактно-барьерных свойств системы Ni-Pt-V/Si при облучении импульсом некогерентного излучения постоянной мощности, заключающиеся в том, что ее нагрев в температурном диапазоне от 450 до 500 °С за  $\sim 7$  с в среде  $N_2$  позволяет получать барьерные слои для диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации за счет формирования в результате последовательности фазовых переходов



Ni→Ni<sub>2</sub>Si→NiSi слоев NiSi, содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией PtSi на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, что обуславливает формирование контактов с высотой барьера Шоттки ~ 0,71 В.

5. Установленные закономерности влияния нагрева системы Ni-V/Pt/Si с толщиной слоя Ni-V от 20 до 40 нм и слоя Pt ~40 нм импульсом некогерентного излучения постоянной мощности до температуры 550 °С за ~ 7 с в среде N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании барьерных слоев для диодов Шоттки расширенного температурного диапазона эксплуатации с уменьшением до 1,18 раза прямого напряжения по сравнению с PtSi/Si барьером, полученным стационарной термообработкой, что обусловлено синтезом в результате последовательности фазовых переходов PtSi→NiSi→Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si структурно-однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si/Si, в которой увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В.

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

В диссертации изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, лично выполненных автором. Им выбрано направление, сформулированы цель и задачи исследований, а также проведена интерпретация полученных результатов. Обсуждение и обобщение полученных результатов проводилось совместно с научным консультантом д-м физ.-мат. наук П. И. Гайдуком. Основные соавторы: – академик НАН Беларуси д-р физ.-мат. наук Ф. Ф. Комаров, чл.-кор. НАН Беларуси д-р техн. наук В. А. Пилипенко, д-р техн. наук А. С. Турцевич, д-р техн. наук В. А. Солодуха, д-р техн. наук В. В. Баранов, д-р физ.-мат. наук А. М. Чапланов, д-р физ.-мат. наук М. И. Маркевич, д-р техн. наук В. Л. Ланин, канд. техн. наук И. И. Рубцевич, канд. техн. наук В. П. Яковлев, канд. техн. наук В. А. Лапицкая, А. Ф. Керенцев, О. С. Васьков, Н. Г. Циркунова, О. Э. Сарычев – проводили численные расчеты и участвовали в измерениях и обсуждении результатов. Помощь в подготовке части образцов, проведении отдельных измерений и обработке результатов оказывали сотрудники БГУ и ОАО «ИНТЕГРАЛ»: С. В. Злоцкий, О. В. Мильчанин, Д. В. Жигулин.

На совместно опубликованные работы с авторами приведены ссылки. Результаты, полученные без вклада соискателя, в работу не вошли.

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

Основные результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на IV Международной научно-технической

конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2006 г.); 1st «Electronics Systemintegration Technology Conference» (Dresden, Germany, 2006 г.); VIII–XIV, XVIII, XXI Международных научно-практических конференциях «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, Украина, 2007–2013 гг., 2017 г., 2020 г.); XII, XIII, XV Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, Беларусь, 2007 г., 2008 г., 2010 г.); XII Международной конференции «Физика и технология тонких пленок и наносистем» (Ивано-Франковск, Украина, 2009 г.); 6th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation» (Lublin, Poland, 2009 г.); IX Международной конференции по актуальным проблемам физики материаловедения и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе (Санкт-Петербург, Россия, 2012 г.); IV конгрессе физиков Беларуси (Минск, Беларусь, 2013 г.); Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, Беларусь, 2014 г.); XXX Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, Россия, 2020 г.); 9-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2011 г.), 10-й, 13-й, 16-й Международных научно-технических конференциях «Приборостроение» (Минск, Беларусь, 2017 г., 2020 г., 2023 г.); I Международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ-электроника» (Минск, Беларусь, 2018 г.); XX Международной научной конференции «Молодежь в науке» (Минск, Беларусь, 2023 г.); III, V, VII–IX Международных научных конференциях «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, Беларусь, 2008 г., 2012 г., 2016 г., 2018 г., 2020 г.); Объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (Черноголовка, Россия, 2023 г.)

Результаты диссертации внедрены в серийное производство изделий электронной техники на филиале «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также в системы управления нагревом пластин в технологическом оборудовании быстрой термической обработки производства ООО «Перспективные инновационные технологии».

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликованы 82 печатные работы общим объемом 30,9 авторского листа, из них 1 монография общим объемом 2,5 авторского листа, 17 статей в научных изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения

о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий общим объемом 7,4 авторского листа, 8 статей в других научных изданиях общим объемом 3,7 авторского листа, 21 статья в материалах научных конференций общим объемом 4,7 авторских листа, 17 тезисов докладов на научных конференциях общим объемом 1,4 авторских листа, 18 патентов на изобретения общим объемом 10,5 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, семи глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и приложений.

Общий объем диссертации составляет 180 страниц, включая 97 страниц основного текста, 62 рисунка на 38 страницах, 14 таблиц на 11 страницах, список использованных источников, включающий библиографический список из 259 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 83 наименований, на 28 страницах, 2 приложения на 6 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена анализу особенностей формирования контактно-барьерных структур для кремниевых диодов Шоттки. Рассмотрены требования к кремниевым диодам Шоттки, проблемы формирования выпрямляющих контактов и приведены технологические методы формирования данных структур путем диффузионного синтеза силицидов.

Показано, что для создания диодов Шоттки с нужными характеристиками требуются технологии формирования высококачественных контактно-барьерных структур с заданной высотой барьера выпрямляющего контакта. Наиболее перспективными материалами для этих целей являются силициды металлов, характеризующиеся высокой стабильностью как собственных свойств, так и границей раздела с кремнием. При этом высокую однородность свойств границы силицид – кремний по площади обеспечивает твердофазный синтез силицидов, получаемых путем нанесения металла и последующей твердофазной реакции металла с кремнием подложки быстрой термообработкой, что в совокупности позволяет получать высококачественную границу раздела силицид – кремний в сочетании с самосовмещенной технологией ее формирования.

Отмечается, что для решения данных задач целесообразно использовать диффузионный синтез силицидов путем БТО в режиме теплового баланса потоком излучения кварцевых галогенных ламп, направленным на обратную сторону кремниевой подложки в течение ~ 7 с. Однако обеспечение заданных

температурно-временных параметров БТО требует разработки физико-математической модели нагрева кремниевой пластины, прогнозирующей изменение ее температуры от мощности источника излучения и времени процесса.

Выявлено, что для получения диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью и максимальной температурой эксплуатации от +100 до +175 °С необходимы технологии формирования пригодных к использованию в диодах Шоттки однородных и бездефектных слоев силицидов большой площади с высотой барьера от 0,62 до 0,76 В. Для разработки таких технологий требуются исследования особенностей формирования и контактно-барьерных свойств силицидных слоев, полученных быстрой термообработкой систем Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si и Ni/Pt/Si.

Во **второй главе** приведены методики подготовки образцов, а также методы исследований их структурно-фазовых и электрофизических свойств.

Влияние быстрой термообработки на структурно-фазовые, электрофизические и контактно-барьерные свойства силицидов изучали на подложках монокристаллического кремния с ориентацией поверхности (111) и нанесенным на рабочую сторону эпитаксиальным слоем кремния, легированным фосфором толщиной от 5 до 12 мкм и удельным сопротивлением от 0,5 до 2,8 Ом·см. Получение тонких (~ 30–40 нм) металлических пленок осуществляли магнетронным распылением мишеней на установках типов «SNT Sigma» (СтратНаноТек, Беларусь) для Cr и Ni; «01НИ-7-015» (НИИ ТМ, Россия) для сплава Ni-Pt-V с содержанием Pt 18 масс. % и V 5,0 масс. %; «MRC 603» (Applied Materials, США) для Pt и «UNV PVD» (Syskey, Тайвань) для сплава Ni-V с содержанием V 7 масс. %. Диффузионный синтез силицидов проводили методом БТО подложек в режиме теплового баланса путем облучения их с обратной стороны некогерентным потоком излучения кварцевых галогенных ламп постоянной мощности в среде азота в течение (~ 7 с) на установках «JetFirst 100» (Jipelec, Франция) и «УБТО ПИТ 1801» (ООО ПИТ, Беларусь). Выбранное время термообработки является достаточным для основных структурных и фазовых изменений в системах металл – кремний на этапе подъема температуры до перехода процесса в стационарную стадию.

Для измерений поверхностного электрического сопротивления применяли четырехзондовый метод с использованием измерителя «RS-35» (KLA Tencor, США). Для изучения фазовых, структурных и морфологических свойств силицидов и их границы с кремнием применяли методы атомно-силовой микроскопии с использованием атомно-силового микроскопа «Dimension FastScan» (Bruker, США), обратного резерфордского рассеяния (ORP) с помощью ускорительного комплекса «AN-2500» (High Voltage,

Нидерланды), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии плоских и поперечных сечений, а также в режиме дифракции электронов, выполненных на просвечивающем электронном микроскопе «Н800» (Hitachi, Япония), растровой электронной микроскопии с применением растрового электронного микроскопа «S-4800» (Hitachi, Япония) и рентгеновского фазового анализа (РФА) с помощью рентгеновского дифрактометра «ULTIMA IV» (Rigaku, Япония).

Контактно-барьерные свойства силицидов исследовали на структурах диодов Шоттки с охранным кольцом путем измерения вольт-амперных характеристик и определения высоты барьера Шоттки из начальных участков их прямых ветвей с точностью  $\pm 0,02$  В.

Энергоэффективность диодов Шоттки определяли путем сопоставления суммарных потерь энергии на диоде Шоттки при прямом и обратном смещении для сигнала с импульсами прямоугольной формы как положительной, так и отрицательной полярности при максимально допустимых прямом токе и обратном напряжении соответственно и длительности рабочего цикла 50 %.

**Третья глава** содержит результаты разработки физико-математической модели нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны потоком некогерентного излучения постоянной плотности в реакторе установки «УБТО ПИТ 1801», прогнозирующей изменение их температуры от мощности источника излучения и времени нагрева.

Для физико-математического моделирования нагрева пластины в режиме теплового баланса за основу было взято уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho ch \frac{dT}{dt} = (1 - R)\eta_{эл} P_{эл} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T^4 - T_{окр}^4), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность кремния,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ;  $c$  – удельная теплоемкость кремния,  $\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ;  $h$  – толщина кремниевой пластины, см;  $T$  – температура пластины, К;  $t$  – время нагрева, с;  $R$  – коэффициент отражения излучения от поверхности пластины, являющийся постоянным и равный 0,3;  $P_{эл}$  – электрическая мощность, подаваемая на ИК-лампы нагрева, Вт;  $\eta_{эл}$  – коэффициент преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотность мощности потока излучения,  $\text{см}^{-2}$ ;  $\varepsilon_{Si}$  – степень черноты кремния;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$ ;  $T_{окр}$  – температура стенок камеры, К.

Моделирование нагрева с использованием уравнения (1) требует установления численного значения параметра  $\eta_{эл}$ , для чего необходимо знать температуру подложки в известный момент времени нагрева. С этой целью

использовали известные температуры фазовых переходов образования эвтектики алюминий–кремний, которая составляет 850,2 К (577 °С), плавления алюминия – 933,5 К (660,3 °С) и плавления серебра – 1235,1 К (961,9 °С). Для этого на рабочую сторону высоколегированной кремниевой пластины наносили пленки алюминия и серебра толщиной порядка 100 нм. Далее пластины нагревали в камере установки «УБТО ПИТ 1801» при заданной мощности ИК-ламп. Величину мощности ламп подбирали таким образом, чтобы время нагрева до фазового перехода не превышало 40 с. Момент фазового перехода фиксировался по изменению показаний пирометра. Численные значения потребляемой мощности ИК-ламп и показаний пирометра «Термоскоп-600-1С» фиксировали системой управления установкой с дискретностью времени  $\Delta t = 96$  мс.

Для численного решения уравнения (1) с учетом материала покрытия его преобразовали следующим образом:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[(1-R)\eta_{эл}P_{эл} - ((\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me}(T_{i-1}))\sigma(T_{i-1}^4 - T_{окр}^4))]\Delta t}{\rho(T_{i-1})c(T_{i-1})h}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура пластины, К;  $n$  – количество интервалов нагрева длительностью  $\Delta t$ ;  $\varepsilon_{Me}$  – степень черноты материала покрытия рабочей стороны пластины. Значения температуры  $T_0$  и  $T_{окр}$  контролировали штатными термопарами установки.

Температурную зависимость плотности и теплоемкости кремния рассчитывали на основе справочных данных по формулам

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - 3\alpha(T)(T - T_0)], \quad (3)$$

где  $\rho_0 = 2,33$ , г·см<sup>-3</sup> – плотность кремния при температуре  $T_0$ ;  $\alpha(T)$  – зависимость термического коэффициента линейного расширения кремния от температуры.

$$\alpha(T) = -4,29 \cdot 10^{-19} T^4 + 1,6 \cdot 10^{-14} T^3 - 2,21 \cdot 10^{-11} T^2 + 1,56 \cdot 10^{-8} T - 5,91 \cdot 10^{-7}, \quad (4)$$

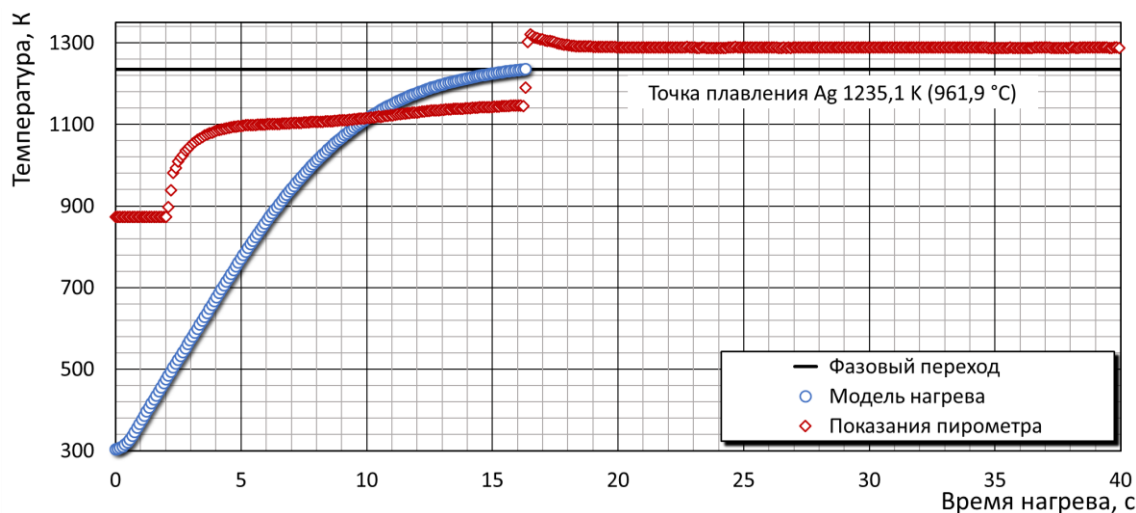
$$c(T) = -8,62 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,41 \cdot 10^{-9} T^3 - 4,85 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,10 \cdot 10^{-3} T + 1,32 \cdot 10^{-1}. \quad (5)$$

Для Al- и Ag-покрытий рабочей стороны пластины численное значение  $\varepsilon_{Me}(T)$  соответственно определяли из справочных данных по выражениям:

$$\varepsilon_{Me}(T) = 5,14 \cdot 10^{-5} T + 1,31 \cdot 10^{-2} \text{ (для Al)}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{Me}(T) = 2,50 \cdot 10^{-5} T + 7,42 \cdot 10^{-2} \text{ (для Ag)}. \quad (7)$$

Уравнение (2) решали относительно параметра  $\eta_{ЭЛ}$  итерационным методом. Вместо параметра  $T$  подставляли температуру соответствующего фазового перехода материала покрытия рабочей стороны кремниевой пластины, а вместо параметра  $n$  – номер интервала нагрева, после которого был зафиксирован фазовый переход (рисунок 1, таблица 1).



**Рисунок 1 – Пример построения зависимости температуры нагрева кремниевой подложки с Ag-покрытием**

**Таблица 1 – Температурно-временные характеристики нагрева кремниевых подложек и результаты определения параметра  $\eta_{ЭЛ}$**

Тип нерабочей стороны кремниевой подложки	Температура фазового перехода, К (°C)	Средняя электрическая мощность ИК-ламп, Вт	Время нагрева до температуры фазового перехода, с	Значение параметра $\eta_{ЭЛ}$ , $\times 10^{-3} \text{ см}^{-2}$
Полированная	850,2 (577)	709,97	34,175	4,93
	933,5 (660,3)	1059,49	24,384	5,18
	1235,1 (961,9)	2736,62	16,320	5,40
Шлифовано-травленная	850,2 (577)	720,06	39,168	5,04
	933,5 (660,3)	1063,44	24,384	5,06
	1235,1 (961,9)	2740,06	16,320	5,36

Усреднение результатов определения параметра  $\eta_{ЭЛ}$  дает значение  $5,16 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$ . Соответственно, в исследуемом диапазоне условий проведения нагрева подложек его максимальное отклонение не превышает  $\pm 4,0 \%$ . В свою очередь, это приводит к отклонениям в прогнозировании температуры пластины не более  $2,5 \%$ .

С учетом изложенного, для численного расчета температуры нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны

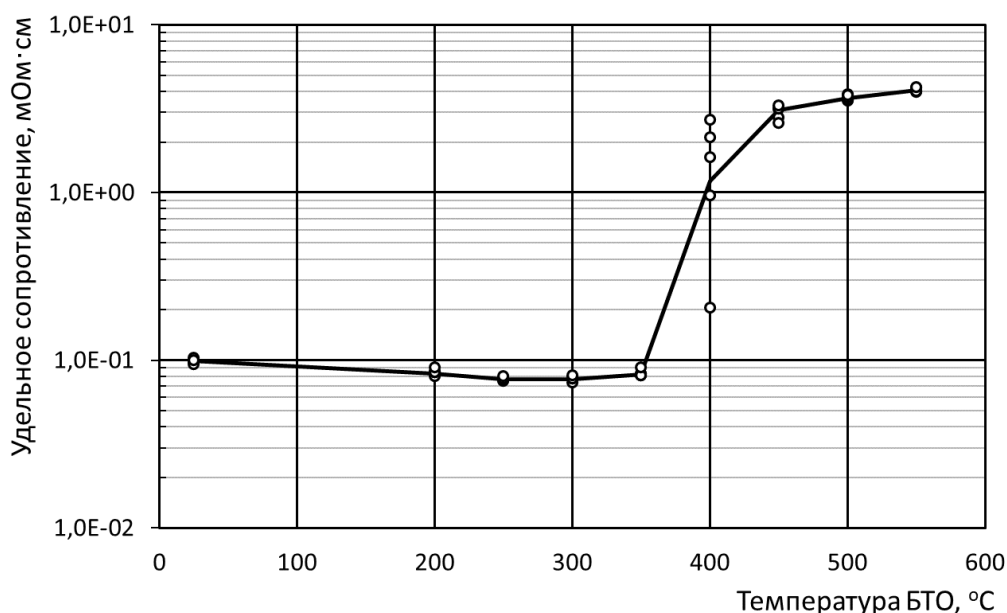
потоком некогерентного излучения постоянной плотности в реакторе установки «УБТО ПИТ 1801», следует использовать формулу

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,16 \cdot 10^{-3}(1-R)P_{эл} - 2\varepsilon_{Si}\sigma(T_{i-1}^4 - T_{окр}^4)]\Delta t}{\rho(T_{i-1})c(T_{i-1})h}. \quad (8)$$

Таким образом, разработанная физико-математическая модель нагрева кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, прогнозирующая изменение температуры кремниевой пластины в зависимости от мощности источника излучения и времени нагрева, позволяет управлять параметрами процесса быстрой термообработки полупроводниковых структур.

**Четвертая глава** содержит результаты разработки технологии формирования БТО контактно-барьерных структур путем диффузионного синтеза в системе Cr/Si, а также проведен анализ влияния ее режимов на электрофизические, структурно-фазовые и контактно-барьерные свойства, морфологию границы раздела с кремнием.

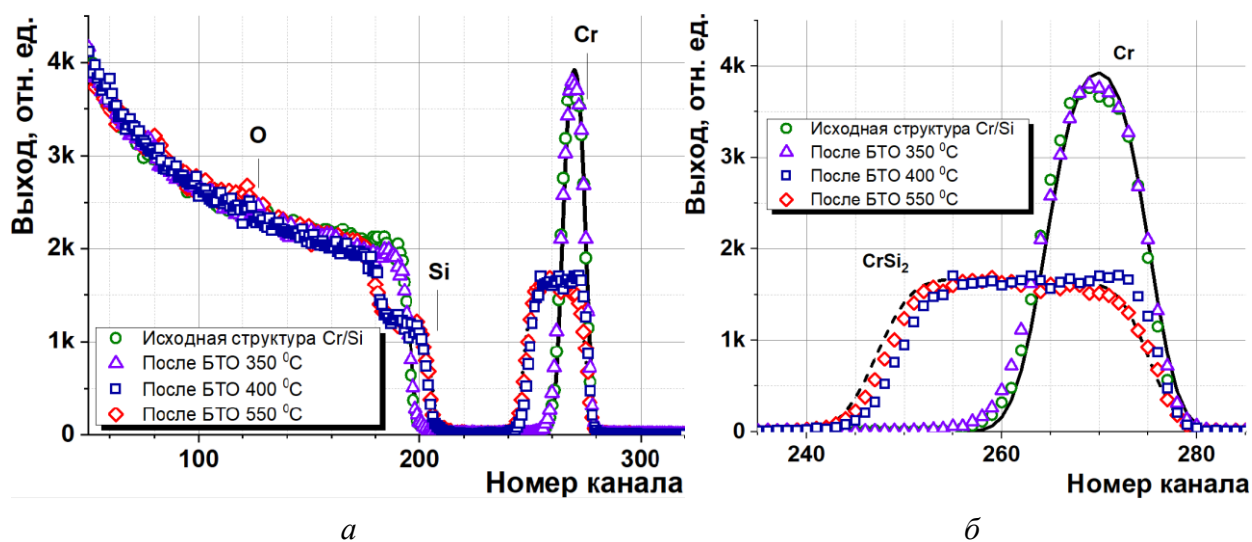
Анализ изменения удельного сопротивления от температуры БТО показывает (рисунок 2), что при 400 °С наблюдается резкий рост удельного сопротивления на порядок величины, что обусловлено преобразованием пленки хрома в дисилицидную фазу. При дальнейшем увеличении температуры БТО до 550 °С удельное сопротивление монотонно возрастает до 4,0 мОм·см, что обусловлено полным переходом хрома в его дисилицид и последующим ростом ширины межзеренных границ, увеличивающих рассеяние носителей заряда в CrSi<sub>2</sub>.



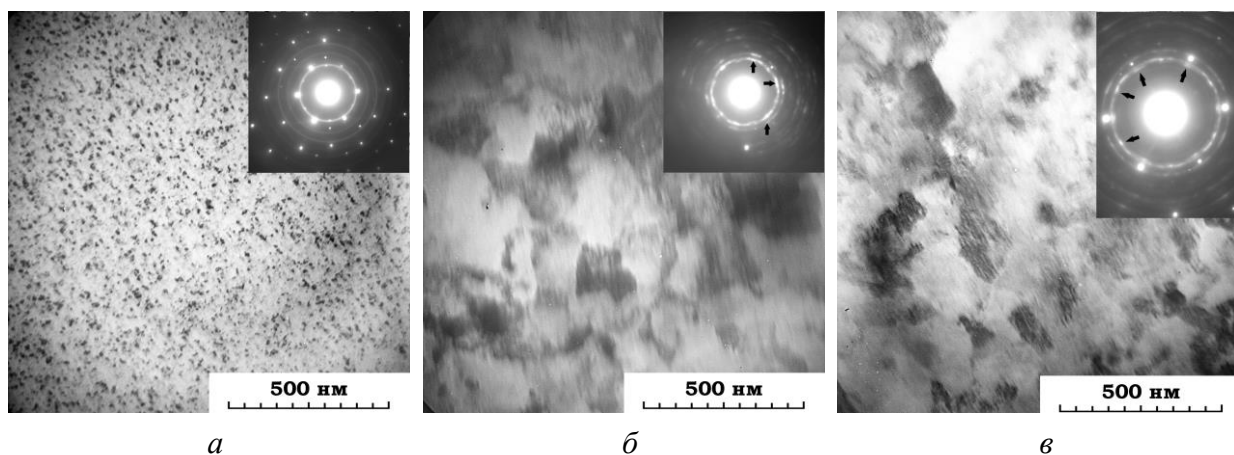
**Рисунок 2 – Зависимость удельного сопротивления хрома на кремниевых подложках от температуры БТО**



Изучение влияния БТО на свойства силицидного слоя методами ОРР (рисунок 3), РФА и ПЭМ в геометрии плоских сечений и дифракции электронов (рисунок 4) подтверждает вывод о том, что превышение порога температуры 400 °С приводит к формированию фазы  $\text{CrSi}_2$  гексагональной структуры с размерами зерен 200–500 нм, текстурированных в направлениях, преимущественно параллельных  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 112 \rangle$  направлениям кремния.



*a* – полный спектр; *б* – детализация спектра в области с пиком от Cr  
**Рисунок 3 – Типичные спектры ОРР от структуры Cr/Si после нанесения хрома и БТО**

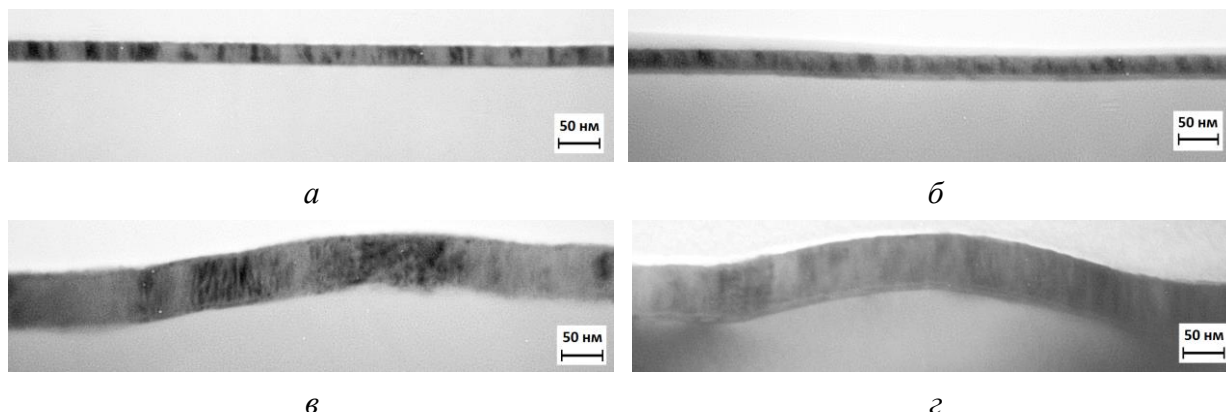


*a* – при 350 °С; *б* – при 450 °С; *в* – при 550 °С

**Рисунок 4 – Светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры и соответствующие картины микродифракции (на вставках), полученные от образцов Cr/Si после БТО**

Исследования ПЭМ поперечных сечений показывают (рисунок 5), что исходные пленки Cr толщиной около 30 нм имеют поликристаллическую структуру с размером зерен 10–15 нм. БТО при температурах вплоть до 350 °С

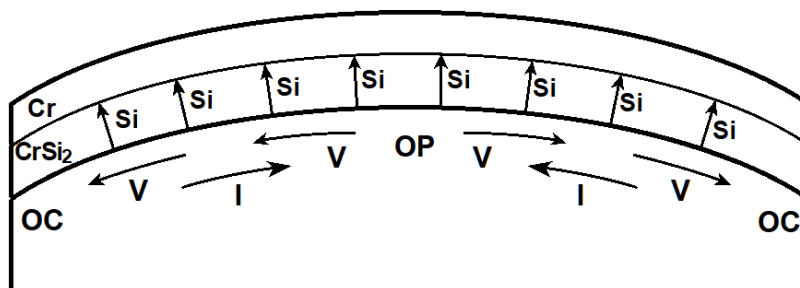
не приводит к видимым изменениям толщины пленки и размера зерен. Увеличение температуры БТО до 400 °С вызывает существенные изменения микроструктуры и морфологии пленок, при этом формируется слой  $\text{CrSi}_2$  толщиной около 70 нм с волнообразной морфологией границы раздела.



*a* – после нанесения Cr; *б* – после БТО при 350 °С; *в* – после БТО при 400 °С;  
*г* – после БТО при 450 °С

**Рисунок 5 – Микрофотографии ПЭМ поперечных сечений структур Cr/Si после нанесения Cr и БТО при различных температурах**

Для объяснения данного эффекта предложена следующая модель (рисунок 6). Поскольку основным диффузионным компонентом при формировании  $\text{CrSi}_2$  является Si, то в соответствии с эффектом Киркендала на стороне кремния происходит генерация неравновесных вакансий. Растущий слой  $\text{CrSi}_2$  между подложкой и слоем Cr приводит к появлению упругих деформационных полей, которые распространяются в том числе и в подложку кремния, а частичная релаксация упругих деформаций приводит к периодическому (волнообразному) распределению областей сжатия и растяжения вдоль границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$ .

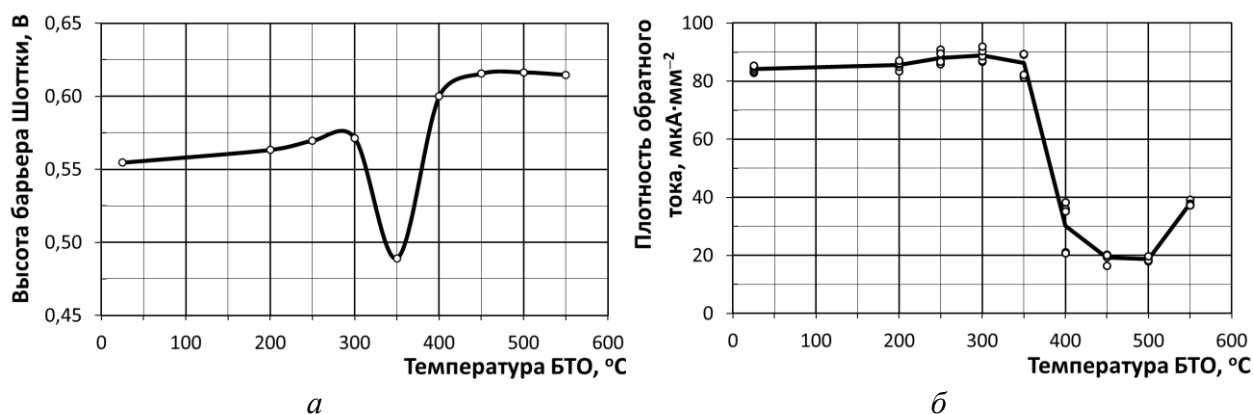


**Si, V, I – направления диффузии атомов кремния, вакансий и собственных междузельных атомов кремния соответственно; OC – область сжатия; OP – область растяжения**

**Рисунок 6 – Формирование макрошероховатой границы  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  при БТО**

Области сжатия являются притягательными для вакансий, что приводит к их диффузионному перераспределению вдоль границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$  в направлении областей сжатия. Приток большого количества вакансий приводит к перемещению границы раздела на большее расстояние, что сопровождается формированием волнообразной границы раздела  $\text{CrSi}_2/\text{Si}$ , при этом толщина слоя  $\text{CrSi}_2$  остается постоянной.

Из результатов изучения контактно-барьерных свойств полученных силицидов (рисунок 7) следует, что БТО системы  $\text{Cr}/\text{Si}$  при температуре 450–500 °С обуславливает формирование дисилицида хрома с высотой барьера  $\sim 0,61$  В и плотностью обратного тока (при обратном смещении 40 В)  $\sim 20$  мкА·мм<sup>-2</sup>, что позволяет на ее основе формировать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации +100 °С.

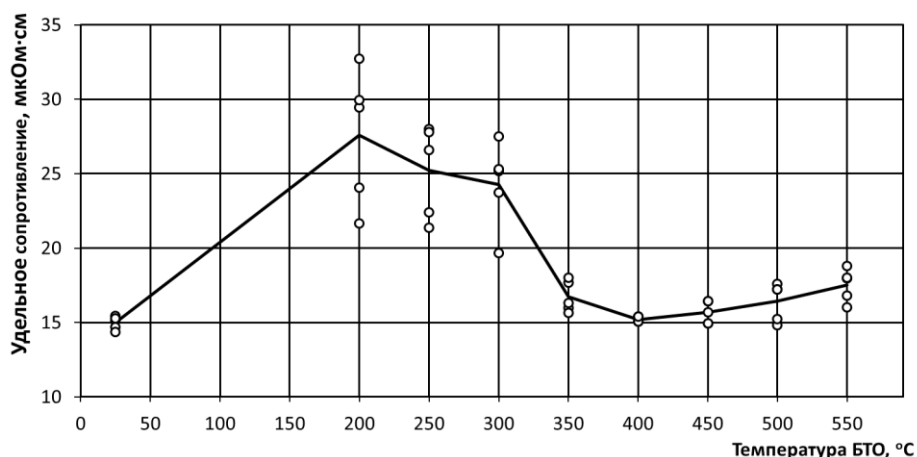


*а* – высота барьера Шоттки; *б* – плотность обратного тока

**Рисунок 7 – Зависимости контактно-барьерных свойств системы  $\text{Cr}/\text{Si}$  от температуры БТО**

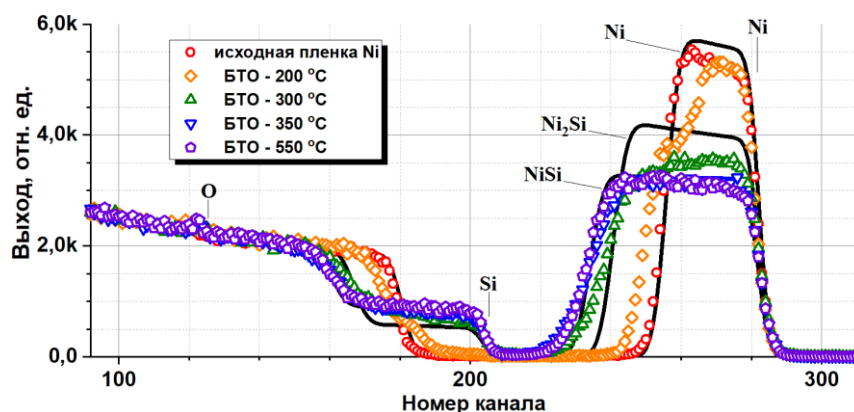
В пятой главе изложены результаты разработки технологии формирования БТО контактно-барьерных структур диффузионным синтезом в системе  $\text{Ni}/\text{Si}$ . Проведен анализ влияния режимов обработки на их электрофизические, структурно-фазовые и контактно-барьерные свойства, морфологию границы раздела с кремнием.

Изменение удельного сопротивления системы  $\text{Ni}/\text{Si}$  после БТО при температуре от 200 до 550 °С (рисунок 8) указывает на формирование высокоомной фазы  $\text{Ni}_2\text{Si}$  при температурах 200–300 °С. Дальнейшее увеличение температуры приводит к преобразованию исходной пленки никеля в фазу  $\text{NiSi}$  и сопровождается уменьшением ее удельного сопротивления до 15–18 мкОм·см.



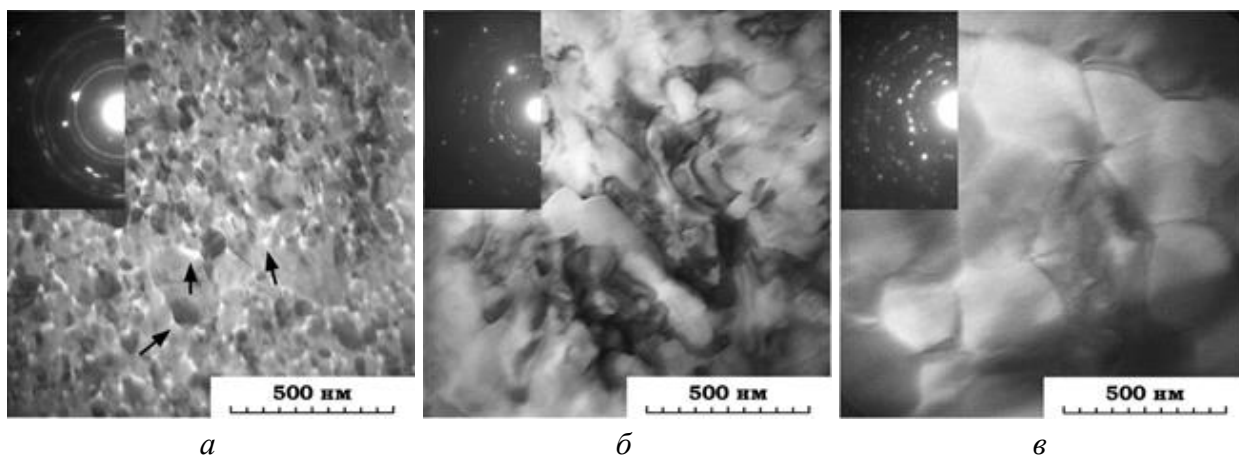
**Рисунок 8 – Зависимость удельного сопротивления системы Ni/Si от температуры БТО**

Из результатов исследований методами ОРР (рисунок 9), РФА, ПЭМ плоских сечений и ПЭД (рисунок 10) установлено, что БТО системы Ni/Si при температуре 200 °С приводит к образованию фазы Ni<sub>2</sub>Si. Проведение БТО при температуре 300 °С вызывает формирование слоя, содержащего до 9 ат. % непрореагировавшего никеля, а также Ni<sub>2</sub>Si и орторомбическую NiSi силицидные фазы, что обусловлено высокой скоростью разогрева на начальной стадии отжига, когда температурные условия формирования фазы NiSi наступают раньше, чем весь слой Ni успевает превратиться в фазу Ni<sub>2</sub>Si. Температура БТО от 350 до 550 °С приводит к формированию структурно-однородного слоя орторомбической фазы силицида NiSi со средним размером зерен от 100 до 300 нм.

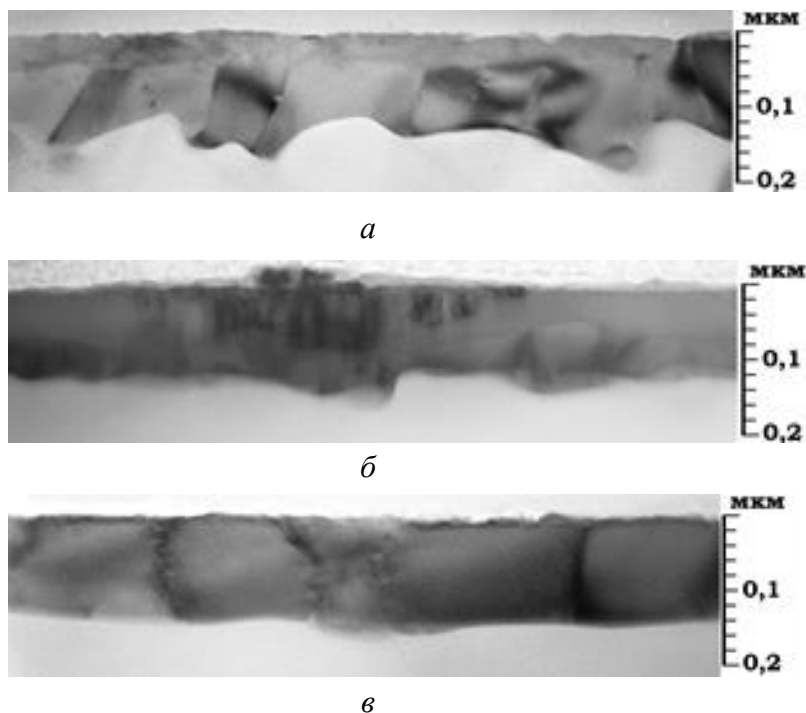


**Рисунок 9 – Типичные спектры ОРР от структур Ni/Si после нанесения и БТО при различных температурах**

Анализ ПЭМ поперечных сечений (рисунок 11) показывает, что формирование слоев моносилицида никеля со сглаженной границей раздела с кремнием и высокой степенью однородности размеров кристаллитов происходит после БТО системы Ni/Si при температуре 400 °С.

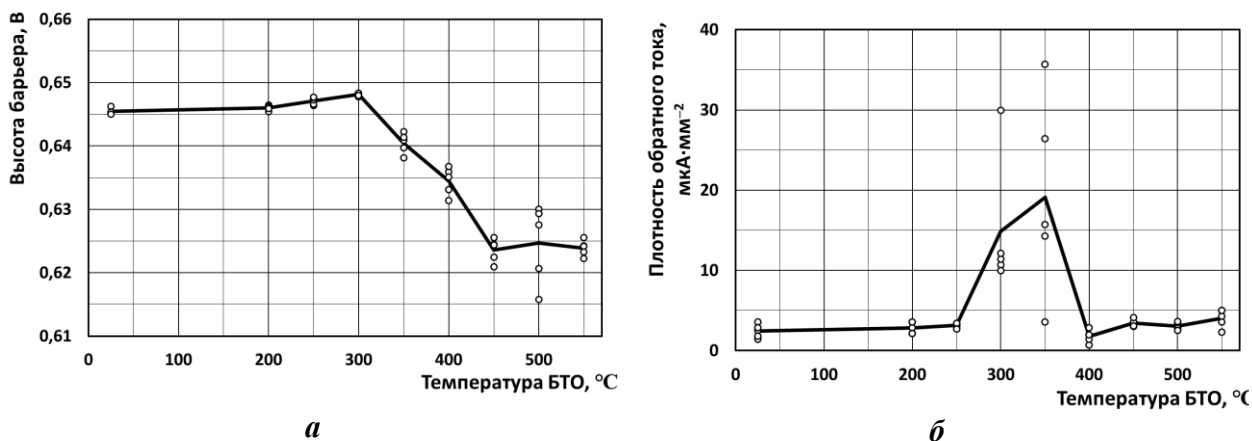


*a* – после БТО при 200 °С; *б* – после БТО при 300 °С; *в* – после БТО при 550 °С  
**Рисунок 10 – Типичные светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры и соответствующие картины микродифракции (на вставках), полученные от образцов Ni/Si после БТО**



*a* – после БТО при 300 °С; *б* – после БТО при 350 °С; *в* - после БТО при 400 °С  
**Рисунок 11 – Типичные микрофотографии ПЭМ поперечных сечений структур Ni/Si после БТО при различных температурах**

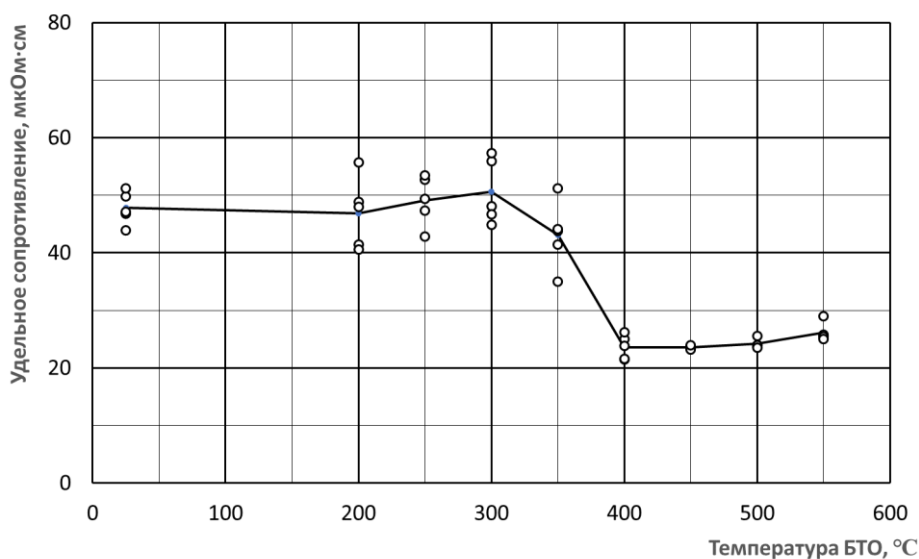
Из результатов изучения влияния БТО на контактно-барьерные свойства системы Ni/Si (рисунок 12) следует, что БТО системы Ni/Si при температуре 400–550°С обеспечивает формирование моносилицида никеля с высотой барьера от 0,62 до 0,63 В и плотностью обратного тока (обратное смещение 40 В)  $\sim 5 \text{ мкА} \cdot \text{мм}^{-2}$ , что позволяет на ее основе формировать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации + 125 °С.



*a* – высота барьера Шоттки; *б* – плотность обратного тока  
**Рисунок 12 – Зависимости контактно-барьерных свойств системы Ni/Si от температуры БТО**

**Шестая глава** содержит результаты исследований характеристик контактно-барьерных структур, полученных быстрой термообработкой в системах Ni-Pt-V/Si и Ni-V/Pt/Si. Проведен анализ влияния режимов обработки на их электрофизические, структурно-фазовые и контактно-барьерные свойства, морфологию границы раздела с кремнием.

*Система Ni-Pt-V/Si.* Из зависимости удельного сопротивления системы Ni-Pt-V/Si от температуры БТО (рисунок 13) видно, что нагрев до температуры вплоть до 300 °C не приводит к существенному изменению удельного сопротивления исходной пленки на уровне 48 мкОм·см, а при температуре от 350 до 400 °C вызывает в структуре фазовые превращения и, как следствие, уменьшение удельного сопротивления до 24 мкОм·см и незначительное его изменение вплоть до 550 °C.



**Рисунок 13 – Зависимость удельного сопротивления системы Ni-Pt-V/Si от температуры БТО**

Результаты исследований методом ОРР (рисунок 14) и РФА (рисунок 15) показывают, что диффузионное перераспределение Ni при быстрой термообработке структуры Ni-Pt-V/Si начинается с температуры 350 °С формированием слоев состава  $\sim \text{Ni}_3\text{Si}$  на границе раздела пленка – подложка, характеризующихся различной степенью упорядоченности, с уменьшением доли Si к поверхности и формированием доменов гексагональной фазы силицида  $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$  эпитаксиальных к подложке.

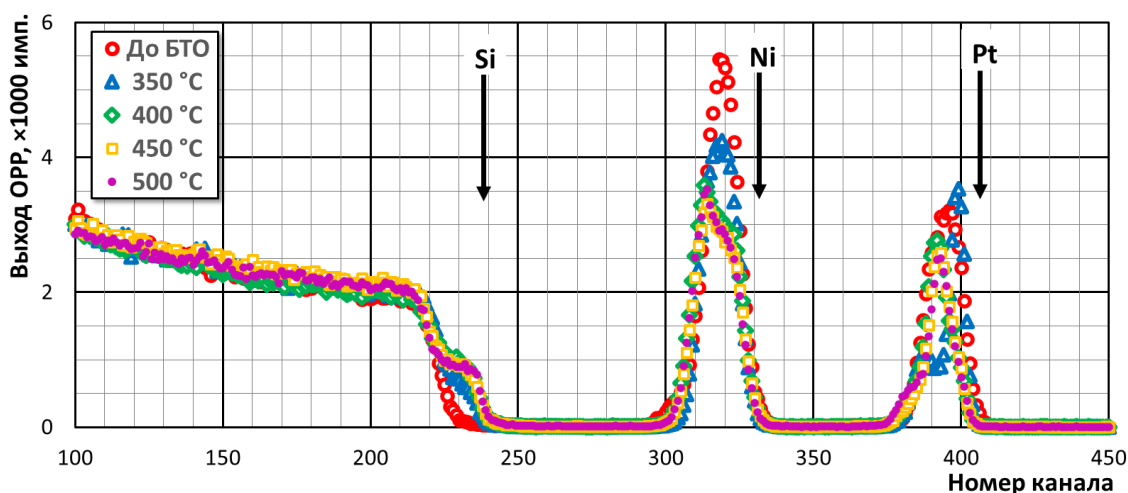


Рисунок 14 – Типичные спектры ОРР от структур Ni-Pt-V/Si после нанесения и БТО при различных температурах

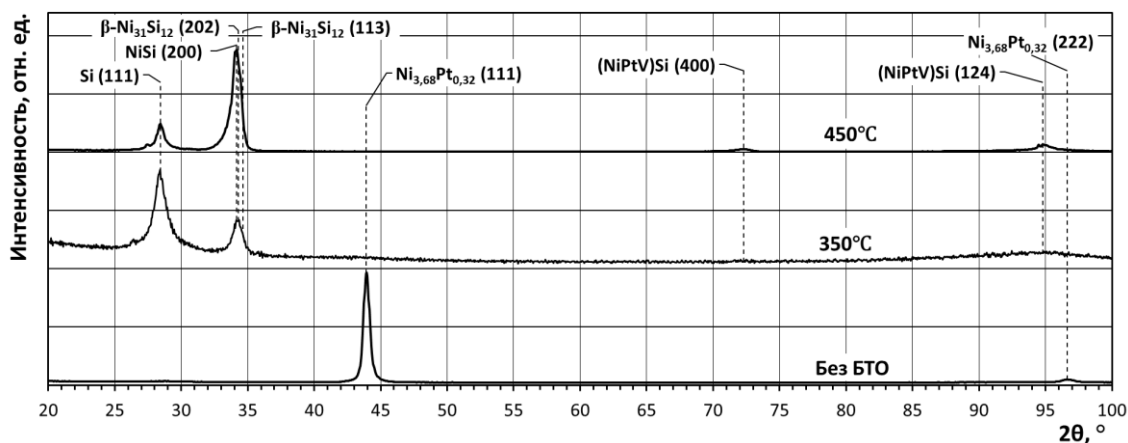


Рисунок 15 – Рентгенограммы от структуры Ni-Pt-V/Si после нанесения Ni-Pt-V и БТО при различных температурах

Быстрая термообработка при температуре от 400 до 500 °С приводит к дальнейшему диффузионному перераспределению реагирующих компонентов и образованию орторомбической фазы NiSi с трансротационной степенью упорядоченности на эпитаксиальных доменах  $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ , содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования. Ванадий, содержащийся в

исходной пленке сплава Ni-Pt-V, непосредственно не участвует в диффузионном перераспределении компонентов силицидного слоя по толщине и остается на его поверхности во всем диапазоне температур формирования силицида.

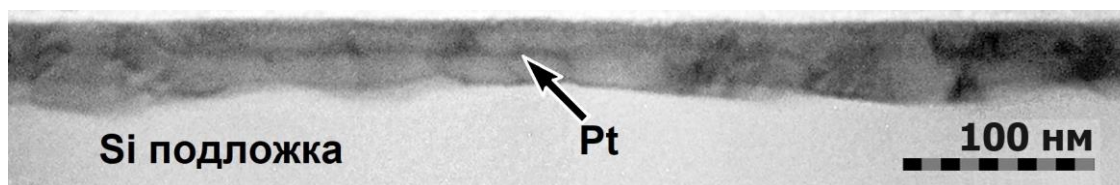
По результатам ПЭМ исследований и моделирования спектров ОРР восстановлена схема расположения слоев (рисунок 16).

9 нм Ni <sub>70</sub> Si <sub>5</sub> V <sub>11</sub> Pt <sub>14</sub> // Ni-Pt-V + Ni <sub>x</sub> Si <sub>y</sub>	10 нм Ni <sub>42</sub> Si <sub>49</sub> V <sub>8</sub> Pt <sub>1</sub> // NiSi(Pt,V)
11 нм Ni <sub>70</sub> Si <sub>18</sub> V <sub>11</sub> Pt <sub>1</sub> // Ni <sub>x</sub> Si <sub>y</sub> + Ni-Pt-V	31 нм Ni <sub>45</sub> Si <sub>49</sub> Pt <sub>6</sub> // NiSi (Pt)
15 нм Ni <sub>68</sub> Si <sub>29</sub> Pt <sub>3</sub> // β-Ni <sub>31</sub> Si <sub>12</sub> (Pt)	9 нм Ni <sub>61</sub> Si <sub>37</sub> Pt <sub>2</sub> // β-Ni <sub>31</sub> Si <sub>12</sub> + NiSi(Pt)
Si-подложка	Si-подложка
<i>a</i>	<i>б</i>

*a* – после БТО при 350 °С; *б* – после БТО при 500 °С

**Рисунок 16 – Расположение слоев в структуре Ni-Pt-V/Si после БТО**

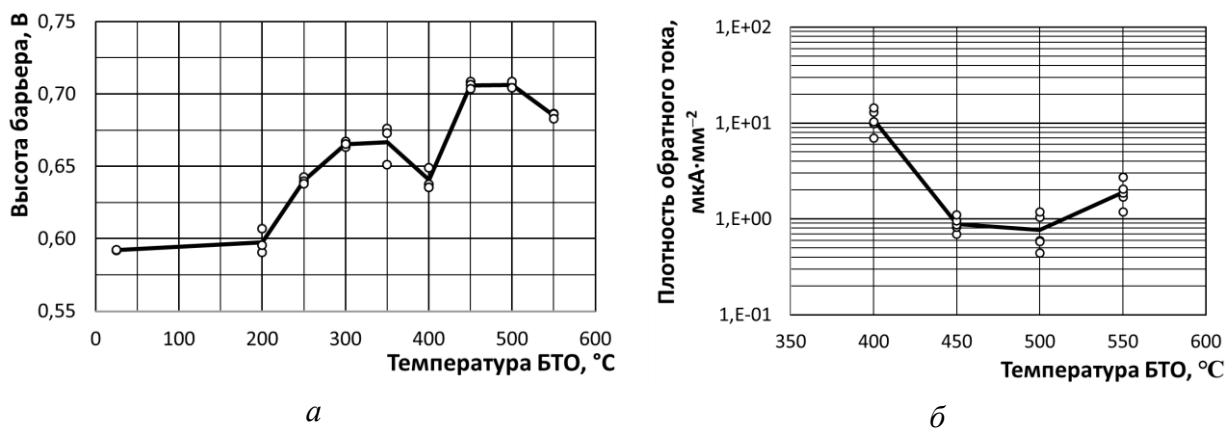
В результате анализа ПЭМ поперечных сечений (рисунок 17) также обнаружено образование слоя силицида, обогащенного платиной в центральной области (темная узкая полоса, отмеченная стрелкой). Кроме того, установлено сглаживание микроморфологии границы раздела силицид – кремний при увеличении температуры БТО до 450 °С.



**Рисунок 17 – Микрофотографии ПЭМ поперечного сечения структуры Ni-Pt-V/Si после БТО при 450 °С**

Изучение влияния БТО на контактно-барьерные свойства системы Ni-Pt-V/Si (рисунок 18) показывает, что высота барьера при температуре от 450 до 500 °С вызывает формирование фазы NiSi с сегрегацией силицида платины на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, приводя к формированию контакта с высотой барьера ~0,71 В, коэффициентом неидеальности ~ 1,0 и плотностью обратного тока (обратное смещение 100 В) ~ 1,0 мкА·мм<sup>2</sup>, что позволяет на ее основе формировать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации +150 °С.

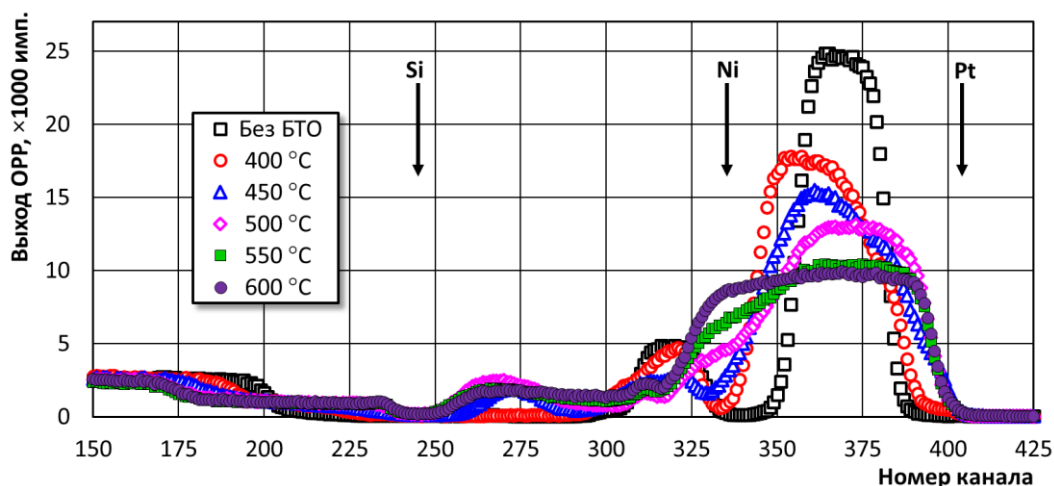


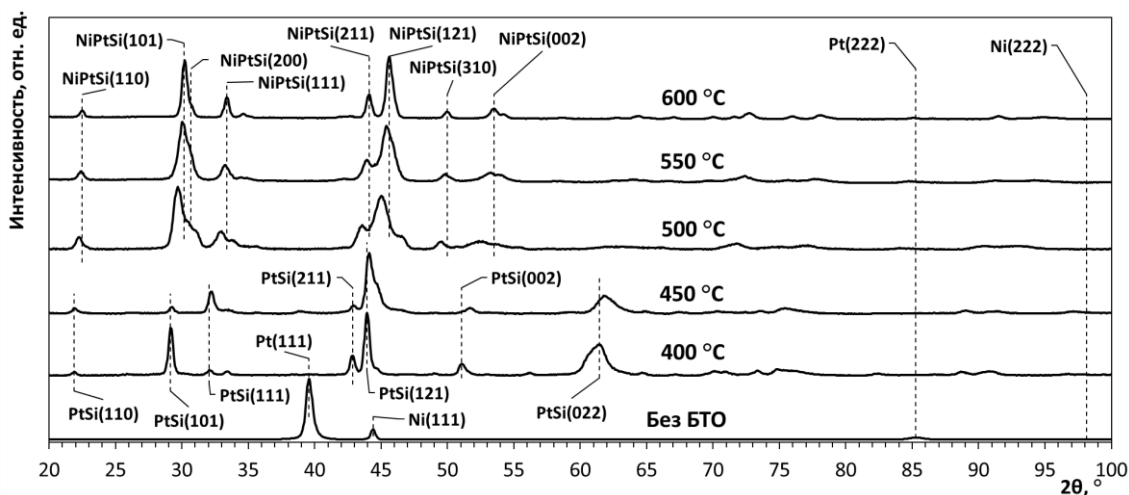


**а** – высота барьера Шоттки; **б** – плотность обратного тока

**Рисунок 18 – Зависимости контактно-барьерных свойств системы Ni/Si от температуры БТО**

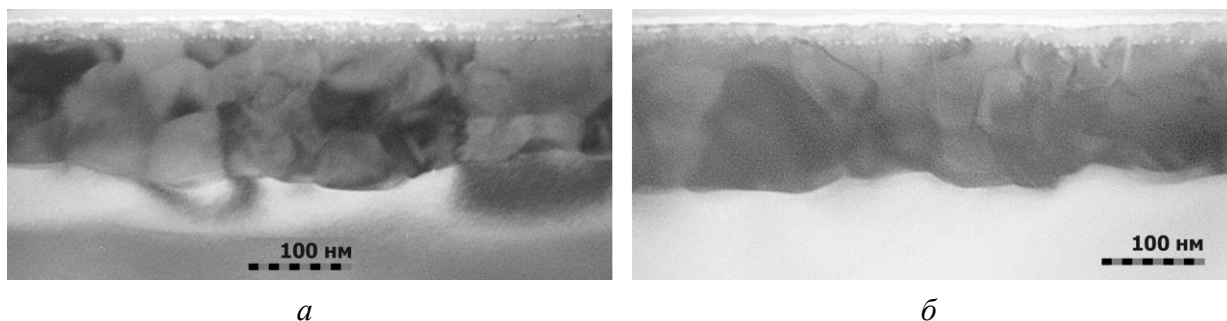
*Система Ni-V/Pt/Si.* Из анализа спектров ОРР (рисунок 19), РФА (рисунок 20) и ПЭД установлено, что проведение быстрой термообработки структуры Ni-V/Pt/Si при температуре 400 °C вызывает формирование на границе раздела с подложкой слоя моносилцида платины за счет преимущественной диффузии Si из подложки с последующим формированием на границе раздела квазиэпитаксиальных доменов NiSi при температуре 450 °C и Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si при температурах выше 500 °C за счет усиления диффузии Pt из поверхностных слоев. При этом в диапазоне температур от 550 до 600 °C Ni и Pt распределяются равномерно по толщине образованного слоя, в котором содержание Ni пропорционально толщине слоя сплава Ni-V, а содержащийся в нем V локализуется в приповерхностной области силицидного слоя.





**Рисунок 20 – Спектры РФА от структуры (40 нм Ni-V)/(40 нм Pt)/Si после нанесения и БТО**

Анализ ПЭМ поперечных сечений выявил (рисунок 21), что при температуре БТО от 450 до 500 °С формируется наношероховатая граница раздела с кремнием. Проведение БТО при температуре 550 °С приводит к сглаживанию границы раздела, что, предположительно, связано с благоприятным влиянием квазиэпитаксиального слоя силицида Ni на промежуточном низкотемпературном этапе формирования силицидов.

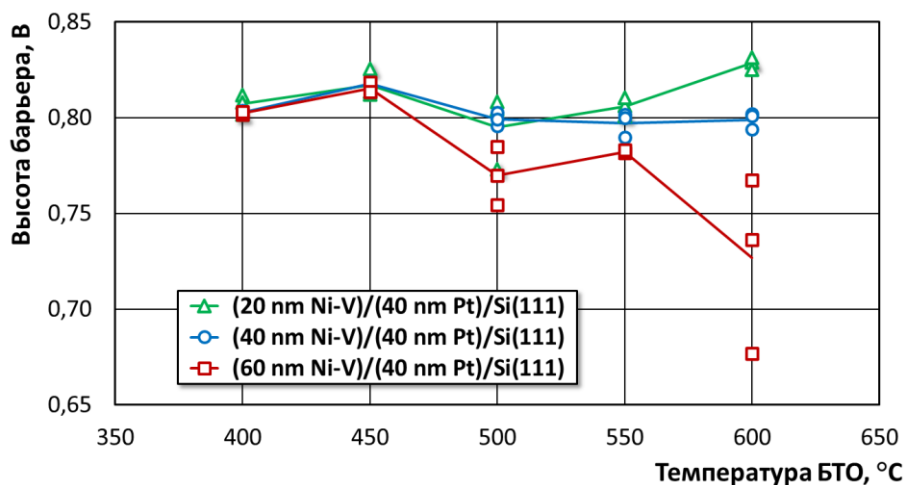


*а* – при температуре 500 °С; *б* – при температуре 550 °С

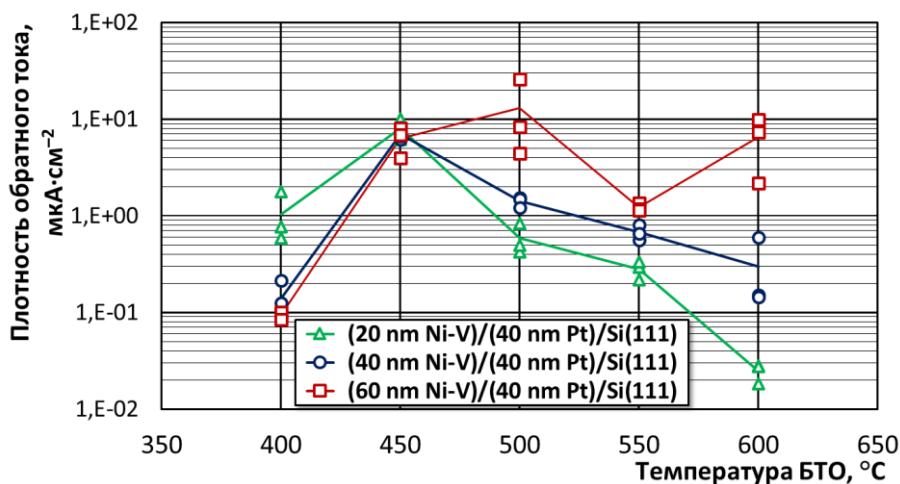
**Рисунок 21 – Микрофотографии ПЭМ поперечных сечений структуры (40 нм Ni-V)/(40 нм Pt)/Si после БТО**

Высота барьера Шоттки после БТО структуры Ni-V/Pt/Si (рисунок 22, *а*), в целом, коррелирует с содержанием Pt вблизи границы силицид – кремний, установленным методом ОРР. Также отмечается отсутствие существенного влияния содержащих V поверхностных слоев на электронные и электрофизические свойства барьеров Шоттки. БТО при температуре от 400 до 450 °С вызывает рост обратного тока более чем на порядок величины (рисунок 22, *б*), что на фоне стабильных значений для высоты барьера указывает на повышение плотности дефектов на границе раздела силицид – кремний, обусловленных диффузией компонентов структуры и фазовыми

перестроениями, что также подтверждается развитой морфологией данной границы раздела.



*a*



*b*

*a* – высота барьера Шоттки; *b* – плотность обратного тока

**Рисунок 22 – Зависимости контактно-барьерных свойств системы Ni-V/Pt/Si от температуры БТО**

Для структур с толщиной слоя Ni-V 20 и 40 нм дальнейшее увеличение температуры БТО приводит к уменьшению величины обратного тока на один и два порядка величины соответственно, что обусловлено снижением плотности дефектов на границе раздела силицид – кремний и формированием сглаженной ее морфологии, а также к увеличению высоты барьера Шоттки.

В структурах с толщиной слоя Ni-V 60 нм зарегистрировано, что увеличение температуры БТО до 500 °C приводит к дальнейшему росту величины обратного тока, что, по-видимому, вызвано снижением высоты барьера Шоттки и свидетельствует о сохранении высокой плотности дефектов на границе раздела силицид – кремний. Выполнение БТО при температуре

550 °С приводит к снижению среднего значения обратного тока на порядок величины и существенному уменьшению его разброса, что свидетельствует об уменьшении плотности дефектов на границе раздела силицид – кремний на фоне сглаживания морфологии границы раздела силицида с кремнием. Дальнейшее увеличение температуры БТО до 600 °С снова приводит к кратному росту обратного тока и его разброса, что коррелирует с уменьшением высоты барьера Шоттки с одновременным увеличением разброса ее значений.

Таким образом, БТО системы Ni-V/Pt/Si с толщиной слоя Ni-V от 20 до 40 нм при температуре 550 °С приводит к формированию силицидных слоев с уменьшенной дефектностью границы раздела с кремнием, характеризующихся высотой барьера Шоттки от 0,83 до 0,80 В и плотностью обратного тока (обратное смещение 100 В) от 0,3 до 0,8 мкА·мм<sup>-2</sup> соответственно, что позволяет на ее основе формировать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации +175 °С.

В **седьмой главе** изложены результаты применения силицидов Cr, Ni, Ni-Pt и Ni/Pt, полученных быстрой термообработкой, при создании кремниевых диодов Шоттки с улучшенными электрическими параметрами.

Силицидные барьеры на основе системы Cr/Si, полученные методом БТО, предложены в качестве альтернативы молибденовым барьерам в диодах Шоттки с максимальной температурой эксплуатации +100 °С для увеличения максимальной плотности прямого тока, что позволяет уменьшить площадь кристалла диода Шоттки при сохранении требуемых уровней электрических параметров. Сравнение характеристик проводили относительно диодов Шоттки с максимальным прямым током 3,0 А и обратным напряжением 40 В. Показано, что замена молибденового барьера на барьер из дисилицида хрома, полученного быстрой термообработкой системы Cr/Si, позволяет создавать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации до +100 °С и сопоставимым уровнем энергоэффективности относительно молибденового барьера при увеличении на 40 % плотности прямого тока.

Барьерные слои, получаемые БТО системы Ni/Si, использовали в качестве замены молибденовых барьеров в диодах Шоттки с максимальной температурой эксплуатации +125 °С для уменьшения прямых напряжений. Сопоставление электрических параметров проводили для диодов Шоттки с максимально допустимым прямым током 3,0 А и обратным напряжением 40 В. Установлено, что замена молибденового барьера на барьер из силицида никеля, полученного быстрой термообработкой системы Ni/Si, позволяет создавать диоды Шоттки с максимальной температурой эксплуатации до +125 °С с уменьшением величины падения прямого напряжения до 1,15 раза.

Контактно-барьерные структуры на основе системы Ni-Pt-V/Si использовали для создания диодов Шоттки с максимальными постоянным прямым током 5,0 А, обратным напряжением 100 В и расширенным температурным диапазоном эксплуатации до +150 °С. Сравнительный анализ типовых вольт-амперных характеристик диодов Шоттки с силицидным барьером, полученным по разработанной технологии, и диодов Шоттки – аналогов показывает, что при сопоставимых параметрах энергоэффективности для 50 % рабочего цикла величина прямого напряжения в диодах Шоттки с Ni-Pt-V барьером при максимальном прямом токе меньше на ~ 50 мВ и ~ 30 мВ для нормальных условий и повышенной температуре соответственно. Таким образом, разработанная технология формирования силицидных слоев на основе системы Ni-Pt-V/Si позволяет формировать барьеры для диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации.

Силицидные барьеры на основе системы Ni-V/Pt/Si, полученные быстрой термообработкой, предложены в качестве замены барьера на базе системы Pt/Si, получаемого стационарным отжигом, в диодах Шоттки с расширенным температурным диапазоном. Показано, что для диодов Шоттки с максимальными постоянным прямым током 5,0 А и обратным напряжением 100 В разработанная технология формирования барьера позволяет уменьшить прямое напряжение более чем на 100 мВ для нормальных условий и на 50 В для повышенной температуры. Таким образом, замена в диодах Шоттки с расширенным температурным диапазоном эксплуатации слоя силицида платины, полученного стационарным термическим отжигом, на силицидный слой, получаемый быстрой термообработкой системы Ni-V/Pt/Si, позволяет уменьшить прямое напряжение диода Шоттки до 1,18 раза.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Предложена физико-математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности, основанная на уравнении нестационарной теплопроводности и прогнозирующая изменение температуры кремниевой пластины от мощности источника излучения и времени при нагреве от комнатной температуры до 960 °С с отклонением менее 2,5 %, что позволило управлять параметрами процесса быстрой термообработки полупроводниковых структур [1–А].

2. С использованием предложенной модели нагрева подложек, модифицированной путем учитывания известных температурных зависимостей плотности и теплопроводности кремния, степени черноты

покрытий рабочей стороны подложек, а также установления температуры подложек в моменты фазовых переходов покрытия рабочей стороны подложки (образования эвтектики алюминий – кремний, плавления алюминия и плавления серебра), фиксируемых пирометрическим методом, предложена методика экспериментального определения коэффициента преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотность мощности потока излучения [14–А; 46–А].

3. Предложен механизм формирования волнообразной морфологии поверхности и границы раздела силицид – кремний, возникающей в процессе быстрой термообработки структуры Cr/Si при температуре более 400 °С, учитывающий генерацию вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузии [13–А; 65–А].

4. Установлено, что нагрев системы Cr/Si в температурном диапазоне от 450 до 500 °С за ~ 7 с в среде N<sub>2</sub> импульсом некогерентного излучения приводит к формированию барьерных слоев для диодов Шоттки с увеличенной в 1,4 раза плотностью прямого тока по сравнению с барьером Mo/Si за счет создания в результате фазового перехода Cr→CrSi<sub>2</sub> структурно-однородного слоя, характеризующегося гладкой границей раздела CrSi<sub>2</sub>/Si с уменьшенной плотностью дефектов и высотой барьера Шоттки ~ 0,61 В [10–А; 12–А; 21–А; 22–А; 24–А; 30–А; 34–А; 35–А; 37–А; 38–А; 39–А; 44–А; 49–А; 53–А; 58–А; 66–А; 70–А; 72–А; 74–А].

5. Выявлены закономерности электрофизических и структурно-фазовых изменений в системе Ni/Si, обусловленные ее быстрой термообработкой за ~ 7 с некогерентным потоком излучения постоянной мощности со стороны кремния в атмосфере N<sub>2</sub>, которые заключаются в том, что фаза Ni<sub>2</sub>Si начинает образовываться при температуре 200 °С, при температуре 300 °С получается силицидный слой, содержащий фазы Ni, Ni<sub>2</sub>Si и NiSi, в диапазоне температур от 350 до 550 °С формируется структурно-однородный слой силицидной орторомбической фазы NiSi со средним размером зерен от 100 до 300 нм и удельным сопротивлением от 15,0 до 18, мкОм·см [15–А; 17–А; 47–А; 51–А; 52–А].

6. Показано, что воздействие на систему Ni/Si импульса некогерентного излучения постоянной мощности, приводящее к ее нагреву от 400 до 450 °С за ~ 7 с в среде N<sub>2</sub>, позволяет формировать барьерные слои для диодов Шоттки с уменьшенным до 1,15 раза прямым напряжением по сравнению с молибденовым барьером, что вызвано образованием в результате фазовых переходов Ni→Ni<sub>2</sub>Si→NiSi структурно-однородного слоя и сглаженной границы раздела NiSi/Si с уменьшенной плотностью дефектов и высотой барьера Шоттки ~ 0,63 В [2–А; 8–А; 11–А; 16–А; 23–А; 28–А; 33–А; 40–А; 41–А].

55–А; 61–А; 62–А; 63–А; 64–А; 68–А; 69–А; 71–А; 73–А; 75–А; 76–А; 79–А; 81–А; 82–А; 83–А].

7. Установлены закономерности изменений электрофизических, и структурно-фазовых свойств в системе Ni-Pt-V/Si при быстрой термической обработки в среде N<sub>2</sub>, заключающиеся в формировании при температуре 350 °С на границе раздела пленка – подложка силицидного слоя состава ~ Ni<sub>3</sub>Si с его переходом за счет повышения температуры до 400–500 °С в орторомбическую фазу NiSi, характеризующейся удельным сопротивлением ~ 25 мкОм·см, и в образовании в диапазоне температур от 450 до 500 °С слоя NiSi, содержащего атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией силицида платины на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием, что обеспечивает формирование контактов с высотой барьера Шоттки ~ 0,71 В [9–А; 25–А; 26–А; 36–А; 42–А; 43–А; 45–А; 48–А; 50–А; 56–А; 57–А; 59–А; 60–А; 77–А; 78–А; 80–А].

8. Зарегистрированы закономерности структурно-фазовых изменений в системе Ni-V/Pt/Si при ее быстрой термообработке в интервале температур от 400 до 600 °С за 7 с в атмосфере N<sub>2</sub>, приводящие за счет последовательных диффузий Si, Ni и Pt при температурах 400, 450 и 500 °С соответственно в результате фазовых переходов PtSi → NiSi → Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si, к формированию на границе раздела с кремнием слоя Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si, в котором содержание никеля пропорционально толщине исходного слоя сплава Ni-V, а содержащийся в исходном слое ванадий локализуется в приповерхностной области силицидного слоя [3–А; 4–А; 5–А; 7–А; 27–А; 41–А; 54–А].

9. Показано, что нагрев системы Ni-V/Pt/Si с толщиной слоя Ni-V от 20 до 40 нм и слоя Pt ~ 40 нм до температуры 550 °С за ~ 7 с в среде N<sub>2</sub> позволяет формировать контактно-барьерные слои для диодов Шоттки расширенного температурного диапазона эксплуатации с уменьшением до 1,18 раза прямого напряжения по сравнению с PtSi/Si-барьером, полученным стационарной термообработкой, что обусловлено синтезом структурно-однородного слоя со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si/Si, в которой увеличение толщины пленки Ni-V от 20 до 40 нм приводит к уменьшению высоты барьера Шоттки с 0,83 до 0,80 В [6–А; 18–А; 20–А; 29–А; 31–А; 32–А; 67–А].

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

Разработанные технологические процессы получения барьерных слоев на основе силицидов никеля и платины с улучшенными структурными и электрическими характеристиками, сформированных быстрой термообработкой, для создания диодов Шоттки и формирования омических

контактов алюминиевой металлизации к различным областям изделий электронной техники (алюминий – силицид, алюминий – кремний, алюминий – поликремний) с использованием роботизированной установки поштучной быстрой термообработки полупроводниковых пластин «УБТО ПИТ 1801» внедрены в серийное производство полупроводниковых приборов и интегральных схем на филиале «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Годовой объем выпуска изделий электронной техники, изготовленных с применением данных технологий, составил 348 279,39 тыс. шт. на сумму 3 352 118 белорусских рублей.

Разработанная физико-математическая модель температуры нагрева высоколегированных кремниевых пластин, облучаемых с обратной стороны некогерентным потоком излучения постоянной плотности в совокупности с фиксацией момента фазовых переходов покрытий рабочей стороны подложки, использована в методике градуировки установок быстрой термической обработки моделей «УБТО ПИТ 1801» и «УБТО ПИТ 1802», созданными ООО «Перспективные инновационные технологии», что позволило создать системы управления нагревом подложек в указанных установках с заданными температурно-временными параметрами. Всего за 2018–2023 гг. ООО «ПИТ» изготовило и поставило в ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по одному экземпляру установок быстрой термической обработки моделей «УБТО ПИТ 1801» и «УБТО ПИТ 1802» для термообработки пластин диаметрами 100 и 150 мм.

Результаты исследований рекомендуется использовать в электронной промышленности при создании выпрямляющих и омических контактов в изделиях электронной техники.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1–А. Контактно-барьерные структуры субмикронной электроники / А. П. Достанко, Н. В. Богущ, С. В. Бордусов, В. П. Василевич, Д. В. Гульпа, М. Е. Збышинская, Н. С. Ковальчук, И. И. Кузьмар, Л. К. Кушнер, В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, Я. А. Соловьёв, Е. В. Телеш, О. И. Тихон ; под ред. А. П. Достанко, В. Л. Ланина. – Минск : Бестпринт, 2021. – 270 с.

### Статьи в научных журналах, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий

2–А. Исследование влияния условий формирования на свойства тонких пленок молибдена, нанесенных магнетронным распылением / Л. П. Ануфриев, А. С. Турцевич, В. В. Глухманчук, Я. А. Соловьёв, В. В. Баранов // Электрон. обработка материалов. – 2004. – № 3. – С. 70–74.

3–А. Формирование острия кремниевых зондов для сканирующих зондовых микроскопов / Н. Г. Циркунова, Я. А. Соловьёв, О. В. Сергеев, В. Е. Борисенко // Докл. БГУИР. – 2005. – № 3 (11). – С. 59–64.

4–А. Циркунова, Н. Г. Методика отображения сопротивления растекания для исследования неоднородности структур силицида платины / Н. Г. Циркунова, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич // Изв. Белорус. инженер. акад. – 2005. – № 1 (19)/5. – С. 168–169.

5–А. Исследование структуры силицида платины с помощью СЗМ / Н. Г. Циркунова, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич, В. Е. Борисенко // Изв. Белорус. инженер. акад. – 2005. – № 1 (19)/5. – С. 169–170.

6–А. Особенности формирования границы раздела Si/PtSi в диодах Шоттки для силовой электроники / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, Д. Л. Ануфриев, О. В. Мильчанин // Докл. БГУИР. – 2006. – № 4 (16). – С. 53–58.

7–А. Циркунова, Н. Г. Использование атомного силового микроскопа для исследования р-n-переходов / Н. Г. Циркунова, Я. А. Соловьёв, В. Е. Борисенко // Докл. БГУИР. – 2010. – № 4 (50). – С. 36–41.

8–А. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. К. Кононенко, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Изв. высш. учеб. заведений. Материалы электрон. техники. – 2014. – № 1 (65). – С. 47–52.

9–А. Особенности фазовых превращений в системе NiV – Pt – Si при ступенчатом стационарном отжиге / А. М. Чапланов, М. И. Маркевич, А. Н. Малышко, Е. Н. Щербакова, В. А. Солодуха, А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев // Изв. РАН. Сер. физич. – 2015. – Т. 79, № 11. – С. 1543–1546.

10–А. Соловьёв, Я. А. Влияние условий быстрой термической обработки на электрофизические свойства тонких плёнок хрома на кремнии // Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко // Докл. БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 157–164.

11–А. Соловьёв, Я. А. Влияние температуры быстрой термической обработки на электрофизические свойства плёнок никеля на кремнии / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко // Докл. БГУИР. – 2020. – № 18 (1). – С. 81–88.

12–А. Соловьёв, Я. А. Формирование дисилицида хрома при быстрой термической обработке в режиме теплового баланса / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко, П. И. Гайдук // Изв. Гомель. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естествен. науки. – 2020. – № 3 (120). – С. 179–185.

13–А. Соловьёв, Я. А. Структура и морфология слоев CrSi<sub>2</sub>, сформированных при быстрой термообработке / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко, П. И. Гайдук // Докл. БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 71–79.

14–А. Соловьёв, Я. А. Моделирование нагрева кремниевых пластин при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801» / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко, В. П. Яковлев // Докл. БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 7. – С. 79–86.

15–А. Пилипенко, В. А. Формирование силицида никеля быстрой термообработкой в режиме теплового баланса / В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьёв, П. И. Гайдук // Докл. нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 111–118.

16–А. Соловьёв, Я. А. Моделирование прямой ветви вольт-амперных характеристик диодов Шоттки с МОП-канавками / Я. А. Соловьёв // Докл. БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 6. – С. 59–65.

17–А. Microstructure and properties of thin-film submicrostructures obtained by rapid thermal treatment of nickel films on silicon // V. Lapitskaya, R. Trukhan, T. Kuznetsova, J. Solovjov, S. Chizhik, V. Pilipenko, K. Liutsko, A. Nasevich, M. Douhal // Surfaces. – 2024. – Vol. 7, iss. 2. – P. 196–207.

18–А. Соловьёв Я. А. Формирование силицидов в двухслойных структурах никель-ванадиевый сплав – платина на кремнии при быстрой термической обработке / Я. А. Соловьёв, П. И. Гайдук // Журн. БГУ. Физики. – 2024. – № 2. – С. 57–68.

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

19–А. Баранов, В. В. Тонкопленочные элементы кремниевых диодов Шоттки для высокотемпературного микромонтажа / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв, Г. В. Кошкаров // Технология и конструирование в электрон. аппаратуре. – 2007. – № 5. – С. 20–21.

20–А. Ланин, В. Л. Факторы, влияющие на герметичность мощных транзисторов в металлостеклянных и металлокерамических корпусах / В. Л. Ланин, А. Ф. Керенцев, Я. А. Соловьёв // Силовая электроника. – 2010. – № 2. – С. 106–111.

21–А. Ланин, В. Л. Конструктивно-технологическая оптимизация параметров диодов Шоттки / В. Л. Ланин, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Силовая электроника. – 2011. – № 1. – С. 12–17.

22–А. Диоды Шоттки и особенности технологии сборки / А. С. Турцевич, В. Л. Ланин, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Технологии в электрон. пром-сти. – 2012. – № 3. – С. 85–90.

23–А. Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс-спектрометром // А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нисс, А. Ф. Керенцев // Технологии и конструирование в электрон. аппаратуре. – 2012. – № 5. – С. 44–47.

24–А. Формирование никель-платинового силицидного слоя в качестве барьерного для диода Шоттки / П. В. Кучинский, Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, Т. Б. Ковалева, В. А. Солодуха, А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, С. В. Гапоненко // Электрические контакты и электроды. – 2014. – Вып. 2014. – С. 211–219.

25–А. Фазовые превращения в системе NiPt(5 ат. %) – Si при быстрой термической обработке / А. М. Чапланов, М. И. Маркевич, А. Н. Малышко, В. А. Солодуха, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, А. Н. Петлицкий // Современ. методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. ; редкол: С. А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2015. – Кн. 1 : Материаловедение. – С. 287–291.

26–А. Формирование и исследование диодов Шоттки на основе силицидов платины и никеля / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов, А. Н. Малышко, В. А. Солодуха, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, Е. Н. Щербакова // Вестн. Баранович. гос. ун-та. Сер. «Технич. науки». – 2016. – № 4. – С. 48–54.

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

27–А. Baranov, V. V. Schottky Contacts Electrical Parameters Modeling / V. V. Baranov, V. A. Emelyanov, J. A. Solovjov // ESTC 2006 : proc. of the 1<sup>st</sup>

Electronics Systemintegration Technology Conf., Dresden, Sept. 5–7, 2006 / German Assoc. for Electrical, Electronic & Inform. Technologies – Soc. of Microelectronics, Micro and Precision Engineering. – Dresden, 2006. – P. 324–327.

28–А. Низкотемпературное формирование силицидов платины для силовых диодов Шоттки / Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, И. В. Конопляник, Е. П. Шабека, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич // *Материалы и структуры современной электроники* : сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2008. – С. 40–44.

29–А. Баранов, В. В. Формирование пленок силицида никеля для диодов Шоттки / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв // *Современные средства связи : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 24–28 сент. 2007 г. / Высш. гос. колледж связи ; редкол.: М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2007. – С. 34–35.

30–А. Низкотемпературное формирование контактных слоев силицидов платины для силовых диодов Шоттки / И. В. Конопляник, О. В. Мильчанин, Ф. Ф. Комаров, Е. П. Шабека, А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв // *Физика и технология тонких пленок и наносистем : материалы XII Междунар. конф.*, Ивано-Франковск, 7–12 мая 2009 г. : в 2 т. / Прикарпат. нац. ун-т им. Василия Стефаника ; под общ. ред. Д. М. Фрейка. – Ивано-Франковск, 2009. – Т. 1. – С. 59–60.

31–А. Низкотемпературный метод формирования контактного слоя силицида платины для силовых диодов Шоттки / Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, Т. Б. Ковалева, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич, Ч. Карват // *Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 9-й Междунар. конф.*, Минск, 20–22 сент. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. М. Анищик. – Минск, 2011. – С. 365–367.

32–А. Тепловые параметры, структура и дефектность посадки мощных полевых транзисторов / О. В. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нисс, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // *Материалы и структуры современной электроники* : сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 27–30.

33–А. Исследование качества посадки кристаллов мощных транзисторов / О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нисс, А. Ф. Керенцев, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич // *IV конгресс физиков Беларуси : сб. науч. тр. симп., посвящ. 100-летию со дня рождения академика Б. И. Степанова*, Минск, 24–26 апр. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси ; редкол.: С. Я. Килин [и др.]. – Минск, 2013. – С. 270–271.

34–А. Обеспечение надежности интегральных схем на стадии производства / В. А. Солодуха, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев, А. А. Довженко, Е. П. Самцов // Современные информационные и электронные технологии : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 27–31 мая 2013 г. : в 2 т. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2013. – Т. 2. – С. 8–11.

35–А. Интегрированные пленочные системы в твердотельных структурах диодов Шоттки / В. А. Солодуха, В. В. Баранов, Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, О. Э. Сарычев, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич, Н. К. Фоменко // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ – БГУИР : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–19 марта 2014 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А. Н. Осипов [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 56–57.

36–А. Методика электротепловой спектроскопии для исследования малых изменений теплового сопротивления полупроводниковых приборов при термоиспытаниях / Ю. А. Бумай, О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нисс, А. Ф. Керенцев, А. Н. Петлицкий, Я. А. Соловьёв // Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф., Минск, 12–13 окт. 2016 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2016. – С. 34–37.

37–А. Повышение качества сборки диодов Шоттки в микрокорпусе с локальным серебрением / В. А. Солодуха, А. К. Панфиленко, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Современные информационные и электронные технологии : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 22–26 мая 2017 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2017. – С. 85–86.

38–А. Сравнение методов T3STER и тепловой релаксационной спектроскопии для исследования структуры внутреннего теплового сопротивления полупроводниковых приборов / Ю. А. Бумай, О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. А. Солодуха, А. Н. Петлицкий, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Приборостроение-2017 : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1–3 нояб. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 160–162.

39–А. Анализ дефектов слоя посадки кристаллов в мощных МОП-транзисторах из разностных тепловых спектров при термошоковом воздействии / Ю. А. Бумай, О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. А. Солодуха, А. Н. Петлицкий, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // Приборостроение-2017 : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1–3 нояб. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2017. – С. 305–307.

40–А. Фазовые превращения в системе: двухслойная пленка Pt/Ni – Si при БТО / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, С. Б. Кущев, О. В. Сербин // *Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII Междунар. науч. конф.* Минск, 10–12 окт. 2018 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2018. – С. 70–73.

41–А. Быстрая термическая обработка системы Ni(5 ат. % Pt)/Si / А. М. Чапланов, М. И. Маркевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, С. Б. Кущев, Д. В. Сериков // *Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018 : сб. науч. тр. I Междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 22–26 окт. 2018 г. / Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2018. – С. 140–143.

42–А. Соловьёв, Я. А. Получение барьеров Шоттки быстрой термообработкой пленок сплава никель – платина – ванадий на кремнии / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко // *Современные информационные и электронные технологии : материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф.*, Одесса, 25–29 мая 2020 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2020. – С. 88–89.

43–А. Соловьёв, Я. А. Влияние режимов быстрой термообработки некогерентным световым потоком на сопротивление пленок хрома на кремнии / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов // *Радиационная физика твердого тела : материалы XXX Междунар. конф.*, Севастополь, 24–29 авг. 2020 г. / Науч.-исслед. ин-т перспектив. материалов и технологий. – М., 2020. – С. 300–304.

44–А. Формирование полупроводниковых приборов с диодами Шоттки с использованием быстрой термообработки / Я. А. Соловьёв, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Д. В. Жигулин, Е. С. Ацецкая, О. Э. Сарычев // *Материалы и структуры современной электроники : сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф.*, Минск, 14–16 окт. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2020. – С. 111–115.

45–А. Моделирование нагрева кремниевых пластин при быстрой термической обработке на установке «УБТО 1801» / Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко, В. П. Яковлев, Н. С. Хлопков, Е. В. Гринцевич, О. Э. Сарычев // *Приборостроение-2020 : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф.*, Минск, 18–20 нояб. 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2020. – С. 313–315.

46–А. Влияние температуры БТО на физико-механические свойства никелевого покрытия на кремнии / Р. Э. Трухан, В. А. Лапицкая, А. В. Хабарова, Я. А. Соловьёв, С. А. Чижик // *Молодежь в науке – 2023 : материалы XX Междунар. науч. конф.*, Минск, 20–22 сент. 2023 г. / Нац. акад.

наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 639–641.

47–А. Структура и физико-механические свойства пленок Ni – Pt – V на кремнии после быстрой термообработки / В. А. Лапицкая, Р. Э. Трухан, А. В. Хабарова, Я. А. Соловьёв, С. А. Чижик // Приборостроение-2023 : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–17 нояб. 2023 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев [и др.]. – Минск, 2023. – С. 419–420.

### **Тезисы докладов на научных конференциях**

48–А. Тонкопленочные резисторы в составе интегральных микросхем / В. В. Баранов, В. А. Зеленков, Я. А. Соловьёв, М. В. Тарасиков // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. : в 2-х т. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: А. П. Достанко [и др.]. – Новополоцк, 2006. – Т. 1. – С. 187–189.

49–А. Баранов, В. В. Управление высотой барьера Шоттки с многослойной структурой Ni – V/Pt / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв, Д. Л. Ануфриев // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Одесса, 21–25 мая 2007 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2007. – С. 335.

50–А. Баранов, В. В. Особенности технологии диодов Шоттки на основе силицида никеля / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. IX Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 19–23 мая 2008 г. : в 2 т. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2008. – Т. 2. – С. 104.

51–А. Баранов, В. В. Формирование барьеров Шоттки на основе сплава никеля / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв // Современные средства связи : тез. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–9 сент. 2008 г. / Высш. гос. колледж связи ; редкол. М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2008. – С. 77.

52–А. Баранов, В. В. Тонкопленочные резисторы повышенной стабильности в составе полупроводниковых интегральных схем / В. В. Баранов, Я. А. Соловьёв, Н. К. Фоменко // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 18–22 мая 2009 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2009. – С. 57.

53–А. Low temperature formation of platinum silicide contact layers for power Shottky diodes / F. F. Komarov, I. V. Konoplyanik, O. V. Milchanin, A. S. Turcevich, J. A. Solov'ev, C. Karwat // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation «NeeT 2009» : abstr. of the 6<sup>th</sup> Int.

conf., Lublin, Poland, June 23–26, 2009. / Lublin Univ. of Technology. – Lublin, 2009. – P. 113.

54–А. Влияние токовой тренировки на стабильность параметров диодов Шоттки / И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, В. В. Глухманчук, В. Л. Ланин, А. Ф. Керенцев // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 24–28 мая 2010 г. : в 2 т. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2010. – Т. 2. – С. 146.

55–А. Римша, А. В. Моделирование ВАХ кремниевых диодов с барьером Шоттки на основе биметаллических сплавов и их силицидов / А. В. Римша, Я. А. Соловьёв // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 24–28 мая 2010 г. : в 2 т. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2010. – Т. 2. – С. 162.

56–А. Дудкин, А. И. Моделирование ВАХ кремниевых диодов Шоттки на основе составных барьеров / А. И. Дудкин, Я. А. Соловьёв, А. В. Римша // Современные средства связи : тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 сент. 2010 г. / Высш. гос. колледж связи ; редкол. М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2010. – С. 63.

57–А. Мацукевич, И. В. Влияние режимов формирования барьерной металлизации на электрические параметры диоды Шоттки / И. В. Мацукевич, Я. А. Соловьёв // Современные средства связи : тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 сент. 2010 г. / Высш. гос. колледж связи ; редкол. М. А. Баркун [и др.]. – Минск, 2010. – С. 83.

58–А. Особенности изделий силовой полупроводниковой электроники / В. В. Баранов, А. И. Дудкин, Я. А. Соловьёв, И. И. Рубцевич, А. С. Турцевич // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 23–27 мая 2011 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2011. – С. 254.

59–А. Римша, А. В. Управление высотой барьера диодов Шоттки с параллельными контактами на основе силицидов биметаллических сплавов / А. В. Римша, Я. А. Соловьёв // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 23–27 мая 2011 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2011. – С. 256.

60–А. Влияние технологии сборки на идеальность ВАХ диода Шоттки / И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. И. Дудкин, Н. Ф. Голубев, А. Ф. Керенцев // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 23–27 мая 2011 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2011. – С. 258.

61–А. Исследование качества пайки кристаллов мощного транзистора релаксационным импеданс-спектрометром тепловых процессов / А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев,



О. С. Васьков, В. К. Кононенко, В. С. Нис // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 4–8 июня 2012 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2012. – С. 191.

62–А. Повышение качества сборки диодов Шоттки / В. А. Солодуха, А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, В. Л. Ланин, А. Ф. Керенцев // Современные информационные и электронные технологии : тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 4–8 июня 2012 г. / Одес. нац. политехн. ун-т. – Одесса, 2012. – С. 193.

63–А. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О. С. Васьков, В. С. Нисс, В. К. Кононенко, А. С. Турцевич, И. И. Рубцевич, Я. А. Соловьёв, А. Ф. Керенцев // IX Международная конференция и VIII Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения и диагностики кремния, наноразмерных структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ-2012» : тез. докл. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 9–13 июля 2012 г. / Физико-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе. – СПб., 2012. – С. 152–153.

64–А. Структура и свойства тонкопленочных субмикроструктур после воздействия быстрой термической обработки / В. А. Лапицкая, А. В. Хабарова, Р. Э. Трухан, С. А. Чижик, Я. А. Соловьёв, В. А. Пилипенко // Электронно-лучевые технологии и рентеновская оптика в микроэлектронике «КЭЛТ-2023» : тез. докл. II Объединен. конф., Черногоровка, 13–16 нояб. 2023 г. / ФГБУН ИПТМ РАН. – Черногоровка, 2023 – С. 154.

### Патенты

65–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 9449 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, В. В. Глухманчук, Д. Л. Ануфриев, Я. А. Соловьёв ; дата публ.: 30.06.2007.

66–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 10443 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/66 (2006) / А. С. Турцевич, Н. Ф. Голубев, Д. Л. Ануфриев, С. В. Кузик, Я. А. Соловьёв ; дата публ.: 30.04.2008.

67–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 11278 Респ. Беларусь : МПК H01L 21/02 (2006) / А. С. Турцевич, В. В. Глухманчук, Д. Л. Ануфриев, Я. А. Соловьёв ; дата публ.: 30.10.2008.

68–А. Высоковольтный биполярный транзистор : пат. 12019 Респ. Беларусь : МПК H01L 21/02 (2006) / А. С. Турцевич, В. В. Глухманчук, Я. А. Соловьёв, Н. Ф. Голубев, А. П. Матюшевский ; дата публ.: 30.06.2009.

69–А. Диод Шоттки : пат. 14848 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/47 (2006) / А. С. Турцевич, В. В. Глухманчук, Н. Ф. Голубев, С. В. Кузик, Я. А. Соловьёв ; дата публ.: 30.10.2011.

70–А. Диод Шоттки : пат. 15400 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/47 (2006) / О. Э. Сарычев, В. В. Глухманчук, Н. Ф. Голубев, В. Б. Высоцкий, Я. А. Соловьёв ; дата публ.: 28.02.2012.

71–А. Диод Шоттки : пат. ВУ 16184 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/872 (2006) / В. И. Блынский, Ю. Г. Василевский, В. В. Глухманчук, Н. Ф. Голубев, С. А. Малышев, Я. А. Соловьёв, А. Л. Чиж ; дата публ.: 30.08.2012.

72–А. Высоковольтный быстродействующий диод : пат. 16468 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/47 (2006) / О. Э. Сарычев, Н. Ф. Голубев, Я. А. Соловьёв, А. И. Дудкин, В. М. Пуцята ; дата публ.: 30.10.2012.

73–А. Диод Шоттки : пат. 18438 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/872 (2006) / В. И. Блынский, С. А. Малышев, В. А. Солодуха, Я. А. Соловьёв, А. С. Турцевич, А. Л. Чиж ; дата публ.: 30.08.2014.

74–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 026752 ЕАПВ : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, В. Е. Лиходиевская ; дата публ.: 31.05.2017.

75–А. Диод Шоттки : пат. 026882 ЕАПВ : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев : дата публ.: 31.05.2017.

76–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 027360 ЕАПВ : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, В. В. Баранов ; дата публ.: 31.07.2017.

77–А. Диод Шоттки : пат. 027445 ЕАПВ : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев ; дата публ.: 31.07.2017.

78–А. Диод Шоттки : пат. 027773 ЕАПВ : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев, Н. Ф. Голубев ; дата публ.: 31.08.2017.

79–А. Способ изготовления диода Шоттки: пат. 21950 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/872 (2006) / А. С. Турцевич, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев ; дата публ.: 30.06.2018.

80–А. Способ формирования на подложке слоя силицида никеля при изготовлении диода Шоттки : пат. 24032 Респ. Беларусь : МПК H01L 21/02 (2006) / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев ; дата публ.: 30.06.2023.

81–А. Диод Шоттки : пат. 24068 Респ. Беларусь : МПК H01L 29/47 (2006) / В. А. Солодуха, Н. С. Ковальчук, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев ; дата публ.: 30.08.2023.

82–А. Способ изготовления диода Шоттки : пат. 24131 Респ. Беларусь : МПК H01L 21/02 (2006) / В. А. Солодуха, А. В. Булыгин, Я. А. Соловьёв, О. Э. Сарычев ; дата публ.: 30.10.2023.

## РЭЗІЮМЭ

Салаўёў Яраслаў Аляксандравіч

### **Фарміраванне метадам хуткай тэрмаапрацоўкі бар'ерных слаёў для крэмніявых дыёдаў Шоткі з палепшанай энергаэфектыўнасцю**

**Ключавыя словы:** дыёд Шоткі, вольт-амперная характарыстыка, вышыня бар'ера, хром, нікель, плаціна, сіліцыды, хуткая тэрмаапрацоўка

**Мэта работы:** устанаўленне асноўных асаблівасцей і заканамернасцей фарміравання структурна-фазавых станаў пры хуткіх тэрмаапрацоўках сістэм Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si і Ni/Pt/Si і распрацоўка тэхналагічных працэсаў фарміравання бар'ерных пластоў дыёдаў Шоткі з палепшанай энергаэфектыўнасцю.

**Метады даследавання:** растрвая электронная мікраскапія, адваротнае рэзерфордаўскае рассеяванне, рэнтгенаўскі фазавы аналіз, прасвечваючая электронная мікраскапія, прасвечваючая электронная дыфракцыя, атамна-сілавая мікраскапія, электрафізічныя вымярэнні.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** прапанавана мадыфікаваная мадэль нагрэву высокалегіраваных крэмніявых пласцін імпульсам некагерэнтнай крыніцы святла; хуткая тэрмаапрацоўка сістэмы Cr/Si пры тэмпературы 400–550 °C прыводзіць да хвалепадобнай марфалогіі паверхні, абумоўленай генерацыяй вакансій за кошт эфекту Кіркендала і іх наступнай дэфармацыйнай-стымуляванай дыфузіяй; выкананне хуткай тэрмаапрацоўкі сістэмы Ni/Si ў дыяпазоне тэмператур ад 400 да 450 °C выклікае фарміраванне структурна-аднастайнага пласта NiSi з памерамі крышталітаў ад 100 да 200 нм, згладжанай мяжой падзелу з крэмніем і вышыняй бар'ера ~ 0,63 В; правядзенне хуткай тэрмаапрацоўкі сістэмы Ni-Pt-V/Si пры тэмпературы 450–500 °C абумоўлівае утварэнне фазы NiSi на эпітаксіяльных да падложкі даменах  $\beta$ -Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub>, якія змяшчаюць атамы Pt, інкарпараваныя ў зародкі ўзрастаючай фазы сіліцыда на ранніх стадыях фарміравання з сэгрэгацыяй сіліцыда плаціны на міжзерневых межах, уключаючы мяжу падзелу з крэмніем; хуткая тэрмаапрацоўка сістэмы Ni-V/Pt/Si за кошт дыфузіі Si пры тэмпературы 400 °C, Ni пры тэмпературы 450 °C і Pt пры тэмпературы вышэй за 500 °C у выніку паслядоўнасці пераходаў PtSi → NiSi → Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si, адпаведна, прыводзіць да фарміравання на мяжы падзелу з Si структурна аднастайнага пласта Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si са згладжанай марфалогіяй і паменшанай дэфектнасцю мяжы падзелу.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення:** у электроннай прамысловасці пры стварэнні выпрамляючых і амічных кантактаў у вырабах электроннай тэхнікі.

## РЕЗЮМЕ

Соловьёв Ярослав Александрович

### **Формирование методом быстрой термообработки барьерных слоев для кремниевых диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью**

**Ключевые слова:** диод Шоттки, вольт-амперные характеристики, высота барьера, хром, никель, платина, силициды, быстрая термообработка

**Цель работы:** установление основных особенностей и закономерностей формирования структурно-фазовых состояний при быстрых термообработках систем Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si и Ni/Pt/Si и разработка технологических процессов формирования барьерных слоев диодов Шоттки с улучшенной энергоэффективностью.

**Методы исследования:** растровая электронная микроскопия, обратное резерфордское рассеяние, рентгеновский фазовый анализ, просвечивающая электронная микроскопия, просвечивающая электронная дифракция, атомно-силовая микроскопия, электрофизические измерения.

**Полученные результаты и их новизна:** предложена модифицированная модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин импульсом некогерентного источника излучения; быстрая термообработка системы Cr/Si при температуре 400–550 °С приводит к волнообразной морфологии поверхности, обусловленной генерацией вакансий за счет эффекта Киркендала и их последующей деформационно-стимулированной диффузией; выполнение быстрой термообработки системы Ni/Si в диапазоне температур от 400 до 450 °С вызывает формирование структурно-однородного слоя NiSi с размерами кристаллитов от 100 до 200 нм, сглаженной границей раздела с кремнием и высотой барьера ~ 0,63 В; проведение быстрой термообработки системы Ni-Pt-V/Si при температуре 450–500 °С обуславливает образование фазы NiSi на эпитаксиальных к подложке доменах  $\beta$ -Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub>, содержащих атомы Pt, инкорпорированные в зародыши растущей фазы силицида на ранних стадиях формирования с сегрегацией силицида платины на межзеренных границах, включая границу раздела с кремнием; быстрая термообработка системы Ni-V/Pt/Si за счет диффузии Si при температуре 400 °С, Ni при температуре 450 °С и Pt при температуре выше 500 °С в результате последовательности переходов PtSi→NiSi→Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si соответственно, приводит к формированию на границе раздела с Si структурно-однородного слоя Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si со сглаженной морфологией и уменьшенной дефектностью границы раздела.

**Рекомендации по использованию и область применения:** в электронной промышленности при создании выпрямляющих и омических контактов в изделиях электронной техники.

## SUMMARY

Solovjov Jaroslav Alexandrovich

### **Formation of barrier layers for Schottky silicon diodes with improved energy efficiency by rapid heat treatment**

**Key words:** Schottky diode, volt-ampere characteristics, barrier height, chromium, nickel, platinum, silicides, rapid heat treatment

**Purpose of work:** to establish the main features and formation patterns of structural-phase states during rapid heat treatment of Cr/Si, Ni/Si, Ni-Pt/Si and Ni/Pt/Si systems and to develop technological processes for the formation of barrier layers for Schottky diodes with improved energy efficiency.

**Research methods:** scanning electron microscopy, Rutherford backscattering, X-ray phase analysis, transmission electron microscopy, transmission electron diffraction, atomic force microscopy, electrophysical measurements.

**Results and scientific novelty:** a modified model of heating heavy-doped silicon wafers by a pulse of an incoherent light source is proposed; rapid heat treatment of the Cr/Si system at a temperature of 400–550 °C leads to a wave-like surface morphology due to the generation of vacancies due to the Kirkendahl effect and their subsequent deformation-stimulated diffusion; rapid heat treatment of the Ni/Si system in the temperature range from 400 to 450 °C causes the formation of a structurally homogeneous NiSi layer with crystallite sizes from 100 to 200 nm, a smoothed interface with silicon and a barrier height of ~ 0.63 V; performing of rapid heat treatment of the Ni Pt-V/Si system at a temperature of 450–500 °C causes the formation of the NiSi phase on the epitaxial to substrate of  $\beta$ -Ni<sub>31</sub>Si<sub>12</sub> domains containing Pt atoms incorporated into the nuclei of the growing silicide phase in the early stages of formation with segregation of platinum silicide at grain boundaries, including the interface with silicon; rapid heat treatment of the Ni-V/Pt/Si system due to Si diffusion at a temperature of 400 °C, Ni at a temperature of 450 °C and Pt at temperatures above 500 °C as a result of the sequence of transitions PtSi → NiSi → Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si, respectively, leads to the formation of a structurally homogeneous Ni<sub>x</sub>Pt<sub>y</sub>Si layer at the interface with Si with smoothed morphology and reduced interface defects.

**Recommended application areas:** in the electronics industry, when creating rectifying and ohmic contacts in electronic products.



*Научное издание*

**Соловьёв Ярослав Александрович**

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ  
БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ  
С УЛУЧШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,  
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,  
приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать 21.10.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 2,5 Уч.-изд. л. 2,69 Тираж 80 Заказ 4247.

Издатель и полиграфическое исполнение

Открытое акционерное общество «Типография Интегралполиграф»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя  
и распространителя печатных изданий №1/572 от 15.12.2023 и №2/21 от 29.11.2013.

Ул. Корженевского, 16, пом. 111, 220108, г. Минск