



Институт автоматизации и процессов  
управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук

## ***Кремний 2026***

***XVI Конференция по актуальным проблемам физики,  
материаловедения, технологии и диагностики кремния,  
нанометровых структур  
и приборов на его основе***

### ***Тезисы докладов***

г. Владивосток, 13 - 17 июля 2026 года

УДК 548/549/538.9/537

ББК 26.303я431

Тезисы докладов XVI Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний–2026» (Владивосток, 13–17 июля 2026 г.). – Владивосток, Дальнаука, 2026. – 122 с.

Конференция «Кремний-2026» является продолжением серии научных конференций посвященных кремнию. Свою историю она ведет с общероссийского совещания по кремнию, проведенного в МИСиС в 1999 году. За эти годы мероприятие превратилось в основной форум, где ученые, представляющие академическое сообщество, ВУЗы и промышленность России и стран СНГ, могут обсудить актуальные проблемы по всему кругу вопросов, включающему в себя получение металлургического и поликристаллического кремния, рост и материаловедение объемных кристаллов и тонких пленок кремния и родственных материалов, а также физику, технологию и диагностику наноструктур на их основе.

На конференции представлены доклады ведущих ученых, работающих в области материаловедения кремния и его применений.

Ответственный редактор сборника Н.Г. Галкин

ISBN 978-5-8044-1757-5

---

© ИАПУ ДВО РАН, 2026

## *Организаторы конференции*

Институт автоматики и процессов  
управления ДВО РАН



Президиум ДВО РАН



## *Генеральный спонсор*

ГК "Криосистемы"



## *Официальные спонсоры*

ООО «КОНТЕК»



ООО "Активная фотоника"



ООО «Научные технологии и сервис»



ООО «Остек-АртТул»



<https://silicon2026.iacp.dvo.ru/>

## **Программный комитет**

**Председатель Конференции - Галкин Н.Г., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток**

**Ученый секретарь - Галкин К.Н., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток**

## **Члены программного комитета**

**Асеев А.Л. ИФП СО РАН**

**Бердников В.С. ИТ СО РАН**

**Владимиров В.М. КНЦ СО РАН**

**Вяткин А.Ф. ИПТМ РАН**

**Горнев Е.С. АО «НИИМЭ»**

**Двуреченский А.В. ИФП СО РАН**

**Ежлов В.С. НИТУ МИСиС**

**Елисеев И.А. ИГХ СО РАН**

**Ивонин И.В. ТГУ**

**Кведер В.В. ИФТТ РАН**

**Кобелева С.П. НИТУ МИСиС**

**Красильник З.Ф. ИФМ РАН**

**Латышев А.В. ИФП СО РАН**

**Лукичев В.Ф. НИЦ «Курчатовский институт» - ФТИАН им. К.А. Валиева**

**Непомнящих А.И. ИГХ СО РАН**

**Нехамин С.М. ООО «НПФ КОМТЕРМ»**

**Никитов С.А. ИРЭ РАН**

**Новиков А.В. ИФМ РАН**

**Номоев А.В. ИФМ СО РАН**

**Пархоменко Ю.Н. НИТУ МИСиС**

**Попов В.П. ИФП СО РАН**

**Ромашко Р.В. ИАПУ ДВО РАН**

**Руденко К.В. НИЦ «Курчатовский институт» - ФТИАН им. К.А. Валиева**

**Саранин А.А. ИАПУ ДВО РАН**

**Сауров А.Н. ИНМЭ РАН**

**Соболев Н.А. ФТИ им. А.Ф. Иоффе**

**Сорокин Л.М. ФТИ им. А.Ф. Иоффе**

**Теруков Е.И. ФТИ им. А.Ф. Иоффе**

**Шарапов А.А. АО "НИИМЭ", МФТИ**

**Якимов Е.Б. ИПТМ РАН**

## **Организационный комитет**

**Галкина А.Н. ИАПУ ДВО РАН**

**Горошко Д.Л. ИАПУ ДВО РАН**

**Горошко О.А. ИАПУ ДВО РАН**

**Змеу С.Б. Президиум ДВО РАН**

**Колбина Е.А. Президиум ДВО РАН**

**Кропачев О.В. ИАПУ ДВО РАН**

**Субботин Е.Ю. ИАПУ ДВО РАН**

**Трифонов А.С. ИАПУ ДВО РАН**

**Чернев И.М. ИАПУ ДВО РАН**

**Чусовитина С.В. ИАПУ ДВО РАН**

## ПРОИЗВОДСТВО ВАКУУМНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

Мы специализируемся на разработке и производстве высокоточных вакуумных систем, компонентов и узлов для научных исследований и промышленных применений. Наши инженеры проектируют и изготавливают нестандартное оборудование, полностью соответствующее потребностям заказчиков.

Мы обеспечиваем полный цикл — от идеи до ввода в эксплуатацию. Это позволяет нашим клиентам получать готовые решения, адаптированные под конкретные задачи и соответствующие международным стандартам.

- **ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УЧЁТОМ СПЕЦИФИКИ ЗАДАЧИ**
- **ПРОИЗВОДСТВО И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ**
- **ФИНАЛЬНАЯ СБОРКА И НАСТРОЙКА ОБОРУДОВАНИЯ**



### Наши компетенции:

#### Термическое и магнетронное напыление тонких плёнок.

Современные методы создания покрытий с высокой точностью и воспроизводимостью.

#### Электронно-лучевое нанесение материалов (Nb, Ti, Al и др.).

Высокая степень чистоты и контроль над процессом осаждения.

#### Химическое паро-осаждение (CVD).

Получение плёнок с уникальными свойствами для микроэлектроники и нанотехнологий.

#### Пульсационно-лазерное осаждение тонких плёнок.

Передовая технология для формирования функциональных покрытий.

#### Сверхвысоковакуумные установки.

Применяются для процессов напыления, травления и анализа материалов.

## ДОЛЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОБОРОННЫХ ЗАКАЗОВ И ГОСУДАРСТВЕННЫХ КОНТРАКТОВ

**75%**

в 2022-2026

## РЕАЛИЗОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

**>350**

за время существования компании

## ПОЛНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦИКЛ

Заготовка, механическая обработка, сварка, финальная сборка

«Криосистемы» — один из лидеров в РФ и дружественных юрисдикциях в разработке конструкторской документации, сборочных чертежей и реализации сложных технических проектов.

ГК «Криосистемы» обеспечивает государственные предприятия РФ высокотехнологичным оборудованием и современными технологиями в образовании, медицине, науке, космосе и атомной отрасли.

### НАШИ ЗАКАЗЧИКИ:



### Квантовые технологии и инженерия.

Оборудование для задач квантовой физики и квантовых вычислений.

### Криогенные системы и криостаты растворения.

Решения для достижения и поддержания сверхнизких температур в экспериментах.

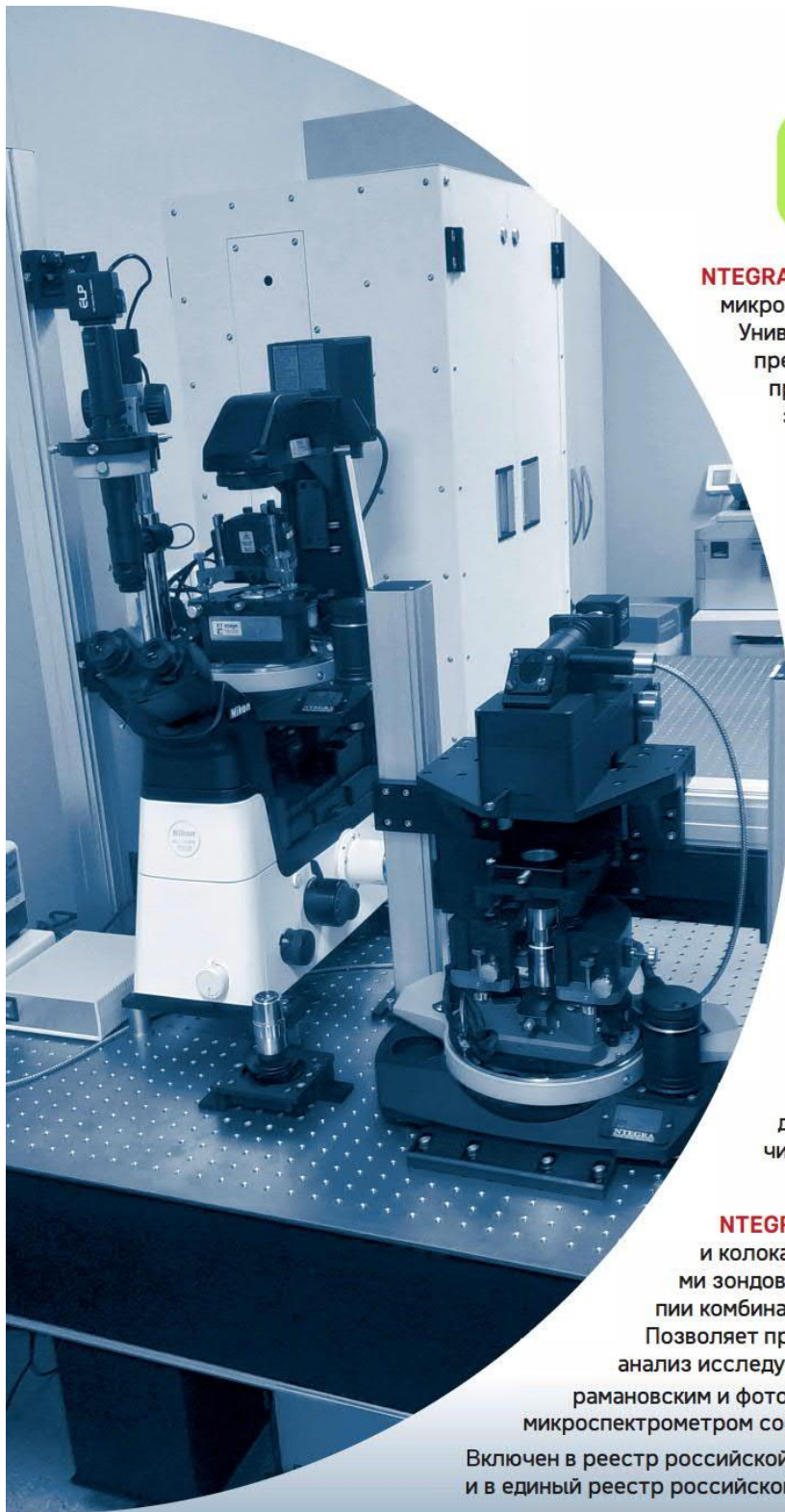
Наши технологические установки используются как в фундаментальной науке, так и в прикладных направлениях, включая микроэлектронику и новые материалы. Мы проектируем и производим оборудование, которое позволяет решать задачи на стыке науки и промышленности.

### ВАШ ИНТЕГРАТОР ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Приглашаем к сотрудничеству!  
Будем рады стать Вашим надежным партнёром и поставщиком:  
**+7 (495) 215-55-65 | cryosystems.ru**  
**info@cryosystems.ru**







**NTEGRA** — платформа для зондовой и оптической микроскопии и спектроскопии в наномасштабе. Универсальная база и модульная конструкция предоставляют свободу конфигурирования прибора под различные задачи и цели использования.

**NTEGRA Academia** — модель сканирующего зондового микроскопа для использования в образовательных целях: изучение принципов зондовой микроскопии, проведение практических работ и ознакомление с основными методиками исследований.

**NTEGRA Prima** — многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп с набором из более 40 методов атомно-силовой и туннельной микроскопии.

**NTEGRA Aura** — атомно-силовой микроскоп для работы в контролируемых условиях и проведения высокочувствительных измерений в многопроходных методиках.

**NTEGRA MFM** — сканирующий зондовый микроскоп, специализированный для исследования магнитных свойств материалов, в том числе во внешнем магнитном поле.

**NTEGRA Spectra** — система для одновременного и координированного исследования образцов методами зондовой микроскопии и микроскопии / спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Позволяет проводить комплексный физико-химический анализ исследуемого образца. Комплектуется конфокальным рамановским и фотолюминесцентным 3D сканирующим микроспектрометром собственного производства LS RamBo 620.

Включен в реестр российской промышленной продукции и в единый реестр российской радиоэлектронной продукции

**ПП РФ 719**

**ПП РФ 878**

**ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ОТЕЧЕСТВЕННОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ**



+7 499 390 66 78

INFO@ACTIVE-PHOTON.COM

WWW.ACTIVE-PHOTON.COM

124460, Г. МОСКВА, Г. ЗЕЛЕНОГРАД,  
ПАНФИЛОВСКИЙ ПРОСПЕКТ, Д. 10, ОФ. 44 Н/2

## Рентгеновское оборудование SIGRAY, Калифорния

### Микро XRF AttoMap

Рентгенофлуоресцентная микроскопия/микроанализ ( $\mu$ XRF) с высоким пространственным разрешением для детального картирования распределения элементов.

- обеспечивает пространственное разрешение 3-5 мкм, высокую чувствительность и возможность количественного картирования элементов на уровне суб-ppm
- использование источника рентгеновских лучей с несколькими энергиями для лучшего детектирования заданных элементов
- использование SiC-источника для устранения фона от Si



### Рентгеновский микротомограф Арех ХСТ для больших образцов

3D рентгеновская микроскопия с высоким разрешением и производительностью для неразрушающего анализа внутренних структур больших образцов. Подходит для реверсивного инжиниринга.

Арех ХСТ: предназначен для задач в области полупроводниковой промышленности и исследований аккумуляторов, обеспечивает разрешение до 0.5 мкм и высокую скорость сканирования.

- обеспечивает детальное изображение внутренних структур с разрешением до 500 нм (минимальный воксель 70 нм)
- образцы до 300 мм в диаметре
- изображения с разрешением 0.5 мкм менее, чем за 15 минут
- отсутствие артефактов ужесточения пучка
- неискаженный контраст
- возможность работы с роботом-податчиком

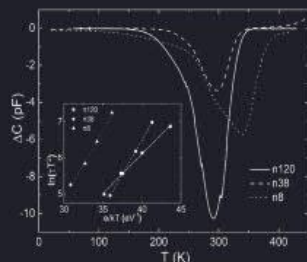


[www.conetech.ru](http://www.conetech.ru)  
info@conetech.ru  
+7 499 350-20-60



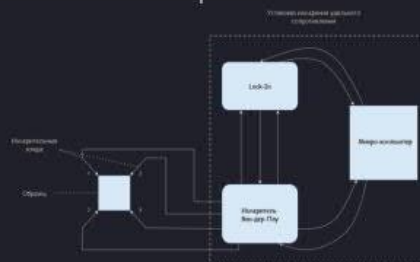
## DLTS-спектрометр

Универсальный DLTS-спектрометр для исследования глубоких центров в полупроводниковых структурах



## Van der PauwTFRS

Scietex Van der Pauw TFRS – установка для измерения удельного сопротивления тонкопленочных материалов



## Система напыления C156TES

Комбинированная система напыления C156TES с турбомолекулярным насосом. Напыляемый металл Au, Pt, Al, Ta, Ni, Mo, Nb, Sn, Zr, Zn, Si и др.



## CD-SEM

сканирующий электронный микроскоп предназначенный для измерения критических размеров в микроэлектронике и полупроводниковой промышленности.



## Scietex TEM F200

просвечивающий электронный микроскоп с термополевым катодом типа Шоттки, 200 кВ



## Scietex SEM F30

многофункциональный сканирующий электронный микроскоп с катодом Шоттки, разрешение 0,9 нм.





**Остек-АртТул - компания группы Остек,  
лидера инженерных решений в России**



**30+**

**опыт группы в инженерных  
решениях**

**2500+**

**проектов реализовано для  
промышленности и НИОКР**

**3000+**

**клиентов + промышленность,  
НИИ, ОПК**

**35 000**

**установок + оборудование,  
внедренное на производствах**

**9 компаний**

**экосистема экспертизы  
и сервисной поддержки**

## **Остек-АртТул - инжиниринговый партнер для промышленности и НИОКР**

### **О компании**

Специализируемся на комплексном оснащении производств и НИИ современным технологическим оборудованием.

### **Наша миссия**

Обеспечивать производства и НИИ передовыми технологическими решениями, которые повышают эффективность сегодня и создают потенциал на будущее.

### **Наш подход**

Работаем как партнер: подбираем оптимальные инструменты, предупреждаем ошибки при внедрении и сопровождаем проект до результата.

**576**

**единиц  
оборудования  
в ассортименте**

**300**

**новинок  
ежегодно**

**72%**

**клиентов  
работают с нами  
более 3 лет**

**14**

**инженеров  
и специалистов  
по применению**

## **Наши направления**

Техническая  
микроскопия



Научно-исследовательское  
оборудование



Оснащение рабочих мест

Автоматизированные  
системы хранения

Метрологическое  
оборудование

Пневматическое  
и гидравлическое оборудование

# Содержание

## Пленарные доклады

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Plenary 01 | Криогенные плазменные технологии в кремниевой микроэлектронике: 3D интегральные схемы или как продлить жизнь закона мура<br><i>Руденко К.В., Мяконьких А.В., Лукичев В.Ф.</i> .....                                                                                            | 17 |
| Plenary 02 | Энергоэффективные элементы ИС - сегнетоэлектрики в кремнии<br><i>Попов В.П., Тарков М.С., Тихоненко Ф.В., Мяконьких А.В., Руденко К.В.</i> .....                                                                                                                               | 18 |
| Plenary 03 | Эпитаксиальные Si/SiGe и Ge/GeSi структуры для квантовых вычислений<br><i>Новиков А.В., Шалеев М.В., Юрасов Д.В., Демидов Е.В., Дроздов М.Н., Ревин Л.С., Панкратов А.Л., Антонов А.В., Красильникова Л.В., Шмырин Д.А., Ситников С.В., Щеглов Д.В., Красильник З.Ф.</i> ..... | 19 |
| Plenary 04 | Закономерности сопряженного конвективного и радиационно-конвективного теплообмена в методах направленной кристаллизации расплавов<br><i>Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гришков В.А., Кислицын С.А., Митин К.А., Михайлов А.В.</i> .....                       | 20 |
| Plenary 05 | Спин-орбитроника - платформа для разработки электронной компонентной базы на новых физических принципах<br><i>Самардак А.С.</i> .....                                                                                                                                          | 21 |
| Plenary 06 | Получение высокочистых материалов для полупроводниковых применений<br><i>Аношин О.С., Гришинова Н.Д., Полежаев Д.М., Радьков Ю.Ф., Зайцев А.В., Котков А.П.</i> .....                                                                                                          | 22 |
| Plenary 07 | Состояние стандартизации в области измерения основных параметров полупроводниковых материалов<br><i>Кобелева С.П., Щемеров И.В., Анфимов И.М., Колоколов Д.Г.</i> .....                                                                                                        | 23 |
| Plenary 08 | Особо-чистые кварцевые концентраты, как необходимая основа получения кремния для солнечной энергетики и микроэлектроники<br><i>Непомнящих А.И., Елисеев И.А., Жабоедов А.П., Федоров А.М.</i> .....                                                                            | 24 |
| Plenary 09 | Следы за дислокациями в кремнии, 50 лет исследований<br><i>Якимов Е.Б.</i> .....                                                                                                                                                                                               | 25 |
| Plenary 10 | Гетерогенная элементная база — основа построения нейроморфных процессоров с новыми архитектурами<br><i>Тельминов О.А.</i> .....                                                                                                                                                | 26 |

## I. Материаловедение кристаллического кремния: получение и очистка металлургического кремния, процессы роста из расплавов, химического осаждения из газовой фазы, аппаратура для роста. Получение кремния солнечного качества и проблемы солнечной энергетики

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.o.01 | Интеграция технологии восстановления монооксида кремния и физического атомно-слоевого осаждения для получения кремниевых планарных структур<br><i>Нехамин С.М., Плюснин Н.И., Киселев Ю.В., Бильгенов А.</i> .....                                              | 28 |
| I.o.02 | Технология получения кремния, пригодного для изготовления солнечных элементов, на основе прямого карботермического восстановления<br><i>Елисеев И.А.</i> .....                                                                                                  | 29 |
| I.o.03 | Анализ и оптимизация промышленного роста монокристаллов кремния с помощью компьютерного моделирования<br><i>Борисов Д.В., Смирнов С.И., Демо И.О., Любимова О.О., Калаев В.В.</i> .....                                                                         | 30 |
| I.o.04 | Зависимость полей температуры и термических напряжений в моно- и поликристаллах кремния от параметров сопряженного радиационно-конвективного теплообмена на различных стадиях технологического процесса<br><i>Митин К.А., Бердников В.С., Митина А.В.</i> ..... | 31 |
| I.p.01 | Управление качеством сырьевых материалов для получения высокочистых соединений кремния<br><i>Вдовина Т.Н., Штриплинг Л.О.</i> .....                                                                                                                             | 32 |
| I.p.02 | Получение сверхчистого монокристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки<br><i>Зайцев А.В., Аношин О.С., Суханов А.Ю., Котков А.П.</i> .....                                                                                                      | 33 |

|        |                                                                                                                                         |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.p.03 | Топологический спектр высокочастотного малоуглового рассеяния волны Рэлея<br><i>Чуков В.Н.</i> .....                                    | 34 |
| I.p.04 | Исследование элементного состава кремния после очистки методом дуговой плавки (Tri-Arc TA-200)<br><i>Халимов А., Шаронов У.Б.</i> ..... | 35 |
| I.p.05 | Технология очистки кремния методом дуговой плавки на установке Tri-Arc TA-200<br><i>Халимов А., Шаронов У.Б.</i> .....                  | 36 |

## **II. Атомные процессы на поверхности, границах раздела и в объеме кремния: дефекты, примесные атомы. Двумерные, одномерные и нульмерные структуры на основе кремния. Рост и материаловедение тонких (в том числе эпитаксиальных) пленок на кремнии, включая кремний-на-изоляторе и напряженные структуры**

|        |                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| П.о.01 | Исследование свойств и структуры мезо и макропористого кремния с осаждённым циннаризином<br><i>Леньшин А.С., Полковникова Ю.А., Черненко С.С., Домашевская Э.П.</i> .....                                                                                  | 38 |
| П.о.02 | Анализ морфологии нанопроволок Si в зависимости от скорости осаждения кремни, температуры и свойств поверхности подложки с помощью Монте-Карло моделирования<br><i>Маниурова С.В., Шварц Н.Л.</i> .....                                                    | 39 |
| П.о.03 | Структурные и оптические свойства пленок пористого SiO <sub>2</sub> , созданных анодным окислением кремния, имплантированного ионами CO <sup>+</sup><br><i>Тыщенко И.Е., Спесивцев Е.В., Попов И.В., Володин В.А., Попов В.П.</i> .....                    | 40 |
| П.о.04 | Формирование тонких многослойных структур кремния методом эпитаксиального наращивания из газовой фазы при пониженной температуре<br><i>Дубкова А.С., Рябов В.Н., Тарасов И.В., Ильюшина Н.Д., Мухин А.А., Дубков С.А.</i> .....                            | 41 |
| П.о.05 | Термодинамическая модель образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом<br><i>Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукунов О., Войцеховский А.В., Коханенко А.П.</i> .....                                                           | 42 |
| П.о.06 | Рост атомно-тонких плёнок для кремниевой наноиндустрии: на пути к новой технологии<br><i>Плюснин Н.И., Ануфриев Ю.В.</i> .....                                                                                                                             | 43 |
| П.о.07 | Кристаллическая и электронная структура, оптические и фононные свойства тонких пленок Cr <sub>3</sub> Si на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (001)<br><i>Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Доценко С.А., Мигас Д.Б., Волкова Л.С., Гришин Т.С., Дудин А.А.</i> ..... | 44 |
| П.о.08 | Исследование кристаллической структуры и электронных свойств двумерных сплавов Si(111)4×1-(Li,Pb) и Si(111)2×1-(Li,Pb)<br><i>Цуканов Д.А., Рыжкова М.В., Михалюк А.Н., Бондаренко Л.В.</i> .....                                                           | 45 |
| П.о.09 | Исследование границы раздела тонких плёнок оксидов переходных металлов, полученных методом атомно-слоевого осаждения на кремниевой подложке<br><i>Александров Н.В., Горячев А.В., Кириленко Е.П., Громов В.Д., Дудин А.А.</i> .....                        | 46 |
| П.о.10 | Молекулярно-лучевая эпитаксия наногетероструктур GeSn/Si со сверхтонкими слоями GeSn<br><i>Скворцов И.В., Тимофеев В.А., Машанов В.И., Зиновьев В.А., Бацанов С.А.</i> .....                                                                               | 47 |
| П.о.11 | Сравнение термоэлектрических свойств тонких пленок CrSi и CrSi <sub>2</sub> , выращенных методом МЛЭ на Si(111) и Si(100)<br><i>Галкин Н.Г., Горошко О.А., Галкин К.Н., Кропачев О.В., Горошко Д.Л., Доценко С.А.</i> .....                                | 48 |
| П.о.12 | Радиационно-стимулированный рост пленок 3R-CaSi <sub>2</sub> на подложках Si(111)<br><i>Кацюба А.В., Двуреченский А.В., Зиновьев В.А., Зиновьева А.Ф., Камаев Г.Н., Володин В.А.</i> .....                                                                 | 49 |
| П.р.01 | Исследование методов получения низкоомных слоёв кремния Р-типа для PIN-диодов СВЧ диапазона<br><i>Дубков С.А., Пухов Д.В., Халимова К.А., Дубкова А.С., Смирнова А.К.</i> .....                                                                            | 50 |
| П.р.02 | Исследование нанокompозитных структур на основе мезопористого кремния и золота<br><i>Ким К.Б., Черненко С.С., Нифталиев С.И., Гречкина М.В., Чукавин А.И., Лукин А.Н., Леньшин А.С.</i> .....                                                              | 51 |
| П.р.03 | Атомная структура реконструкции Cu/TbSi <sub>2</sub> на Si(111)<br><i>Бурковская П.В., Котляр В.Г., Утас Т.В., Рыжкова М.В., Жданов В.С., Зотов А.В., Саранин А.А.</i> .....                                                                               | 52 |



|        |                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| П.р.04 | Сендвич-структура Al/Si на базе редкоземельного силицида HoSi <sub>2</sub> /Si(111)<br><b>Жданов В.С.,</b> Олянич Д.А., Утас Т.В., Грузнев Д.В., Вековишин Ю.Е., Тупчая А.Ю.,<br>Бондаренко Л.В., Котляр В.Г., Бурковская П.В., Михалюк А.Н., Зотов А.В., Саранин А.А. .... | 53 |
| П.р.05 | Влияние иттрия на структурные изменения поверхности Si(111)-5×2-Au<br><b>Олянич Д.А.,</b> Жданов В.С., Утас Т.В., Грузнев Д.В., Вековишин Ю.Е., Тупчая А.Ю.,<br>Бондаренко Л.В., Михалюк А.Н., Зотов А.В., Саранин А.А. ....                                                | 54 |
| П.р.06 | Формирование и электрическая проводимость поверхностных структур Si(111)-InSn<br><b>Рыжкова М.В.,</b> Цуканов Д.А. ....                                                                                                                                                     | 55 |
| П.р.07 | Двумерный силицид Pd на Si(111)<br><b>Тупчая А.Ю.,</b> Бондаренко Л.В., Вековишин Ю.Е., Утас Т.В., Брыкин Л.О., Михалюк А.Н.,<br>Грузнев Д.В., Зотов А.В., Саранин А.А. ....                                                                                                | 56 |
| П.р.08 | Влияние соотношения потоков Ca/Si на формирование пленки Ca <sub>2</sub> Si на Si(111)<br><b>Галкин К.Н.,</b> Кропачев О.В., Горошко Д.Л., Герасименко А.В., Галкин Н.Г. ....                                                                                               | 57 |
| П.р.09 | Эффект слабой локализации в ультратонкой пленке FeSi на Si(111)<br><b>Горошко Д.Л.,</b> Данилюк А.Л., Субботин Е.Ю., Галкин К.Н., Мигас Д.Б., Галкин Н.Г. ....                                                                                                              | 58 |
| П.р.10 | Низкотемпературный магнитотранспорт в тонких пленках CoSi на кремниевой подложке<br><b>Горошко Д.Л.,</b> Галкин К.Н., Кропачев О.В., Чернев И.М., Маслов А.М., Горошко О.А.,<br>Галкин Н.Г. ....                                                                            | 59 |
| П.р.11 | Особенности транспорта и термоэлектрических свойств тонких пленок Cr <sub>3</sub> Si на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (001)<br><b>Галкин Н.Г.,</b> Субботин Е.Ю., Галкин К.Н., Горошко О.А., Горошко Д.Л. ....                                                             | 60 |
| П.р.12 | Упорядоченные наноструктурированные поверхности кремния, сформированные методом<br>металл-стимулированного каталитического травления<br><b>Тумашев В.С.,</b> Селезнев В.А. ....                                                                                             | 61 |
| П.р.13 | Рост топологических изоляторов на подложках S(111) методом МЛЭ<br><b>Ищенко Д.В.,</b> Кырова Е.Д., Кумар Н., Супрун С.П., Голяшов В.А., Степина Н.П., Сухих А.С.,<br>Суровцев Н.В., Юнин П.А., Милехин И.А., Мартовицкий В.П., Терещенко О.Е. ....                          | 62 |
| П.р.14 | Механизм синтеза CaSi <sub>2</sub> под действием электронного пучка при эпитаксии CaF <sub>2</sub> на Si(111)<br><b>Ван Ю.,</b> Кацюба А.В., Камаев Г.Н., Зиновьева А.Ф., Зиновьев В.А., Двуреченский А.В. ....                                                             | 63 |

### III. Физика кремниевых квантово-размерных структур твердотельной электроники, в том числе нано- и оптоэлектроники, фотоники, спинтроники и скирмионики

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.o.01 | Светоизлучающие диоды и транзисторы с Ge(Si) наноостровками для кремниевой фотоники<br><b>Новиков А.В.,</b> Захаров В.Е., Яблонский А.Н., Демидов Е.В., Шалеев М.В., Юрасов Д.В.,<br>Вербус В.А., Михайлов А.Н., Тетельбаум Д.И., Смагина Ж.В., Родякина Е.Е. ....                             | 65 |
| III.o.02 | Сингулярности Ван Хова в двумерных системах на поверхности кремния<br><b>Бондаренко Л.В.,</b> Вековишин Ю.Е., Тупчая А.Ю., Утас Т.В., Жданов В.С., Денисов Н.В.,<br>Михалюк А.Н., Грузнев Д.В., Зотов А.В., Саранин А.А. ....                                                                  | 66 |
| III.o.03 | Механизм транспорта заряда и кулоновское отталкивание электронов, локализованных<br>на ловушках в MgO<br><b>Гисматулин А.А.,</b> Горшков Д.В., Гриценко В.А. ....                                                                                                                              | 67 |
| III.o.04 | Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры с варьируемым периодом<br>как инструмент управления оптоэлектронными свойствами кремния<br><b>Бородаенко Ю.М.,</b> Шевлягин А.В., Кучмижак А.А. ....                                                                              | 68 |
| III.p.01 | Влияние типа проводимости подложки кремния на электрические и магнитотранспортные<br>характеристики гибридной структуры Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> /Si<br><b>Балашев В.В.,</b> Писаренко Т.А., Субботин Е.Ю., Олянич Д.А., Яковлев А.А., Цуканов Д.А. ....               | 69 |
| III.p.02 | Повышение эффективности фотовольтаической структуры TeO <sub>2</sub> /Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Si<br><b>Яковлев А.А.,</b> Писаренко Т.А., Балашев В.В., Мараров В.В., Цуканов Д.А. ....                                                                                                | 70 |
| III.p.03 | Эпитаксия мультислоев нанокристаллов β-FeSi <sub>2</sub> в кремнии на подложке КНИ(100):<br>кристаллическая структура и фотолюминесценция на 1.5 мкм<br><b>Галкин Н.Г.,</b> Галкин К.Н., Кропачев О.В., Доценко С.А., Степихова М.В., Юнин П.А.,<br>Волкова Л.С., Гришин Т.С., Дудин А.А. .... | 71 |

|          |                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.p.04 | Оптически активные дефектные центры в матрице Si для КМОП-совместимых устройств квантовой фотоники<br><i>Юрасов Д.В., Яблонский А.Н., Захаров В.Е., Михайлов А.Н., Никольская А.А. и Новиков А.В.</i> .....                                                   | 72 |
| III.p.05 | Кулоновское отталкивание и вигнеровская кристаллизация локализованных электронов в $\text{HfO}_2$ : эксперимент и моделирование<br><i>Гисматуллин А.А., Махмудиан М.М., Махмудиан Мехрдад М., Энтин М.В., Маркелова А.К., Алиев В.Ш., Грищенко В.А.</i> ..... | 73 |
| III.p.06 | Роль интерфейсов в управлении магнитными свойствами и доменной структурой многослойных нанопленок Pt/Co/CoOx/Gd/Pt<br><i>Турпак А.А., Кузнецова М.А., Козлов А.Г., Пашенко А.С., Черноусов Н.Н., Давыденко А.В.</i> .....                                     | 74 |
| III.p.07 | Влияние плоскостного магнитного поля на неуниверсальные параметры режима ползучести<br><i>Давыденко А.В., Черноусов Н.Н., Пашенко А.С., Козлов А.Г., Турпак А.А.</i> .....                                                                                    | 75 |
| III.p.08 | Плазмонные структуры на основе пористого кремния<br><i>Тыныштыкбаев К.Б.</i> .....                                                                                                                                                                            | 76 |

#### **IV. Нанотехнологии кремниевой электроники, включая ионную имплантацию, литографию, технологии создания квантовых точек и скрытых слоев. Квантовые технологии на основе кремниевых структур, квантовые сенсоры**

|         |                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.o.01 | Разработка слоев Mo-Si для реализации оптической фотолитографии с нанометровыми технологическими нормами<br><i>Громов Д.Г., Лебедев Е.А., Новосельцев А.И., Крохан Н.В., Аникин А.В.</i> .....                                                 | 78 |
| IV.o.02 | Использование атомно-слоевого травления для планаризации поверхности $\text{SiO}_2$<br><i>Ковалев А.Н., Резванов А.А., Шибанов Д.Р. и Лопачев Д.В.</i> .....                                                                                   | 79 |
| IV.o.03 | Формирование переходного слоя на кремнии при облучении ионами $\text{C}_{60}$<br><i>Карасев П.А., Карасев К.П., Стрижкин Д.А., Пуха В.Е.</i> .....                                                                                             | 80 |
| IV.o.04 | UTBV SOI структуры с локальными tr-hr слоями после имплантации молекулярных ионов CO<br><i>Попов В.П., Антонов В.А., Жилицкий Е.В., Мяхоньких А.В., Руденко К.В.</i> .....                                                                     | 81 |
| IV.o.05 | Формирование упорядоченных структур серебра на кремнии методом литографически-контролируемого гальванического вытеснения<br><i>Жарова Ю.А., Федорова Е.С., Ермина А.А., Пригода К.В., Большаков В.О., Марков Д.П., Солодовченко Н.С.</i> ..... | 82 |
| IV.p.01 | Исследование свойств Low-к диэлектрика на основе оксида кремния с добавлением бензольных и метильных групп<br><i>Кадыров А.Д., Резник А.А., Резванов А.А.</i> .....                                                                            | 83 |
| IV.p.02 | Химические реакции травления при использовании газовой смеси тетрафторида кремния, силана и водорода при осаждении пленки нанокристаллического кремния<br><i>Миловзоров Д.Е.</i> .....                                                         | 84 |
| IV.p.03 | Моделирование напряженно-деформированного состояния системы металлизации на кремнии в условиях теплового удара<br><i>Никитин В.В., Скворцов А.А., Николаев В.К., Рыбакова М.Р.</i> .....                                                       | 85 |
| IV.p.04 | Анодное окисление кремния, имплантированного большими дозами ионов $\text{CO}^+$<br><i>Попов И.В., Смагина Ж.В., Спесивцев Е.В., Тыщенко И.Е., Попов В.П.</i> .....                                                                            | 86 |
| IV.p.05 | Разработка и калибровка модели постэкспозиционной сушки в резистах с химическим усилением<br><i>Степанова М.Г., Литаврин М.В., Клочкова Е.Л., Шарапов А.А., Шишлянников А.В., Фортунова Е.А., Горнев Е.С.</i> .....                            | 87 |
| IV.p.06 | Исследование точности совмещения и воспроизводимости критических размеров в технологии двукратной 193-нм сухой литографии<br><i>Тихонова Е.Д., Горнев Е.С.</i> .....                                                                           | 88 |
| IV.p.07 | Особенности формирования плотных линейных структур методом самосовмещенной двукратной литографии с использованием аморфного углерода<br><i>Тихонова Е.Д., Степанова М.Г., Шарапов А.А.</i> .....                                               | 89 |
| IV.p.08 | Оптимизация процесса активации имплантированной примеси в кремнии для мощных полевых транзисторов методом лазерного отжига<br><i>Федорова О.А., Демо И.О., Смирновский А.А., Иванов Д.А.</i> .....                                             | 90 |

|         |                                                                                                                                                                                           |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IV.p.09 | Особенности моделирования нагрева межсоединений на кремнии в условиях теплового удара<br><i>Худаяров З.Ф., Скворцов А.А., Скворцов П.А., Рыбакова М.Р.</i> ..... 91                       |
| IV.p.10 | Физико-химическое моделирование профиля и неровности края в фоторезисте<br><i>Шарапов А.А., Литаврин М.В., Горнев Е.С.</i> ..... 92                                                       |
| IV.p.11 | Исследование каталитической активности наноструктур пористый кремний/платина при электроокислении этанола<br><i>Лазоркина Е.Н., Воловлюкова О.В., Горошко Д.Л.</i> ..... 93               |
| IV.p.12 | Иерархический пористый композиционный материал на основе наноструктурированного кремния и углеродных наноматериалов, легированных металлами<br><i>Спивак Ю.М., Гагарина А.Ю.</i> ..... 94 |
| IV.p.13 | Масштабирование технологии физического атомно-слоевого осаждения на промышленные подложки кремния<br><i>Ануфриев Ю.В., Плюснин Н.И.</i> ..... 95                                          |

## **V. Диагностика кремния и приборных структур на его основе.**

### **Новые приборы, включающие элементы микромеханики, оптоэлектроники, силовой электроники, светоизлучающие структуры и фотоприемники**

|        |                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V.o.01 | КМОП-интеграция и стабилизация рабочих характеристик энергонезависимой резистивной памяти<br><i>Ананьев А.Д., Рындин Е.А., Мазинг Д.С., Андреева Н.В.</i> ..... 97                                                                                     |
| V.o.02 | Светодиоды с дислокационной люминесценцией на основе ионно-имплантированного кремния<br><i>Зотов А.А., Терещенко А.Н., Королев Д.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Тетельбаум Д.И.</i> ..... 98                                                           |
| V.o.03 | Кремниевый чувствительный элемент газового детектора на основе явления автоэлектронной эмиссии<br><i>Карасева Е.П., Кондратьев В.М., Кондратьева А.С., Мишин М.В., Осипов А.А., Большаков А.Д.</i> 99                                                  |
| V.o.04 | Люминесцентные свойства GeSi наноструктур после облучения ионами Ge <sup>+</sup><br><i>Смагина Ж.В., Зиновьев В.А., Зиновьева А.Ф., Федина Л.И., Гутаковский А.К., Вдовин В.И., Яблонский А.Н., Захаров В.Е., Мудрый А.В., Живулько В.Д.</i> ..... 100 |
| V.p.01 | Высокочувствительный кристалл датчика давления ТДК с ООС на основе биполярного транзистора для диапазонов до 1, 5 и 60 КПа<br><i>Басов М.В.</i> ..... 101                                                                                              |
| V.p.02 | Двухканальный акустоэлектронный кремниевый датчик для детектирования вязкости жидкости и её температуры<br><i>Воронова Н.В.</i> ..... 102                                                                                                              |
| V.p.03 | Твердотельные нанопоры для детектирования одиночных наночастиц золота<br><i>Еганова Е.М., Комарова Н.В., Кузнецов А.Е.</i> ..... 103                                                                                                                   |
| V.p.04 | Влияние параметров послеростового отжига на характеристики микрорезонаторов германий-кремний<br><i>Коханенко А.П., Дирко В.В., Кукенов О., Лозовой К.А.</i> ..... 104                                                                                  |
| V.p.05 | Термоэлектрические характеристики плёнки Mg <sub>2</sub> Si и гетероструктуры Mg <sub>2</sub> Si/Si(111)<br><i>Поляков А.В., Фомин Д.В., Шолыгин И.О., Галкин Н.Г., Галкин К.Н., Горошко Д.Л.</i> ..... 105                                            |
| V.p.06 | Дислокационная электролюминесценция ионно-имплантированных кремниевых структур<br><i>Терещенко А.Н., Зотов А.А., Королев Д.С., Михайлов А.Н., Белов А.И., Тетельбаум Д.И.</i> ..... 106                                                                |

## **VI. Методы и аппаратура для исследования свойств кремния и структур на его основе, включая гетероструктуры с кремнийсодержащими соединениями**

|         |                                                                                                                                                                                                                            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VI.o.01 | Ограничения бесконтактных методов измерения времени жизни<br><i>Щемеров И.В., Кобелева С.П., Анфимов И.М., Колоколов Д.Г.</i> ..... 108                                                                                    |
| VI.o.02 | Развитие приборной и методологической базы для решения задач микроэлектроники методами сканирующей зондовой микроскопии<br><i>Новиков И.А., Козодаев Д.А., Сотник Г.П., Мошников В.А.</i> ..... 109                        |
| VI.o.03 | Новые электрофизические комплексы для характеризации дефектов структуры и электрических свойств полупроводников: DLTS-спектрометр и установка Ван дер Пау<br><i>Кудрявцев А.С., Базлов Н.В., Бондаренко А.С.</i> ..... 110 |

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VI.o.04 | Особенности высокочастотной проводимости кремния легированного водородоподобной примесью<br><i>Ормонт М.А., Ляшенко А.А.</i> ..... 111                                                                                                                                                  |
| VI.o.05 | Лазерно-индуцированное пространственно-временное управление синхротронным рентгеновским излучением с использованием динамики кристаллической решётки кремния<br><i>Обыденнов Н.Н., Мареев Е.И., Пиляк Ф.С., Куликов А.Г., Ефременко В.Ф., Писаревский Ю.В., Потёмкин Ф.В.</i> ..... 112 |
| VI.p.01 | Высокотемпературное поведение SiSiC-керамики в окислительной и защитной средах<br><i>Беляков А.Н., Марков М.А.</i> ..... 113                                                                                                                                                            |
| VI.p.02 | Фазовая стабильность тугоплавких соединений титана в расплаве кремния при реакционном спекании<br><i>Быкова А.Д., Марков М.А.</i> ..... 114                                                                                                                                             |
| VI.p.03 | Исследование гетероструктур на основе тонких пленок оксида и нитрида кремния электронно-зондовыми и ионно-зондовыми методами<br><i>Горячев А.В., Александров Н.В., Кириленко Е.П., Габдрахманов А.Э., Еганова Е.М., Гришин Т.С., Дудин А.А.</i> ..... 115                               |
| VI.p.04 | Перспективные методы синтеза и изучения плёнок на Si<br><i>Гуральник А.С., Субботин Е.Ю., Чернев И.М., Маслов А.М., Доценко С.А., Герасименко А.В., Козлов А.Г., Волкова Л.С., Дудин А.А., Поляков М.В.</i> ..... 116                                                                   |
| VI.p.05 | Современные подходы к созданию биосенсоров: ковалентное закрепление фермента на оксиде тантала<br><i>Смолин Е.С., Комарова Н.В., Кузнецов А.Е.</i> ..... 117                                                                                                                            |
| VI.p.06 | Формирование и исследование свойств черных металлов на оксинитриде кремния<br><i>Наумова О.В., Ярошевич А.С., Демьяненко М.А., Пономарев С.А.</i> ..... 118                                                                                                                             |
| VI.p.07 | Моделирование ориентационных взаимосвязей зёрен в поликристаллических материалах на основе графовых нейронных сетей<br><i>Чуешова А.Г., Пещерова С.М., Осипова Е.А., Непомнящих А.И.</i> ..... 119                                                                                      |
|         | <b>Авторский указатель</b> ..... 120                                                                                                                                                                                                                                                    |



## **Пленарные доклады**

## Криогенные плазменные технологии в кремниевой микроэлектронике: 3D интегральные схемы или как продлить жизнь закона Мура

**Руденко К.В., Мяконьких А.В., Лукичев В.Ф.**

ОФТИ им. К.А. Валиева, Центр перспективной микроэлектроники

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

e-mail: rudenko@ftian.ru

В современных интегральных схемах (ИС), построенных на MOSFET, длина каналов транзисторов подошла к физическому пределу  $\sim 10$  нм. Возникли ограничения на плотность планарных транзисторов на кристалле ИС. Чтобы поддержать прогресс микроэлектроники в соответствии с законом Мура, начиная с проектных норм  $< 22$  нм (Рис.1а), конструкция FinFET вывела каналы из плоскости пластины, а, начиная с 5 нм (GAAFET), индексы проектной нормы не означают минимального литографического размера, а лишь отражают нормировку площади, занимаемой на кристалле транзистором. Предполагается, что после 2030 года транзисторы микропроцессоров будут полностью вертикальными (3D). Уже сейчас в монокристаллических ИС памяти 3D NAND (Рис.1б) вертикальные транзисторы FG-FET, SONOS-структуры, с вертикальными линиями связи word lines, размещенные в 200-300 слоях p-Si обеспечивают максимальный уровень интеграции, без использования предельных возможностей литографии. Успешно реализуется гетерогенная 3D-интеграция микросхем при помощи кремниевых пластин-интерпозеров со структурами микроотверстий TSV.

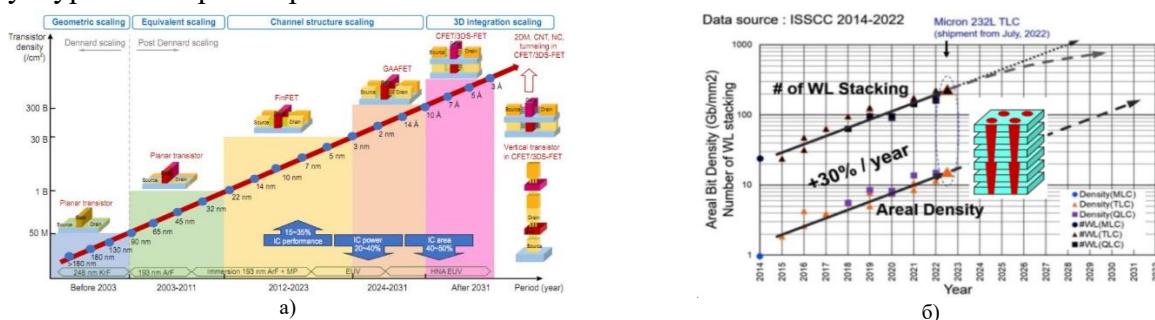


Рисунок 1 – Рост плотности элементов в современных кремниевых ИС: (а) эволюция от планарного к вертикальному транзистору в микросхемах MPU [1]; (б) рост числа слоев и плотность ячеек в чипах памяти 3D NAND [2]]

Ключевым моментом для 3D-схем является создание прецизионных глубоких высокоаспектных (HAR) микроструктур тренчей и отверстий в Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с аспектным отношением до 1:200 и апертурой  $< 100$  нм, требующее расширения технологического инструментария. Новые возможности предлагает криогенное анизотропное глубокое плазменное травление этих и других материалов [3]. Показано, что его уникальные характеристики, в концепции “clean processes”, обеспечивают формирование HAR-структур до 120 мкм глубиной, нанометровую шероховатость и управляемый угол наклона стенок [4], что, в конечном счете, повышает надежность сложных 3D ИС. Несмотря на осторожное отношение промышленности к криотехнологиям, компания Lam Research Corp. (технология Lam Cryo™ 3.0) к настоящему времени выпустила инновационное оборудование для плазменного криотравления 3D NAND чипов, что обозначило переход технологии от статуса опытной к производственной.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24-69-00039, <https://rscf.ru/project/24-69-00039/>.

### Литература

1. Q. Zhang *et al.* New structure transistors for advanced technology node CMOS ICs. // Natl. Sci. Rev. **11**, 2024, P. nwae008. doi:10.1093/nsr/nwae008.
  2. A. Goda. Review: Recent Progress on 3D NAND Flash Technologies. // Electronics, **10**, 2021, P. 3156. doi:10.3390/electronics10243156.; ISSCC at <https://www.isscc.org/past-conferences>
  3. K. Kim. Cryogenic Etching in Advanced Electronics Manufacturing: Applications and Challenges. // Appl. Sci. Conver. Technol. **33** (5), 2024, P. 108. doi:10.5757/ASCT.2024.33.5.108
- K. Rudenko *et al.* Physical Principles of *In Situ* Sidewall Profile Control in Cryogenic Plasma Etching of HAR Silicon Microstructures. // Russ. Microelectron. **54** (8), 2025, P. 1297.

## Энергоэффективные элементы ИС - сегнетоэлектрики в кремнии

**Попов В.П.<sup>1)</sup>, Тарков М.С.<sup>1)</sup>, Тихоненко Ф.В.<sup>1)</sup>, Мяконьких А.В.<sup>2)</sup>, Руденко К.В.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников СО РАН им.А.В. Ржанова, Новосибирск

<sup>2)</sup>НИИЦ «Курчатовский институт - ОФТИ им. К.А. Валиева, Москва

e-mail: popov@isp.nsc.ru

Изменения вольт-амперных характеристик (ВАХ) сегнетоэлектрических мемристоров, диодов и транзисторов (рисунок 1) после печных (FA) и быстрых (RTA) термообработок важно для их применения в кросс-бар нейроморфных матрицах, СВЧ, опто- и радиоэлектроники с расширенным функционалом. Критическими величинами скрытого диэлектрика (BOX) в структурах являются остаточная поляризация  $P_r$  и коэрцитивное поле  $E_c$ , величины которых определяются долей метастабильной орторомбической фазы  $R3m$  и напряжениями из-за примеси Al в  $\text{HfO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  10:1 (NAO) и  $\text{HfO}_2:\text{ZrO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  5:5:1 (HZA). Целью исследований было определение электрофизических свойств КНИ структур с туннельно тонким скрытым оксидом (BOX) для многофункциональной электроники для выявления пределов существования сегнетоэлектрика в FTJ диодах и FeFET КНИ транзисторах после технологических FA и RTA обработок в диапазоне 600-1100°C (рисунок 1), что важно для совместимости с КМОП-технологией, в том числе в режимах последовательного термоокисления и травления диоксида кремния для достижения нанометровых толщин Si-слоя КНИ. Текстуры слоев и содержание фаз измерены просвечивающей электронной микроскопией высокого разрешения на поперечных сечениях (x-HRTEM), комбинационным рассеянием света (КРС) в геометрии "лицом к лицу" и малоугловой рентгеновской дифракцией (GIXRD), показывающей основную ориентацию скрытых слоев NAO и HZA сегнетоэлектрической фазы  $R3m$  [1].

Поскольку КНИ-структуры и КНИ КМОП-интегральные схемы (ИС), сформированные путем сращивания, требуют температур термообработки не менее 900 °C, мы тестировали те же 20-нм изоляторы затворов high-k  $\text{HfO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  (10:1) с толщиной  $T_{\text{BOX}} = 20$  нм ( $E_{\text{OT}} = 2,0$  нм) в промышленном процессе в качестве изоляторов затвора для КМОП-двухзатворных КНИ-транзисторов, сохраняя низкое напряжение питания. После RTA при 950°C псевдо- FeFET со слоем NAO BOX показывают окно гистерезиса 1.2 В. Установлено, что оптимальным составом для FeFET КНИ транзисторов с наибольшими подвижностью  $\mu_{e,h}$  (1300 и 300  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) и остаточной поляризацией  $P_r \sim 10\text{-}12$  мкКл/см<sup>2</sup> являются слои HZA при RTA вплоть до 900°C, тогда как NAO  $P_r < 5$  мкКл/см<sup>2</sup> после RTA при 950°C [1, 2]. Предложено решение проблемы MTJ кросс-бар матриц, связанной с относительно небольшой (<10) разностью токов для двух поляризаций, переходом от МДМ узлам к резонансным диодам (RFTJ).

Работа выполнена при поддержке МОН РФ в рамках проекта ГЗ № FWGW-2025-0010.

### Литература

1. В.П. Попов, В.А. Антонов, В.Е. Жилицкий, А.А. Ломов, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко. Термостабильный сегнетоэлектрик  $\text{HfO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  (10:1) в SOI и SOS гетероструктурах после RTA обработок и утончения кремния окислением // Письма в ЖЭТФ, 121(12), 2025, стр. 945-951.
2. V.Popov, M.Tarkov Mikhail; V.Antonov, F.Tikhonenko, A.Miakonkikh, K. Rudenko. Energy-Efficient VLSI Ferroelectric Elements for Neuromorphic Artificial Intelligence Systems // IEEE Xplore: 2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). -2025.

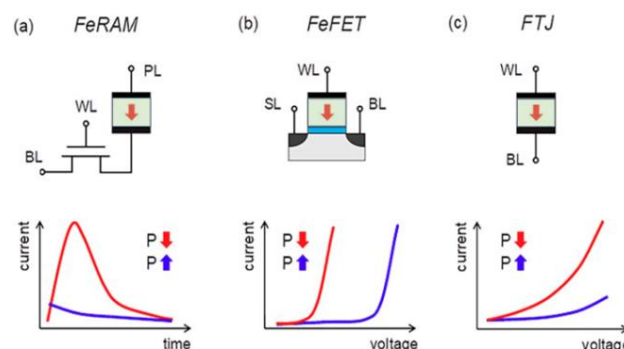


Рисунок 1 – Кросс-бар ячейки НС с элементами НС ReRAM (a), FeFET (b), and FTJ (c) и соответствующими им ВАХ [1]

## Эпитаксиальные Si/SiGe и Ge/GeSi структуры для квантовых вычислений

***Новиков А.В.<sup>1)</sup>, Шалеев М.В.<sup>1)</sup>, Юрасов Д.В.<sup>1)</sup>, Демидов Е.В.<sup>1)</sup>, Дроздов М.Н.<sup>1)</sup>, Ревин Л.С.<sup>1)</sup>,  
Панкратов А.Л.<sup>1)</sup>, Антонов А.В.<sup>1)</sup>, Красильникова Л.В.<sup>1)</sup>, Шмырин Д.А.<sup>1)</sup>, Ситников С.В.<sup>2)</sup>,  
Щеглов Д.В.<sup>2)</sup>, Красильник З.Ф.<sup>1)</sup>***

<sup>1)</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

<sup>2)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск  
e-mail: anov@ipmras.ru

Среди различных материальных систем, рассматриваемых для создания квантового компьютера, безусловным преимуществом кубитов на основе Si и его гетероструктур с Ge является возможность их формирования в промышленных масштабах и развитые технологии изотопной очистки этих материалов от изотопов с ненулевым ядерным спином. На SiGe структурах за счет выбора их дизайна возможно создание различных кубитов, основанных на манипуляции как ядерным спином примесного атома, так и спином электрона или дырки [1]. При этом к настоящему времени выбор в пользу наиболее перспективного типа кубита не сделан. В настоящей работе приведены результаты по формированию эпитаксиальных SiGe гетероструктур, которые могут быть использованы для создания различных типов кубитов.

Из-за реализации в Si/Ge гетеропаре потенциальной ямы для дырок в слоях с более высоким содержанием Ge, для кубитов, основанных на манипуляции спином дырок, необходим рост SiGe гетероструктур с Ge квантовыми проволоками и Ge квантовой ямой (КЯ) [2]. Главное преимущество данного типа кубита – это управление кубитом только за счет электрических сигналов из-за сильного спин-орбитального взаимодействия для дырок и возможность использования структур природного обогащения [2]. Для данного типа кубитов методом МПЭ за счет тщательного подбора условий осаждения Ge и постростового отжига были получены структуры с Ge самоформирующимися нанопроволоками длиной более 500 нм [3]. Данной длины достаточно для создания на них кубитов [2]. Для получения структур с напряженной Ge КЯ была отработана технология формирования на Ge(001) и Si(001) подложках релаксированных SiGe буферов с высокой ( $\geq 80\%$ ) долей Ge. Были исследованы транспортные свойства двумерного дырочного газа в выращенных структурах с Ge КЯ.

Преимуществом кубитов, основанных на манипуляции спином электронов, являются большие времена спиновой когеренции вследствие слабого спин-орбитального взаимодействия для электронов в SiGe структурах [1]. Однако, для достижения этих времен необходимо очищение структур от изотопов  $^{29}\text{Si}$  и  $^{73}\text{Ge}$  с ненулевым ядерным спином из-за сильного сверхтонкого взаимодействия для электронов. В работе на релаксированных SiGe/Si(001) буферах методом МПЭ получены изотопнообогащенные структуры Si/SiGe с рекордно низким суммарным содержанием изотопов  $^{29}\text{Si}$  и  $^{73}\text{Ge}$  на уровне 10 атомов на миллион [4]. Подвижность электронов в полученных  $^{28}\text{Si}$  КЯ превышает  $105 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с})$  при 2К, что указывает на их высокое кристаллическое качество. На данных структурах созданы кубиты, состоящие из системы управляющих электродов и микромагнита, на которых продемонстрировано формирование до двух квантовых точек и одноэлектронный транспорт через них.

Работы по изотопнообогащенным Si/SiGe гетероструктурам выполнены при поддержке Росатома в рамках Дорожной карты «Квантовые вычисления» (Договор № 868/1817-Д от 20 октября 2025 г. и Договор № 868/1818-Д от 17.10.2025 г.)

### Литература

1. P. Stano, D. Loss. Review of performance metrics of spin qubits in gated semiconducting nanostructures // <https://arxiv.org/abs/2107.06485>.
2. G. Scappucci et al., The Ge information route // Nat. Rev. Mat 6, (2021) P. 926.
3. Д.В. Юрасов, М.В. Шалеев, А.В. Новиков, Методика получения Ge/Si(001) самоформирующихся нанопроволок для формирования на их основе дырочных спиновых кубитов // Письма ЖТФ 51(22), (2025) С. 17-20.
4. Д.В. Юрасов и др., Изотопнообогащенные Si/SiGe эпитаксиальные структуры для квантовых вычислений // Письма ЖТФ 50(10), (2024) С. 22-25.

## Закономерности сопряженного конвективного и радиационно-конвективного теплообмена в методах направленной кристаллизации расплавов

**Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гришков В.А., Кислицын С.А.,  
Митин К.А., Михайлов А.В.**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*  
e-mail: mitin86@mail.ru

подавляющее большинство многофункциональных монокристаллов получают из расплавов наиболее производительными методами направленной кристаллизации, к которым относятся методы Чохральского, Бриджмена-Стокбаргера, бестигельной зонной плавки (БЗП) и горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК). Во всех этих методах на качество кристаллов влияет конвективный тепло- и массообмен в расплаве, особенно вблизи фронта кристаллизации (ФК) на стадии перехода расплав-кристалл [1-3]. Существенно влияет и теплоотдача от кристалла в окружающую среду в ростовой камере, от особенностей которой зависят поля температуры и градиентов температуры в кристаллах в процессе роста [4]. От режимов сопряженного теплообмена зависит однородность кристаллографических характеристик кристаллов. Непосредственно на ростовых установках изучать особенности конвективных процессов в расплавах, включая ламинарно-турбулентные переходы в расплаве у ФК и в пограничных слоях на образующих кристаллов при радиационно-конвективной теплоотдаче от кристаллов в окружающую среду в ростовой камере практически невозможно. Поэтому целесообразно исследования основных закономерностей конвективных процессов проводить комплексно, сочетая возможности физического и численного моделирования [1-4]. Проведены исследования гидродинамики и теплообмена экспериментально и численно в условиях, характерных для основных методов направленной кристаллизации. Изучено влияние конвективного теплообмена на формы ФК и радиационно-конвективного теплообмена на поля температуры в кристаллах. Исследования выполнены в широком диапазоне значений чисел Прандтля:  $0,05 \leq Pr \leq 2700$ , в режимах тепловой гравитационно-капиллярной и смешанной конвекции. При различных относительных высотах слоев расплавов в неподвижных и вращающихся тиглях. При различных отношениях радиусов тиглей и кристаллов исследовано влияние перепадов температуры между стенками тиглей и ФК и скоростей вращения кристаллов на формы ФК. Теплоотдача от кристаллов изучена при различных длинах и при различных режимах теплообмена кристаллов с окружающей средой. Во всех случаях определены границы переходов от ламинарных к турбулентным режимам течения. В нестационарных режимах изучено влияние амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры на мгновенные формы ФК и на градиенты температуры в кристаллах. Исследовано влияние инверсной зависимости плотности расплава от температуры на особенности гидродинамики, теплообмен и формы ФК.

*Работа выполнена в рамках Гос. задания ИТ СО РАН 0257-2021-0003, номер гос. регистрации 121031800213-0*

### Литература

1. В.С. Бердников, В.В. Винокуров Влияние падения уровня расплава в неподвижном тигле в методе Чохральского на конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика, 2024, том 31, № 4. – С. 647 – 662.
2. В.С. Бердников, С.А. Кислицын, К.А. Митин Численное моделирование процессов роста кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации из расплавов с различными числами Прандтля // Известия Российской академии наук. Серия Физическая, 10, 2017 стр. 1389–1394.
3. К.А.Митин, В.С.Бердников, С.А. Кислицын Зависимость формы фронта кристаллизации от режима теплообмена в методе Бриджмена-Стокбаргера // Вычислительная механика сплошных сред 1, 2019 стр. 106-116.
4. К.А. Митин, В.С. Бердников Влияние режимов теплоотдачи на поле температуры в кристаллах в методе Чохральского // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 7, 2022 стр. 989-996.



## Спин-орбитроника - платформа для разработки электронной компонентной базы на новых физических принципах

**Самардак А.С.**

*Лаборатория спин-орбитроники, Институт наукоемких технологий и передовых материалов,  
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*  
e-mail: samardak.as@dvfu.ru

Динамическое развитие информационных технологий вызывает спрос на энергоэффективные электронные компоненты и элементы памяти, что подвигает ученых к поиску альтернативных *КМОП-технологии* решений. В этом контексте спин-орбитронные материалы и устройства на их основе выделяются в качестве конкурентоспособных кандидатов, особенно для применений в энергонезависимой памяти и сверхбыстрой логике. При таком подходе используют уникальные транспортные свойства, возникающие в результате спин-орбитальной связи в магнитных наногетероструктурах, лишенных инверсионной симметрии. В этих системах, обычно состоящих из многослойных ферромагнетиков переходных металлов (Co, Ni, Fe и их сплавов) и тяжелых металлов (Pt, Pd, W, Ta, Ru и сплавов типа Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, WTe<sub>2</sub> и др.), межинтерфейсная спин-орбитальная связь способствует возникновению множества интересных физических явлений: генерации спин-орбитальных крутящих моментов (англ. spin-orbit torques, SOT), взаимному превращению спинового и зарядового токов и стабилизации топологических магнитных скирмионов [1]. Открытие этих эффектов вызвало новую волну интереса к магнитным материалам, что в итоге привело к научно-техническим прорывам, включая сверхбыстрое переключение магнитного состояния, генерацию терагерцевого излучения [2] и управляемое током движение скирмионов и доменных стенок.

Одним из наиболее перспективных направлений развития микроэлектроники является магниторезистивная память с произвольным доступом (SOT-MRAM), обладающая энергонезависимостью, высокой скоростью и надежностью. В основе SOT-устройства лежит гетероструктура «тяжелый металл/свободный ферромагнитный слой/туннельный барьер/фиксированный слой». Ток в тяжелом металле (например, Pt, Ta, W) генерирует спиновый ток, который воздействует на намагниченность соседнего ферромагнитного слоя, вызывая его переключение [3]. Несмотря на преимущества, широкому внедрению SOT-устройств препятствуют фундаментальные и технологические проблемы: низкая эффективность генерации SOT, необходимость внешнего магнитного поля для переключения и дефектность интерфейсов в традиционных тонкопленочных системах. Решением является переход к новым материалам. В последние годы двумерные (2D) ван-дер-ваальсовы материалы, такие как магнитные Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>, CrI<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>, открыли уникальные возможности для создания ультратонких гетероструктур с атомарно гладкими интерфейсами и управляемыми свойствами [4]. В докладе будут представлены перспективные разработки Лаборатории спин-орбитроники ДВФУ и предложена стратегия дальнейшего развития отечественной микроэлектроники на новых физических принципах. Работа выполнена в рамках госзадания № FZNS-2026-0013.

### Литература

1. Samardak A. S., Kolesnikov A. G., Davydenko A. V., Steblii M. E., Ognev A. V. Topologically Nontrivial Spin Textures in Thin Magnetic Films // *Physics of Metals and Metallography*. 2022. Vol. 123. No. 3. pp. 238-260.
2. Shelukhin L. A., Kuzikova A. V., Telegin A. V., Bessonov V. D., Ognev A. V., Samardak A. S., Park J., Kim Y. K., Kalashnikova A. Enhanced laser-induced single-cycle terahertz generation in a spintronic emitter with a gradient interface // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2025. Vol. 26. No. 1. 2448417.
3. He W., Wan C., Zheng C., Wang Y., Wang X., Ma T. Y., Wang Y., Guo C., Luo X., Stebliy M. E., Yu G., Yaowen L., Ognev A. V., Samardak A. S., Han X. F. Field-Free Spin-Orbit Torque Switching Enabled by the Interlayer Dzyaloshinskii-Moriya Interaction // *Nano Letters*. 2022. Vol. 22. No. 17. pp. 6857-6865.
4. X. Wang et al. Current-driven magnetization switching in a van der Waals ferromagnet Fe<sub>3</sub>GeTe<sub>2</sub>. *Sci. Adv.* 2019. Vol. 5. eaaw8904.

## Получение высокочистых материалов для полупроводниковых применений

Аношин О.С., Гришинова Н.Д., Полежаев Д.М., Радьков Ю.Ф., Зайцев А.В., Котков А.П.

АО «НПП «Салют», Нижний Новгород

e-mail: anoshinos@nppsalut.ru

Актуальность работы обусловлена прямой зависимостью параметров современных полупроводниковых приборов (гетероструктур для СВЧ-электроники, оптоэлектроники и силовой электроники) от содержания остаточных примесей в исходных прекурсорах. Снижение уровня фонового легирования и компенсации в эпитаксиальных слоях, выращиваемых методами МОС-гидридной эпитаксии (CVD, MBE), требует применения материалов с беспрецедентно высокой чистотой (6N и выше). Кроме того, в условиях импортозамещения критически важным является создание полностью отечественной сырьевой базы для электронной промышленности.

На базе АО «НПП «Салют» создан и более 25 лет под руководством Анатолия Павловича Коткова развивается полный цикл производства ключевых компонентов газовой и твердотельной элементной базы. В рамках единого научно-производственного центра сформирована комплексная технологическая платформа, охватывающая синтез, глубокую очистку и контроль свойств основных классов полупроводниковых материалов. Это позволило перейти к импортонезависимому производству прекурсоров квалификации «шесть девяток» (6N) и выше.

Синтезированы и аттестованы высокочистые гидридные газы квалификации 6N (арсин, фосфин, аммиак), полученные методом низкотемпературной ректификации. На их основе получены прецизионные газовые смеси (моносилан, фосфин, арсин в  $H_2/He$ ) с заданным уровнем легирующих компонентов, непосредственно пригодные для проведения процессов эпитаксии.

Методом глубокой очистки получены высокочистые галогениды: тетрахлорид кремния, трихлориды мышьяка и бора, а также трифторид бора. Достигнутое содержание остаточных примесей (на уровне  $10^{-6}$  мас.%) позволяет использовать данные соединения в качестве исходных реагентов для CVD-процессов, включая синтез заготовок для производства кварцевого оптоволокна с низкими оптическими потерями.

Получены кристаллические материалы: монокристаллические слитки кремния методом бестигельной зонной плавки (FZ-Si), а также мышьяк высокой чистоты, полученный термическим разложением высокочистого арсина (6N). Полученный мышьяк пригоден для использования в качестве источника легирующей примеси или компонента полупроводниковых соединений  $A_3B_5$ .

Разработана номенклатура высокочистых металлоорганических соединений (МОС) для МОС-гидридной эпитаксии: триметилгаллий (TMGa), триметилалюминий (TMAI), диэтилцинк (DEZn), а также триэтильные аналоги галлия и алюминия. Установлено, что содержание лимитируемых примесей в полученных МОС не превышает  $10^{-4}$  мас.%, что соответствует требованиям для роста активных областей приборных гетероструктур.

В результате проведенных работ создана и внедрена линейка высокочистых веществ (гидриды, галогениды, МОС, кристаллические материалы), непосредственно пригодных для использования в технологических циклах производства полупроводниковых приборов. Разработанные материалы обеспечивают возможность получения эпитаксиальных структур с низким уровнем остаточного фонового легирования (менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), что является необходимым условием для создания приборов с высокой подвижностью носителей заряда и реализации импортозамещения в секторе производства материалов для полупроводниковой электроники.

## Состояние стандартизации в области измерения основных параметров полупроводниковых материалов

**Кобелева С.П.<sup>1,2)</sup>, Щемеров И.В.<sup>1,2)</sup>, Анфимов И.М.<sup>2)</sup>, Колоколов Д.Г.<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва,

<sup>2)</sup>ООО «Разработка и изготовление измерительных систем», г. Москва.

<sup>3)</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов», г. Лыткарино  
e-mail: kob@misis.ru

В докладе анализируется система международных стандартов организации SEMI (Semiconductor Equipment and Manufacturing International), включающих измерения удельного и поверхностного электросопротивления ( $\rho$  и  $R_{\text{кв}}$ ), рекомбинационного времени жизни свободных носителей заряда ( $\tau$ ) и параметров, измеряемых по эффекту Холла.

Достигнут определенный прогресс в отношении измерения  $\rho$  и  $R_{\text{кв}}$  по сравнению с ситуацией, анализированной в [1], но по существу аналогов предлагаемых расчетов, минимизирующих систематическую погрешность измерения этих параметров, в РФ на настоящий момент нет, как не выработан общий подход к метрологическим характеристикам приборов, измеряющих эти параметры.

Еще более сложная ситуация наблюдается в отношении оценок  $\tau$  по спаду фотопроводимости (ФП). Особенно когда это касается измерения  $\tau$  на непассивированных поверхностях монокристаллического кремния (МК), в частности на слитках МК. Это связано с определяющим влиянием поверхностной рекомбинации и неоднородной генерации на кривую спада ФП [2]. Предложенные в двух стандартах SEMI варианты расчетов постоянных спада ФП [3,4] заметно отличаются и не всегда условия расчетов достижимы. Поэтому возникает потребность в разработке отечественного стандарта с указанием методики оценки постоянной спада ФП как на пассивированных, так и непассивированных образцах.

В работе на основе расчета численными методами анализируются проблемы, возникающие при использовании рекомендаций [4] для расчетов постоянной спада ФП и связи этого параметра с  $\tau$  в объеме образца. Именно этот параметр представляет интерес для оценки качества МК.

Предложения по развитию системы стандартизации в метрологии полупроводниковых материалов обсуждаются.

### Литература

1. С.П. Кобелева, Л.П. Холодный. Метрологическое обеспечение измерения удельного электросопротивления полупроводниковых материалов и проводящих нанокмполитов / 5-я школа «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и наноиндустрии» / Черноголовка, 2012, Тез. Докладов, с. 35.
2. И.М. Анфимов, С.П. Кобелева и др. К вопросу об определении объемного времени жизни по спаду фотопроводимости на непассивированных образцах монокристаллического кремния. Известия ВУЗов. МЭТ. Том 19 №3, 2016, с. 210-216.
3. Test method for carrier recombination lifetime in silicon wafers by non-contact measurement of photoconductivity decay by microwave reflectance. SEMI MF1535.
4. Test Method for Contactless Excess-Charge-Carrier Recombination Lifetime Measurement in Silicon Wafers, Ingots, and Bricks Using an Eddy- Current Sensor, SEMI PV13-0211, 2011.

## Особо-чистые кварцевые концентраты, как необходимая основа получения кремния для солнечной энергетики и микроэлектроники

**Непомнящих А.И., Елисеев И.А., Жабоедов А.П., Федоров А.М.**

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск*

e-mail: ainep@igc.irk.ru

Особо-чистый природный кварц имеет широкий спектр промышленных и технологических применений. Кварциты высокой чистоты необходимы для прямого производства (без применения технологии химического хлорирования) кремния для солнечной энергетики [1-3]. Природный кварц является исходным материалом для получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой степени чистоты. На основе кварцевых концентратов производится оптическое кварцевое стекло для видимой и ближней инфракрасной областей спектра и микроэлектронике, а также термостойкая кварцевая керамика самого широкого применения. Максимальные объемы кварцевых концентратов используются для изготовления тиглей из кварцевых стекол для выращивания монокристаллического кремния и из кварцевой керамики для получения мульткристаллического кремния.

Для кварцевых концентратов, используемых при производстве тиглей для выращивания монокристаллического кремния, предъявляются очень высокие требования как по химической чистоте, так и по термостойкости кварцевого стекла

В Институте геохимии СО РАН проводятся комплексные работы по поиску, оценке особо-чистого природного кварцевого сырья и разработке на его основе высокочистых кварцевых концентратов для различного применения. В Восточном Саяне выявлены нетрадиционные источники особо-чистого кварцевого сырья в виде высокочистых кварцитов, разработаны процессы их обогащения и получены кварцевые концентраты глубокого и сверхглубокого обогащения [4-6].

В докладе будут рассмотрены основные подходы, реализуемые нами, для получения особо-чистых кварцевых концентратов, удовлетворяющих требованиям кремниевой промышленности.

### Литература

1. Nepomnyashikh A. I., Fedosenko V.A., Eremin V.P. and Krasin B.A. Low cost multicrys-talline silicon for solar cells. Silicon for chemical industry VI, Loen-Norway, 2002, pp. 191-196
2. А.И. Непомнящих, В.П. Еремин, Б.А. Красин, И.Е. Васильева, И.А. Елисеев, А.В. Золотайко, С.И. Попов, В.В. Синицкий. Мульткристаллический кремний для солнечной энергетики. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 4, 02, 2002, с. 16-24.
3. Sergio Pizzini. Towards solar grade silicon: Challenges and benefits for low cost photovoltaics // Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010, v. 94 № 9, pp. 1528-1533. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.01.016
4. Е.И. Воробьев, А.М. Спиридонов, А.И. Непомнящих, М.И. Кузьмин. Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // ДАН. 2003, т. 390, № 2, с. 219-223.
5. А.И. Непомнящих, А.М. Федоров, А.П. Жабоедов, М.Г. Волкова. Высокочистые кварциты Восточного Саяна // Геология и геофизика. 2023. 8, стр. 1205-1215
6. Непомнящих А. И., Жабоедов А. П., Зимин М. Д., Гармышева Т. Ю., Канева Е. В., Федоров А. М., Шалаев А. А., Субанакоев А. К. Кристаллизация кварцевого стекла // Физика и химия стекла, 2025, том 51, № 5, с. 534–543

## Следы за дислокациями в кремнии, 50 лет исследований

**Якимов Е.Б.**

*Институт проблем технологии и особочистых материалов РАН, Черноголовка*  
e-mail: yakimov@iptm.ru

Влияние квазидвумерных протяженных дефектов (следов за дислокациями), формирующихся за скользящими дислокациями, на электрические свойства кремния, было обнаружено в 1977 г. [1]. Тогда же было начато исследование свойств этих дефектов, хотя некоторые указания на присутствие этих дефектов можно найти и в более ранних работах. Последующие исследования показали, что следы за дислокациями обладают заметной рекомбинационной активностью и могут быть выявлены методом наведенного тока. Выявлен спектр глубоких уровней, связанный с ДС. Было показано, что со следами за дислокациями (ДС) связан потенциальный барьер, который повышает сопротивление в направлении, перпендикулярном ДС. С этим барьером связан и аномальный светлый контраст в режиме наведенного тока, длина которого достигает нескольких мм и существенно превышает диффузионную длину неравновесных носителей заряда. Обнаружено, что ДС существенно влияют на подвижность дислокации, что проявляется в повышении подвижности дислокаций при инверсии направления их скольжения. Получены данные, которые могут свидетельствовать о влиянии ДС на дислокационную люминесценцию. Показано, что взаимодействие с примесями металлов, с такими, например, как золото и никель, существенно повышает рекомбинационную активность ДС.

Однако, несмотря на длительную историю исследования ДС, их природа до сих пор не выяснена. Достаточно давно было высказано предположение, что ДС формируются из собственных точечных дефектов (вакансий или междоузлий), которые генерируются вследствие неконсервативного движения ступенек на линии дислокации [2]. Однако ни причина образования многочисленных ступенек на дислокациях, ни механизм агломерации собственных точечных дефектов в стабильные структуры не обсуждались. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии не выявили заметных дефектов в плоскости скольжения. Эксперименты с диффузией золота, которые во многих случаях позволяют различить дефекты междоузельного и вакансионного типов, хотя и выявили влияние ДС на профили распределения атомов золота в положении замещения, не позволили сделать однозначный вывод о природе ДС. Было обнаружено, что ДС следы образуются не за всеми дислокациями, в частности, наблюдалось различие свойств ДС за дислокациями, скользящими на сжатой и растянутой сторонах. В области действия растягивающих напряжений ДС с наиболее сильным рекомбинационным контрастом всегда обнаруживаются за 60-градусным плечом полупетли, в то время как ДС невидимы в режиме наведенного тока (если вообще существуют) за другим плечом и нижним сегментом полупетли. Анализ полученных результатов позволил предположить, что электрически активные ДС формируются при скольжении расщепленной дислокации с лидирующей  $90^\circ$  частичной дислокацией. В настоящей работе представлен обзор результатов полученных при исследовании ДС в Si и приведены примеры, демонстрирующие возможность формирования таких дефектов и в других полупроводниковых материалах.

### Литература

1. В.Г. Еременко, В.И. Никитенко, Е.Б. Якимов. Аномальная анизотропия подвижности в пластически деформированном кремнии с малой плотностью дислокаций // Письма в ЖЭТФ, 26(2), 1977, стр. 72-75.
2. W.C. Dash, Evidence of dislocation jogs in deformed silicon // J. Appl. Phys. 29, 1958, pp. 705-709.



## Гетерогенная элементная база — основа построения нейроморфных процессоров с новыми архитектурами

**Тельминов О.А.**

*Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»,  
г. Москва*

e-mail: otelminov@niime.ru

Повышение быстродействия программно-аппаратных комплексов может быть осуществлено путем перехода на параллельные алгоритмы и параллельно организованные вычислители, например, на нейросети. В зависимости от реализуемой модели нейрона различают нейросетевые процессоры — для формальных нейронов и нейроморфные процессоры — для спайковых нейронов. Размер подавляющего большинства практически значимых нейросетей всегда превышает объем ресурсов процессора, в связи с чем вычисления выполняются для фрагментов нейросети. Оптимизация вычисления фрагментов или их групп может выполняться как по базовым критериям — «быстродействие», «точность», «площадь поверхности на кристалле», так и по косвенным — тепловыделению, энергоэффективности и др.

Применение нейросетей состоит из нескольких этапов: настройки параметров нейросети на обучающей выборке, проверки корректности работы на валидационной выборке и получении результата на основе реальных данных (инференса). Особое внимание уделяется архитектурам процессоров обработки нейросетей, способным выполнять функции обучения и инференса. В связи с вероятностной природой нейросетей наиболее чувствительные и ответственные решения вырабатываются классическими алгоритмами, соответствующие процессоры для которых сопрягаются с процессорами обработки нейросетей.

В работе проведен сравнительный анализ основных характеристик элементной базы для реализации процессоров обработки нейросетей: на основе традиционной кремниевой КМОП-технологии [1] — конденсаторов, динамической памяти и пр., а также элементной базы на новых физических принципах — мемристоров и MRAM, вспомогательная обработка сигналов для которых выполняется на аналоговых кремниевых элементах. Затронуты вопросы разбиения элементов процессора на чиплеты и их последующей интеграции с учетом потоков данных и гетерогенности элементной базы. Рассмотрены подходы для: (1) сокращения разрыва в быстродействии между вычислительными элементами и памятью с помощью вычислений «около» и «в» памяти; (2) организации функций обучения и инференса; (3) статического (после вычисления параметров нейросети) и динамического (непосредственно перед инференсом с конкретными данными) выбора блока вычислений на традиционной или новой элементной базе; (4) организации конвейерной обработки с учетом минимизации «пузырьков» и остановов.

При разработке систем управления робототехническими комплексами встает вопрос сокращения сроков выхода на рынок новых продуктов за счет способности быстрого обучения, одновременно отвечающих вопросам кибербезопасности. Рассмотренные аспекты применены к ранее предложенному подходу [2] построения таких систем в многоагентной реализации с развитой иерархией по критерию быстродействия, с цифровыми моделями и цифровым двойником реальных объектов сцены действия.

В дальнейшем предполагается моделирование отдельных блоков процессоров в САПР с целью их оптимизации и последующего сопряжения.

### Литература

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологий и микроэлектроника. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020.
2. Тельминов О.А. Подход к проектированию нейросетевой системы управления колесной платформой с клонированием поведения и оптимизацией аппаратной части / Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов : Материалы VII международной конференции, Москва, 20–22 октября 2025 года. – М.: ООО "МАКС Пресс", 2025. – С. 101-103.

**I. Материаловедение кристаллического кремния:  
получение и очистка металлургического кремния,  
процессы роста из расплавов, химического  
осаждения из газовой фазы, аппаратура для  
роста. Получение кремния солнечного качества и  
проблемы солнечной энергетики**

## Интеграция технологии восстановления монооксида кремния и физического атомно-слоевого осаждения для получения кремниевых планарных структур

**Нехамин С.М.<sup>1,2)</sup>, Плюснин Н.И.<sup>3)</sup>, Киселев Ю.В.<sup>2)</sup>, Бильгенов А.<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup> ООО «НПФ КОМТЕРМ», Москва

<sup>2)</sup> ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва

<sup>3)</sup> ФГБУН ИНМЭ РАН, Москва

<sup>4)</sup> ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Челябинск

e-mail: s5m1n@mail.ru

Наногетероструктуры с двумерными (2D) слоями и нанослоями кремния находят широкое применение в кремниевой микроэлектронике и солнечной энергетике. Для получения этих слоёв используются стандартные энерго- и ресурсоёмкие технологии. Вместе с тем, для снижения затрат на производство требуется пересмотр этих технологий. Такие возможности предоставляют две технологии: синтез монооксида кремния из кремнезёма [1] и физическое атомно-слоевое осаждение – ФАСО [2].

Первая технология, реализующаяся в печи микроплазменного кипящего слоя, позволяет получить рафинированный SiO непосредственно из кремнезёма. Преимуществом данной технологии является высокая степень активации исходных компонентов под действием микроплазменных разрядов. Это позволяет использовать чистые от примесей исходные материалы в качестве сырья, которые в традиционной технологии не применяются из-за их низкой реакционной способности. При этом исключается ряд технологических операций, выполнение которых в традиционных руднотермических печах приводит к внесению в кремний большого количества нежелательных примесей.

Вторая технология - ФАСО, которая позволяет получать атомно-тонкие слои кремния на инородной подложке, реализуется с использованием планарных плёночных или тонкостенных источников, соразмерных подложке и близко расположенных к ней.

Доклад посвящен совмещению или интеграции двух вышеупомянутых технологий. Приводятся схемы: 1) реактора для получения газообразного SiO, 2) вакуумного объёма, для осаждения SiO на промежуточную подложку с разложением SiO и 3) СВВ камеры для получения атомно-тонких слоёв кремния с помощью ФАСО.

Пример вакуумного объёма для получения Si из SiO показан на рис. 1. В этом процессе, в результате диспропорционирования рафинированного SiO, полученный Si конденсируется на промежуточной подложке, которая, вместе с напылённой на неё плёнкой кремния, в дальнейшем, используется, как планарный источник кремния в установке ФАСО для получения наногетероструктур микроэлектроники и солнечной энергетике.

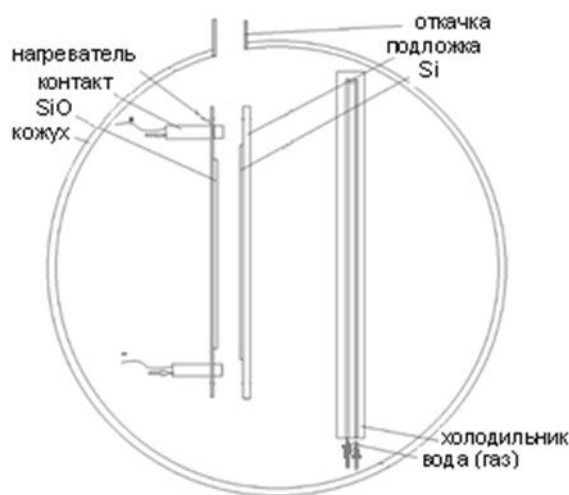


Рисунок 1 – Схема вакуумной камеры для дистилляции Si из SiO.

### Литература

1. С.М. Нехамин. Способ электротермической переработки дисперсного материала в псевдоожигенном слое и устройство для его осуществления. Патент RU 2663425, БИ № 22, 2018.
2. Н.И. Плюснин. Физическое атомно-слоевое осаждение (PALD), как новая технология получения наноматериалов и наногетероструктур // Нано- и микросистемная техника, 1, 2026 (февраль). <https://doi.org/10.17587/nmst.28.19-30>.

## Технология получения кремния, пригодного для изготовления солнечных элементов, на основе прямого карботермического восстановления

Елисеев И.А.

*Институт геохимии СО РАН, Иркутск*

e-mail: elia@igc.irk.ru

Доклад, представляет собой обобщение результатов, полученных в Институте геохимии СО РАН, в процессе разработки технологии получения рафинированного кремния высокой чистоты.

В начале 2000 годов, в связи с имеющимся тогда дефицитом кремния, необходимого для изготовления солнечных элементов, возник интерес к получению высокочистого кремния на основе прямого рудотермического восстановления. Институт геохимии принял активное участие в разработке данной технологии.

В основу работы легли результаты компьютерного моделирования процессов взаимодействия элементов, в расплаве кремния, показавшие пути решения задач очистки металлургического кремния от примесей бора, фосфора, мышьяка, кальция, натрия, калия и алюминия. Для расчета химического состава системы использовалась минимизация энергии Гиббса в ПК "Селектор". В результате расчетов, были предложены условия, при которых возможен переход примесей в газовую фазу и/или шлак.

Для удаления «тяжелых» металлов, имеющих равновесный коэффициент распределения существенно ниже 1, было предложено использование направленной кристаллизации, которая одновременно с удалением примесей формировала необходимую для ФЭП кристаллическую структуру.

Для проверки расчетов была создана лабораторная линия включающая в себя 100 кВА печь для восстановления кварца, колпаковую печь для исследования процессов восстановления и рафинирования и вакуумную печь для выращивания кремния методом Стогбаргера.

В 2003 году был состоялся эксперимент на Шелеховском заводе ЗАО Кремний электротермической печи мощностью 16,5 МВА (Шелеховский завод ЗАО Кремний). В результате которого было получено около 3 тонн рафинированного кремния.

Результаты проведенного промышленного эксперимента легли в основу созданного нами устройства (Патент № 2645138) для рафинирования кремния, названного генератор газовой смеси

В декабре 2006 года были проведены работы по получению высокочистого кремния с использованием ГГС на 9,6 МВА печи ТОО МК «Kaz Silicon» г.Уштобе Республика Казахстан.

Таким образом, к концу 2014 года в Институте геохимии СО РАН была создана промышленно опробованная технология получения кремния пригодного для изготовления солнечных элементов, на основе прямого карботермического восстановления, без использования хлора и его продуктов.

Основными элементами разработанной технологии являются:

1. Использование для получения кремния высокочистых кварцитов месторождения Бырал-Сардыг и специально подготовленного восстановителя
2. Рафинирование кремния в ковше с использованием ненасыщенного водяного пара
3. Использование более высокой температуры и объема продуваемого газа при рафинировании регулируемые за счет корректировки состава газовой смеси
4. Корректировка процессов очистки на основе предельных концентраций примесей как в исходном сырье, так и в промежуточных продуктах
5. Направленная кристаллизация, позволяющая одновременно с созданием поликристаллической структуры кремния существенно снизить концентрацию металлов

## Анализ и оптимизация промышленного роста монокристаллов кремния с помощью компьютерного моделирования

**Борисов Д.В., Смирнов С.И., Демо И.О., Любимова О.О., Калаев В.В.**

ООО «Софт-Импакт», г. Санкт-Петербург

e-mail: vladimir.kalaev@softimpact.ru

Монокристаллы кремния электронного качества производятся методами Чохральского и бестигельной зонной плавки (БЗП). Компьютерное моделирование процессов роста кристаллов широко используется в промышленности для анализа и оптимизации ростовых параметров и дизайна оборудования.

Срыв бездислокационного (БД) роста может происходить на этапах разращивания конуса и во время роста цилиндрической части кристалла по нескольким причинам, которые можно анализировать с использованием компьютерного моделирования. Превышение критических напряжений в плоскостях скольжения кристаллической решетки, генерирующие дислокации, анализируются посредством проведения трехмерных расчетов, учитывающих анизотропию констант упругости в зависимости от кристаллографической ориентации затравки ( $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ) [1]. Избыточное локальное переохлаждение [2] или подплавление на фронте кристаллизации, вызванные нестационарной турбулентной конвекцией расплава, могут приводить, как к срыву БД, так и к неустойчивости формирования боковой границы кристалла. Флуктуации размера граней кристалла (особенно при росте в направлении  $\langle 111 \rangle$ ) [3] в совокупности с концентрационным переохлаждением являются наиболее типичной причиной срыва БД при росте сильно легированных кристаллов. Концентрация кислорода и допантов в расплаве, геометрия фронта кристаллизации и тепловые градиенты в кристалле определяют прочностные характеристики, сопротивление и ансамбль дефектов в монокристаллическом слитке кремния и полученных из него подложках.

Для моделирования вхождения в растущий кристалл вакансий и междоузлий, их рекомбинации, объемных реакций и образования кластеров с кислородом и между собой по мере охлаждения кристалла, в нашей компании была разработана специальная модель динамики точечных дефектов. Расчет констант реакций был произведен с использованием теории функционала плотности (англ. Density Functional Theory). Для расчета динамики дефектов необходимо распределение температурных градиентов в растущем кристалле кремния, что невозможно получить без точного расчета геометрии фронта кристаллизации, а также распределение концентрации кислорода в кристалле, которые рассчитываются предварительно с использованием STR (stress tensor reconstruction) k-ε модели турбулентности, разработанной в Софт-Импакт.

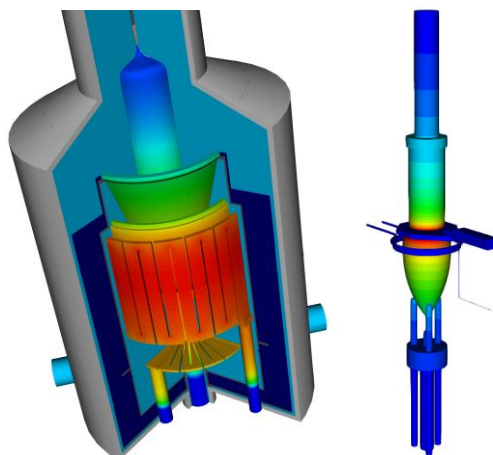


Рисунок 1 – Моделирование теплообмена в ростовых узлах Чохральского и БЗП

### Литература

1. I. Drikis, M. Plate, J. Sennikovs, J. Virbulis. Effect of process parameters and crystal orientation on 3D anisotropic stress during CZ and FZ growth of silicon // J. Cryst. Growth. – 2017. – Vol. 474. – p. 8–15.
2. Y. Mukaiyama, V.V. Artemyev, K. Sueoka. Numerical analysis of constitutional supercooling in heavily doped silicon crystals grown using the Czochralski method // J. Cryst. Growth. – 2022. – Vol. 597. – 126844.
3. S. Gruner, C. Kranert, T. Jauß, T. Sorgenfrei, C. Reimann, J. Friedrich. Investigation of faceted growth in heavily doped silicon crystals grown in mirror furnaces // Crystals – 2022. – Vol. 12. – 1575.

## **Зависимость полей температуры и термических напряжений в моно- и поликристаллах кремния от параметров сопряжённого радиационно-конвективного теплообмена на различных стадиях технологического процесса**

**Митин К.А., Бердников В.С., Митина А.В.**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Новосибирск,  
пр-т Академика Лаврентьева, 1, berdnikov@itp.nsc.ru  
e-mail: mitin86@mail.ru*

Кремний остается важным материалом в областях микро- и силовой электроники. Проблемы повышения кристаллографического совершенства монокристаллов кремния электронного и солнечного качества остаются актуальными. Совершенства монокристаллов кремния и других многофункциональных материалов в значительной степени определяются тепловой историей в процессе роста кристалла, особенно при их получении из расплавов методами направленной кристаллизации. На поля температуры и градиентов температуры в кристаллах влияют особенности процессов конвективной или радиационно-конвективной теплоотдачи от поверхности кристаллов в окружающую среду в ростовых узлах установок. Теплопередача в кристаллах происходит в кондуктивном или радиационно-кондуктивном режимах. Поля градиентов температуры и ими обусловленные термические напряжения по мере вытягивания кристалла и увеличения его длины меняются не только монотонно во времени, но и квазипериодически при развитии неустойчивостей в пограничных слоях на образующих кристаллов. Флуктуации температуры в пограничных слоях в зависимости от их амплитудно-частотных характеристик порождают тепловые волны в кристаллах и нестационарные термические напряжения. Особенности сопряжённого конвективного и радиационно-конвективного теплообмена кристаллов с окружающей средой в зависимости от их длины практически не исследованы. Для понимания закономерностей зависимости полей температуры и термических напряжений в кристаллах от интенсивности теплоотдачи с их образующих решаются задачи в рамках частичного моделирования. Частичное моделирование позволяет определить основные тенденции в поведении рассматриваемых систем при изменении отдельных управляющих параметров или их группы.

Численно, методом конечных элементов, исследованы процессы сопряжённого радиационно-конвективного, свободно-конвективного и кондуктивного теплообмена растущего кристалла с окружающей средой на различных стадиях технологических процессов выращивания моно- и поликристаллов. Рассмотрены процессы выращивания монокристаллов методом Чохральского, Степанова, бестигельной зонной плавки и поликристаллов методом Сименса. В режимах конвективного теплообмена для понимания относительной роли механизмов генерации течения газа в ростовой камере решались задачи при термогравитационной конвекции, при центробежной конвекции, возникающей вследствие вращения кристалла, и при совместном влиянии центробежных сил и сил плавучести. Решалась система уравнений смешанной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура с учётом равномерного вращения кристалла. Расчёты радиационных потоков проведены на основе модифицированного зонального метода. Для расчета термоупругих напряжений решалась задача термоупругости, используя концепцию термоупругого потенциала перемещений. По распределению поля температуры в данный момент времени находилось поле термоупругого потенциала перемещения, затем находились поля компонент термического напряжения. По известным распределениям полей компонент термических напряжений находились эквивалентные напряжения по Мизесу. Показано, что поля температуры в кристаллах существенно зависят от особенностей режимов теплоотдачи. Сопряжённый теплообмен с окружающей средой приводит к неоднородности полей температуры в кристаллах и к неоднородности термических напряжений внутри кристаллов. Радиационная теплоотдача приводит к более эффективному охлаждению кристаллов и снижению роли сил плавучести. Но режимы течения при термогравитационной и смешанной конвекции при появлении ламинарно-турбулентных переходов в пограничных слоях существенно влияют на неоднородность распределения поля температуры в кристаллах и приводят к осцилляциям температуры, как на поверхности кристалла, так и в объёмах кристаллов.



## Управление качеством сырьевых материалов для получения высокочистых соединений кремния

**Вдовина Т.Н., Штриплинг Л.О.**

ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск  
e-mail: tatiananv7755@mail.ru

Высокочистый синтетический кварц, получаемый из ископаемых кварцитов, является источником синтеза поликристаллического кремния электронного качества, оптических изделий, труб, тиглей. Ископаемые кварциты являются дорогим и дефицитным сырьем, поэтому удешевление технологии получения технического кремния достигается за счет расширения сырьевой базы (низкокачественных кварцитов, кварцевого песка, отходов производства цветных металлов [1]. В качестве одного из возможных источников сырья для получения технического кремния в настоящей работе рассмотрены золошлаковые отходы (ЗШО) от сжигания каменных углей, содержание  $\text{SiO}_2$  в которых составляет от 52% до 61% (масс.).

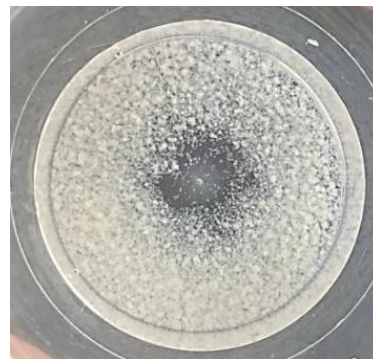


Рисунок 1 – Осаждение аморфного диоксида кремния из коллоидного раствора  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Целью работы является анализ эффективности методов выделения  $\text{SiO}_2$  из ЗШО, включая изучение возможности концентрирования редкоземельных элементов из фильтратов после фильтрования осадка  $\text{SiO}_2$ . Выделение диоксида кремния из смеси оксидов металлов и неметаллов, входящих в ЗШО, основано на особенностях химических свойств  $\text{SiO}_2$ , не растворяющегося в минеральных кислотах (кроме плавиковой  $\text{HF}$ ), но реагирующего со щелочами с образованием водорастворимых силикатов.

Проанализированы условия кислотного разделения  $\text{SiO}_2$  от оксидов металлов, содержащихся в ЗШО. Результаты экспериментов свидетельствуют о наибольшей эффективности процесса разделения исходного  $\text{SiO}_2$ , находящегося в ЗШО в виде аморфного  $\text{SiO}_2$  и в составе алюмосиликата, из 2М раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Фильтрат из катионов, растворившихся в 2М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , обработан водным раствором  $\text{NaOH}$ , регулирование концентрации которого под контролем pH позволили обеспечить поэтапное осаждение гидроксидов металлов.

Выделение  $\text{SiO}_2$  из кристаллического алюмосиликата (муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) методом щелочной обработки осуществлялось в две стадии: 1) обработка алюмосиликата 1N  $\text{NaOH}$  с образованием водорастворимого силиката натрия, 2) обработка коллоидного раствора силиката натрия 0,5М  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в соотношении 1:2, а затем разбавление дистиллированной водой до концентрации серной кислоты 0,1М. Этот вариант обеспечил максимальную эффективность осаждения диоксида кремния из коллоидного раствора, обеспечивая получение крупных, хорошо оформленных частиц  $\text{SiO}_2$  (рис.1).

Полученные результаты могут быть применены для разработки технологии получения сырьевых материалов различного качества для синтеза кремния и его соединений.

### Литература

1. Т.В. Критская, В.Н. Додонов. Инновационные технологии кремния для новых соединений // Кремний-2024 : Тезисы докладов XV Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Иркутск, 15–20 июля 2024 года. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2024. – С. 41. – EDN HFOGNA.

## Получение сверхчистого монокристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки

Зайцев А.В., Аношин О.С., Суханов А.Ю., Котков А.П.

АО «НПП «Салют», Нижний Новгород

e-mail: a.v.zaytsev@inbox.ru

Несмотря на широкое распространение метода Чохральского, для критических применений (силовая электроника (IGBT-транзисторы, высоковольтные тиристоры) и детекторы ядерных излучений) требуется кремний с предельно низким содержанием фоновых примесей (О, С) и электрически активных центров (В, Р). Метод бестигельной зонной плавки (БЗП) остается единственным способом достижения такой чистоты. Актуальность работы обусловлена необходимостью импортозамещения сверхчистого монокристаллического кремния (МКК) с параметрами, соответствующими требованиям для приборов специального назначения.

Метод БЗП основан на локальном высокочастотном нагреве вертикального поликристаллического стержня в вакууме или инертном газе. Узкая зона расплава удерживается силами поверхностного натяжения, что исключает контакт с тиглем и обеспечивает предельно высокую чистоту материала. При перемещении зоны вдоль стержня со скоростью  $\sim 3$  мм/мин происходит кристаллизация на затравку с образованием монокристалла. Ключевыми параметрами процесса, определяющими структурное совершенство, являются скорость роста, вращение слитков и термические условия в зоне расплава.

Ключевым условием получения бездислокационных кристаллов является прецизионный контроль чистоты на всех этапах, начиная с подготовки поликристаллического сырья (химическое травление, обезжиривание) и заканчивая финишными операциями непосредственно перед ростом. Оптимизация данных процедур позволила минимизировать фоновое загрязнение и обеспечить стабильное прохождение таких стадий процесса БЗП, как затравливание, разращивание конуса и рост тела кристалла. Установлено, что определяющее влияние на структурное совершенство оказывают скорость кристаллизации и гидродинамика расплава, регулируемая скоростью вращения слитков.

Рост МКК проводился на установках БЗП, позволяющих выращивать монокристаллические слитки диаметром до 100 мм и длиной до 1500 мм. В результате оптимизации ростовых режимов реализован стабильный процесс получения бездислокационных кристаллов кремния в диапазоне диаметров 50–100 мм.

Исследование параметров выращенных слитков МКК проводилась с использованием комплекса методов. Установлено, что удельное электрическое сопротивление (УЭС), измеренное четырехзондовым методом, варьируется в пределах  $1000 \div 7000$  Ом·см. Важным результатом является экспериментальное подтверждение низкого содержания фоновых примесей. Методом ИК-спектроскопии продемонстрировано, что концентрации кислорода и углерода находятся на уровне порога чувствительности метода ( $< 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>). Наиболее значимые данные получены методом низкотемпературной (гелиевой) ИК-спектроскопии: содержание бора и фосфора на уровне менее  $4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, а мышьяка и алюминия — менее  $1 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>.

Таким образом, в результате оптимизации технологических режимов БЗП получены бездислокационные монокристаллы кремния диаметром до 100 мм с низким содержанием остаточных примесей: бор и фосфор  $< 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, мышьяк и алюминий  $< 1 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, кислород и углерод  $< 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Полученные параметры соответствуют требованиям к сверхчистому кремнию для приборов силовой электроники и обеспечивают возможность создания IGBT-структур с высокими рабочими характеристиками.

## Топологический спектр высокочастотного малоуглового рассеяния волны Рэлея

**Чуков В.Н.**

*Институт Биохимической Физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва*  
 e-mail: vchukov@mail.ru

Закономерности [1] волновых процессов, в частности в кремнии, широко используются в физике и технике [2]. В настоящей работе теоретически смоделирован гребенчатый спектр произвольной формы высокочастотного малоуглового рассеяния с помощью новых топологических законов рассеяния [3-21]. Данные новые физические явления нарушают классический закон Гинье [1] о монотонности указанного спектра и позволяют управлять спектром рассеяния и моделировать его в широком диапазоне длин волн [3-21].

### Литература

1. А. Гинье, Г. Фурне. Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей // М.: Физматгиз, 1959.
2. В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. Физические основы акустооптики // М.: Радио и связь, 1985.
3. В.Н. Чуков. // Диссертация к.ф.-м.н. Москва, МИФИ, 1994.
4. В.Н. Чуков. // ФТТ, 39(2), 1997 стр. 267.
5. В.Н. Чуков. О законах рэлеевского, резонансного и коротковолнового рассеяния волны Рэлея // Препринт ИБХФ РАН. Москва, РИИС ФИАН, 2002.
6. V.N. Chukov. The new laws of the Rayleigh wave scattering on a near-surface inhomogeneity // In: Proc. Days on Diffraction (DD), International Seminar, IEEE Conference Publications, 2012. DOI: 10.1109/DD.2012.6402750
7. В.Н. Чуков. Структура поверхностной неоднородности и законы рэлеевского рассеяния волны Рэлея // Препринт ИБХФ РАН. Москва, РИИС ФИАН, 2003.
8. V.N. Chukov. // Ultrasonics, 52, 2012 P. 5. DOI: 10.1016/j.ultras.2011.07.010
9. V.N. Chukov. On violation of Rayleigh and Bragg laws of scattering // In: Proc. Days on Diffraction (DD), International Seminar, IEEE Conference Publications, 2011. DOI: 10.1109/DD.2011.6094365
10. V.N. Chukov. The Rayleigh law violation and its influence on the wave scattering. Lambert Academic Publishing, 2017.
11. V.N. Chukov. Topological laws of the Rayleigh wave scattering. Lambert Academic Publishing, 2018.
12. V.N. Chukov. // J. Phys. Conf. Ser. 2103, 2021 P. 012157.
13. V.N. Chukov. // St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics, 16(1,2), 2023 pp. 557-564.
14. В.Н. Чуков. // Сборник трудов III Всероссийской Акустической конференции. Политех-Пресс, Санкт-Петербург, 2020, с. 87. <https://acoust-conference.iapras.ru>.
15. V.N. Chukov. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 88(2), 2024, pp. 244–253.
16. V.N. Chukov. // Russian Physics Journal, Springer Nature, 67(10), 2024 P. 1787. DOI: 10.1007/s11182-024-03313-y.
17. V.N. Chukov. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 89(1), 2025, pp. 96–108.
18. V.N. Chukov. // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 18(5), 2025 pp. 585–604.
19. В.Н. Чуков. // Материалы XX Международной молодёжной конференции по люминесценции и лазерной физике. 30 июня – 5 июля 2025, С. 142. Иркутск, Россия.
20. В.Н. Чуков. Суб-брэгговский спектр рассеяния поверхностной акустической волны Рэлея // Препринт ИБХФ РАН. М.: Паблит, 2025. ISBN: 978-5-6055100-2-4.
21. В.Н. Чуков. Мета-спектроскопия рассеяния волны Рэлея на топологических структурах шероховатости // Препринт ИБХФ РАН. М.: Паблит, 2025. ISBN: 978-5-6053423-9-7.

## Исследование элементного состава кремния после очистки методом дуговой плавки (Tri-Arc TA-200)

*Халимов А.<sup>1)</sup>, Шаронов У.Б.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Бухарский государственный медицинский институт, Бухара

<sup>2)</sup>Физико-технический институт им. С.А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан,  
Ташкент

e-mail: utkirstar@gmail.com

Кремний является одним из ключевых материалов современной микроэлектроники, фотоэлектрических и полупроводниковых технологий. Чистота кремния существенно влияет на его электрические, оптические и структурные свойства, поэтому разработка эффективных методов его очистки является важной научно-технической задачей. Одним из перспективных методов повышения чистоты кремния является вакуумная дуговая плавка, позволяющая удалять летучие и металлические примеси при высоких температурах.

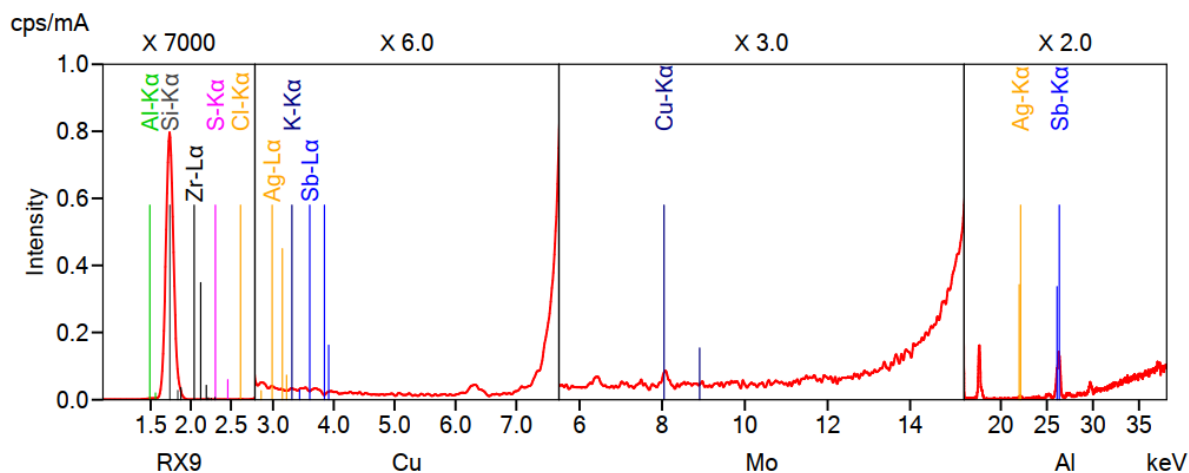


Рисунок – Рентгенофлуоресцентный спектр и элементный состав исследуемого образца кремния.

В настоящей работе исследованы результаты очистки кремния методом дуговой плавки на приборе Tri-Arc TA-200, с последующим анализом элементного состава полученного образца. Для определения химического состава использовался метод рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре Rigaku NEX CG.

Результаты анализа показали (Рисунок), что основным компонентом исследуемого образца является кремний с концентрацией 99,6 мас.%. Одновременно были выявлены примесные элементы, присутствующие в значительно меньших количествах. В частности, содержание алюминия составляет 0,155 мас.%, циркония — 0,0919 мас.%, хлора — 0,0486 мас.%, серы — 0,0173 мас.%, калия — 0,0178 мас.%, сурьмы — 0,0125 мас.%. Следовые количества меди (0,0017 мас.%) и серебра (0,0005 мас.%) также были зарегистрированы в образце. Эти результаты свидетельствуют о наличии остаточных примесей, связанных как с исходным материалом, так и с технологическими условиями плавки.

Полученные данные подтверждают эффективность метода дуговой плавки для очистки кремния и демонстрируют возможность получения материала с высоким содержанием основного компонента. Дальнейшее повышение степени очистки может быть достигнуто за счёт оптимизации параметров плавки, вакуумных условий и состава инертной атмосферы. Ниже на таблице приведены элементный состав очищенного кремния по данным рентгенофлуоресцентного анализа.

| Элемент           | Si   | Al    | Zr     | Cl     | K      | S      | Sb     | Cu     | Ag     |
|-------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Содержание, мас.% | 99.6 | 0.155 | 0.0919 | 0.0486 | 0.0178 | 0.0173 | 0.0125 | 0.0017 | 0.0005 |

## Технология очистки кремния методом дуговой плавки на установке Tri-Arc TA-200

*Халимов А.<sup>1)</sup>, Шаронов У.Б.<sup>2)</sup>*

*<sup>1)</sup>Бухарский государственный медицинский институт, Бухара*

*<sup>2)</sup>Физико-технический институт им. С.А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент*

e-mail: utkirstar@gmail.com

Кремний высокой степени чистоты является основным материалом современной микроэлектроники, фотоэлектрических преобразователей энергии и различных полупроводниковых приборов. Наличие примесных элементов существенно влияет на электрические и структурные свойства материала, поэтому разработка эффективных методов очистки кремния представляет важную научно-техническую задачу. Одним из перспективных подходов является применение высокотемпературной дуговой плавки в вакууме или инертной атмосфере, позволяющей удалять летучие и металлические примеси.

Мы разработали технологическая последовательность очистки кремния методом дуговой плавки на установке Tri-Arc TA-200. Данная установка оснащена тремя дуговыми электродами, что обеспечивает более равномерный нагрев и эффективное перемешивание расплава. Максимальная температура в зоне дуги может превышать 3500 °С, что позволяет проводить плавление и рафинирование различных тугоплавких материалов.

На первом этапе исходный кремний подвергается механическому дроблению до фракций требуемого размера. Полученный материал размещается в водоохлаждаемом медном тигле установки. Далее камера установки вакуумируется до необходимого уровня давления для удаления воздуха и влаги. После достижения требуемого вакуума камера заполняется инертным газом — аргоном, который предотвращает окисление расплава и обеспечивает стабильные условия плавления.

На следующем этапе между электродом и образцом возбуждается электрическая дуга, под действием которой происходит интенсивный нагрев и плавление кремния. Использование трех дуговых электродов позволяет перемешивать расплав и обеспечивает более равномерное распределение температуры в зоне плавления. В процессе плавки часть летучих примесей испаряется, а другие примеси могут концентрироваться в отдельных участках слитка, что облегчает их последующее удаление.

После завершения плавления расплавленный кремний охлаждается и кристаллизуется с образованием слитка. Полученный материал может быть подвергнут повторной плавке для повышения степени очистки. Дальнейший анализ элементного состава и структурных характеристик кремния проводится с использованием методов рентгенофлуоресцентного анализа, рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии.

Таким образом, применение установки Tri-Arc TA-200 позволяет эффективно проводить высокотемпературную очистку кремния и получать материал с пониженным содержанием примесей. Разработанная технологическая последовательность может быть использована при создании высокочистого кремния для полупроводниковых и фотоэлектрических технологий.

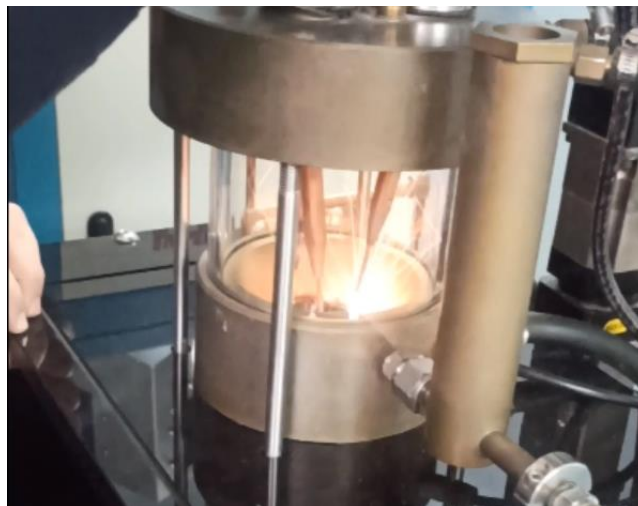


Рисунок – Процесс возбуждения электрической дуги в атмосфере аргона при очистке кремния методом дуговой плавки на установке Tri-Arc TA-200..

**II. Атомные процессы на поверхности, границах раздела и в объеме кремния: дефекты, примесные атомы. Двумерные, одномерные и нульмерные структуры на основе кремния. Рост и материаловедение тонких (в том числе эпитаксиальных) пленок на кремнии, включая кремний-на-изоляторе и напряженные структуры**



## Исследование свойств и структуры мезо и макропористого кремния с осаждённым циннаризином

Леньшин А.С., Полковникова Ю.А., Черненко С.С., Домашевская Э.П.

*Воронежский государственный университет, г. Воронеж*

e-mail: lenshinas@mail.ru

В рамках программы технологического развития РФ биомедицине и биотехнологиям отведена существенная роль. Интерес к пористому кремнию с точки зрения проблем биомедицины обусловлен его хорошей биосовместимостью, а также возможностью модификации химических свойств поверхности и управления морфологией пористого слоя. Пористый кремний может быть успешно использован для доставки различных терапевтических средств, от малых молекул препаратов до больших пептидов/белковых терапевтических препаратов при управлении составом поверхности и морфологией его пористого слоя. Лекарственные препараты, созданные на основе кремниевых наноструктур, обладают основными свойствами, предъявляемыми к системам направленного транспорта лекарственных средств: легким высвобождением лекарственного средства при достижении заданной цели, а также возможностью парентерального введения, в частности, внутривенного введения. Поэтому, опыт использования нейропротективного и нейротрофического препарата циннаризин у пациентов с неврологическими расстройствами в постковидном периоде представляет большой интерес.

Образцы пористого кремния получали методом электрохимического травления монокристаллического кремния. Морфологию и микроструктуру образцов изучали методом просвечивающей электронной микроскопии с помощью просвечивающего электронного микроскопа Libra120. Исследования химического состава и строения молекул проводились на ИК-Фурье спектрометре Vertex Bruker 70 с приставкой для измерения поглощения/пропускания тонкопленочных образцов. Исследование фазового состава проводилось на дифрактометре ДРОН-04. Оптические свойства образцов изучались методом ультрафиолетовой спектроскопии с помощью прибора UV mini-1240 фирмы Shhimadzu.

Установлено, что в результате физико-химического взаимодействия при химическом осаждении в *por-Si* кристаллический циннаризин аморфизуется с небольшим содержанием кристаллической фазы. Было определено оптимальное время адсорбции циннаризина с поверхности мезопористого кремния: *por-Si* - 30 минут и время десорбции циннаризина с поверхности *por-Si* - 45 минут. Установлен преимущественно физический механизм адсорбции циннаризина на пористый кремний. Полученные времена десорбции и адсорбции свидетельствует о перспективности использования мезопористого кремния для осаждения циннаризина и его последующей доставки в лечебных целях.

Показана возможность использования культуры клеток инфузории *Paramecium caudatum* при исследовании токсичности нанопорошков из мезопористого кремния и нанопорошков из мезопористого кремния с осажденным циннаризином.

Полученные результаты комплексных исследований показывают, что контроль твердой фазы, аморфной или кристаллической, осажденного лекарственного средства, как циннаризин, может оказаться полезной информацией при разработках его различных лекарственных форм для увеличения общего количества абсорбированного лекарственного средства

Исследования были проведены при поддержке гранта РФФИ № 25-22-00292 с использованием оборудования ЦКПНО ВГУ.

# Анализ морфологии нанопроволок Si в зависимости от скорости осаждения кремния, температуры и свойств поверхности подложки с помощью Монте-Карло моделирования

Маницурова С.В.<sup>1,2</sup>, Шварц Н.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>)Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>)Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: nshwartz@isp.nsc.ru

Изучение роста кремниевых нанопроволок (НП) по механизму пар-жидкость-кристалл с использованием золота в качестве катализатора проводилось с помощью Монте-Карло моделирования. Рассмотрение процессов, происходящих на границе раздела капля — кристалл, на атомарном уровне позволяет понять причину выбора того или иного направления роста НП. В данной работе исследуется влияние ростовых условий на направление и морфологию НП на подложках Si(111) и Si(100).

Основное внимание уделено росту Si планарных НП на поверхностях кремния с ориентацией (100). Необходимым условием для роста планарных НП является увеличение смачиваемости поверхности каплями катализатора. В модели сильная смачиваемость подложки каплями катализатора и адгезия НП по отношению к подложке, требуемые для планарного роста, обеспечивались присутствием тонкого слоя пассивирующего материала. Моделирование показало, что морфология планарных НП зависит от пересыщения капли кремнием. Состав расплава Au-Si определяется скоростью осаждения кремния и температурой. Зависимость морфологии ПНП от температуры и скорости осаждения кремния представлена на Рис.1. При низких температурах и высоких скоростях осаждения пересыщение капли кремнием велико. При уменьшении пересыщения расплава кремнием (увеличение температуры или уменьшение скорости осаждения кремния), когда ростовые условия не обеспечивают достаточного притока в каплю, происходит растворение приповерхностного слоя подложки каплей. В этом случае наблюдается рост извилистых ПНП. Направление роста извилистых ПНП определяется растворением фасеток {011}, ограничивающих ямку травления под каплей.

Было обнаружено, что изменение пересыщения капли ответственно и за рост извилистых непланарных нанопроволок на подложках Si(111).

Работа выполнена при поддержке программы Минобрнауки РФ (№ FWGW-2025-0015).

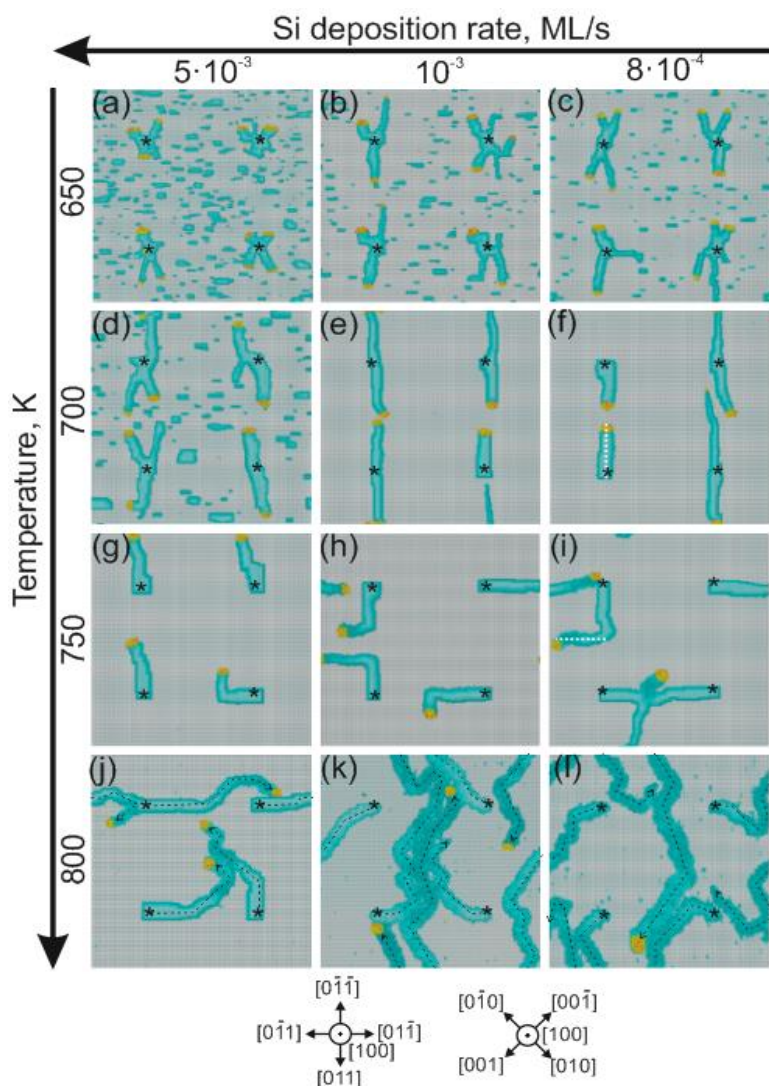


Рисунок 1 – Виды сверху модельных поверхностей Si(100) (77×77 нм²) с пассивирующим слоем после осаждения 1 монослоя Si при разных температурах и скоростях осаждения. Звездочками отмечено начальное положение каплей золота радиуса 4 нм до начала осаждения кремния.

# Структурные и оптические свойства пленок пористого SiO<sub>2</sub>, созданных анодным окислением кремния, имплантированного ионами CO<sup>+</sup>

**Тысченко И.Е., Спесивцев Е.В., Попов И.В., Володин В.А., Попов В.П.**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск*

e-mail: tys@isp.nsc.ru

Пленки пористого SiO<sub>2</sub> привлекают большой интерес с точки зрения создания антиотражающих покрытий для стекол и прозрачных полимеров, использующихся в фотоэлектрических модулях. Разработка новых методов создания пористого SiO<sub>2</sub>, совместимых с текущей кремниевой технологией, остается весьма важной задачей. В данной работе изучены свойства пленок пористого SiO<sub>2</sub>, сформированных анодным окислением подложек Si, имплантированных ионами CO<sup>+</sup>, в зависимости от дозы ионов и температуры отжига.

Подложки кремния марки КОФ-2000 с ориентацией (111) были имплантированы ионами CO<sup>+</sup> с энергией 90 кэВ дозами  $2.5 \times 10^{15}$ – $5 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. На глубине среднего пробега ионов ~120 нм полная концентрация атомов С и О составляла от 0.6 до 10 ат.%. После имплантации пластины были отожжены при температуре 700 и 1100 °С в течение 1 часа в атмосфере паров N<sub>2</sub>. Анодное окисление проводилось при комнатной температуре в гальваностатическом режиме в ячейке с электролитом 0.04%Na(KNO<sub>3</sub>), 0.5%Н<sub>2</sub>О и С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>(ОН)<sub>2</sub>. Плотность тока составляла 8 мА/см<sup>2</sup>. Исследования окисленных слоев проводились методами спектральной эллипсометрии, спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения, комбинационного рассеяния света (КРС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

В спектрах ИК поглощения окисленных образцов Si, имплантированных дозами ионов CO<sup>+</sup> выше  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и отожженных при температуре 1100 °С, наблюдались пики на частоте около 806 см<sup>-1</sup>, соответствующие поглощению в кристаллах SiC. После отжига при 700 °С слабая широкая полоса поглощения с максимумом на указанной частоте наблюдалась после внедрения лишь максимальной дозы ионов. По мере окисления пленок, отожженных при 700 °С, в области волновых чисел 2280–2400 см<sup>-1</sup> наблюдался рост поглощения по мере увеличения дозы ионов CO<sup>+</sup>. Природа наблюдаемой полосы обусловлена поглощением на молекулах газа CO<sub>2</sub>. В образцах, отожженных при 1100 °С, наблюдалось лишь уменьшение интенсивности полосы 806 см<sup>-1</sup>, а полоса в области 2280–2400 см<sup>-1</sup> наблюдалась лишь на начальных стадиях окисления пленки.

Было обнаружено сильное влияние дозы ионов CO<sup>+</sup> на показатель преломления анодного SiO<sub>2</sub> после окисления подложек, отожженных при температуре 700 °С (Рисунок 1). Его величина в слое SiO<sub>2</sub> толщиной около 50 нм уменьшилась от 1,39 до 1,17 по мере увеличения дозы ионов от  $2,5 \cdot 10^{15}$  до  $3 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. С ростом толщины пленки до ~300 нм коэффициент преломления снижался до 1.12. В образцах, отожженных при температуре 1100 °С, при дозах выше  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> эффект дозы на коэффициент преломления исчезает, а его зависимость от толщины окисленного слоя становится более слабой и варьируется от ~1.3 до 1.12.

Определена доля микропор в пленках SiO<sub>2</sub>, которая изменяется от 25 до 70 % и растет с температурой постимплантационного отжига. Полученные результаты обсуждаются в рамках формирования молекул и пузырей CO<sub>2</sub>, образующихся при окислении областей кремния, содержащих фазу SiC.

Исследования поддержаны Российским Научным Фондом [Грант № 25-19-20049] и Правительством Новосибирской области [Грант № 30-2025-000924].

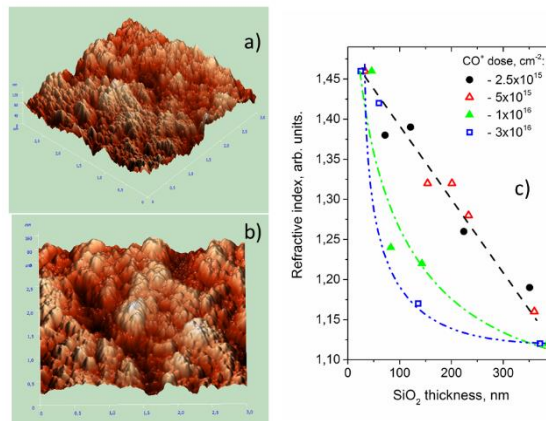


Рисунок 1 – (а, б) Изображение топографии поверхности анодно окисленных пленок Si, имплантированных ионами CO<sup>+</sup> дозами (а)  $5 \times 10^{15}$  и (б)  $3 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и отожженных при 700 °С. (с) Профиль показателя преломления анодно-окисленных пленок для образцов Si, имплантированных разными дозами ионов CO<sup>+</sup>.

## Формирование тонких многослойных структур кремния методом эпитаксиального наращивания из газовой фазы при пониженной температуре

Дубкова А.С., Рябов В.Н., Тарасов И.В., Ильюшина Н.Д., Мухин А.А., Дубков С.А.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

e-mail: asdubkova@istokmw.ru

Совершенствование существующих и разработка новых твердотельных приборов СВЧ-электроники ставят новые требования к эпитаксиальным структурам, на основе которых они изготавливаются. Разработка приборов коротковолнового диапазона и повышения КПД приборов выдвигают новые требования по созданию многослойных кремниевых эпитаксиальных структур с толщиной отдельных слоев менее 0,1 мкм. Основа развития эпитаксиальной технологии – это снижение температуры процесса для уменьшения процессов диффузии как легирующих примесей, так и процессов внедрения загрязняющих компонентов. Снижение температуры процесса роста приводит к появлению новых эффектов – сегрегации и автолегирования. Эффект поверхностной сегрегации атомов примеси характерен не только для процессов молекулярно-лучевой эпитаксии, но также и для эпитаксии из газовой фазы при пониженной температуре роста [1]. Актуальной задачей на данный момент является не только изучение характера поведения примесных атомов в полупроводнике, но и практические способы регулирования распределения легирующей примеси.

Для изготовления многослойных эпитаксиальных структур кремния проводились эксперименты по нахождению оптимальных режимов легирования эпитаксиального слоя бором и мышьяком. Тонкие  $p^+$  и  $n^+$ -слои наращивались при пониженных давлении и температуре в реакторе методом пиролиза моносилана. Толщина слоя и уровень его легирования зависят от многих параметров процесса. С учетом наличия сегрегации примеси варьировались режимы предварительного запуска легирующей добавки – диборана и арсина в реактор, роста и отжига после роста.

Целью работы было получение многослойных эпитаксиальных структур кремния с тонкими (менее 0,1 мкм) высоколегированными слоями разного типа проводимости. Было обнаружено, что уровень легирования  $p$ -слоев, граничащих с  $p^+$ -слоем, почти не зависит от концентрации подложки  $p^{++}$  ( $4 \cdot 10^{19}$ ,  $1,5 \cdot 10^{20}$  см $^{-3}$ ), но зависит от температуры наращивания, и чем выше температура, тем выше уровень. Также было замечено, что профиль легирования переходных областей  $p^+$ -слоя зависит не только от режима наращивания слоя, но и от режимов предварительного запуска легатуры в реактор и отжига слоя. Важно отметить, что существуют отличия при легировании слоев бором и мышьяком или фосфором. Применение мышьяка в качестве легирующей примеси позволяет получать слои с высокой концентрацией более тонкими, чем при использовании фосфора.

После отработки технологического маршрута были получены слои с концентрацией  $\sim 1 \cdot 10^{18}$  см $^{-3}$ , толщина которых не превосходит 0,08 мкм. В результате отработки оптимальных режимов наращивания была получена структура  $p^{++}pp^+pnn^+nn^{++}$ -типа для лавинно-пролетного диода, работающего в СВЧ диапазоне.

Исходя из полученных результатов было видно, что закономерности легирования  $n$ - и  $p$ -слоев различаются. В зависимости от приборных задач получение тонких слоев (пиков) требует технологической оптимизации всех этапов наращивания. Исследования поверхностной сегрегации примеси бора и мышьяка при оптимизации режимов наращивания тонких слоев кремния будут продолжены.

### Литература

1. Ю.Ю. Эрвье О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии // Материалы электронной техники №2, 2013 стр. 4-10.



## Термодинамическая модель образования пирамидальных эпитаксиальных островков с различным контактным углом

**Лозовой К.А., Дирко В.В., Кукунов О., Войцеховский А.В., Коханенко А.П.**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*  
e-mail: lozovoymailbox@mail.ru

В настоящее время гетероструктуры с квантовыми точками широко используются при создании различных оптоэлектронных приборов, включая фотоприемники видимого и инфракрасного диапазонов, солнечные элементы, полупроводниковые светодиоды и лазерные источники. Для реализации таких устройств применяются различные полупроводниковые материальные системы, оптимально отвечающие заданным требованиям. Несмотря на существенные достижения в области их исследования и практического применения, возможности данных структур до конца не исчерпаны, и они по-прежнему рассматриваются как одна из наиболее перспективных платформ оптоэлектроники.

Наиболее эффективным способом формирования квантовых точек является их самопроизвольное возникновение в процессе молекулярно-лучевой или газофазной эпитаксии. Такой механизм самоорганизации реализуется при наличии рассогласования постоянных кристаллической решетки подложки и осаждаемого материала. При достижении двумерным слоем критической толщины накопленные упругие напряжения приводят к потере устойчивости послойного роста, в результате чего начинается формирование трехмерных островков [1].

В данной работе на основе развития существующих термодинамических моделей эпитаксиального роста рассмотрена энергетика образования пирамидальных островков с различным контактным углом, а также показано существование равновесного значения угла при основании, при котором для заданных энергетических параметров системы достигается минимум свободной энергии, что соответствует экспериментально наблюдаемой форме островка.

Основой для построения модели является выражение для изменения свободной энергии при переходе атомов из смачивающего слоя, образующегося на поверхности подложки, в островок. Учитывается вклад в изменение свободной энергии за счет увеличения поверхностной энергии и длины ребер при образовании трехмерного кластера, релаксации упругих напряжений, возникающих из-за наличия в системе рассогласования по параметру кристаллической решетки, а также за счет уменьшения притяжения атомов к подложке [2].

Найдены выражения для минимума свободной энергии системы и критического числа атомов в островке, учитывающие образование дополнительных ребер. Определены зависимости равновесного угла при основании от энергетических и упругих параметров осаждаемого материала и подложки (Рисунок 1). Показано, что равновесный угол увеличивается с увеличением рассогласования по постоянной решетки между двумя материалами, а также с увеличением количества осажденного материала, что приводит к экспериментально наблюдаемой морфологической перестройке островков на поздних стадиях роста.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

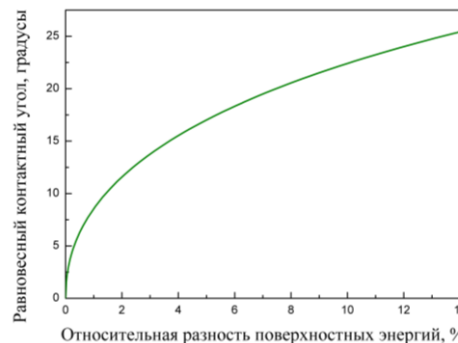


Рисунок 1 — Зависимость величины равновесного контактного угла от приведенной разности энергий боковой грани и основания

### Литература

1. V.V. Dirko, K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko, A.V. Voitsekhovskii. High-resolution RHEED analysis of dynamics of low-temperature superstructure transitions in Ge/Si(001) epitaxial system // Nanotechnology, 33(11), 2022. P. 115603.
2. K.A. Lozovoy, A.P. Kokhanenko, A.V. Voitsekhovskii. Influence of edge energy on modeling the growth kinetics of quantum dots // Crystal Growth & Design, 15(3), 2015. P. 1055.

## Рост атомно-тонких плёнок для кремниевой наноиндустрии: на пути к новой технологии

**Плюснин Н.И., Ануфриев Ю.В.**

*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва*  
e-mail: plusnin.n@inme-ras.ru

В гетероструктурах на кремнии, двумерные (2D) слои металлов, кремния и силицидов [1] имеют критическое значение для развития кремниевой нанотехники, т.к. они обеспечивают минимальную площадь при минимальном электрическом сопротивлении. Их синтез происходит путём роста метастабильного 2D слоя и его стабилизации, с помощью атомно-тонких прослоек, либо поверхностно-активных покрытий, либо другими методами. И, поскольку, в процессе роста, метастабильный 2D слой перемешивается с граничащими фазами и агрегирует в отдельные «островки», то этот слой осаждают при низкой температуре, чтобы избежать вышеупомянутые негативные процессы.

Существующие технологии, такие, например, как ALD (Atomic Layer Deposition), MBE (Molecular Beam Epitaxy) и твердофазный синтез - высокотемпературные. Поэтому, с учётом вышесказанного, была выполнена серия исследований [2], посвященная проблеме создания низкотемпературной технологии роста атомно-тонких слоёв. Первоначально в этих исследованиях, была выяснена физика роста неравновесных и метастабильных атомно-тонких слоёв при формировании интерфейсов системы металл-кремний. Далее, с помощью моделирования этого процесса, была выяснена роль кинетики латерального роста этих слоёв из атомного потока. Затем, потребовалось создать новую технологию и технику эксперимента – осаждения плёнок в планарной геометрии, где источником служили одна или две нагретые «стенки» (размером не меньшим, чем размер подложки и на расстоянии до подложки, меньшем или порядка размера «стенок»). В результате, было открыто ранее неизвестное состояние твёрдой плёнки на инородной подложке – твердофазный (или замороженный) смачивающий слой (SWL – “solid wetting layer”), который имеет нанофазную структуру и перестроенный под неё приграничный слой подложки [3]. Стало ясно, что при PALD, физика формирования интерфейса между плёнкой объёмной фазы и инородной подложкой должна включать стадию роста SWL.

Тем не менее, с помощью новой технологии, были обнаружены новые явления и новые свойства в объектах исследования [1-3]. И, благодаря недавним теоретическим исследованиям [4], стала ясна физическая природа этой технологии. Поэтому, эта технология была названа физическим атомно-слоевым осаждением – PALD (Physical Atomic Layer Deposition - по аналогии с химическим ALD). Но, в конце концов, возник вопрос: а возможно ли распространить PALD на подложки больших диаметров, которые используются в промышленности? Проведенные исследования в ИНМЭ РАН показывают, что масштабирование этой технологии на промышленные подложки вполне возможно.

### Литература

1. Н. И. Плюснин. Низкоразмерные фазы и формирование наногетероструктур в системе переходный 3D-металл-кремний // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1, 2005. стр. 17-27.
2. Н.И. Плюснин. Физическое осаждение атомных слоев и рост предельно-тонких пленок: четырех-десятилетняя серия исследований системы тугоплавкий металл-кремний // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 18 (4.1 - ASCO-Nanomat 2025), 2026 (февраль). <https://doi.org/10.18721/IPM>
3. Плюснин, Н. И. Твердый смачивающий слой, формирование межфазной границы и тонкопленочные наноматериалы. Краткий обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. 25(4), 2023. стр. 594-604. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11471>
4. Н.И. Плюснин. Физическое атомно-слоевое осаждение (PALD), как новая технология получения наноматериалов и наногетероструктур // Нано- и микросистемная техника, 1, 2026 (февраль). <https://doi.org/10.17587/nmst.28.19-30>



## Кристаллическая и электронная структура, оптические и фононные свойства тонких пленок $\text{Cr}_3\text{Si}$ на $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$

Галкин Н.Г.<sup>1)</sup>, Галкин К.Н.<sup>2)</sup>, Доценко С.А.<sup>1)</sup>, Мигас Д.Б.<sup>2)</sup>, Волкова Л.С.<sup>3)</sup>,  
Гришин Т.С.<sup>3)</sup>, Дудин А.А.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Беларусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия  
e-mail: ngalk@dvo.ru

Толстые (225 нм) однофазные пленки  $\text{Cr}_3\text{Si}$  с кубической структурой (A15), сформированные методом твердофазной реакции при 800°C из тонких бислоев аморфного кремния и хрома на подложке  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  продемонстрировали свойства металла с дырочной проводимостью [1]. Однако однофазные тонкие (80 нм) пленки  $\text{Cr}_3\text{Si}$  с высокоупорядоченной структурой DO3, продемонстрировали полуметаллический характер проводимости с линейным положительным магнетосопротивлением (МС) до 100 К и переходом к отрицательному МС ниже 5 К [2].

В данной работе исследованы структура очень тонких (10-20.8 нм) однофазных пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  на подложке сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$ ), выращенных методом МЛЭ при  $T=350, 500$  и  $650^\circ\text{C}$ . Для них исследована кристаллическая структура, оптические и фононные свойства по данным спектроскопии КРС и ИК-спектроскопии, которые сопоставлены с данными первопринципных расчетов электронной структуры, оптического отражения, спектра коэффициента поглощения и расчетов КРС-фононов в объемном  $\text{Cr}_3\text{Si}$  с кубической и тригональной структурой. Теоретические расчеты из первых принципов для объемного  $\text{Cr}_3\text{Si}$  показали, что наиболее выгодными являются кубическая  $c\text{-Cr}_3\text{Si}$  ( $\text{Pm}\bar{3}\text{n}$ ) и тригональная  $\text{tr-Cr}_3\text{Si}$  ( $\text{R}\bar{3}\text{c}$ ) модификации.

Теоретические расчеты из первых принципов для объемного  $\text{Cr}_3\text{Si}$  показали, что наиболее выгодными являются кубическая  $c\text{-Cr}_3\text{Si}$  ( $\text{Pm}\bar{3}\text{n}$ ) и тригональная  $\text{tr-Cr}_3\text{Si}$  ( $\text{R}\bar{3}\text{c}$ ) модификации. При этом тригональная фаза имеет значительно меньшую полную энергию, по сравнению с кубической фазой. Исследования кристаллической структуры пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  методами ХРД и ВР ПЭМ показали, что при температуре подложки  $650^\circ\text{C}$ , происходит островковый поликристаллический рост пленки  $\text{Cr}_3\text{Si}$  с зернами кубической и тригональной модификации. Уменьшение температуры подложки до  $350^\circ\text{C}$  приводит к росту нанокристаллической фазы  $\text{Cr}_3\text{Si}$  с вкраплениями аморфной фазы  $\text{Cr}_3\text{Si}$  по данным энергодисперсионной спектроскопии. При температуре  $500^\circ\text{C}$  наблюдается рост укрупненных нанокристаллов с несколькими эпитаксиальными ориентациями. Вычисление показателя несоответствия предложенной модели и экспериментальных данных для каждой из двух модификаций показали, что образце при  $T_{\text{Si}}=500^\circ\text{C}$  формируется преимущественно тригональная фаза  $\text{tr-Cr}_3\text{Si}$ .

Сопоставление расчетных и экспериментальных спектров отражения показали, что лучшее соответствие наблюдается для кубической фазы  $\text{Cr}_3\text{Si}$ . При этом спектры коэффициента поглощения сопоставимы только при энергиях фотонов более 0.5 эВ, что связано с искажениями отражения за счет подложки сапфира. Получено удовлетворительное соответствие по значениям коэффициента поглощения в спектрах пленок и данным расчета. В спектрах КРС для образца с температурой роста  $650^\circ\text{C}$  наблюдаются четыре пика КРС (216.0, 261.0, 274.0 и  $304.0\text{ см}^{-1}$ ), которые качественно согласуются с теоретическими 4 пиками для тригональной фазы  $\text{Cr}_3\text{Si}$ : 117.6, 184.6 и  $295.65\text{ см}^{-1}$  (мода  $E_g$ ) и  $141.9\text{ см}^{-1}$  (мода  $A_{1g}$ ). Существование тригональной фазы  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , следовательно, доказано теоретически и экспериментально.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

### Литература

1. E. Mazzega, M. Michellini, F. Nava, Electrical properties of chromium silicide films:  $\text{Cr}_3\text{Si}$  and  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  // Journal of Physics F: Metal Physics, 17(5), 1987 P. 1135–1142.
2. C. Liu, X. Dai, L. Wang, Y. Si, C. Liu, L. Jin, Y. Liu, X. Zhang, G. Liu. Fabrication and physical properties of the zero-gap half-metallic  $\text{Cr}_3\text{Si}$  film with a DO3 structure // J. Appl. Phys. 138, 2025 P. 073903.

# Исследование кристаллической структуры и электронных свойств двумерных сплавов $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-(Li,Pb)}$ и $\text{Si}(111)2 \times 1\text{-(Li,Pb)}$

**Цуканов Д.А.<sup>1,2)</sup>, Рыжкова М.В.<sup>1)</sup>, Михалюк А.Н.<sup>2)</sup>, Бондаренко Л.В.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

e-mail: tsukanov@iacp.dvo.ru

В последнее время одномерные наноструктуры на кремнии привлекают особое внимание благодаря своим уникальным свойствам, которые не встречаются в объемных и даже двумерных пленках, например, формирование квазиодномерных металлических поверхностных состояний [1], наличие зарядовых и спиновых волн вследствие эффекта пайерлсовской неустойчивости [2] и т.д.

В данной работе исследованы кристаллическая структура, электронные свойства и электрическая проводимость двумерных сплавов  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-(Li,Pb)}$  и  $\text{Si}(111)2 \times 1\text{-(Li,Pb)}$ .

Кристаллическая структура и морфология поверхности изучена с помощью методов дифракции медленных электронов (ДМЭ) и сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Электронная структура исследована с помощью ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (УФЭСУР). Расчеты проводились методом плоских волн на базе программного обеспечения, реализованного в VASP (Vienna Ab initio Simulation Package). Оптимизация геометрии структур была выполнена с использованием функционала Пердью-Берка-Эрнзергофа (PBE) в приближении обобщенного градиента (GGA) методом PAW. Для построения структур и выявления структуры с наиболее низкой энергией использовался метод AIRSS. Расчетные атомные структуры соответствуют картинкам поверхности, полученным с помощью метода СТМ. Измерения поверхностной проводимости проводились с помощью четырехзондового метода *in situ* с расположением зондов по углам квадрата.

Установлено, что в структуре  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-LiPb}$  на ячейку приходится 1 атом лития, что соответствует покрытию лития 0,25 МС и 4 атома свинца (1 МС свинца). Для выяснения природы анизотропии электрического сопротивления была рассчитана зонная структура поверхностной фазы  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-(Li,Pb)}$  в направлении вдоль и поперек нанопроволок. Показано, вдоль направления нанопроволок присутствуют несколько глубоких электронных зон, тогда как поперек направления нанопроволок присутствует одна небольшая дырочная зона, пересекающая уровень Ферми. Показано также, что структура  $\text{Si}(111)2 \times 1\text{-(Li,Pb)}$  также демонстрирует высокую анизотропию электрического сопротивления. Расчетная картина УРУФЭС продемонстрировала, что вдоль нанопроволок структура электронных зон имеет глубокий расщепленный по спине электронный уровень, а в поперечном направлении поверхностные состояния, пересекающие уровень Ферми, отсутствуют (Рисунок 1).

Работа выполнена в рамках госзадания ИАПУ ДВО РАН (FWFW-2026-0007).

## Литература

1. T. Abukawa, et al. Surface electronic structure of a single-domain  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$  surface: a synchrotron radiation photoemission study // Surface Science. 325, 1995. P. 33.
2. T. Aruga. Charge-density waves on metal surfaces // Journal of Physics: Condensed Matter. 14, 2002 P. 8393.

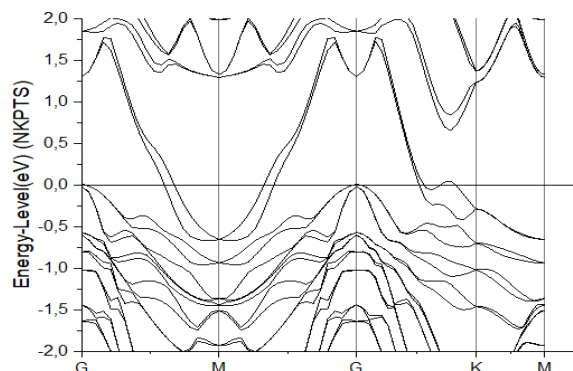


Рисунок 1 – Расчетный спектр УРУФЭС для поверхности  $\text{Si}(111)2 \times 1\text{-(Li,Pb)}$ .

# Исследование границы раздела тонких плёнок оксидов переходных металлов, полученных методом атомно-слоевого осаждения на кремниевой подложке

**Александров Н.В.<sup>1,2)</sup>, Горячев А.В.<sup>1)</sup>, Кириленко Е.П.<sup>1)</sup>, Громов В.Д.<sup>1,3)</sup>, Дудин А.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва

<sup>2)</sup>НИТУ МИСИС, Москва

<sup>3)</sup>Московский институт электронной техники, Зеленоград

e-mail: adelsandrov@mail.ru

Миниатюризация устройств электроники в общем и переход к ультратонким диэлектрическим плёнкам в частности ведут ко всё возрастающей роли переходных слоёв, состав и структура которых зависят не только от метода формирования плёнок, но и от их толщины [1]. Поскольку толщина переходных слоёв составляет несколько нанометров (рисунок 1), то для ультратонких плёнок толщина переходных слоёв оказывается сопоставима с толщиной самой плёнки. По этой причине на свойства диэлектрических плёнок влияют образование промежуточных химических соединений на границе раздела между слоями, повышенное содержание гидроокислов и неоднородное распределение химических элементов по толщине плёнок.

Для диагностики тонких и ультратонких плёнок и исследования границ раздела с соседними слоями необходима разработка специализированных методик анализа с высоким разрешением по глубине, а также отработка условий воздействия первичного и ионного пучков на материал образца.

В рамках данной работы получены оже-спектры сравнения для некоторых переходных металлов (Ti, Hf, Ta, Zr) и их основных химических соединений, отработаны условия оже-анализа с учётом артефактов воздействия электронного и ионного пучков, а также определены коэффициенты относительной элементной чувствительности для получения распределения концентраций химических соединений по толщине тонких плёнок. Проведено сравнение плёнок оксидов Ti, Ta, Hf и HfZr, полученных методом атомно-слоевого осаждения.

Корреляция между результатами анализа методами электронной оже-спектроскопии (ЭОС), время-пролётной масс-спектрометрии вторичных ионов и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) свидетельствует об образовании слоя силицида металла на границе раздела с кремниевой подложкой.

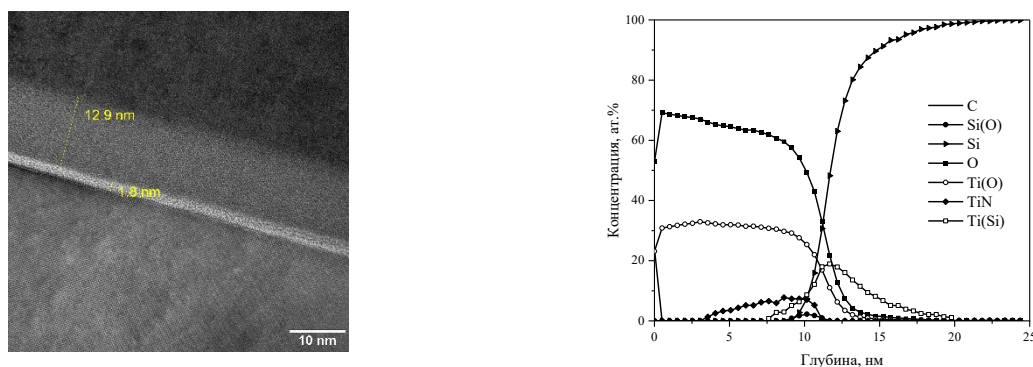


Рисунок 1 – Изображение плёнки  $\text{TiO}_x$ , полученное методом ПЭМ (слева) и распределение концентраций химических соединений по толщине той же плёнки, полученное методом ЭОС (справа).

## Литература

1. J.T. Gaskins. Review — Investigation and Review of the Thermal, Mechanical, Electrical, Optical, and Structural Properties of Atomic Layer Deposited High-k Dielectrics: Beryllium Oxide, Aluminum Oxide, Hafnium Oxide, and Aluminum Nitride // ECS Journal of Solid State Science and Technology, V. 6, №189, 2017.

## Молекулярно-лучевая эпитаксия наногетероструктур GeSn/Si со сверхтонкими слоями GeSn

**Скворцов И.В., Тимофеев В.А., Машанов В.И., Зиновьев В.А., Бацанов С.А.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики  
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск*

e-mail: i.skvortsov@isp.nsc.ru

В последние несколько десятилетий создание оптоэлектронных устройств на основе элементов IV группы (Ge, Si, Sn) стало перспективным направлением благодаря возможности монолитной интеграции оптоэлектронных устройств и электронных компонент микросхем на основе комплементарных структур металл-оксид-полупроводник (КМОП) на едином кремниевом кристалле [1]. Основные исследования направлены на разработку фотоприемных и светоизлучающих устройств ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона. Несмотря на достигнутые успехи в изучении материалов на основе GeSn, на сегодняшний день остаются практически не изученными начальные стадии роста, а также структурные и оптические свойства упругонапряженных слоев GeSn с высоким содержанием Sn, сформированных на подложке Si.

В данной работе исследованы начальные стадии формирования тонких пленок  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  с содержанием Sn 25–75% на поверхности Si(100) с применением метода низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии. На основе данных дифракции быстрых электронов, а также атомно-силовой микроскопии, установлено, что при осаждении пленок GeSn происходит образование двойного смачивающего слоя вследствие сегрегации олова, а затем формируются наноразмерные островки по механизму Странского-Крастанова. Изучены температурные зависимости критической толщины перехода от двумерного роста к трехмерному для пленок GeSn. Обнаружено, что в температурном диапазоне 50–350 °C критическая толщина увеличивается с ростом содержания Sn. Методом просвечивающей электронной микроскопии было продемонстрировано высокое кристаллическое совершенство множественных квантовых ям (МКЯ) GeSn/Si, включающих монослой  $\text{Ge}_{0.50}\text{Sn}_{0.50}$ . Слои твердого раствора заращивались слоями Si толщиной 6 нм. На рис. 1 приведено изображение высокоразрешающей электронной микроскопии (БРЭМ) от МКЯ GeSn/Si. Ранее было показано, что от таких структур наблюдается фотолюминесценция в ближнем ИК диапазоне в результате излучательной рекомбинации дырок, локализованных в слоях GeSn, и электронов, локализованных вблизи гетерограницы GeSn/Si [2].

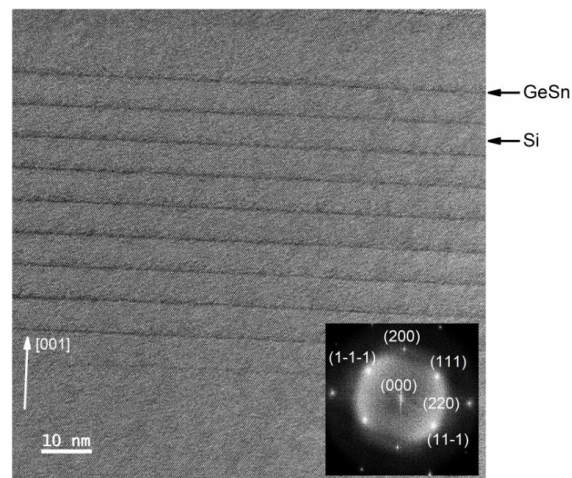


Рисунок 1 – БРЭМ-изображение МКЯ GeSn/Si. На вставке приведена картина микродифракции электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № FWGW-2024-0001.

### Литература

1. O. Moutanabbir et al. Monolithic infrared silicon photonics: The rise of (Si)GeSn semiconductors // Appl. Phys. Lett. 118, 2021 P. 110502.
2. I.V. Skvortsov et al. Multiple quantum wells with ultrathin high-Sn fraction GeSn layers: Structural and optical properties // Next Mater. 9, 2025 P. 101353.

## Сравнение термоэлектрических свойств тонких пленок CrSi и CrSi<sub>2</sub>, выращенных методом МЛЭ на Si(111) и Si(100)

**Галкин Н.Г., Горошко О.А., Галкин К.Н., Кропачев О.В., Горошко Д.Л., Доценко С.А.**

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

*e-mail: ngalk@dvo.ru*

Известно, что полупроводниковый дисилицид хрома (CrSi<sub>2</sub>) и полуметаллический моносилицид хрома (CrSi) растут эпитаксиально на кремнии в виде тонких пленок [1, 2]. Они обладают хорошей проводимостью и заметным коэффициентом Зеебека [2, 3], что позволяет их рассматривать в качестве возможных пленочных термоэлектриков для умеренных температур. Однако прямое сравнение их термоэлектрических свойств ранее не проводилось.

В СВВ-установке VARIAN с базовым давлением  $2 \times 10^{-10}$  Торр при температурах 350 и 450 °С методом МЛЭ были выращены тонкие (16 – 260 нм) поликристаллические пленки CrSi и CrSi<sub>2</sub> на кремниевых подложках с двумя ориентациями: (111) и (100). Кристаллическую структуру образцов исследовали методом ХРД на дифрактометре RIGAKU, а морфологию пленок - на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47. Термоэлектрические измерения образцов с пленками проводили на установке “Cryotel” в диапазоне температур 80-450 К. Для анализа шунтирования пленки подложкой и расчета коэффициента Зеебека пленок и их фактора мощности использовали подход, развитый в работе [4] с использованием двухслойной модели. Исследования кристаллической структуры позволили разделить образцы на три группы. В первую группу (образцы *A* и *B*) включены тонкие пленки CrSi<sub>2</sub> с различными ориентациями зерен: CrSi<sub>2</sub>(003)//Si(100), CrSi<sub>2</sub>(003)//Si(111) и CrSi<sub>2</sub>(2 $\bar{1}$ 1)//Si(111). Во вторую группу (образцы *C*, *D* и *E*) вошли тонкие пленки CrSi с преимущественной ориентацией трех типов зерен: CrSi (200), (210) и (211) на Si(111). В третью группу (образцы *F*, *G* и *H*) включены – пленки, включающие две фазы с ориентациями: CrSi (200), (210) (211) и CrSi<sub>2</sub> (003) на Si(111) и Si(100). Формирование силицидов подтвердилось также данными спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Установлено, что независимо от состава силицида хрома пленки с толщинами 16 – 33 нм имеют заметное шунтирование подложкой, поэтому полученные данные для пленок не являются истинными в рамках двухслойной модели [5]. В пленках больших толщин шунтированием можно пренебречь. Расчеты параметров пленок показали, что для пленки CrSi<sub>2</sub> в образце *B* (260 нм) максимум коэффициента Зеебека 190 мкВ/К и максимум фактора мощности (0.4 мВт/(м·К<sup>2</sup>)) наблюдаются при 420 К. Максимальные значения коэффициента Зеебека и фактора мощности наблюдаются для пленок CrSi в образцах *C* и *E* достигают 50 мкВ/К и 1.1-1.3 мВт/(м·К<sup>2</sup>) при T=450 К. Для пленки смеси CrSi + CrSi<sub>2</sub> в образце *G* (72 нм) максимальные значения коэффициента Зеебека и фактора мощности наблюдаются в диапазоне температур 250-400 К и составляют 75 - 80 мкВ/К и 0.7 мВт/(м·К<sup>2</sup>). Двухфазные пленки являются более перспективными за счет лучшей проводимости и хорошего коэффициента Зеебека.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

### Литература

1. N.G. Galkin, T.V. Velitchko, S.V. Skripka, A.B. Khrustalev. Semiconducting and structural properties of CrSi<sub>2</sub> A-type epitaxial films on Si(111) // Thin Solid Films. 280, 1996 P. 211-220.
2. N.G. Galkin, E.Y. Subbotin, K.N. Galkin, D.L. Goroshko, O.A. Goroshko, D.B. Migas, A.B. Filonov, I.A. Tkachenko, A.Y. Samardak. Ultra-thin and thin CrSi films on Si(111): II. Transport and magnetic properties // Journal of Materials Chemistry C. 13(6), 2025 P. 2875-2886.
3. M.A.E. Qader, R. Venkat, R. Kumar, T. Hartmann, P. Ginobbi, N. Newman, R. Singh. Structural, electrical, and thermoelectric properties of CrSi<sub>2</sub> thin films // Thin Solid Films. 545, 2013 P. 100-105.
4. A. Riss, M. Stöger, M. Parzer, F. Garmroudi, N. Reumann, B. Hinterleitner, T. Mori, and E. Bauer. Criteria for Erroneous Substrate Contribution to the Thermoelectric Performance of Thin Films // Phys. Rev. Applied. 19, 2023 P. 054024(1-10).



## Радиационно-стимулированный рост пленок 3R-CaSi<sub>2</sub> на подложках Si(111)

**Кацюба А.В., Двуреченский А.В., Зиновьев В.А., Зиновьева А.Ф., Камаев Г.Н., Володин В.А.**

Институт физики полупроводников имени А.В.Ржанова, 630090, Новосибирск, Россия

e-mail: kasyuba\_isp@bk.ru

В настоящее время кремний остается одним из важнейших материалов в полупроводниковой промышленности, позволяющим создавать разнообразные устройства. В последнее время надежды на прогресс в области полупроводниковых технологий возлагаются на открытие новых 2D-материалов, которые могут улучшить производительность и функциональность электронных и оптоэлектронных систем. Эпитаксиальное выращивание в настоящее время рассматривается как наиболее приемлемый метод получения силицена. Первые положительные результаты были получены на металлических подложках, но для успешного внедрения силицена в современную электронику необходимо уметь выращивать силицен на диэлектрических подложках. Недавно были получены многообещающие результаты по эпитаксиальному выращиванию силицена на слоях CaF<sub>2</sub>, модифицированных электронным пучком[1]. Нами было показано, что для успешного роста достаточно создать шаблонный слой CaSi<sub>2</sub> с гексагональной упаковкой. Мы использовали для этой цели электронный пучок, падающий под небольшим углом на поверхность растущей пленки CaF<sub>2</sub>. Луч вызывает процесс радиолиза на поверхности, в результате которого молекула CaF<sub>2</sub> распадается на кальций и фтор, фтор легко десорбируется, а кальций может связываться с кремнием с образованием CaSi<sub>2</sub>.

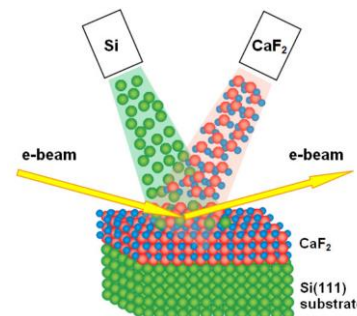


Рисунок 1 – Схема воздействия электронным лучом при совместном осаждении CaF<sub>2</sub> и Si.

В данной работе исследованы процессы образования CaSi<sub>2</sub> при одновременном осаждении кремния и CaF<sub>2</sub> при облучении быстрыми электронами как во время, так и после выращивания пленки. Было получено, что при заданной температуре роста (550°C) при одновременном осаждении кремния и CaF<sub>2</sub> фаза 3R-CaSi<sub>2</sub> всегда образуется как непосредственно в процессе роста, так и после формирования пленок различной толщины. Результаты, полученные в данной работе, позволяют предположить, что присутствие атомов Si по всей глубине пленки позволяет сократить время диффузии до событий столкновения (химического взаимодействия) между Ca и Si, как следствие, атомы фтора не успевают десорбироваться, а внедряются в междоузлия в решетке CaSi<sub>2</sub>, стабилизируя метастабильную фазу 3R-CaSi<sub>2</sub> при любой толщине облучаемого слоя. Было обнаружено, что некоторые атомы кремния не вступают в реакцию, собираясь в отдельные островки высотой до ≈100 нм, а также в наночастицы кремния, дающие характерные пики в спектре комбинационного рассеяния.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWGW-2022-0011 Физические явления в квантовых структурах для компонент наноэлектроники, нанофотоники и спинтроники).

### Литература

1. Zinovieva, V. Zinovyev, A. Katsyuba, V. A. Volodin, V. I. Muratov, and A. V. Dvurtechenskii, "Growth of silicene by molecular beam epitaxy on CaF<sub>2</sub>/Si(111) substrates modified by electron irradiation," JETP Lett. 119, 703–707 (2024).

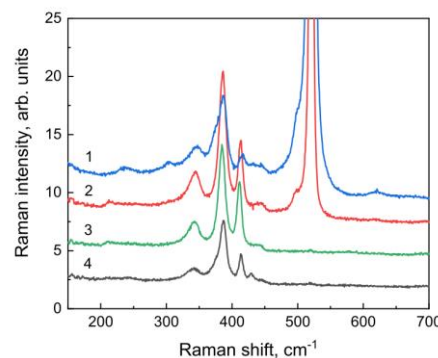


Рисунок 2 – Спектры комбинационного рассеяния света полученные: 1) для необлученной области, 2) облучение во время роста + дополнительно 15 минут после, 3) облученной во время роста + дополнительно 60 минут после, 4) пост облучение 60 минут.



## Исследование методов получения низкоомных слоёв кремния Р-типа для PIN-диодов СВЧ диапазона

Дубков С.А., Пухов Д.В., Халимова К.А., Дубкова А.С., Смирнова А.К.

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

e-mail: asdubkova@istokmw.ru

На сегодняшний день формирование контактного слоя проводится методом ионного легирования. Метод ионной имплантации позволяет получать слои с высоким уровнем легирования, однако из-за необходимости получения больших концентраций атомов бора ( $\sim 10^{19}$ - $10^{20}$  см<sup>-3</sup>) в р<sup>++</sup>-слое, процесс занимает продолжительное время (порядка нескольких рабочих дней) [1,2]. Альтернативным методом получения легированных слоев является эпитаксиальное наращивание и диффузия. Данные методы позволяют получать тонкие высоколегированные слои менее чем за 1 час.

Целью работы было определение оптимальных методов формирования контактных слоёв кремния для pin-диодов СВЧ диапазона. Для эксперимента было изготовлено несколько образцов pin-структур, в которых активный i-слой сформирован методом эпитаксиального наращивания при пониженной температуре [3], а контактный р<sup>++</sup>-слой методами: 1 – ионной имплантации, 2 – эпитаксиального наращивания, 3 – комбинированным методом (эпитаксиальный рост основного р-слоя с поверхностным легированием малой дозой и энергией), 4 – диффузии.

Главным требованием к структурам для pin-диодов является малое значение поверхностного сопротивления. Проведенные измерения показали, что поверхностное сопротивление структур, полученных методом эпитаксии имеют наибольшее значение. В то же время структуры, которые формировались методом ионной имплантации и комбинированным методом имеют поверхностное сопротивление в несколько раз меньше и различаются незначительно. На образцах, в которых контактный слой формировалась путем диффузии значения поверхностного сопротивления меньше, чем при эпитаксии, но больше, чем имплантация и комбинированный метод.

Работа pin-диода характеризуется крутизной вольтамперной характеристики (ВАХ) и падением прямого напряжения  $U_{ds}$ . Измерения ВАХ показали, что наилучшими параметрами обладает диод, полученный на структуре, сформированной комбинированным методом.

Таким образом, в работе показана возможность получения контактного слоя комбинированным методом, который представляет собой наращивание контактного р<sup>++</sup>-слоя эпитаксией из газовой фазы при пониженном давлении и температуре с последующим легированием поверхности малой дозой и энергией. Полученные опытным путем значения дают возможность сделать вывод о том, что данный метод является оптимальным для получения структур pin-диодов, так как показывает лучшие рабочие характеристики и снижает время формирования контактного слоя в 4 раза.

### Литература

1. Мейер Д., Эриксон Л., Дэвис Д. Ионное легирование полупроводников: (Кремний и германий): Пер. с англ / Под ред. канд. физ.-мат. наук В.М. Гусева. - Москва: Мир, 1973. – 296 с.
2. Буренков А.Ф. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей / А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов и др. – Минск: Изд-во БГУ, 1980. – 352 с.
3. А.С. Дубкова, В.Н. Рябов, И.В. Тарасов, Д.В. Пухов, В.Б. Кольцов. Особенности формирования низколегированных слоев кремния на сильнолегированных подложках // XII Всероссийская научно-техническая конференция "Электроника и микроэлектроника СВЧ", 2023 стр. 393 – 395.

## Исследование нанокompозитных структур на основе мезопористого кремния и золота

**Ким К.Б.<sup>1)</sup>, Черненко С.С.<sup>1)</sup>, Нифталиев С.И.<sup>1)</sup>, Гречкина М.В.<sup>2)</sup>, Чукавин А.И.<sup>3)</sup>,  
Лукин А.Н.<sup>2)</sup>, Леньшин А.С.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий,

<sup>2)</sup>Воронежский государственный университет,

<sup>3)</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

e-mail: lensshinas@mail.ru

Пористый кремний (por-Si) является перспективным материалом для сенсорики и фотоники благодаря развитой поверхности и уникальным оптическим свойствам. Модификация por-Si наночастицами золота позволяет создавать гибридные структуры с улучшенными электрофизическими и плазмонными характеристиками. Целью работы является получение и комплексное исследование структурно-морфологических особенностей, химического состава и функциональных свойств нанокompозитных гетероструктур на основе мезопористого кремния (por-Si) и золота, сформированных методом вакуумно-термического осаждения.

Мезопористый кремний получали электрохимическим анодированием пластин монокристаллического кремния КЭФ (100) с удельным сопротивлением 0.2 Ом·см. Золото наносили методом вакуумно-термического осаждения (установка ВУП-4) при давлении остаточных газов  $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$  мм рт. ст. Толщина пленки составляла 200 нм, скорость осаждения – 3–5 нм/с. Исследование морфологии проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ, JSM-6380LV) и атомно-силовой микроскопии (АСМ, SOLVER P47 PRO). Химический состав и состояние поверхности анализировали методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, ИК-Фурье спектроскопии (Vertex 70) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS, SPECS).

По данным РЭМ, сформированный пористый слой имеет толщину 9–10 мкм со средним диаметром пор около 150 нм. После осаждения золота наблюдается формирование сплошной пленки толщиной до 200 нм, при этом металл частично проникает в поры, не разрушая пористую структуру. Энергодисперсионный анализ подтвердил наличие золота (3.06 ат.%) в составе гибридного материала.

АСМ-исследования показали, что исходная поверхность por-Si характеризуется средней шероховатостью 36 нм. После осаждения золота параметры шероховатости незначительно снижаются (28 нм), при этом значение структурной энтропии остается практически неизменным, что свидетельствует о точном воспроизведении золотой пленкой рельефа подложки.

ИК-Фурье спектроскопия выявила уменьшение интенсивности полос, соответствующих связям Si–H (2087, 2106  $\text{см}^{-1}$ ), Si–O–Si (1032  $\text{см}^{-1}$ ) и Si–Si (616  $\text{см}^{-1}$ ), что связано с экранированием поверхности металлической пленкой. Отсутствие новых полос и сдвигов, существующих указывает на физический характер осаждения без химического взаимодействия. XPS-анализ подтвердил наличие металлического золота и отсутствие окисленных форм, а также наличие на поверхности как элементарного кремния, так и его оксидов.

Методом вакуумно-термического осаждения получены композитные наноструктуры por-Si/Au, представляющие собой сплошную золотую пленку толщиной ~200 нм, повторяющую рельеф пористой подложки. Установлено, что золото сохраняет металлическое состояние, не образует химических соединений с кремнием и частично заполняет поры. Сочетание развитой поверхности пористого кремния и проводящих свойств золота делает полученные структуры перспективными для создания высокочувствительных сенсорных элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-73-00149

## Атомная структура реконструкции Cu/TbSi<sub>2</sub> на Si(111)

**Бурковская П.В.<sup>1,2)</sup>, Котляр В.Г.<sup>1)</sup>, Утас Т.В.<sup>1)</sup>, Рыжкова М.В.<sup>1)</sup>, Жданов В.С.<sup>1)</sup>,  
Зотов А.В.<sup>1)</sup>, Саранин А.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

e-mail: burkovskaya\_pv@iacp.dvo.ru

Силициды редкоземельных металлов на поверхности кремния уже несколько десятилетий привлекают внимание научного сообщества. Из литературы известно, что структуры, содержащие редкоземельные металлы, обладают уникальными свойствами и являются перспективными материалами для применения в устройствах и системах, разработанных на основе кремния [1-2]. На данный момент изучено множество подобных соединений [3]. В частности, установлено строение силицида тербия TbSi<sub>2</sub> [4]. Возможное изменение свойств TbSi<sub>2</sub> в результате встраивания атомов Cu в верхний бислой кремния послужило мотивацией для проведения данного исследования.

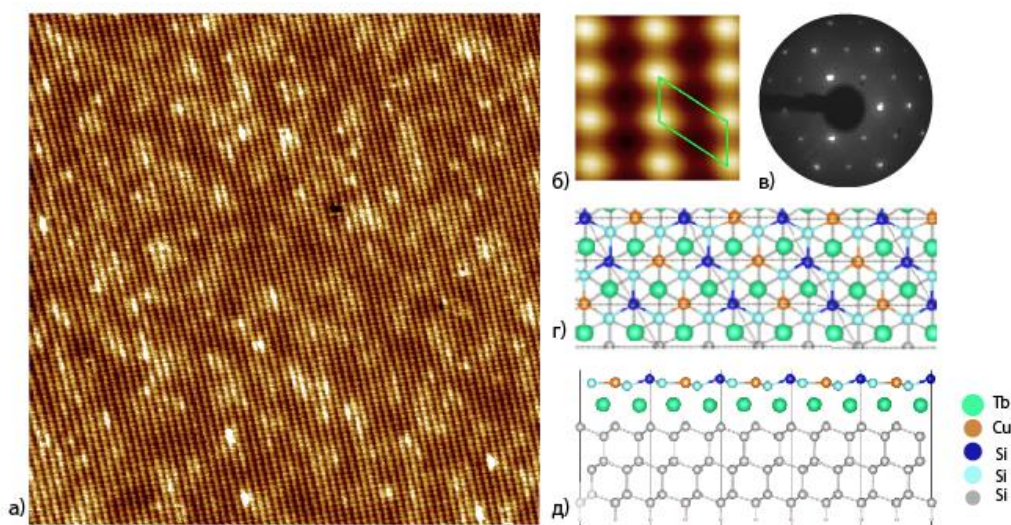


Рисунок 1 – Поверхностная реконструкция 2×1-(Cu/TbSi<sub>2</sub>). СТМ изображения заполненных состояний а) (50×50 нм<sup>2</sup>, -1В, 1нА) и б) (1,5×1,5 нм<sup>2</sup>, -1В, 1нА), выделена ячейка 2×1. в) ДМЭ картина поверхности, E = 42,5 эВ. Атомная модель структуры 2×1-(Cu/TbSi<sub>2</sub>) г) вид сверху и д) вид сбоку.

Данная работа выполнена на сверхвысоковакуумной экспериментальной установке OMICRON, оснащенной сканирующим туннельным микроскопом (СТМ) и дифракцией медленных электронов (ДМЭ). На рис.1 а), б) представлены СТМ изображения поверхности 2×1-(Cu/TbSi<sub>2</sub>) и картина дифракции на рис.1 в). Формирование данной реконструкции происходило в процессе адсорбции 0,5 МС Cu при температуре около 500 °С на предварительно подготовленную поверхность силицида Si(111)1×1-TbSi<sub>2</sub> с покрытием 1 МС Tb. На основе данных СТМ и неэмпирических расчетов предложена модель структуры 2×1-(Cu/TbSi<sub>2</sub>) (рис.1 г), д)). Атомы Cu модифицируют верхний бислой кремния, замещая его атомы таким образом, что на каждую ячейку 2×1 приходится 2 атома Tb, 1 атом Cu и 3 атома Si.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

### Литература

1. K. N. Tu, R. D. Thompson, B. Y. Tsaur. Low Schottky barrier of rare-earth silicide on n-Si // Appl. Phys. Lett. 38, 1981 P. 626–628.
2. S. Vandr , C. Preinesberger, W. Busse, M. D hne. Conservation of flatband conditions for DySi<sub>2</sub> monolayers on n-type Si(111) // Appl. Phys. Lett.. 78, 2001 P. 2012.
3. S.Sanna et al. Rare-earth silicide thin films on the Si(111) surface // Phys. Rev. B 93, 2016 P. 195407
4. M. Franz et al. Growth and electronic properties of Tb silicide layers on Si(111) // J. Vac. Sci. Technol. A 34, 2016 P. 061503.

## Сендвич-структура Al/Si на базе редкоземельного силицида HoSi<sub>2</sub>/Si(111)

**Жданов В.С.<sup>1)</sup>, Олянич Д.А.<sup>1)</sup>, Утас Т.В.<sup>1)</sup>, Грузнев Д.В.<sup>1)</sup>, Вековшинин Ю.Е.<sup>1,2)</sup>,  
Тупчая А.Ю.<sup>1)</sup>, Бондаренко Л.В.<sup>1)</sup>, Котляр В.Г.<sup>1)</sup>, Бурковская П.В.<sup>1,2)</sup>, Михалюк А.Н.<sup>1,2)</sup>,  
Зотов А.В.<sup>1)</sup>, Саранин А.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

e-mail: vzhdanov@mail.dvo.ru

Структуры пониженной размерности на основе редкоземельных элементов привлекают внимание с точки зрения возможных необычных спиновых структур [1]. Особый интерес вызывают наноматериалы на основе редкоземельных силицидов [2, 3]. Создание новых функциональных наноматериалов на их основе предоставляет потенциальную возможность использования их в перспективных устройствах спинтроники.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), дифракции медленных электронов (ДМЭ) и расчетов в рамках теории функционала плотности (ТФП) системы (Ho, Al)/Si(111).

Показано, что сформированная плёнка

является эпитаксиальной, равномерно покрывает всю доступную поверхность подложки и состоит из множества доменов размером порядка  $5\sqrt{3} \times 5\sqrt{3}$  (рисунок 1 (а)), при этом внутри домена периодичность  $1 \times 1$ . ТФП расчёты из первых принципов показали, что структурно данная система представляет из себя «сендвич»: на поверхности кремниевой подложки находится силицид HoSi<sub>2</sub> с модифицированным алюминием верхним кремниевым бислоем, где атомы Al находятся внутри этого Si бислоя. Данную систему можно рассматривать как комбинированную структуру из HoSi<sub>2</sub> и двух слоёв  $\gamma$ -фазы Si-Al [4], причём верхний слой  $\gamma$ -фазы перевернут. Формирование системы происходит без массопереноса, плёнка HoAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> является плоской и однослойной, что делает её перспективной для дальнейших технологических применений, в том числе для дальнейших комбинаций двумерных материалов. Электронная зонная структура полученной системы также является модифицированной версией зонной структуры HoSi<sub>2</sub>. HoAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> имеет те же зоны пересекающие уровень Ферми, а также по дополнительному дырочному и электронному карману в Г и М точках, что свидетельствует о металлическом характере плёнки и большем количестве носителей относительно исходного HoSi<sub>2</sub>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00181, <https://rscf.ru/project/24-12-00181/>. Вычисления проводились с использованием оборудования ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).

### Литература

1. A. N. Mihalyuk et al. // Nanoscale. 2022. V. 14. P. 14732.
2. D. V. Averyanov et al. // JMST. 2023. V. 164. P. 179.
3. I. S. Sokolov et al. // Small. 2023. V. 19. P. 2301295.
4. A. A. Saranin et al. // Surface Science. 2002. V. 517. P. 151.

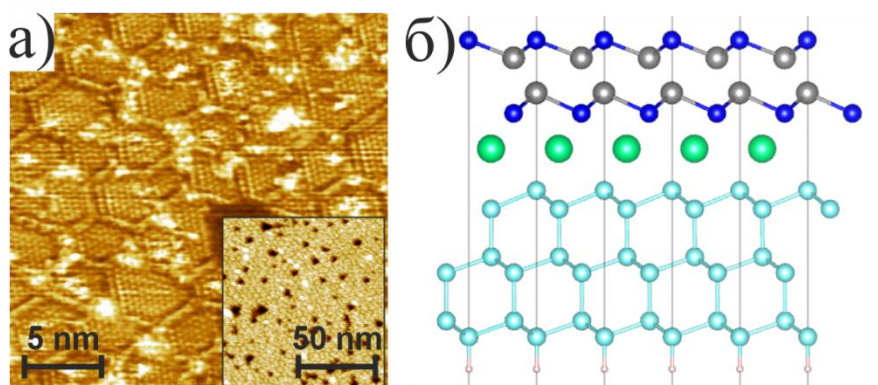


Рисунок 1 – (а) СТМ изображения высокого разрешения полученной плёнки HoAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>(20nm×20nm). (б) Модель отражающая атомное устройство полученной системы. Атомы Si изображены в синих цветах, атомы Al в серых, атомы Ho показаны зеленым.

## Влияние иттрия на структурные изменения поверхности Si(111)-5×2-Au

Олянич Д.А.<sup>1)</sup>, Жданов В.С.<sup>1)</sup>, Утас Т.В.<sup>1)</sup>, Грузнев Д.В.<sup>1)</sup>, Вековишин Ю.Е.<sup>1,2)</sup>,  
Тупчая А.Ю.<sup>1)</sup>, Бондаренко Л.В.<sup>1)</sup>, Михалюк А.Н.<sup>1,2)</sup>, Зотов А.В.<sup>1)</sup>, Саранин А.А.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: olyanich@iacp.dvo.ru

В последние годы значительное внимание уделяется исследованию структурных и электронных свойств поверхностей кремния с адсорбированными металлами, особенно в контексте формирования упорядоченных наноструктур. Поверхность Si(111)-5×2-Au, обладающая металлической проводимостью, является удобной модельной системой для изучения влияния примесных атомов редкоземельных металлов, в частности иттрия, на её структурные и электронные характеристики [1].

В работе с помощью методов сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и дифракции медленных электронов (ДМЭ) исследовано формирование структуры Si(111)-c(12×2)-(Au,Y) при осаждении иттрия на поверхность Si(111)-5×2-Au, а также её изменения в зависимости от покрытия и термической обработки.

Установлено, что осаждение Y при комнатной температуре (КТ) приводит к образованию беспорядочно расположенных кластеров, размер которых увеличивается с ростом покрытия. Последующий отжиг при 520 °C вызывает значительные структурные изменения: при покрытии Y < 0,04 МС (1 МС = 7,8×10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) количество адатомов кремния уменьшается с 0,0273 до 0,0098 МС; при покрытии 0,04–0,14 МС ряды с периодом 5a<sub>0</sub> (1 a<sub>0</sub> = 3,84 Å) переходят в ряды с периодом 6a<sub>0</sub>, формируя упорядоченную структуру c(12×2)-(Au,Y). При покрытии Y > 0,14 МС структура с периодичностью c(12×2) исчезает, и на поверхности образуется структура с периодичностью 6×6.

Состав структуры c(12×2)-(Au,Y) включает 0,59 МС атомов Au и 0,14 МС атомов Y (14 ± 1 атомов Au и 3–4 атома Y на ячейку c(12×2)). Источниками Au и Y служили вольфрамовые нити; скорость осаждения откалибрована по кварцевым микровесам и поверхностным структурам с известным покрытием. Полученные результаты демонстрируют активное взаимодействие иттрия с поверхностью Si(111)-5×2-Au, изменяющее её структуру и потенциально влияющее на электронные свойства системы. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFW-2026-0007).

## Литература

1. Kwon, Se Gab and Kang, Myung Ho. Identification of the Au Coverage and Structure of the Au/Si(111)-(5×2) Surface // Phys. Rev. Lett., 113, 2014, 086101.



# Формирование и электрическая проводимость поверхностных структур Si(111)–InSn

**Рыжкова М.В.<sup>1)</sup>, Цуканов Д.А.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: horgax@yandex.ru

Поверхностные структуры на кремнии, формирующиеся при адсорбции атомов металлов, представляют интерес для исследования низкоразмерных электронных систем и атомарно-тонких проводящих слоев. Особое внимание привлекают системы, образующиеся при совместной адсорбции различных металлов на поверхность Si(111), поскольку в них возможно формирование новых упорядоченных поверхностных фаз со сложной атомной структурой и модифицированными электронными свойствами, например [1].

В данной работе исследованы процессы формирования структур Si(111)–InSn и их электрическая проводимость. Показано, что при комнатной температуре осаждение Sn на Si(111) с поверхностной фазой In приводит к его вытеснению и образованию сплошной пленки Sn. Это следует из поведения электрической проводимости (рис. 1): после осаждения около 0,4 МС Sn на достаточно толстую фазу индия  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  (с покрытием  $\sim 2,1$  МС) значение проводимости становится практически таким же, как и после формирования пленки Sn, осажденной на чистую поверхность Si(111)  $7 \times 7$ . Дополнительным подтверждением служат данные дифракции медленных электронов: рефлексы, соответствующие структуре  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ –In, исчезают, и появляются рефлексы, характерные для пленки Sn.

В то же время при повышенных температурах осаждение олова на Si(111)–In с различным покрытием приводит к формированию большого числа совместных поверхностных структур In–Sn. Впервые обнаружено около десяти упорядоченных фаз (табл. 1), различающихся поверхностной периодичностью. Для всех структур получены дифракционные картины ДМЭ. Измерена поверхностная электрическая проводимость сформированных фаз; для двух структур обнаружена выраженная анизотропия электрической проводимости.

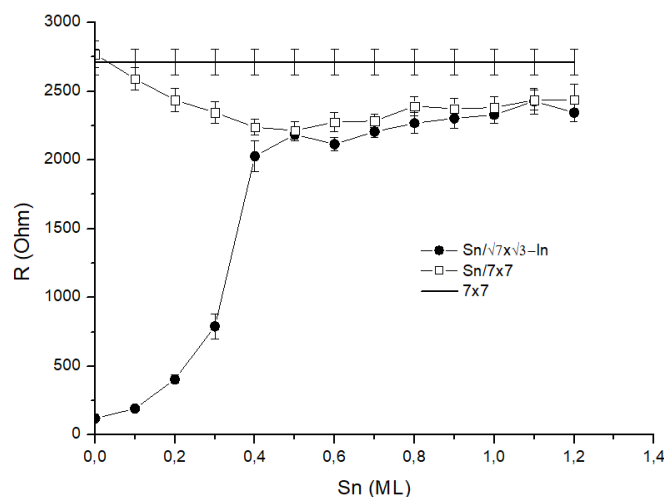


Рисунок 1 – Зависимость электрического сопротивления образца от покрытия Sn при напылении на Si(111)  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ –In при комнатной температуре.

Таблица 1 – Условия формирования структур и электрическая проводимость.

| структура                    | Sn, МС | In, МС | Температура, °С | $\sigma$ , $10^{-5}$ S/□ | $\sigma_{\perp}/\sigma_{\parallel}$ |
|------------------------------|--------|--------|-----------------|--------------------------|-------------------------------------|
| $7 \times 7$                 | -      | -      | -               | 4.1                      | 0.97                                |
| $3\sqrt{3} \times 10$        | 0.6    | 0.3    | 170-350         | 6.6                      | 0.83                                |
| $3\sqrt{3} \times \sqrt{73}$ | 0.6    | 0.3    | 560             | -                        | -                                   |
| $5 \times 5$                 | 0.3    | 0.3    | 170-500         | 4.7                      | 0.92                                |
| $5 \times 2\sqrt{21}$        | 0.3    | 1.2    | 170-500         | 6.7                      | 0.69                                |
| $3\sqrt{3} \times 4$         | 0.1    | 0.6    | 500             | 4.5                      | 0.93                                |
| $5 \times 10$                | 0.3    | 1      | 170-500         | 6.6                      | 0.62                                |
| $2\sqrt{3} \times 7$         | 0.6    | 1      | 350-500         | 6.5                      | 0.93                                |
| $2\sqrt{3} \times 5$         | 0.6    | 2.1    | 170-550         | -                        | -                                   |
| $6 \times 6$                 | 1      | 0.3    | 450-500         | -                        | -                                   |
| $4\sqrt{3} \times 6$         | 1      | 2.1    | 170-500         | 5.5                      | 0.81                                |

## Литература

1. F. Klasing, T. Frigge, B. Hafke, B. Krenzer, S. Wall, A. Hanisch-Blicharski, and M. Horn-von Hoegen. Hysteresis proves that the In/Si(111)  $(8 \times 2)$  to  $(4 \times 1)$  phase transition is first-order // PHYSICAL REVIEW B 89, 2014, 121107.



## Двумерный силицид Pd на Si(111)

***Тупчая А.Ю.<sup>1)</sup>, Бондаренко Л.В.<sup>1)</sup>, Вековшинин Ю.Е.<sup>1)</sup>, Утас Т.В.<sup>1)</sup>, Брыкин Л.О.<sup>1,2)</sup>,  
Михалюк А.Н.<sup>1,2)</sup>, Грузнев Д.В.<sup>1,2)</sup>, Зотов А.В.<sup>1)</sup>, Саранин А.А.<sup>1)</sup>***

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: a.tupchaya@gmail.com

Исследования двумерных материалов в настоящее время являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений физики конденсированного состояния и материаловедения. Однако, несмотря на высокую активность в данной области, сохраняется заметный пробел в изучении двумерных силицидов металлов и способов их модификации, хотя именно силициды обладают отличной совместимостью с кремниевыми технологиями, лежащими в основе современной микроэлектроники.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса формирования двумерного силицида палладия на поверхности кремния, а также его характеристики методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (УФЭСУР).

Экспериментально было обнаружено, что осаждение атомов палладия при температуре  $\sim 450^\circ\text{C}$  на исходную поверхность Si(111)  $7 \times 7$  приводит к формированию хорошо упорядоченного слоя с периодом решетки  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  (рис. 1а). Как видно на СТМ изображении, структура представляет собой сотовый массив, в котором каждая ячейка образована тремя яркими и тремя менее яркими максимумами. Наблюдаемое различие в контрасте указывает на наличие у системы симметрии  $C_{3v}$ .

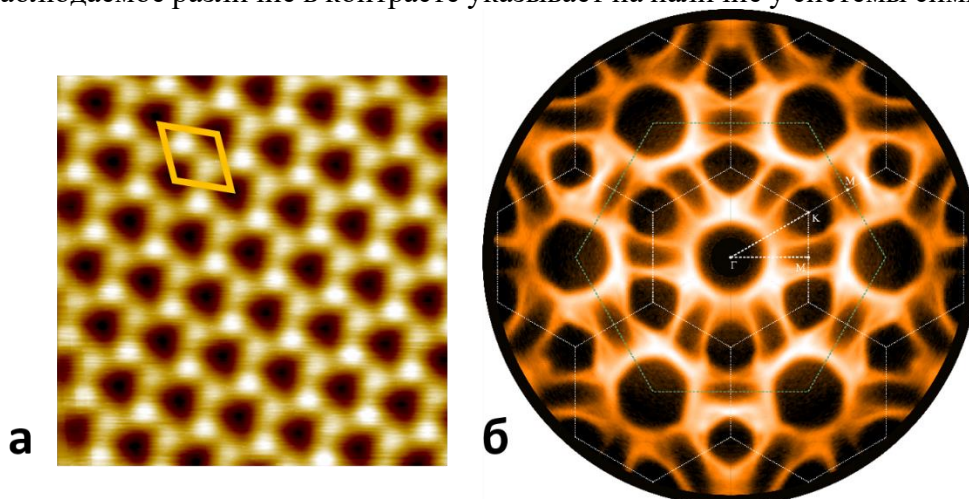


Рисунок 2 – Двумерный силицид палладия на поверхности Si(111): (а)  $4 \times 4 \text{ nm}^2$  СТМ изображение ( $-0,2 \text{ В}$ ;  $0,8 \text{ нА}$ ), желтым ромбом обозначена ячейка  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ , (б) поверхность Ферми, белыми шестиугольниками обозначены зоны Бриллюэна  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ , зеленым шестиугольником обозначена зона Бриллюэна  $1 \times 1$ . Буквами Г, К и М обозначены высокосимметричные точки обратного пространства.

Электронная структура сформированного двумерного силицида демонстрирует выраженный металлический характер (рис. 1б). Анализ дисперсии электронных состояний при построении срезов по энергиям ниже уровня Ферми (ЕФ) позволяет сделать вывод о наличии седловой точки в направлении Г–К, расположенной на  $70 \text{ мэВ}$  ниже ЕФ. Такое положение делает систему перспективной с точки зрения управления уровнем Ферми с целью увеличения плотности состояний на нем и реализации сильно коррелированных электронных состояний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00790, <https://rscf.ru/project/25-22-00790/>

## Влияние соотношения потоков Ca/Si на формирование пленки $\text{Ca}_2\text{Si}$ на Si(111)

**Галкин К.Н.<sup>1)</sup>, Кропачев О.В.<sup>1)</sup>, Горошко Д.Л.<sup>1)</sup>, Герасименко А.В.<sup>2)</sup>, Галкин Н.Г.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

<sup>2)</sup>Институт химии ДВО РАН, Владивосток

e-mail: galkinkn@iacp.dvo.ru

В системе Ca-Si возможно формирование 6 силицидов:  $\text{Ca}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ca}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{CaSi}$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_4$ ,  $\text{Ca}_{14}\text{Si}_{19}$  и  $\text{CaSi}_2$ . Часть этих силицидов ( $\text{Ca}_2\text{Si}$ ,  $\text{Ca}_3\text{Si}_4$ ,  $\text{Ca}_{14}\text{Si}_{19}$ ) обладают полупроводниковыми свойствами, а часть ( $\text{Ca}_5\text{Si}_3$ ,  $\text{CaSi}$ ,  $\text{CaSi}_2$ ) – полуметаллическими [1]. Полупроводниковый полусилицид кальция ( $\text{Ca}_2\text{Si}$ ) обычно получали из силицида магния ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) путем замещения атомы магния атомами кальция [2]. Формирование однофазной пленки при температурах 300-350 °С осложнено близкими значениями энтальпии между  $\text{Ca}_2\text{Si}$  и  $\text{Ca}_5\text{Si}_3$  [4].

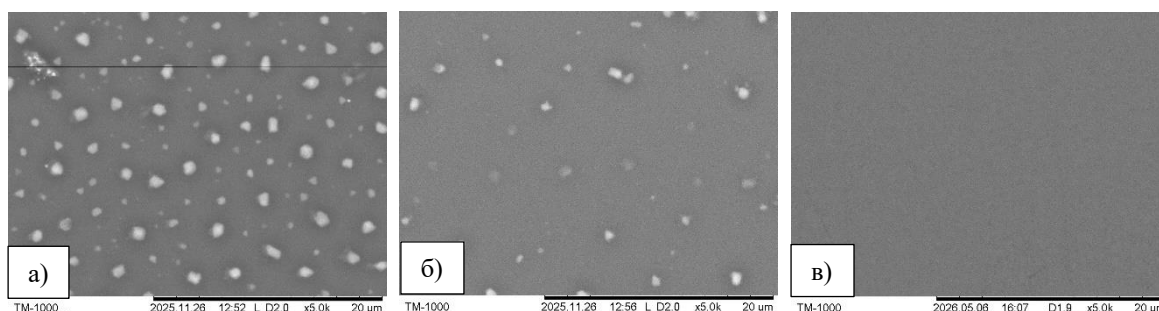


Рисунок 1 – Изображения РЭМ для образцов с соотношением потоков: а) 4.4:1, б) 7.6:1 и в) 15:1

В данной работе предложен метод пересыщения потока атомами кальция в 4-19 раз по отношению к потоку кремния, при росте на подложке кремния при температуре 300-330 °С. Из Рисунка 1 видно, что при соотношении потоков 4.4:1 на поверхности наблюдаются помимо ровной пленки еще и островки с размерами 50 до 1000 нм и плотностью  $2 \times 10^{11}$  шт/м<sup>2</sup>. По данным спектров комбинационного рассеяния (КРС) поверхность – сплошная пленка  $\text{Ca}_2\text{Si}$ , а островки состоят из Si. Увеличение скорости потока до 7.6:1 приводит к уменьшению плотности островков в 3 раза ( $6-7 \times 10^{10}$  шт/м<sup>2</sup>). При соотношениях потоков 15:1 и более на поверхности не наблюдаются островки кремния.

По данным оптической спектрофотометрии на отражение и пропуск (Рисунок 2) все пленки характеризуются пиками, соответствующими полусилициду кальция. При малых потоках коэффициент отражения не превышает 41 %, тогда как при потоке 15:1 и выше составляет 47 % при 2.1 эВ. При потоках 15:1 и более наблюдается уменьшение коэффициента пропускания при энергиях менее 0.3 эВ, что возможно является следствием легирования пленки атомами кальция.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWF-2026-0007).

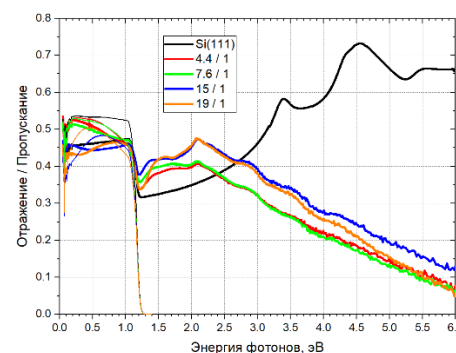


Рисунок 2 – Спектры отражения и пропускания

## Литература

1. Manfretti P., Fornasini M.L., Palenzona A., The phase diagram of the Ca-Si system // *Intermetallics* 8 (2000) 223-228.
2. Takagi N., Sato Yu., Matsuyama T., Tatsuoka H., Tanaka M., Fengmin Chu, Kuwabara H., Growth and structural properties of  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{Ca}_2\text{Si}$  bulk crystals // *Applied Surface Science* 244 (2005) 330–333.
3. Brutti S., Ciccioli A., Balducci G., Gigli G., Manfrinetti P., Napoletano M., Thermodynamic stabilities of intermediate phases in the Ca-Si system // *Journal of Alloys and Compounds* 317–318 (2001) 525–531.

## Эффект слабой локализации в ультратонкой пленке FeSi на Si(111)

Горошко Д.Л.<sup>1)</sup>, Данилюк А.Л.<sup>2)</sup>, Субботин Е.Ю.<sup>1)</sup>, Галкин К.Н.<sup>1)</sup>,  
Мигас Д.Б.<sup>2)</sup>, Галкин Н.Г.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Беларусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

e-mail: goroshko@iacp.dvo.ru

В работе [1] методами первопринципных расчетов электронной структуры объемного моносилицида железа (FeSi) в кубической ( $P2_13$ ) и моноклинной ( $P2_1$ ) структурах доказано, что моноклинная фаза FeSi имеет минимальную полную энергию и характеризуется высокой динамической устойчивостью к фононному возбуждению. В экспериментальной части работы [1] показано, что ультратонкая (УТ) пленка FeSi имеет моноклинную структуру, для которой характерен немонотонный характер температурной зависимости удельного сопротивления  $\rho(T)$ , на котором в работе [2] выделены участок роста  $\rho$  от 160 К до 65 К с  $E_g=14.8$  мэВ и дальнейший рост  $\rho(T)$  без насыщения до температуры 1.5 К. Однако механизм проводимости на последнем участке не был определен.

Рост УТ (3.2 нм) пленки FeSi проводили методом твердофазной эпитаксии при  $T=350$  °С в сверхвысоковакуумной камере с базовым вакуумом  $2 \times 10^{-10}$  торр. Для выяснения природы металлической проводимости в УТ пленке FeSi проводили подгонку низкотемпературного (2-40 К) магнетосопротивления (МС) и коэффициента Холла ( $R_H$ ) с учетом в рамках двумерной (2D) модели слабой локализации [3].

Обобщая данные магнетосопротивления и холловских измерений по пленке FeSi, можно сказать, что в ней с ростом температуры и напряженности магнитного поля ( $H$ ) не обнаружены признаки квадратичной зависимостей ( $\sim H^2$ ), а наблюдаются зависимости  $\sim H^s$ , где  $s=0.3-1.0$ , а также наличие положительного и отрицательного МС, кроссоверов между ними и немонотонные зависимости МС( $H$ ). Это говорит о том, что МС за счет силы Лоренца [4] (изгиб траекторий) не проявляется в рассматриваемой УТ пленке FeSi, а механизм МС связан с эффектами слабой локализации (WL) [3]. Из холловских измерений установлено, что  $R_H$  для пленки FeSi во всем температурном диапазоне положительный ( $R_H > 0$ ), что означает превалирование дырочной проводимости.

Для интерпретации низкотемпературной проводимости применялись 2D-модель слабой локализации [3], с помощью которой проведено фитирование экспериментальных данных и получены коэффициенты диффузии и времена дефазировки, спин-орбитального рассеяния и рассеяния на магнитных примесях. Установлено, что полученные результаты можно объяснить конкуренцией вкладов в квантовую поправку к магнитопроводимости как магнитного поля, так и эффективных полей, обусловленных дефазировкой  $B_\phi$ , спин-орбитальным рассеянием  $B_{so}$  и рассеянием на магнитных примесях  $B_s$ .

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

## Литература

1. N.G. Galkin, D.B. Migas, N.V. Medvedeva, A.B. Filonov, a.o. New monoclinic ground state of FeSi // Computational Material Science. 233, 2024 P. 112762.
2. Н.Г. Галкин, И.М. Чернев, Е.Ю. Субботин, О.А. Горошко, С.А. Доценко, А.М. Маслов, К.Н. Галкин, О.В. Кропачев, Д.Л. Горошко, А.Ю. Самардак, А.В. Герасименко, Е.В. Аргунов. Структура, транспортные и магнитные свойства ультратонких и тонких пленок FeSi на Si(111) // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 4, 2023 С.3-16.
3. B.L. Altshuler, D.E. Khmel'nitzkii, A.I. Larkin. Magnetoresistance and Hall effect in a disordered two-dimensional electron gas // Phys. Rev. B 22, 1980 P. 5142-5150.
4. C. Kittel, P. McEuen. Introduction to solid state physics. 8th Edition, John Willey & Sons, Singapore, Pte Ltd, 2005.

## Низкотемпературный магнитотранспорт в тонких пленках CoSi на кремниевой подложке

**Горошко Д.Л., Галкин К.Н., Кропачев О.В., Чернев И.М., Маслов А.М.,  
Горошко О.А., Галкин Н.Г.**

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*  
e-mail: goroshko@iacp.dvo.ru

Исследование низкотемпературных свойств тонких плёнок моносилицида кобальта (CoSi) представляет особый интерес в силу их уникального положения в обширном семействе моносилицидов переходных металлов (CrSi, MnSi, FeSi, CoSi). Их структура, характеризующаяся отсутствием инверсионной симметрии, часто приводит к возникновению нетривиальных электронных состояний, что стало ключевой причиной их исследований в современной физике конденсированного состояния [1]. Среди этих материалов CoSi выделяется как топологический вейлевский полуметалл [2], демонстрирующий выдающиеся электрические и термоэлектрические свойства, которые были изучены в объёмных монокристаллических и поликристаллических образцах [3]. Однако сохраняется значительный пробел в знаниях о том, как эти явления проявляются в тонкоплёночных структурах [4], что делает это направление исследований актуальным и малоизученным.

Переход к тонкоплёночным системам открывает новые грани в этих исследованиях благодаря эффектам квантового ограничения и модифицированным состояниям на поверхности и границах раздела, которые могут кардинально изменить поведение материала. Измерения эффекта Холла становятся особенно информативными в таких структурах, поскольку они могут выявить смену механизмов переноса (объёмный/поверхностный) в зависимости от толщины, а также позволяют исследовать возможные аномальные вклады в эффект Холла, возникающие из-за топологической природы материала или формирования спиновых структур. Изучение электропроводности тонких плёнок при низких температурах может обнаружить новые механизмы рассеяния, отличные от поведения в объёмных образцах, возможно, связанные с дефектами на границах раздела или электрон-фононным взаимодействием. Пониженная размерность может также усиливать спин-орбитальные эффекты, что делает измерения магнетосопротивления критически важными для обнаружения возможных признаков киральной аномалии или других топологических транспортных явлений, которые могут подавляться в объёмных образцах.

В данной работе мы исследовали электропроводность и эффект Холла в диапазоне температур 4-300 К в тонких пленках CoSi, сформированных методом твердофазной эпитаксии из слоев кобальта толщиной до 10 нм на поверхности монокристаллического кремния в условиях сверхвысокого вакуума. На основе анализа полевых и температурных зависимостей продольного и поперечного магнетосопротивления обсуждаются особенности переноса заряда в пленках моносилицида кобальта разной толщины.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFW-2026-0007).

### Литература

1. P. Dutta, S.K. Pandey. Investigating the electronic structure of MSi (M= Cr, Mn, Fe & Co) and calculating  $U_{\text{eff}}$  &  $J$  by using cDFT // Comput. Condens. Matter. Elsevier, 16, 2018 стр. e00325.
2. D.A. Pshenay-Severin и др. Band structure and unconventional electronic topology of CoSi // J. Phys. Condens. Matter. IOP Publishing, 30, 2018 стр. 135501.
3. D.A. Salamatin и др. Anomalous Positron Lifetime in Single Crystal of Weyl Semimetal CoSi // Crystals. MDPI, 13, 2023 стр. 509.
4. M.T. Normuradov и др. Structures for constructing devices from formed Mn<sub>4</sub>Si<sub>7</sub> and CoSi films // Adv. Phys. Res., 4, 2022 стр. 142–154.

## Особенности транспорта и термоэлектрических свойств тонких пленок $\text{Cr}_3\text{Si}$ на $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$

**Галкин Н.Г., Субботин Е.Ю., Галкин К.Н., Горошко О.А., Горошко Д.Л.**

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*  
e-mail: jons712@mail.ru

Формирование и структура металлических силицидов хрома ( $\text{Cr}_3\text{Si}$ ,  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  и  $\text{CrSi}$ ) [1-4], подробно исследовались ранее и в последние годы. Металлические силициды  $\text{Cr}_3\text{Si}$  и  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  исследовались, как в виде объемных образцов [2], так и в виде пленок на диэлектрической подложке [1]. Однако информация об электронной и фононной структуре и оптических свойствах тонких пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , выращенных на сапфире, отсутствует в настоящее время.

Эксперименты по росту тонких пленок силицида трихрома ( $\text{Cr}_3\text{Si}$ ) на подложке  $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$  проводили в СВВ-установке VARIAN ( $2 \times 10^{-10}$  Торр). Для роста тонких пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  использовали метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при температурах 350, 500 и 650 °С. Выращены три образца (*A*, *B* и *C*), для которых определены скорости осаждения хрома и кремния, а также рассчитаны отношения потоков хрома к кремнию. Исследования кристаллической структуры выращенных пленок показали [5], что наблюдается формирование как кубической, так и тригональной фаз  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , которые показывают особенности оптической и фононной структуры.

В данной работе проведены исследования транспорта и термоэлектрических свойств пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$ , выращенных при температурах подложки 350 и 500 °С, которые являются сплошными по данным ВР ПЭМ [5]. Температурные (80-400 К) слоевого сопротивления и коэффициента Зеебека проводили на лабораторной установке «Cryotel» в атмосфере азота в диапазоне температур от 80 К до 450 К и рабочих токах от 10 до 100 мкА. Погрешность измерения тока составила  $\pm 0,5\%$ , а погрешность измерения напряжения -  $\pm 0,1\%$ .

Для пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  в образцах *B* и *C* проведены температурные исследования слоевого сопротивления и коэффициента Зеебека в диапазоне температур 80-450 К. Пленки показали температурные зависимости слоевого сопротивления, близкие к линейным, что характерно для металлических пленок. Температурные зависимости коэффициента Зеебека показали, что основной вклад в термо-эдс вносят электроны во всем диапазоне температур: 80 – 450 К, а минимальное удельное сопротивление ( $2 \cdot 10^{-4}$  Ом·см) имеет – пленка в образце *C* с нанокристаллической структурой  $\text{Cr}_3\text{Si}$  [5]. Расчет фактора мощности из удельного сопротивления и коэффициента Зеебека показал, что в области температур 150-250 К он максимален ( $0,085$  мВт/К<sup>2</sup>) для образца *C* и минимален ( $0,07$  мВт/К<sup>2</sup>) для образца *B*. Следовательно кристаллическое качество сплошных пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  незначительно влияет на величину фактора мощности и характер его зависимости от температуры, что перспективно для термоэлектрических пленочных преобразователей, работающих при комнатной температуре.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

### Литература

1. E. Mazzega, M. Michelini, F. Nava, Electrical properties of chromium silicide films:  $\text{Cr}_3\text{Si}$  and  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  // Journal of Physics F: Metal Physics, 17(5), 1987 p. 1135–1142.
2. G.A. Yakaboylu, K. Sabolsky, E.M. Sabolsky, Chromium silicide-based composites fabricated via solid-state reactions: Phase development, oxidation behavior and electrical properties at high-temperatures // Journal of Alloys and Compounds, 769, 2018 p. 430–442.
3. P. Wetzel, C. Pirri, J. C. Peruchetti, D. Bolmont, and G. Gewinner, Formation of  $\text{CrSi}$  and  $\text{CrSi}_2$  upon annealing of Cr overlayers on Si(111) // Physical Review B, 35(11), 1987 p. 5880-5883.
4. T. Mori, T. Aizawa, S. N. Vijayaraghavan and N. Sato, Fabrication and Thermoelectric Properties of Chromium Silicide Thin Films // Sensors and Materials, 32(7), 2020 p. 2433–2441.
5. Н.Г. Галкин, К.Н. Галкин, А.С. Доценко, Д.Б. Мигас, Л.С. Волкова, Т.С. Гришин, А.А. Дудин, А.В. Герасименко, Кристаллическая и электронная структура, оптические и фононные свойства тонких пленок  $\text{Cr}_3\text{Si}$  на  $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$  // Сборник тезисов «Кремний-2026», 2026, с. 44.



## Упорядоченные наноструктурированные поверхности кремния, сформированные методом металл-стимулированного каталитического травления

***Тумашев В.С., Селезнев В.А.***

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск*

e-mail: tumashev@isp.nsc.ru

Высокоорганизованные микро- и наноструктурированные поверхности позволяют управлять их межфазными свойствами, имеющими значение для таких областей применения, как энергетика, электроника, фотоника, композитные материалы и биоинженерия. Например, показано, что массивы асимметричных поверхностных элементов, таких как массивы канавок, наклонных столбиков и спиральных выступов, придают уникальные анизотропные свойства, включая смачиваемость, адгезию, тепловую и/или электрическую проводимость, оптическую активность и способность направлять рост клеток [1]. Ключевой задачей остается разработка надежных и высокопроизводительных методов наноструктурирования. Метод металл-стимулированного каталитического травления (МСКТ) является одним из наиболее перспективных для структурирования поверхности полупроводников [2]. Данный метод позволяет локально растворять полупроводниковую подложку только под тонким слоем металлического катализатора (Au, Ag или Pt) при помещении образца в водный раствор HF и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

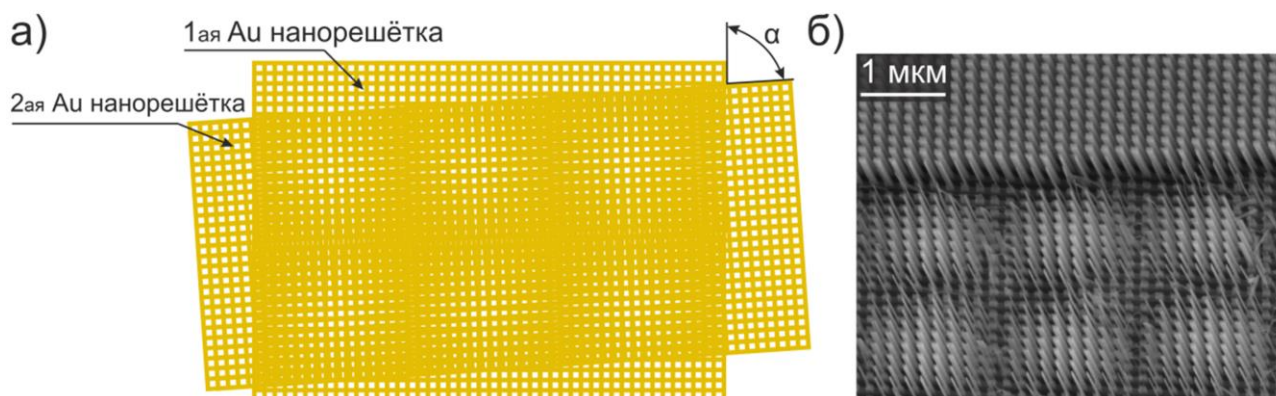


Рисунок 1 – Схема сверхпериодической Au сетки изготовленной с помощью последовательной 4-ох уровневой адгезивного переноса 1D Au решеток (а), СЭМ - изображение наноструктурированной поверхности Si со сверхпериодическим массивом наностолбиков, сформированных после МСКТ Au сеткой (б).

В данной работе мы демонстрируем развитие технологии последовательного адгезивного переноса 1D Au решеток, с целью создания многослойных трехмерных Au катализаторов для МСКТ, которые невозможно создать другими нанолитографическими методами. Процессы каталитического травления Si созданными трехмерными Au катализаторами существенно отличаются от хорошо изученных процессов травления плоским Au рисунком. Разработана методика направленного МСКТ, на основе специальной геометрии катализатора и определенного состава травителя. В результате созданы упорядоченные массивы Si наностолбиков с заданным наклоном и сечением, а также их сверхпериодические массивы (рис.1). Выполненные в работе исследования подтверждают, что движение катализатора при МСКТ определяется силами Ван-дер-Ваальса, которые значительно влияют на наклон и сечение формируемых наностолбиков.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

### Литература

1. Tawfick S. et al. Engineering of Micro- and Nanostructured Surfaces with Anisotropic Geometries and Properties // Adv. Mater. 2012. Vol. 24, № 13. P. 1628–1674.
2. Znati S. et al. Metal-assisted chemical etching beyond Si: applications to III-V compounds and wide-bandgap semiconductors // Nanoscale. Royal Society of Chemistry, 2024. Vol. 16, № 23. P. 10901–10946.



## Рост топологических изоляторов на подложках S(111) методом МЛЭ

**Ищенко Д.В.<sup>1)</sup>, Кырова Е.Д.<sup>1)</sup>, Кумар Н.<sup>1)</sup>, Супрун С.П.<sup>1)</sup>, Голяшов В.А.<sup>1)</sup>, Степина Н.П.<sup>1)</sup>, Сухих А.С.<sup>2)</sup>, Суровцев Н.В.<sup>3)</sup>, Юнин П.А.<sup>4)</sup>, Милехин И.А.<sup>1)</sup>, Мартовицкий В.П.<sup>5)</sup>, Терещенко О.Е.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

<sup>2)</sup>Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск

<sup>3)</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

<sup>4)</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

<sup>5)</sup>Физический институт им. Лебедева РАН, Москва

e-mail: ischenkod@isp.nsc.ru

Топологические изоляторы (ТИ) привлекли своё внимание благодаря их уникальными поверхностными состояниями (ПС) и в связи с возможным их применением в электронике, спинтронике и квантовых вычислениях [1]. В идеальном случае эти материалы характеризуются изолирующим объёмом и проводящими ПС, защищённых симметрией обращения времени, которая вызвана сильным спин-орбитальным взаимодействием [2]. К ТИ относятся большое количество материалов, в том числе и различные соединения вида  $A_2B_3$  ( $A = Bi, Sb, B = Te, Se, S$ ) и их комбинаций. Выявление вклада ПС в общую проводимость возможно путём уменьшения роли объёма либо подбором состава так, чтобы уровень Ферми находился в запрещённой зоне, например, получение четырёхкомпонентных растворов ( $Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$ ), либо уменьшением геометрических размеров. Также проводятся исследования соединений с нарушением защиты симметрии обращения времени, что возможно путём внедрения в решётку магнитных примесей. В [3] показано, что при введении атомов Mn в решётку  $Bi_2Te_3$  образуется другая чередующаяся структура (Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te) с общей формулой  $(MnTe)_x \cdot (Bi_2Te_3)_y$ . В этой структуре магнитный момент каждого слоя атомов Mn направлен вдоль оси с, но антипараллелен магнитному моменту в следующем слое. Поэтому электрические свойства этих структур сильно зависят от количества (четное – нечетное) слоёв. В связи с указанными выше свойствами, задача получения ТИ и магнитных ТИ (МТИ) тонких слоёв является в настоящее время чрезвычайно актуальной.

Кроме того, характерной особенностью всех этих материалов являются их слоистая структура, при этом слои связаны между собой ван-дер-Ваальсовым взаимодействием, что, теоретически, позволяет выращивать эти материалы на любой поверхности.

В настоящей работе показаны результаты эпитаксиального роста методом МЛЭ различных соединений ( $Bi_2Te_3$ ,  $Bi_{2-x}Sb_xTe_{3-y}Se_y$  и  $(MnTe)_x \cdot (Bi_2Te_3)_y$ ) на подложках Si(111) из различных источников: элементных (Bi, Mn, Te) и многокомпонентных ( $Bi_2Te_3$ ,  $BiSbTeSe_2$ ). Приводятся данные атомно-силовой микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской дифракции, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, комбинационного рассеяния света, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Приводится сравнение плёнок ТИ и МТИ, выращенных на других подложках: графен/ $SiO_2/Si$ , графен/ $SiC$ ,  $Al_2O_3(0001)$ .

Работа проведена при частичной поддержке Госзадания № FWGW-2025-0011.

## Литература

1. Tian, W., Yu, W., Shi, J., & Wang, Y. (2017). The property, preparation and application of topological insulators: A review. *Materials*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/MA10070814>.
2. Culcer, D. (2012). Transport in three-dimensional topological insulators: Theory and experiment. In *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures* (Vol. 44, Issue 5, pp. 860–884). <https://doi.org/10.1016/j.physe.2011.11.003>.
3. E. D. L. Rienks et.al. Large magnetic gap at the Dirac point in  $Bi_2Te_3/MnBi_2Te_4$  heterostructures \\\ Nature. 2019. Vol. 576. 423 – 428.

## Механизм синтеза $\text{CaSi}_2$ под действием электронного пучка при эпитаксии $\text{CaF}_2$ на $\text{Si}(111)$

**Ван Ю.<sup>1)</sup>, Кацюба А.В.<sup>2)</sup>, Камаев Г.Н.<sup>1,2)</sup>, Зиновьева А.Ф.<sup>1,2)</sup>,  
Зиновьев В.А.<sup>2)</sup>, Двуреченский А.В.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>2)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова, Новосибирск

e-mail: y.van5@g.nsu.ru

В последние годы активно ведется поиск способов синтеза силицидов металлов на кремниевых подложках, перспективных для создания новых нанoeлектронных и оптоэлектронных устройств. В работе [1] был предложен оригинальный метод получения пленок дисилицида кальция ( $\text{CaSi}_2$ ) в процессе эпитаксии  $\text{CaF}_2$  на  $\text{Si}(111)$  при одновременном облучении пучком быстрых электронов. Образование  $\text{CaSi}_2$  подтверждено методами комбинационного рассеяния света и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) [1]. Авторы [1] предположили, что облучение  $\text{CaF}_2$  электронным пучком приводит к разложению  $\text{CaF}_2$  на фтор и кальций с последующей десорбцией ионов  $\text{F}^+$  с поверхности  $\text{CaF}_2$ . Оставшиеся атомы кальция могут впоследствии реагировать с кремнием с образованием силицида кальция на границе раздела с  $\text{Si}$  подложкой. Однако, до сих пор не было предложено детального механизма формирования  $\text{CaSi}_2$  в условиях облучения высокоэнергетичными электронами.

В данной работе были рассмотрены основные факторы, лимитирующие скорость образования  $\text{CaSi}_2$ , и предложен механизм формирования  $\text{CaSi}_2$ . В рамках данного механизма ионизация атомов кальция электронным пучком является основным лимитирующим процессом. Этот процесс контролирует распад молекулы  $\text{CaF}_2$  при электронном воздействии [2]. Мы предположили, что при используемых энергиях электронов процесс ионизации происходит с участием внутренних  $M$ ,  $L$  и  $K$  оболочек. Были проведены количественные оценки скорости образования  $\text{CaSi}_2$  при электронном облучении при стандартных параметрах электронного пучка (ускоряющее напряжение 20 кэВ и плотность тока  $\sim 0,125 \text{ мА/см}^2$ ). Результаты оценок были сопоставлены с экспериментальными данными по количеству синтезированного  $\text{CaSi}_2$ , полученными с помощью атомно-силовой микроскопии (Рис. 1) и EDX спектроскопии и получено хорошее совпадение. Таким образом, нами было продемонстрировано, что основным фактором, контролирующим процесс формирования  $\text{CaSi}_2$  является ионизация атомов кальция электронным пучком. Предложенный механизм работает для тонких пленок  $\text{CaSi}_2$  (толщиной  $\leq 10 \text{ нм}$ ) и при достаточно высоких температурах  $\sim 550^\circ\text{C}$ , для более толстых пленок и низких температур процесс формирования  $\text{CaSi}_2$  может лимитироваться диффузией кремния из подложки.

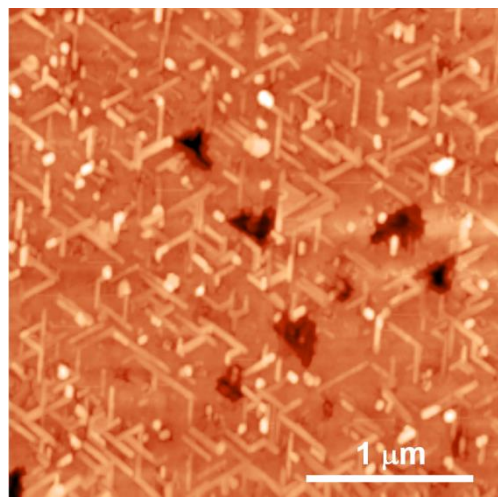


Рисунок 1 – Изображение поверхности пленки толщиной 10 нм, облученной в течение 5 мин в процессе роста  $\text{CaF}_2$ , полученное методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Вытянутые наноструктуры представляют собой кристаллиты  $\text{CaSi}_2$ .

### Литература

1. A.V. Kacyuba, A.V. Dvurechenskii, G.N. Kamaev., V.A. Volodin, A.Y. Krupin. Radiation-Induced epitaxial  $\text{CaSi}_2$  film growth at the molecular-beam epitaxy of  $\text{CaF}_2$  on Si // Mater. Lett., 268, 2020 P. 127554.
2. K. Miura, K. Sugiura, H. Sugiura.  $\text{F}^+$ -desorption mechanism from  $\text{CaF}_2(111)$  surface by low-energy electron irradiation // Surface Science Letters, 253, 1991 P. L407–L410.

**III. Физика кремниевых квантово-размерных  
структур твердотельной электроники, в том числе  
нано- и оптоэлектроники, фотоники, спинтроники  
и скирмионики**

## Светоизлучающие диоды и транзисторы с Ge(Si) наноструктурами для кремниевой фотоники

***Новиков А.В.<sup>1)</sup>, Захаров В.Е.<sup>1)</sup>, Яблонский А.Н.<sup>1)</sup>, Демидов Е.В.<sup>1)</sup>, Шалеев М.В.<sup>1)</sup>,  
Юрасов Д.В.<sup>1)</sup>, Вербус В.А.<sup>1)</sup>, Михайлов А.Н.<sup>2)</sup>, Тетельбаум Д.И.<sup>2)</sup>, Смагина Ж.В.<sup>3)</sup>,  
Родякина Е.Е.<sup>3)</sup>***

<sup>1)</sup>Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород

<sup>2)</sup>Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского,  
г. Нижний Новгород

<sup>3)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

e-mail: anov@ipmras.ru

В настоящее время продолжают активные исследования, направленные на создание источников излучения для Si фотоники на основе гетероструктур IV группы таблицы Менделеева [1]. Безусловным преимуществом таких источников является их большая совместимость с кремниевой интегральной технологией, чем источников на основе АЗВ5 структур. По этому критерию выделяются структуры с Ge(Si) самоформирующимися наноструктурами, которые могут быть встроены непосредственно в планарный Si/SiO<sub>2</sub> волновод, сформированный на пластине «кремний-на-изоляторе» (SOI). В данной работе представлены результаты по формированию и исследованию работающих в диапазоне длин волн 1,2-1,6 мкм светоизлучающих диодов (LED) и транзисторов (LET) на основе структур с Ge(Si)/SOI наноструктурами с возможностью вывода излучения как в свободное пространство, так и в Si планарный волновод.

На структурах с Ge(Si)/SOI островками была разработана оригинальная технология формирования латеральных p<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup> LED, которая не приводила к деградации излучательных свойств островков при комнатной температуре [2]. Встраивание 2D фотонных кристаллов (ФК) в i-область LED позволило за счет взаимодействия островков с модами ФК на порядок увеличить мощность излучения, выводимого в свободное пространство [2]. Достигнутые мощности излучения достаточны для использования полученных LED в задачах тестирования Si фотонных схем [1]. Выявлено неоднородное распределение интенсивности сигнала электролюминесценции (ЭЛ) вдоль LED с максимумом выхода на границе p<sup>+</sup>-i областей [3]. Продemonстрировано, что для LED с длиной (>10 мкм) i-областью подача управляющего напряжения на SOI подложку позволяет управлять пространственным распределением сигнала ЭЛ [3]. Согласно результатам моделирования влияние потенциала подложки на излучательные свойства LED обусловлено пространственной локализацией дырок в островках и образованием дополнительных каналов проводимости для носителей заряда на границе структуры со скрытым окислом при подаче на подложку напряжения соответствующего знака [4]. Возможность управления свойствами излучения LED с Ge(Si)/SOI наноструктурами за счет подачи напряжения на подложку позволяет рассматривать их в качестве LET [3]. Продemonстрирована возможность вывода излучения Ge(Si) островков в планарный Si волновод и его распространение в волноводе на расстояние до 1 мм, что значительно больше расстояния, на которое распространяется излучение Si светодиода в таком волноводе (~ 200 мкм) [1]. В докладе обсуждается возможность планарного вывода излучения Ge(Si)/SOI островков за счет фотонно-кристаллических волноводов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 25-12-00367) с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН «Физика и технология микро- и наноструктур».

### Литература

1. А.В. Новиков, Д.В. Юрасов, З.Ф. Красильник Источники излучения для кремниевой фотоники на основе гетероструктур IV группы, Квантовая электроника 55(9), 2025, с.533.
2. V.B. Shmagin et al., Room-temperature light-emitting diodes with Ge(Si) nanoislands embedded in photonic crystals // Nanotechnology, 35(16), 2024 p. 165203.
3. A.N. Yablonskiy et al, Silicon-based light-emitting transistor with Ge(Si) nanoislands embedded in a photonic crystal: control of the spectrum and spatial distribution of the emission // Appl. Phys. Lett 125, (2024) p .231103.
4. Е.В. Демидов и др., Моделирование транспортных и излучательных характеристик светоизлучающего латерального кремниевого p<sup>+</sup>-i-n<sup>+</sup> транзистора с самоформирующимися Ge(Si) наноструктурами // ФТП 59(4), 2025 с. 242.

## Сингулярности Ван Хова в двумерных системах на поверхности кремния

***Бондаренко Л.В.<sup>1)</sup>, Вековшинин Ю.Е.<sup>1)</sup>, Тупчая А.Ю.<sup>1)</sup>, Утас Т.В.<sup>1)</sup>, Жданов В.С.<sup>1)</sup>,  
Денисов Н.В.<sup>1)</sup>, Михалюк А.Н.<sup>1,2)</sup>, Грузнев Д.В.<sup>1,2)</sup>, Зотов А.В.<sup>1)</sup>, Саранин А.А.<sup>1)</sup>***

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: bondarenko@dvo.ru

Сингулярности Ван Хова (СВХ) являются критическими точками в электронной структуре материалов, где градиент энергетической дисперсии равен нулю. В двумерных системах СВХ часто проявляются как логарифмические расходимости в плотности электронных состояний (ПЭС). Если эти расходимости находятся вблизи уровня Ферми, они значительно усиливают электрон-электронные и электрон-фононные взаимодействия, что может приводить к появлению таких явлений, как сверхпроводимость, магнетизм и волны зарядовой плотности. Особый интерес представляют СВХ более высокого порядка, проявляющиеся более резкой степенной зависимостью в ПЭС, что ещё усиливает электронные взаимодействия и повышает вероятность возникновения сильно коррелированных явлений. Двумерные системы являются идеальным объектом для изучения СВХ, поскольку в них (в отличие от трехмерных или одномерных систем) эти сингулярности ярко выражены, а также доступны для исследований методом фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР). Кроме того, благодаря разнообразию атомных структур в двумерных системах наблюдается большое разнообразие геометрии зон электронных состояний, что, в свою очередь, позволяет исследовать различные типы СВХ. Несмотря на растущий интерес к СВХ, исследования этих сингулярностей в двумерных системах на кремниевых подложках практически отсутствуют.

В настоящей работе при помощи метода ФЭСУР и расчётов на основе теории функционала плотности были исследованы СВХ в нескольких металлических системах атомарной толщины на поверхности Si(111). Так, в кагоме-системе  $\text{LaTl}_3$  был обнаружен целый набор СВХ, в том числе сингулярности более высокого порядка [1]. В двумерном растворе  $\text{AuCu}$  изменение стехиометрии от  $\text{Au}_3\text{Cu}$  до  $\text{AuCu}_3$  позволило нарушить симметрию атомной структуры, что привело к появлению СВХ вблизи уровня Ферми, а также к переходу Лифшица. В моноатомном слое свинца T<sub>4</sub>-конфигурации были обнаружены СВХ высокого порядка в нерегулярных точках поверхностной зоны Бриллюэна, что проясняет причины возникновения сверхпроводимости, наблюдаемой в данной системе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

## Литература

1. Yuriy E. Vekovshinin, Leonid V. Bondarenko, Alexandra Y. Tupchaya, Tatiana V. Utas, Edrick Wang, Alexey N. Mihalyuk, Dimitry V. Gruznev, Andrey V. Zotov, and Alexander A. Saranin. High-Order Van Hove Singularities in Atomically Thin Kagome Metal  $\text{LaTl}_3$  // ACS Nano 19 (41), 2025 стр. 36510-36516.

# Механизм транспорта заряда и кулоновское отталкивание электронов, локализованных на ловушках в MgO

Гисматулин А.А.<sup>1)</sup>, Горшков Д.В.<sup>2)</sup>, Гриценко В.А.<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

<sup>2)</sup>АО "Катод", Новосибирск

<sup>3)</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск  
e-mail: agismatulin@isp.nsc.ru

Тонкие пленки оксида магния (MgO) используются для применения в различных электронных приборах. MgO используется в приборах на основе вторичной электронной эмиссии, в частности, в микроканальных устройствах. Еще одно применение MgO — высокоэффективные преобразователи солнечной энергии. Туннелирование через тонкий слой MgO (2 нм) лежит в основе принципа магниторезистивной памяти. Цель данной работы — изучение механизма переноса заряда и определение параметров ловушек, ответственных за перенос заряда в MgO.

Механизм транспорта заряда в аморфных пленках оксида магния на кремниевой подложке экспериментально исследован и смоделирован численно с помощью четырех моделей транспорта заряда. Установлено, что эффект Френкеля, модель Хилла-Адачи перекрывающихся кулоновских ловушек и модель Макрама-Эбейда и Ланноо многофононной ионизации изолированных нейтральных ловушек не описывают транспорт заряда в MgO. Эксперимент описывается моделью фонон-облегченного туннелирования между соседними ловушками Насырова-Гриценко. Определены термическая ( $W_t = 1,35$  эВ) и оптическая ( $W_{opt} = 2,7$  эВ) энергии ионизации ловушек. С помощью сдвига вольт-фарадных характеристик определена концентрация  $n_t \approx 1,0 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> заполненных, заряженных ловушек. Оказалось, что концентрация заряженных ловушек на порядок меньше концентрации нейтральных ловушек  $N_t = 1,6 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, определенной в экспериментах по транспорту заряда. Это соотношение концентраций заполненных и нейтральных ловушек объясняется кулоновским отталкиванием локализованных электронов. Кулоновское отталкивание локализованных электронов на ловушках соотносится с теоретическим предсказанием образования двумерного стекла, подобного вигнеровской кристаллизации локализованных электронов на ловушках в диэлектрике [2].

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 25-12-00022.

## Литература

1. T.V. Perevalov, D.R. Islamov, T.M. Zalyalov, A.A. Gismatulin, V.A. Golyashov, O.E. Tereshchenko, D.V. Gorshkov, V.A. Gritsenko. Electron and hole bipolar injection in magnesium oxide films // Appl. Phys. Lett. 124, 2024 P. 042903.
2. S. S. Shaimeev, V. A. Gritsenko, H. Wong. Wigner crystallization due to electrons localized at deep traps in two-dimensional amorphous dielectric. // Appl. Phys. Lett. 96, 2010 P. 263510.

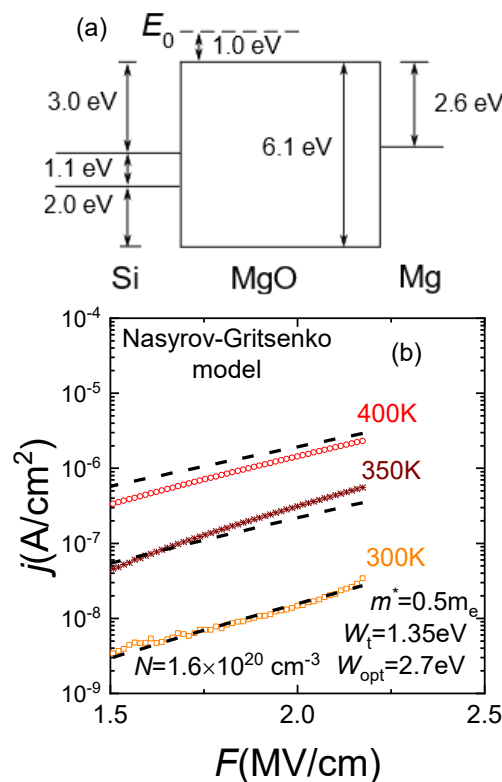


Рисунок 1 – (а) Энергетическая диаграмма структуры Si/MgO/Mg [1]. (б)  $j$ - $F$  характеристики при разных температурах (Точки) и сравнение с численной моделью Насырова-Гриценко для MgO (Пунктирные линии).



## Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры с варьируемым периодом как инструмент управления оптоэлектронными свойствами кремния

***Бородаенко Ю.М.<sup>1)</sup>, Шевлягин А.В.<sup>1)</sup>, Кучмижак А.А.<sup>1,2)</sup>***

*<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

*<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

*e-mail: serbm@mail.ru*

Ключевыми проблемами при создании оптоэлектронных, фотонных и фотовольтаических устройств на основе кристаллического кремния (с-Si) остаются высокие потери на отражение, недостаточная ширина спектрального диапазона (до  $\sim 1100$  нм) и изотропность его оптических свойств. Перспективным подходом к преодолению указанных ограничений является формирование микро- и нанорельефа на поверхности кремния методом фемтосекундной лазерной обработки. При облучении происходит самоорганизация материала с образованием лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) в виде нанорешеток, период которых зависит от параметров обработки, свойств материала и окружающей среды.

В данной работе за счет использования двух длин волн лазерного излучения (515 и 1030 нм) и варьирования среды обработки (воздух и метиловый спирт) при формировании ЛИППС на поверхности с-Si продемонстрирована возможность систематической перестройки периода нанорешеток в диапазоне 70–700 нм (Рис.1). Формирование ЛИППС приводит к анизотропии оптических свойств поверхности кремния, обеспечивая возможность создания поляризационно-чувствительных фотодетекторов [1,2]. Обсуждаются возможности расширения диапазона работы фотодетекторов в коротковолновый ИК диапазон (SWIR) как за счет формирования при лазерном наноструктурировании приповерхностного дефектного слоя, а также пост-осаждения тонких пленок силицида магния.

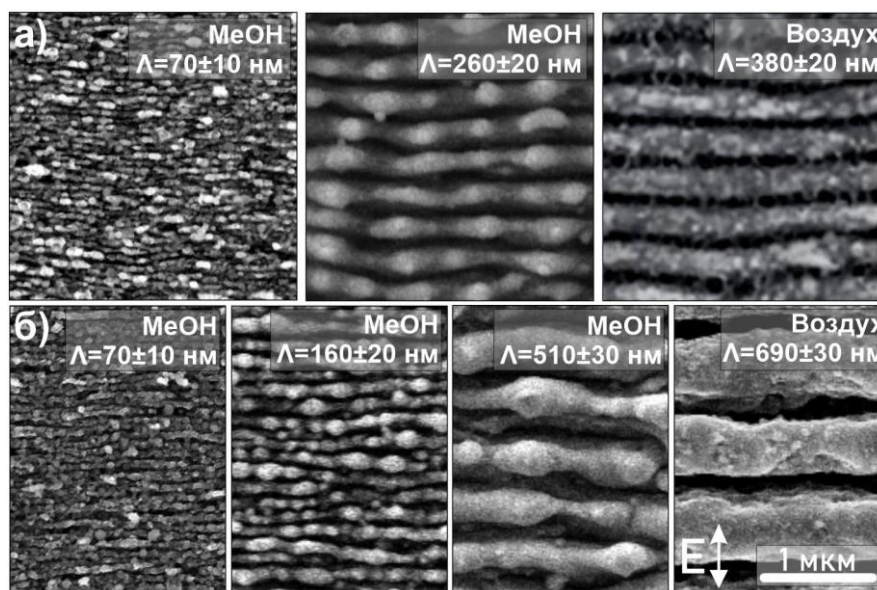


Рисунок 1 – СЭМ-изображения кремниевых ЛИППС (вид сверху) с различным периодом при использовании лазерных импульсов с длиной волны (а) 515 нм и (б) 1030 нм. Среда обработки и период полученных ЛИППС указаны сверху для каждой морфологии; поляризации излучения перпендикулярна нанозазорам.

Данная работа была поддержана Российским научным фондом (грант № 24-72-10078).

### Литература

1. Borodaenko Y. et al. Deep subwavelength laser-induced periodic surface structures on silicon as a novel multifunctional biosensing platform //ACS Applied Materials & Interfaces, 13(45), 2021 стр. 54551-54560.
2. Borodaenko Y. et al. Polarized p–n junction Si photodetector enabled by direct laser-induced periodic surface structuring //Surfaces and Interfaces, 56, 2025 стр. 105568.

# Влияние типа проводимости подложки кремния на электрические и магнитотранспортные характеристики гибридной структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$

**Балашев В.В.<sup>1,2)</sup>, Писаренко Т.А.<sup>1)</sup>, Субботин Е.Ю.<sup>1)</sup>, Олянич Д.А.<sup>1)</sup>,  
Яковлев А.А.<sup>1)</sup>, Цуканов Д.А.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: balashev@dvo.ru

Магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) является одним из наиболее известных ферромагнитных материалов, используемых в электронике. Он обладает такими важными характеристиками как высокая температура Кюри (850 К) и 100% спиновая поляризация электронов проводимости. Использование этого оксида железа может быть перспективным при создании таких полупроводниковых спинтронных устройств как спиновые полевые транзисторы [1]. Разработка таких транзисторов требует изучения эффективной инжекции спин-поляризованных носителей заряда из ферромагнетика в полупроводник, а также их переноса внутри полупроводника. Известно, что использование тонкого слоя диэлектрика в качестве туннельного барьера на границе раздела ферромагнетик/полупроводник значительно уменьшает деполяризацию спина электронов [2]. В данной работе проводилось исследование возможности инжекции спин-поляризованных носителей заряда из пленки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в подложку кремния. В качестве тонкого туннельного барьера был использован диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной  $\sim 1.5$  нм, были сформированы на поверхности подложек Si, используя метод влажной химической обработки. После загрузки окисленных образцов в высоковакуумную камеру методом реактивного осаждения Fe в атмосфере  $\text{O}_2$  на поверхности  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  были выращены текстурированные пленки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  толщиной 70 нм [3]. С целью формирования электрически стабильных контактных площадок на пленке  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  выращивался бислой Cu/Ti. Используя метод селективного (жидкостного) химического травления слоёв Cu, Ti и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , были получены мезаструктуры с отдельно расположенными контактами магнетита на поверхности  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . На рисунке 1, показаны двух- и трёх- контактные конфигурации измерения сигнала, обусловленного спиновой аккумуляцией под каждым из двух индивидуальных контактов. Проведенные измерения показали, что при изменении магнитного поля происходит изменение разности потенциалов между ферромагнитными контактами при пропускании тока хотя бы через один контакт (Рисунок 2). Предполагается, что при включении внешнего магнитного поля происходит деполяризация спина электронов, инжектируемых в кремний. В докладе обсуждаются механизмы спинового транспорта в данных структурах, а также результаты экспериментов, полученных для подложек кремния с различным типом проводимости.

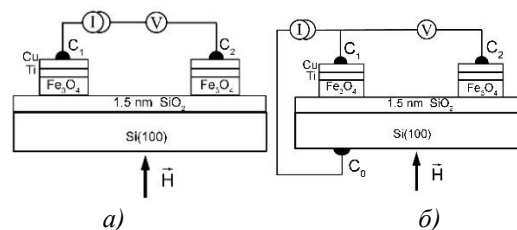


Рисунок 1 – Схемы подключения: двух- (а) и трех- (б) контактная.

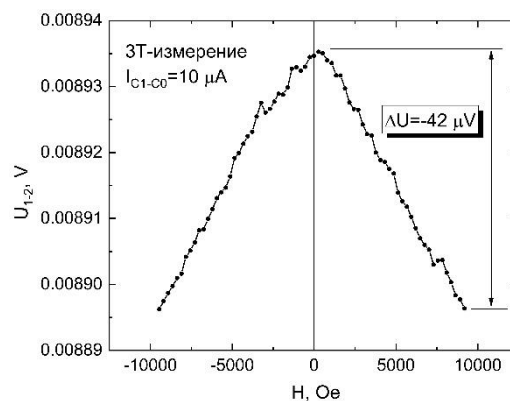


Рисунок 2 – Зависимость разности потенциалов между контактами C1-C2 от магнитного поля.

## Литература

1. M. Ciorga, Perspective on the spin field-effect transistor // J. Phys. D: Appl. Phys. 58, 2025, p.012001.
2. K. Takanashi, Creation and control of spin current in solids // Jap. J. Appl. Phys., 49, 2010, p.110001.
3. V.V. Balashev, K.S. Ermakov, D.A. Tsukanov, A.Yu. Samardak, A.V. Ognev, A.S. Samardak, Thickness dependence of magnetic and magnetotransport properties of textured  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ferrimagnetic films on  $\text{SiO}_2/\text{n-Si}(001)$  // J. Alloys Compd. 961, 2023, p.170967(1-7).

## Повышение эффективности фотовольтаической структуры $\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Si}$

**Яковлев А.А.<sup>1)</sup>, Писаренко Т.А.<sup>1)</sup>, Балашев В.В.<sup>1,2)</sup>, Мараров В.В.<sup>1)</sup>, Цуканов Д.А.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

<sup>2)</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: yakovlev@iacp.dvo.ru

Плёнки теллурида висмута толщиной 5 нм были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях сверхвысокого вакуума ( $\sim 10^{-10}$  Торр) на подложках  $n\text{-Si}(111)$  [1] и закрыты слоями Те, которые в результате окисления *ex situ* трансформируются в защитный прозрачный слой парателлурида ( $\text{TeO}_2$ ). В полученной серии образцов варьировались толщина и температура осаждения слоя теллура. Латеральный фотоэффект был изучен в диапазоне длин волн 730-830 нм с использованием  $\text{Ti:sapphire}$  лазера (диаметр пучка – 50 мкм) и универсального измерительного прибора Keithley-2000. Расстояние между контактами составляло 1 мм.

Выбор системы  $\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/n\text{-Si}(111)$  обусловлен сочетанием оптических свойств кремния и теллурида висмута, позволяющим создавать многофункциональные автономные структуры с возможностью управления спиновой ориентацией с помощью электрического тока [2].

Было обнаружено, что величина латерального фотонапряжения практически не зависит от толщины защитного прозрачного покрытия  $\text{TeO}_2$  в диапазоне толщин 2-10 нм. Спектральные характеристики указывают на механизм генерации фотонесителей в кремнии (вставка на рис. 1). Существенного улучшения фотовольтаической чувствительности удается достичь при увеличении температуры подложки при осаждении слоя теллура. Идентичность фоточувствительности в структурах, полученных при осаждении теллура при 150 и 200°C, свидетельствует, что в этом температурном диапазоне происходит полиморфный структурно-фазовый переход теллура [3], который при последующем окислении приводит к полиморфному изменению слоя  $\text{TeO}_2$  [4]. Полиморфное преобразование теллура приводит к изменению межатомных расстояний в кристаллической структуре пленки, что является причиной увеличения прозрачности защитного покрытия  $\text{TeO}_2$  и, соответственно, улучшения характеристик фотовольтаических ячеек на основе гибридной структуры  $\text{TeO}_2/\text{Bi}_2\text{Te}_3/n\text{-Si}(111)$ .

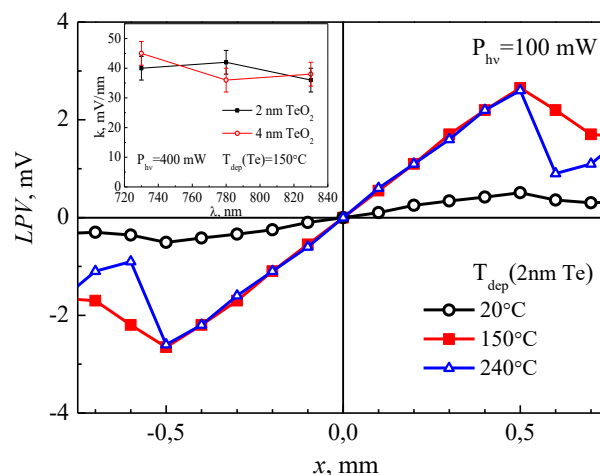


Рисунок 1 – Зависимости фотонапряжения от положения светового пятна, параметризованные температурой осаждения теллура. На вставке спектральные зависимости фоточувствительности.

## Литература

1. A.V. Matetskiy, I.A. Kibirev, T. Hirahara, S. Hasegawa, A.V. Zotov, A. A. Saranin. Direct observation of a gap opening in topological interface states of  $\text{MnSe}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$  heterostructure // Appl. Phys. Lett., 107, 2015 P. 091604.
2. Л.Е. Голуб. Спиновый транспорт в гетероструктурах // Успехи физических наук, 182(8), 2012 С.876.
3. A. Apte et al. Polytypism in ultrathin tellurium // 2D Materials, 6(1), 2018 P. 015013.
4. A.P. Mirgorodsky, T. Merle-Méjean and J.-C. Champarnaud, P. Thomas, B. Frit. Dynamics and structure of  $\text{TeO}_2$  polymorphs: model treatment of paratellurite and tellurite; Raman scattering evidence for new  $\gamma$  and  $\delta$ -phases // Journal of Physics and Chemistry of Solids, 61, 2000 P. 501 – 509.

## Эпитаксия мультислоев нанокристаллов $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> в кремнии на подложке КНИ(100): кристаллическая структура и фотолюминесценция на 1.5 мкм

Галкин Н.Г.<sup>1)</sup>, Галкин К.Н.<sup>1)</sup>, Кропачев О.В.<sup>1)</sup>, Доценко С.А.<sup>1)</sup>, Степихова М.В.<sup>2)</sup>, Юнин П.А.<sup>2)</sup>, Волкова Л.С.<sup>3)</sup>, Гришин Т.С.<sup>3)</sup>, Дудин А.А.<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>3)</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

e-mail: ngalk@dvo.ru

Известно, что нанокристаллы (НК)  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>, встроенные монолитно в кремниевую решетку приводят к появлению фотолюминесценции (ФЛ) с длиной волны 1.5 мкм при температурах ниже 80 К [1]. Кроме того, в такой наногетероструктуре, помещенной в i-область p-i-n диода на Si(111), была получена интенсивная электролюминесценция с мощностью до 25 мВт при плотности тока 9 А/см<sup>2</sup> и T=20 °С [2]. Здесь представляется актуальным исследовать встраивание НК  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> в подложку КНИ(100), совместимую с планарной технологией СБИС, с целью получения эффективного люминесцентного отклика на 1.5 мкм, что откроет возможности создания новых приборных структур для схем интегральной фотоники.

В данной работе НК  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> встраивались в подложки КНИ с ориентацией (100) методом комбинации твердофазной эпитаксии (ТФЭ) железа и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) кремния. Сначала на поверхности Si(100)-2×1 формировали методом МЛЭ при 750 °С буферный слой толщиной 50 нм, после чего путем последовательного осаждения железа (0.5 нм) при T=20 °С с последующим отжигом при T=630 °С и двух слоев кремния: 12 нм при T=630 °С и 24 нм при T=700 °С. Процедуру роста бислоев повторяли 8 раз. Поверхность образца имела шероховатость:  $\sigma_{rms}$ =6.5 нм. Исследования методом рентгеновской дифракции показали наличие фазы  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>, что подтверждено методом ВР ПЭМ (Рис. 1(а,б)). Установлено, что при встраивании НК коалесцируют и не образуют слоистую структуру с кремниевыми промежутками [1], а квазиоднородно распределены по толщине (Рис. 1(а)). Нанокристаллы имеют овальную форму с размерами от 10 до 30 нм и монолитно встроены в матрицу кремния без образования дислокаций несоответствия (Рис. 1(б)). Для них установлены эпитаксиальные отношения и напряжения в решетке. Исследования спектров ФЛ показали (Рис. 1(в)), что максимум пика при T=77 К находится при 1.5 мкм и отсутствуют линии ФЛ, характерные для дислокаций. При нагреве до 300 К пик ФЛ исчезает, что связано с безызлучательными переходами через уровни дефектов на границе  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>/Si.

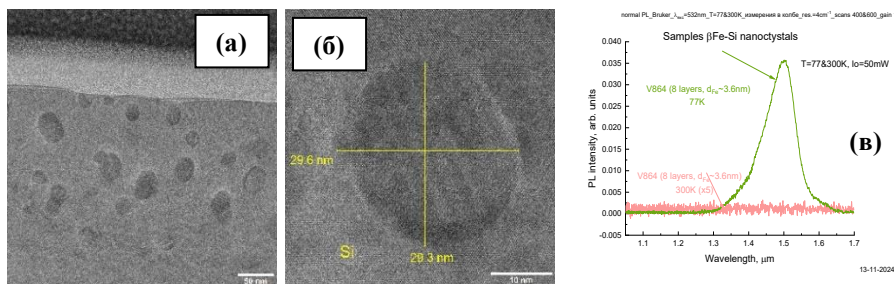


Рисунок 1 – Снимки ВР ПЭМ поперечного среза в образце при увеличении 100000х (а) и 800000х (б). Спектры ФЛ образца при T=77 К и 300 К (в).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

### Литература

1. N.G. Galkin, E.A. Chusovitin, T.S. Shamirsaev, A.K. Gutakovskii, A.V. Latyshev, Growth, structure and luminescence properties of multilayer Si/ $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>NCs/Si/.../Si nanoheterostructures // Thin Solid Films, 519, 2018 p. 8480–8484.
2. A.V. Shevlyagin, D.L. Goroshko, E.A. Chusovitin, S.A. Balagan, S.A. Dotsenko, K.N. Galkin, N.G. Galkin, T.S. Shamirzaev, A.K. Gutakovskii, A.V. Latyshev, M. Iinuma, and Y. Terai, A room-temperature operated Si LED with  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> nanocrystals in the active layer: mW emission power at 1.5 mm // J. Appl. Phys., 121, 2017 p. 113101(1-10).

## Оптически активные дефектные центры в матрице Si для КМОП-совместимых устройств квантовой фотоники

***Юрасов Д.В.<sup>1)</sup>, Яблонский А.Н.<sup>1)</sup>, Захаров В.Е.<sup>1)</sup>, Михайлов А.Н.<sup>2)</sup>, Никольская А.А.<sup>2)</sup> и Новиков А.В.<sup>1)</sup>***

*<sup>1)</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

*<sup>2)</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*  
e-mail: Inquisitor@ipmras.ru

Многие годы прогресс в микроэлектронике достигался за счет миниатюризации элементов и увеличения их плотности размещения на чипе. Однако снижение характерных размеров до единиц нанометров требует поиска новых подходов. Переход к оптоэлектронике и фотонике, причем совместимой с современной Si КМОП-технологией, является одним из перспективных вариантов дальнейшего развития. К настоящему времени многие оптические элементы на базе Si (такие как волноводы, модуляторы и др.) уже созданы, но отсутствует один из ключевых – эффективный источник излучения ближнего ИК диапазона на основе Si (либо совместимый с Si). Кроме того, у проблемы создания Si-совместимого излучателя в последнее время возник новый аспект, связанный с оптическими квантовыми вычислениями и коммуникациями. Для решения данного класса задач необходимы, помимо прочего, излучатели одиночных фотонов. Создание фотонных схем на чипе с интегрированными однофотонными источниками откроет новые возможности для реализации квантовых вычислительных протоколов, а также для масштабирования таких систем.

Одной из возможных материальных систем, могущих быть использованной для решения вышеописанных задач, являются оптически активные дефектные центры в Si [1]. Создание их возможно различными методами, в частности, за счет стандартного метода ионной имплантации. Среди большого разнообразия дефектных центров в Si [2], внимание будет сосредоточено на двух – т.н. G- и W-центрах. G-центр (комплекс из 2 атомов C и 1 атома Si) является популярным объектом исследований ввиду того, что его бесфононная линия излучения (ZPL) является одной из наиболее интенсивных (в сравнении с другими центрами в Si), лежит в ближнем ИК (~1278 нм) и обладает малой шириной (от долей мэВ для природного Si до значений ниже 1 мкэВ для матрицы из изотопно-очищенного <sup>28</sup>Si). W-центр (комплекс из 3 атомов Si в междоузлиях) исследован меньше, однако тоже представляется перспективным. Он также излучает в ближнем ИК (~1220 нм), причем обладает большей термостойкостью.

Эффективным способом модификации оптических свойств сред является использование резонаторов. Использование диэлектрических микрорезонаторов для вышеописанных дефектных центров в Si позволяет повысить их эффективность как излучателей и дает дополнительные возможности по управлению их излучением. В работе рассмотрены способы создания изолированных дефектных центров и встраивания их в подобные микрорезонаторы.

Развитие технологий очистки природного Si позволяет получить образцы <sup>28</sup>Si с остаточными долями изотопов <sup>29</sup>Si и <sup>30</sup>Si на уровне 10-100 ppm. Формирование дефектных центров в матрице из изотопно-очищенного <sup>28</sup>Si позволяет устранить уширения линии излучения таких центров, связанное с флуктуациями их окружения, что, приводит к резкому (1-2 порядка) сужению линии их излучения при низких температурах.

Работа поддержана РНФ (грант № 26-12-00464).

### Литература

1. G. Davies. The optical properties of luminescence centres in silicon // Phys. Rep., V.176(3–4), 1989 p.83.
2. A. Durand *et.al.*, Broad Diversity of Near-Infrared Single-Photon Emitters in Silicon // Phys. Rev. Lett., V.126, 2021 p.083602.



# Кулоновское отталкивание и вигнеровская кристаллизация локализованных электронов в $\text{HfO}_2$ : эксперимент и моделирование

Гисматулин А.А.<sup>1)</sup>, Махмудиан М.М.<sup>1,2)</sup>, Махмудиан Мехрдад М.<sup>1,2)</sup>, Энтин М.В.<sup>1)</sup>,  
Маркелова А.К.<sup>1)</sup>, Алиев В.Ш.<sup>1)</sup>, Гриценко В.А.<sup>1,3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

<sup>2)</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>3)</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: aagismatulin@isp.nsc.ru

Теоретически предсказанное Вигнером [1] упорядочение взаимодействующих электронов в металлах было экспериментально обнаружено для электронов на поверхности жидкого гелия в 1979 году Граймсом и Адамсом [2]. С тех пор кристаллические структуры Вигнера были обнаружены в полупроводниковых гетероструктурах (в сильных магнитных полях), графене, квантовых проволоках, углеродных нанотрубках, пылевой плазме, кластерах захваченных ионов. Все эти электронные системы были одномерными, двумерными или квазитрехмерными. Одномерная вигнеровская кристаллизация локализованных электронов была продемонстрирована в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [3].

Данная работа посвящена изучению структурного упорядочения, в частности, вигнеровской кристаллизации, локализованных электронов на глубоких ловушках ( $\approx 1,25$  эВ) в  $\text{HfO}_2$  при комнатной температуре. Экспериментально доказано, что концентрация локализованных электронов на два порядка ниже, чем концентрация нейтральных ловушек, что указывает на кулоновское отталкивание между локализованными электронами. В данной работе мы исследуем структурное упорядочение в двумерном (2-D) кластере локализованных электронов с помощью численного моделирования. Рассматривается система случайно распределенных ловушек на сферической поверхности. Анализируется упорядочение захваченных на ловушках электронов с помощью пространственной корреляционной функции  $\zeta(x)$  (Рисунок 1). При малой плотности электронов  $\zeta(x)$  имеет чётко выраженные пики (черная). Это связано с тем, что при уменьшении плотности, растёт число доступных мест, а из-за кулоновского отталкивания и симметрии системы, электроны будут отдаляться друг от друга на почти одинаковые расстояния, что проявляется в серии отчётливых пиков. С ростом плотности электронов пики на  $\zeta(x)$  размываются (синяя и красная). Таким образом, Рис.1 демонстрирует переход системы от упорядоченного состояния к неупорядоченному.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 25-12-00022.

## Литература

1. E. Wigner. On the Interaction of Electrons in Metals // Physical Review 46, 1934, P. 1002.
2. C. C. Grimes and G. Adams. Evidence for a Liquid-to-Crystal Phase Transition in a Classical, Two-Dimensional Sheet of Electrons // Physical Review Letters 42, 1979 P. 795.
3. V. A. Gritsenko, M. M. Mahmoodian, Mehrdad M. Mahmoodian, A. A. Gismatulin, M. V. Entin. Wigner crystallization of localized electrons in a flash memory // Applied Physics Letters 127, 2025 P. 222901.

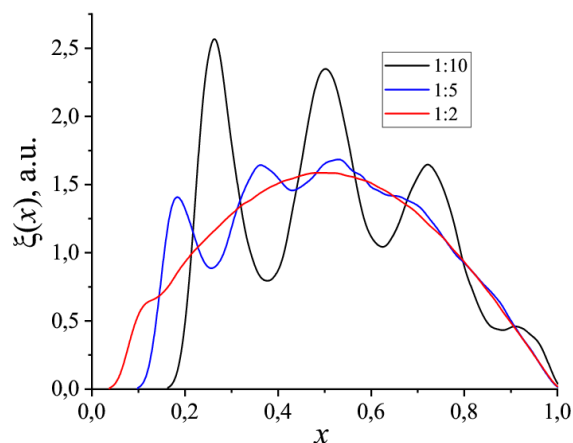


Рисунок 1 – Пространственная корреляционная функция  $\zeta(x)$  для 100 (красный), 50 (синий) и 20 (черный) электронов в системе с 200 случайными ловушками на сферической поверхности. На вставке показано соотношение концентраций электронов и ловушек.



## Роль интерфейсов в управлении магнитными свойствами и доменной структурой многослойных нанопленок Pt/Co/CoO<sub>x</sub>/Gd/Pt

Турпак А.А., Кузнецова М.А., Козлов А.Г., Пашенко А.С.,  
Черноусов Н.Н., Давыденко А.В.

Дальневосточный федеральный университет, Россия, г. Владивосток, остров Русский,  
Поселок Аякс, 10

e-mail: turpak.aa@dvfu.ru

Многослойные структуры на основе магнитных и немагнитных материалов представляют большой интерес для спинтроники благодаря возможности реализации перпендикулярной магнитной анизотропии (ПМА), взаимодействия Дзялошинского–Мория (ВДМ) и переносу вращательного момента от тока (SOT-эффект, от англ. Spin Orbit Torque).

В данной работе методом магнетронного напыления были получены многослойные структуры состава Pt/Co/CoO<sub>x</sub>/Gd/Pt. Магнитные характеристики исследовались методом вибрационной магнитометрии, а доменная структура – методами магнитно-силовой микроскопии (МСМ) и магнитооптического эффекта Керра.

Экспериментальные результаты показали, что изменение толщины нижнего слоя Pt(40-100 Å) в структуре Pt/Co/CoO<sub>x</sub>/Gd/Pt приводит к увеличению магнитного момента системы от 75 до 109 мкэрг·Гс<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup> и росту эффективного поля ПМА от 1400 до 2400 Э.

Для изучения магнитного поведения слоя Gd были получены образцы Pt/Gd/Pt. Несмотря на парамагнитную природу Gd, петли магнитного гистерезиса демонстрируют ферромагнитное поведение со слабым магнитным моментом. Увеличение толщины Gd с 10 до 100 Å приводит лишь к небольшому росту магнитного момента с 15 до 21 мкэрг·Гс<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>, что указывает на формирование магнитного момента в интерфейсных слоях Gd вследствие эффекта близости с Pt [1].

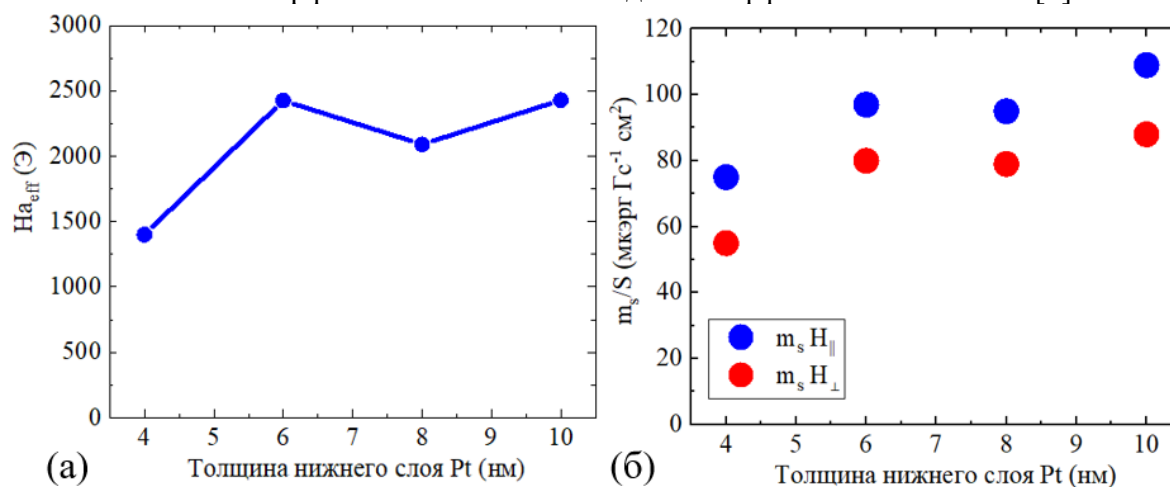


Рисунок 1 – Зависимость (а) перпендикулярной магнитной анизотропии и (б) магнитного момента от толщины нижнего слоя Pt

В дальнейшем планируется исследование SOT-эффекта и ВДМ в данной системе путем измерения смещения петель магнитного гистерезиса при пропускании электрического тока через микроструктуры [2].

### Литература

1. Sutapa Dutta et al. Observation of interface-induced nonlocal spin-torques from Gd/Pt interface // Appl. Phys. Lett. – Vol. 125. – 2024. – P. 222407.
2. Chi-Feng Pai et al. Determination of spin torque efficiencies in heterostructures with perpendicular magnetic anisotropy // Physical Review. – Vol. 93. – 2016. – P. 144409.

### Благодарность

Работа Турпака А. А., Черноусова Н. Н. и Давыденко А. В. выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-42-00083, <https://rscf.ru/project/25-42-00083/>).

## Влияние плоскостного магнитного поля на неуниверсальные параметры режима ползучести

**Давыденко А.В., Черноусов Н.Н., Пащенко А.С., Козлов А.Г., Турпак А.А.**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

e-mail: chernousov.nn@dvfu.ru

Исследование посвящено фундаментальной проблеме влияния кирального магнитного затухания на динамику доменных стенок границ в режиме ползучести в эпитаксиальной системе Pd/Co/Pd/Cu/Si(111).

В отличие от классического магнитного затухания Гильберта, которое изотропно, киральное затухание линейно зависит от градиента намагниченности и проявляется в системах, с нарушенной инверсионной симметрией. Эффект заключается в различной константе магнитного

затухания для правовинтовой и левовинтовой конфигурации доменной границы во внешнем плоскостном магнитном поле в многослойных магнитных структурах с перпендикулярной магнитной анизотропией [1].

В режиме ползучести подвижности гетерокиральных доменных границ могут отличаться в 100-1000 раз [3]. Однако пока не построена цельная аналитическая модель, способная связать структурные параметры с киральностью затухания и определить как этот эффект модифицирует три ключевых параметра режима ползучести доменных границ: поле депиннинга  $H_d$ , температуру депиннинга  $T_d$  и скорость доменных границ при поле депиннинга  $v(H_d)$ .

В этой работе для образца состава Pd(3 нм)/Co(0.7 нм)/Pd(3 нм)/Cu(2 нм), выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, измерены зависимости скорости доменных границ от величины перпендикулярного магнитного поля  $v(H_z)$  при разных значениях плоскостного поля в плоскости (рисунок 1). Каждая из зависимостей  $v(H_z)$  аппроксимировалась уравнением режима ползучести и депиннинга для определения неуниверсальных параметров режима ползучести. Единственным параметром, не являющимся симметричным относительно  $H_x = 0$ , является поле депиннинга. Таким образом, на асимметрию затухания в этой системе наблюдается вследствие зависимости поля депиннинга от киральности доменных границ.

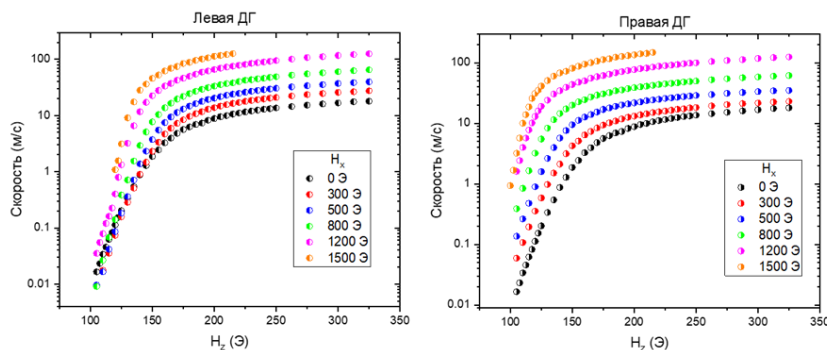


Рисунок 1 – Зависимости  $v(H_z)$  в логарифмическом масштабе для левой и правой доменной границ при разных значениях  $H_x$

## Литература

1. E. Jue et al., “Chiral damping of magnetic domain walls”, Nature Materials, vol. 15, p. 272–277, 2016.
2. A.V. Davydenko et al., “Chirality of domain wall mobility in different regimes of domain wall propagation in epitaxial Pd/Co/Pd(111) films”, Physical Review B, vol. 112, № 224402, 2025.

## Благодарность

Работа Турпака А. А., Черноусова Н. Н., Пащенко А.С. и Давыденко А. В. выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-22-20079, <https://rscf.ru/project/25-22-20079/>) и Правительства Приморского края (грант № 25-810-62470-2-0214-000004).

## Плазмонные структуры на основе пористого кремния

**Тыныштыкбаев К.Б.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup>Физико-технический Институт, Сатбаев Университет, Алматы 050032, Казахстан

<sup>2)</sup>Назарбаев Университет, Астана 010000, Казахстан

**e-mail:** k.tnyshtykbayev@satbayev.university; kurbangali.tnyshtykbayev@nu.edu.kz

В докладе будут представлены результаты исследования плазмонных свойств структур Ni-PNP/por-Si, Ni/Ag-PNP/por-Si и Ag-PNP/por-Si, сформированных методом одношагового металлостимулированного электрохимического травления, EMACE. Предварительное маскирование поверхности кремниевой пластины с помощью оптической литографии и последующее металлостимулированное травление методом позволяет создать периодическую плазмонную структуру с улучшенными свойствами процессов комбинационного рассеяния света, фотолюминесценции и испарения воды.

Никелевые плазмонные структуры Ni-PNP/por-Si на основе пористого кремния обладают высокой химической стабильностью за счет формирования поверхностных слоев силицидов никеля NiSi.

Серебряные плазмонные структуры Ag-PNP/por-Si демонстрируют видимую фотолюминесценцию с гигантским усилением сигнала комбинационного рассеяния на частотах, соответствующих нанокристаллической фазе. Светимость серебряных плазмонных структур обусловлена излучательными свойствами плазмонной структуры Ag-PNP/por-Si.

Каталитическая активность плазмонных Ag-PNP/por-Si структура превышает эффективность известных в литературе солнечных термогенераторов воды и равна  $E_a = 7.58 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

Высокая активность плазмонных структур серебра Ag-PNP/por-Si в процессах испарения воды зависит от времени металл-стимулированного осаждения плазмонных наночастиц серебра Ag-PNP.

Полученные результаты имеют важные прикладные значения в технологии микро-, наноэлектроники для создания приборов и устройств с использованием методов химических, электрохимических травления; излучательных приборов и устройств; высокоактивных фотоэлектродов для получения водорода при фотоэлектролизе воды; высокоэффективных солнечных термогенераторов морской воды.

**IV. Нанотехнологии кремниевой электроники, включая ионную имплантацию, литографию, технологии создания квантовых точек и скрытых слоев. Квантовые технологии на основе кремниевых структур, квантовые сенсоры**

## Разработка слоев Mo-Si для реализации оптической фотолитографии с нанометровыми технологическими нормами

**Громов Д.Г., Лебедев Е.А., Новосельцев А.И., Крохан Н.В., Аникин А.В.**

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград  
e-mail: gromadima@gmail.com

Стремительное повышение степени интеграции кремниевых ИС происходит в значительной мере за счет совершенствования инструментария проекционной фотолитографии [1], важной частью которого является фотошаблон, представляющий собой плоскопараллельную пластину, покрытую маскирующим слоем, в котором сформирован рисунок топологического слоя производимой ИС. В нанометровой области размеров для проектных норм ниже 45 нм стандартные бинарные фотошаблонные заготовки хрома на стекле с хромовыми пленками толщиной 70 нм не могли обеспечить требуемый минимальный размер элементов, линейность и шаг между элементами. Для создания фотошаблонов высокого разрешения были разработаны две альтернативные конфигурации фотошаблонных заготовок: ослабляющая фазосдвигающая фотошаблонная заготовка (EAPSM) с фазосдвигающим слоем на основе полупрозрачного MoSi и фотошаблонная заготовка с непрозрачным MoSi на стекле (OMOG) [2].

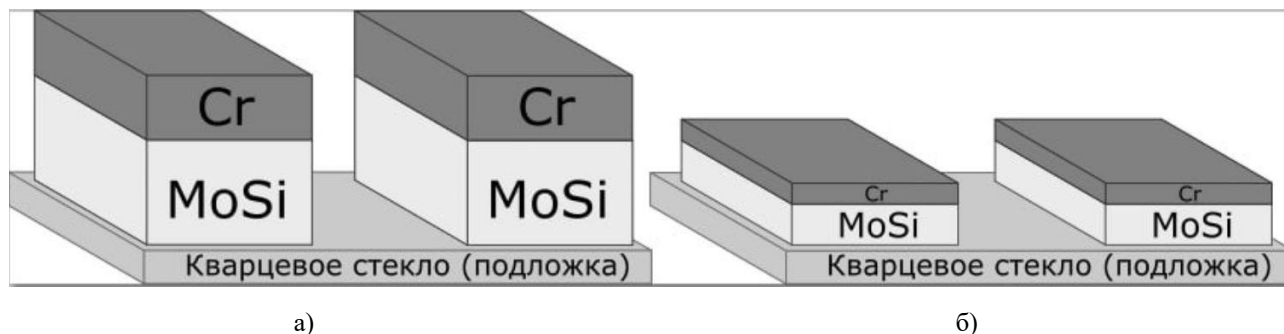


Рисунок 1 – Варианты бинарного фотошаблона: а) 116 нм EAPSM: слой Cr 49 нм и фазосдвигающий слой MoSi 67 нм; б) 70 нм OMOG: непрозрачный слой MoSi 60 нм со слоем Cr 10 нм.

В работе представлены результаты исследований свойств фазосдвигающих слоев для EAPSM и непрозрачных слоев для OMOG на основе Mo-Si, которые были сформированы методом магнетронного распыления в азот-содержащей среде. Изучено изменение состава слоев в зависимости от концентрации азота в рабочей газовой смеси. Для выбранных составов и толщин слоев на основе Mo-Si измерены основные оптические характеристики: пропускание, показатель преломления, коэффициент экстинкции, фазовый сдвиг электромагнитной волны для полупрозрачных фазосдвигающих слоев на основе MoSi и коэффициент отражения, оптическая плотность для непрозрачных слоев на основе MoSi. Сформированные фазосдвигающие и непрозрачные слои на основе Mo-Si были подвергнуты воздействию различных доз глубоко ультрафиолетового излучения (ГУФ) эксимерного лазера ArF с длиной волны 193 нм. Показано, что оба материала слабо изменяют свои оптические свойства в интервале доз облучения от 0 до 2,5 кДж/см<sup>2</sup>, что делает их пригодными для использования в производстве фотошаблонов.

### Литература

1. Г.Я. Красников, Е.С. Горнев, И.В. Матюшкин. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации / // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2017. – № 4(168) – Р. 16–41.
2. T. Faure, E. Gallagher, M. Hibbs, L. Kindt, K. Racette, R. Wistrom, A. Zweber, A. Wagner, Y. Kikuchi, T. Komizo, S. Nemoto. Characterization of Binary and Attenuated Phase Shift Mask Blanks for 32nm Mask Fabrication // Proc. of SPIE, Vol. 7122, 2008, 712209.

## Использование атомно-слоевого травления для планаризации поверхности SiO<sub>2</sub>

***Ковалев А.Н.<sup>1,2)</sup>, Резванов А.А.<sup>1,2)</sup>, Шибанов Д.Р.<sup>3)</sup> и Лопачев Д.В.<sup>3)</sup>***

*<sup>1)</sup>АО Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, г. Зеленоград*

*<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт (НИИУ), г. Москва*

*<sup>3)</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва*

e-mail: kovalev.an@phystech.edu

Реактивное ионное травление (RIE) неизбежно приводит к образованию дефектного слоя и увеличению шероховатости из-за физического распыления поверхности высокоэнергетичными ионами [1]. Традиционные методы сглаживания поверхности, такие как химико-механическая планаризация (CMP) сложно интегрировать в единую кластерную систему. Одним из альтернативных способов уменьшения шероховатости может стать атомно-слоевое травление (ALE) из-за цикличности процесса и самонасыщения в каждом цикле [2].

В настоящей работе исследована возможность in-situ планаризации поверхности SiO<sub>2</sub>/Si после реактивного ионного травления методом атомно-слоевого травления в реакторе с индуктивно связанной плазмой (ICP). Оба процесса проводились в одной и той же камере – Плазма ТМ 200-04 производства НИИТМ. Цикл ALE состоял из четырех стадий: 1) осаждения полимерной пленки из C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>; 2) продувки аргоном; 3) травления в O<sub>2</sub>/Ar; 4) продувки аргоном [3]. Отличительной особенностью подхода является отсутствие напряжения смещения (bias) на стадии травления, что приводит к отсутствию высокоэнергетичных ионов и, как следствие, физического распыления поверхности. Механизм сглаживания основан на циклическом конформном осаждении полимера и его последующем удалении. Благодаря зависимости скорости травления от кривизны поверхности, происходит преимущественное удаление материала с пиков микрорельефа [4].

Контроль толщины слоя SiO<sub>2</sub> до, во время и после процессов RIE и ALE проводился при помощи лазерного in-situ эллипсометра и спектрального ex-situ эллипсометра. Для определения шероховатости использовалась методика с перекрестными измерениями на атомно-силовом микроскопе (AFM) и рентгеновском рефлектометре (XRR).

Предлагаемый подход позволяет снизить шероховатость поверхности SiO<sub>2</sub> до суб-нанометрового уровня, устраняя последствия RIE-повреждений in-situ, без использования дополнительных технологических операций. Применение режима плазменного ALE без смещения, ориентированное на задачу планаризации, открывает новые перспективы для использования данного метода при формировании чувствительных к степени гладкости интерфейсов.

### Литература

1. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 3rd ed. – Wiley, 2018. – 800 p.
2. Choi M., Lee H. Plasma atomic layer etching of SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> using low global warming hexafluoropropene // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2025. – Vol. 43, No. 2. – P. 022601.
3. Lopaev, D.V., Shibanov D.R. (2026). Fluorocarbon (C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>) assisted plasma-enhanced atomic layer etching (PEALE) of SiO<sub>2</sub> with high repeatability of cycles in industrial ICP reactor. I. experiment. Journal of Vacuum Science & Technology A. 44. 10.1116/6.0005123.
4. Gasvoda R.J., van de Steeg A.W. Surface phenomena during plasma assisted atomic layer etching of SiO<sub>2</sub> // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2017. – Vol. 35, No. 5. – P. 05C301.



## Формирование переходного слоя на кремнии при облучении ионами $C_{60}$

**Карасев П.А.<sup>1)</sup>, Карасев К.П.<sup>1,2)</sup>, Стрижкин Д.А.<sup>1)</sup>, Пуха В.Е.<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>С-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, С-Петербург

<sup>2)</sup>С-Петербургский Академический университет им. Ж.И. Алферова, С-Петербург

<sup>3)</sup>ФИЦ Проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка

e-mail: platon.karaseov@yandex.ru

Облучение ускоренными ионами широко применяется для модификации свойств поверхности и приповерхностных слоев, а также для анализа их свойств. Этот метод позволяет формировать нанорельеф, травить, или наращивать слои на облучаемой поверхности. Помимо атомарных ионов, технологическое применение находят и кластеры – конгломераты, состоящие из десятков, или даже тысяч атомов. Коллективные эффекты в этом случае играют существенную роль и взаимодействие кластерных ионов с мишенью существенно отличается от взаимодействия атомарных, что открывает дополнительные возможности управления свойствами поверхности мишени.

В работе проводилось облучение подложки Si (100) ионами  $C_{60}$  с энергиями 7-9 кэВ при температурах 20 °С и 250 °С до флюенса  $=2 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, (~ 2 монослоя молекул  $C_{60}$ ). Свойства поверхности до и после облучения исследованы методами атомно-силовой микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Показано, что шероховатость мишени практически не изменяется. В переходном слое образуются непереломные оксиды и карбид кремния, а также наблюдается появление углерод-углеродных связей, преимущественно имеющих  $sp^3$  гибридизацию. С ростом температуры значительно увеличивается скорость осаждения углерода, уменьшается доля атомов кислорода на поверхности, а также растет отношение  $sp^2/sp^3$  связей атомов углерода.

Для объяснения обнаруженных явлений проведено моделирование взаимодействия ускоренных молекул  $C_{60}$  с поверхностью кремния методом молекулярной динамики с использованием пакета LAMMPS. Наличие оксидного слоя не учитывалось. Межатомные взаимодействия определялись двумя способами: потенциалом Терсоффа, или потенциалом Стилинджера – Вебера. Для корректного описания взаимодействия частиц с высокой энергией (> 1 эВ) эти потенциалы гладко сшивались с потенциалом Зиглера-Бирзака-Литтмарка (ZBL). По боковым сторонам расчетной ячейки применялись периодические граничные условия, нижние 3 слоя атомов мишени были зафиксированы. Для диссипации избыточной энергии использовался термостат Берендсена шириной в 1 элементарную ячейку непосредственно над зафиксированным слоем атомов. На некоторой высоте над поверхностью помещалась молекула  $C_{60}$ , все атомы которой в начальный момент времени направлялись в сторону мишени. Скорость направлялась под различными полярным и азимутальным углами для исследования влияния угла падения. Выполнялось моделирование, как одиночных случаев, так и последовательного падения многих молекул  $C_{60}$ .

На рисунке 1 приведен пример рельефа, появившегося на исходно гладкой поверхности мишени в результате кумулятивного падения 3400 ионов  $C_{60}$ . Анализ данных МД моделирования подтверждает формирование связей Si-C и C-C в переходном слое. На границе переходной области образуется аморфный слой Si, причем с ростом температуры его толщина уменьшается. Толщина самого переходного слоя и распределения атомов углерода и кремния практически не зависят от температуры. Совокупность экспериментальных и расчетных результатов открывает новые особенности процесса карбидизации и формирования переходного слоя в подложке кремния при ионном облучении, которые могут быть использованы для создания защитных и функциональных покрытий с контролируемой долей  $sp^2/sp^3$  связей.

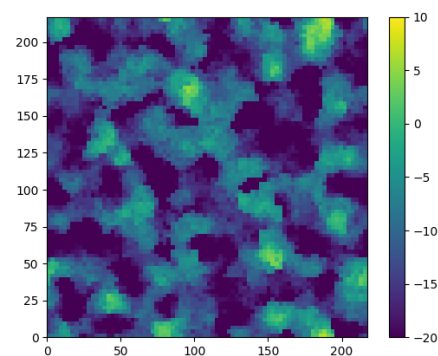


Рисунок 1 – Модель участка поверхности кремния размером 22×22 нм<sup>2</sup> после последовательного падения на нее 3400 ионов  $C_{60}$ .

## UTBB SOI структуры с локальными tr-hr слоями после имплантации молекулярных ионов CO

**Попов В.П.<sup>1)</sup>, Антонов В.А.<sup>1)</sup>, Жилицкий Е.В.<sup>1)</sup>, Мяконьких А.В.<sup>2)</sup>, Руденко К.В.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников СО РАН им.А.В. Ржанова, Новосибирск

<sup>2)</sup>НИЦ «Курчатовский институт - ОФТИ им. К.А. Валиева, Москва

e-mail: popov@isp.nsc.ru

Интегральные активные и пассивные микроволновые (MW) и оптические элементы (волноводы, фазовращатели, модуляторы, резонаторы и линии задержки) основаны на субмикрометровых металлических проводниках для микроволновых волноводов и на кремниевых полосках 200х500 нм, расположенных крест-на-крест, в структурах кремний-на-изоляторе (SOI) с толстым (2-4 мкм) скрытым слоем SiO<sub>2</sub> (BOX) [1]. Полуизолирующий слой поликристаллического кремния толщиной 2-4 мкм обычно лежит под слоем BOX в монокристаллическом кремнии с высоким сопротивлением (>1 кОм×см). Он фиксирует уровень Ферми, минимизирует концентрацию и время жизни носителей заряда вблизи гетерограницы, что уменьшает линейные потери сигнала в MW и оптических волноводах за счет эффекта паразитной поверхностной проводимости (PSC). Интеграция микроволновых, оптических и логических элементов интегральных схем требует формирования локальных областей со свойствами, аналогичными свойствам слоев TR-HR на стандартных кремниевых подложках. Использование структур TR-HR SOI® для КМОП-интегральных схем (ИС) ограничено из-за высокого напряжения смещения подложки  $V_{sub} > 5$  В и низкого теплоотвода из-за большой толщины  $t_{SiO_2}$  BOX [1,2]. Её уменьшение достижимо переходом на слои high-k BOX с эквивалентной толщиной окисла  $EOT = t_{SiO_2} \cdot \epsilon_{SiO_2} / \epsilon_{high-k}$  до 1 нм и менее [1].

Формирование локальных TR-HR слоев в подложках Si проводили имплантацией ионов CO<sup>+</sup> ( $E = 90-200$  кэВ,  $\Phi = (0.25-5.0) \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>) в зонах микроволнового или фотонного излучений как на стандартных пластинах SOI с BOX SiO<sub>2</sub> толщиной до 100 нм, так и на SOI структурах с кристаллическими high-k BOX и  $EOT \leq 2$  нм. TR-HR слой при печных отжигах от 700 до 1100°C снижал толщину BOX и эффективную EOT, но при этом обеспечивал снижение проходной емкости  $C_p$  и увеличение эффективного сопротивления подложки  $r_{eff}$ , аналогично высокоомным пластинам TR-HR SOI®. Структура и состав TR-HR слоев определялись по спектрам ИК Фурье поглощения и комбинационного рассеяния света, показывающих эволюцию Si-C и Si-O связей в подложке, а также отжиг нарушений в ней, ограничивающий диапазон термообработок. Показано, что быстрые термообработки (RTA) увеличивают этот диапазон до 1000°C при сохранении изолирующих свойств TR-HR слоев подложки за счет формирования нанокристаллической фазы кремния под слоем BOX.

Показано, что применением high-k кристаллических изоляторов эквивалентная толщина BOX и слоя кремния могут быть уменьшены до нанометра (UTBB SOI) при сохранении проходной емкости на уровне пластин TR-HR SOI® (SOITEC). Локальные слои TR-HR на низкоомной подложке эффективны при массовом производстве интегрированной с элементами MW и PIC CMOS логики с динамически регулируемым порогом полевых транзисторов [2].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №25-19-20049 и Правительства Новосибирской области № 30-2025-000924.

### Литература

1. В.П. Попов, В. А. Антонов, В.Е. Жилицкий, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко. Импеданс-спектроскопия ультратонких КНИ структур с высокоомными слоями // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, 6, 2024. С. 76-77.
2. M. Perros'e, P. Acosta, J. Lugo-Alvarez, et al. Low-loss RF substrate compatible with FD-SOI integration using Si+ implantation // Solid-State Electronics. 229, 2025, Art. No. 109189.

## Формирование упорядоченных структур серебра на кремнии методом литографически-контролируемого гальванического вытеснения

***Жарова Ю.А., Федорова Е.С., Ермина А.А., Пригода К.В., Большаков В.О., Марков Д.П., Солодовченко Н.С.***

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург*  
e-mail: piliouguina@mail.ioffe.ru

В работе представлен метод литографически-контролируемого гальванического вытеснения (ЛКГВ) для создания упорядоченных Ag структур в виде «нанозвезд» на монокристаллической кремниевой (c-Si) подложке с кристаллографической ориентацией (100). Разработанный подход объединяет: (i) электронно-лучевую литографию, задающую топологию структуры, и (ii) реакцию гальванического вытеснения, обеспечивающую рост металлической наноструктуры.

Метод ЛКГВ, который состоит из 4 этапов: (1) термическое окисление c-Si; (2) электронно-лучевая литография; (3) буферное травление слоя SiO<sub>2</sub> с последующим удалением резиста; (4) осаждение Ag методом гальванического вытеснения из раствора AgNO<sub>3</sub>:HF.

После проведения всех 4 этапов ЛКГВ были получены Ag «нанозвезды», радиусы которых составили  $450 \pm 20$  нм, а поверхностный фактор заполнения ( $f$ ) 16 %. Термообработка «нанозвезд» Ag в парах воды при температуре 1100°C в течение 90 мин позволила впервые получить упорядоченные эндотаксиальные (внедренные в c-Si) наночастицы Ag (AgНЧ) в форме четырехгранных пирамид. Эндотаксиальный рост означает образование новой фазы с сохранением ее состава (в нашем случае AgНЧ) внутри объема исходной структуры (c-Si). Важным свойством эндотаксиальных структур является строгая зависимость кристаллографической ориентации новообразовавшейся фазы по отношению к кристаллографической ориентации исходной фазы. Размеры сторон основания Ag пирамид составили  $260 \pm 90$  нм, а  $f = 2$  %. Механизм внедрения и свойства внедренных разупорядоченных AgНЧ рассмотрены в наших предыдущих работах [1, 2]. Разработанный метод ЛКГВ отличается технологической простотой, воспроизводимостью и представляет интерес для масштабирования к меньшим периодам и размерам НЧ, а также открывает новые возможности для формирования наноструктур с заданной топологией и формой. При этом потенциальные ограничения по минимальным характерным размерам, вероятнее всего, будут определяться предельным разрешением электронно-лучевой литографии. Для получения упорядоченных эндотаксиальных AgНЧ с двух- и трёхкратной симметрией методом высокотемпературной обработки, используя его в качестве инструмента модификации «нанозвезд», необходимо использовать c-Si подложки с кристаллографическими ориентациями (110) и (111) соответственно.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FFUG-2024-0017).

### Литература

1. A. A. Ermina et al. Silver particles embedded in silicon: The fabrication process and their application in surface enhanced Raman scattering (SERS), *Applied Surface Science*. **608**, 155146, (2023) <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155146>.
2. Yu. A. Zharova et al. Anisotropic process of Ag nanoparticles embedding into c-Si during high-temperature annealing. *Applied Surface Science*. **682**, 161549 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161549>.

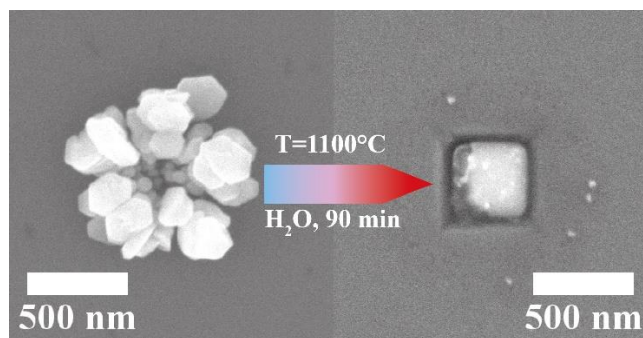


Рисунок 1 – РЭМ изображения (вид сверху) трансформации Ag «нанозвезд» в эндотаксиальную AgНЧ

## Исследование свойств Low-к диэлектрика на основе оксида кремния с добавлением бензольных и метильных групп

Кадыров А.Д.<sup>1,2)</sup>, Резник А.А.<sup>1,2)</sup>, Резванов А.А.<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>АО «НИИМЭ», Зеленоград

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный

e-mail: akadyrov@niime.ru

Проблема увеличения тактовой частоты будущих интегральных схем связана с наличием временных RC задержек в слоях металлизации интегральной схемы. Задержки вызваны емкостной связью проводников через изолятор, отделяющих их друг от друга. Для решения этой проблемы исследуются новые low-к диэлектрики — диэлектрики с диэлектрической проницаемостью меньше, чем у оксида кремния, что позволяет уменьшить емкость изолятора, а, следовательно, и RC-задержки. Однако, для интеграции low-к диэлектриков в существующие технологические процессы, необходимо чтобы свойства новых материалов удовлетворяли требованиям микроэлектронной промышленности (механические свойства, температурная стабильность, гидрофобность и т. д.) [1]. Поэтому важной задачей является исследование различных свойств low-к диэлектрика.

В недавней статье [2] был представлен low-к диэлектрик на основе оксида кремния с добавлением бензольных мостиковых групп и терминальных метильных групп. Однако, экспериментально были исследованы не все свойства материала. Для некоторых свойств, например для модуля Юнга, наблюдается сильная зависимость от соотношения концентраций бензольных групп к метильным, как показано на рисунке, и при этом эксперимент был произведен лишь в нескольких точках. Поэтому важной задачей является построение модели для исследования различных свойств данного low-к диэлектрика в более широком диапазоне значений концентраций бензольных колец.

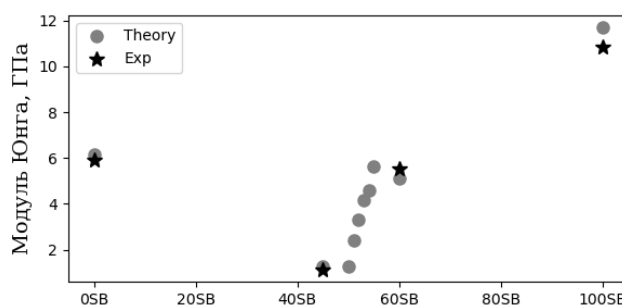


Рисунок 1 – Зависимость модуля Юнга от соотношения концентраций бензольных к метильным группам.

Для построения модели материала использовался метод классической молекулярной динамики. Благодаря ему была исследована зависимость модуля Юнга от концентрации бензольных колец: рассчитанные значения близки к экспериментальным точкам, что позволяет верифицировать модель, рассчитаны значения в наиболее интересующей области, от 50SB до 55SB, где как раз и наблюдается перколяционный переход и, соответственно, резкий рост модуля Юнга. Модель позволила подтвердить гипотезу, представленную в статье, о связи резкого роста упругих свойств с пере-ориентированием бензольных колец вдоль направления деформации.

Также была исследована температурная стабильность диэлектрика в диапазоне температур от 300K до 2000K с шагом в 200K. Температура плавления находится в области от 700K до 900K, так как при этом переходе наблюдается скачок плотности и потенциальной энергии системы.

### Литература

1. Красников Г.Я., Орлов О.М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной нормы до уровня 0.18 мкм и меньше //Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. №. 7-8. С. 124–128.
2. Rezvanov A. A. et al. Benzene bridged hybrid organosilicate films with improved stiffness and small pore size // Materials Chemistry and Physics. 2022. V. 290:126571.

## Химические реакции травления при использовании газовой смеси тетрафторида кремния, силана и водорода при осаждении пленки нанокристаллического кремния

Миловзоров Д.Е.

Российский новый университет РОСНОУ, Москва

e-mail: MilovzorovDE@stud.rosnou.ru

Тетрафторид кремния обеспечивает на поверхности появление фтороводорода, действие которого на оксид кремния позволяет изготовить нанокристаллические пленки при низких температурах с высокими рабочими параметрами.

На поверхности пленки кремния образуются в результате травления фтороводородом оксида кремния снова тетрафторид кремния и вода:  $\text{SiO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{SiF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Реакции, протекающие в реакторе, можно подразделить на те, которые протекают непосредственно в реакторе в газообразном состоянии в объеме реактора и другие, которые протекают только на поверхности пленки кремния. Количество тетрафторида кремния, который синтезируется в реакторе при взаимодействии фтороводорода с оксидом кремния. Поэтому, на основании такого предположения, количество вещества можно выразить таким образом:

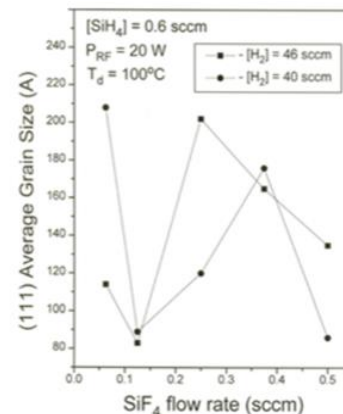
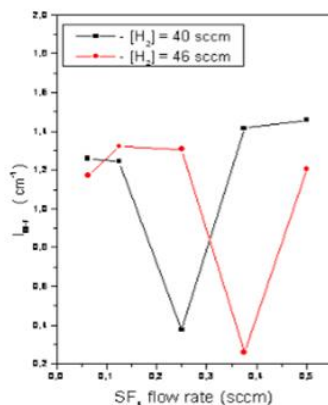


Рисунок 1 – Зависимость интенсивности линии поглощения SiF (слева) и размера нанокристаллов кремния (справа) от скорости натекания тетрафторида кремния.

$$C_{\text{SiF}_4} = C_{\text{SiF}_4}^0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(\alpha \omega_k); \quad (1)$$

Концентрация в электрохимическом реакторе меняется периодически под действием соединения тетрафторида кремния с водородом с образованием фтороводорода, с одной стороны, и, с другой стороны, происходит одновременный процесс травления кремния тетрафторидом кремния и образования дифторида, а, затем, и фторида кремния. При изменении величины температуры со 100 °C до 300 °C то есть в три раза, отношение скоростей в этом случае будет пропорционально отношению квадратных корней из величин температуры, то есть увеличится в 1.732 раза. Решение уравнения описывающего модель в виде эллиптической функции Вейерштрасса следующего вида имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= H_2 (H_1 + \varphi) x^2; \\ x &= \wp \left( \sqrt{\frac{H_2 (H_1 + \varphi)}{6}} t + C_2 \right); g_2 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Функция Вейерштрасса задается на всей вещественной прямой чисел и имеет аналитический вид:

$$\begin{aligned} \wp(\tau) &= \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cos(a^n \pi \tau); \\ a &\neq 1, 0 < b < 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассматривая альтернативные иерархические процессы химических реакций необходимо учесть приоритетное направление рассмотрения задачи, а именно, критерий отбора рассматриваемых реакций, таких, которые реализуют травление, и в таких, продуктом которых будет травитель.



## Моделирование напряженно-деформированного состояния системы металлизации на кремнии в условиях теплового удара

**Никитин В.В., Скворцов А.А., Николаев В.К., Рыбакова М.Р.**

Московский политехнический университет, Москва

e-mail: labor.vitae@icloud.com

Настоящая работа посвящена моделированию процесса термомеханической деградации тонкоплёночной структуры на основе кремниевой подложки с подслоем из оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) в условиях теплового удара. Исследуемая структура, представляла собой окисленную кремниевую пластину (толщина кремниевой пластины и пленки  $\text{SiO}_2$  равны  $h_{\text{Si}} = 100 \text{ }\mu\text{m}$  и  $h_{\text{SiO}_2} = 1 \text{ }\mu\text{m}$  соответственно), с напыленной на неё алюминиевой пленкой ( $h_{\text{Al}} = 4 \text{ }\mu\text{m}$ ). Тепловой удар формировался путем пропускания одиночного токового импульса (длительностью  $500 \text{ }\mu\text{s}$ ) через слой металлизации:

$$Q(T, t) = \rho(T) \cdot j^2 \cdot p(t) \quad (1)$$

здесь  $\rho(T)$  – температурозависимое удельное сопротивление металлизации,  $j$  – плотность тока,  $p(t)$  – функция формы импульса, задающая масштаб значения источника тепла во времени. В процессе расчетов учитывалось зависимость свойств контактирующих материалов от температуры. При этом полагалось, что материалы остаются упругими. Также тепловые режимы работы системы не доводилась до процессов деградации.

Моделирование температурных полей в условиях термоудара на рассматриваемой структуре проводилось при плотностях тока:  $j_1 = 1.7 \times 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ ,  $j_2 = 3.3 \times 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ ,  $j_3 = 3.9 \times 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$  и  $j_4 = 4 \times 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ . Результаты моделирования показали, что наибольший температурный градиент достигается в подслое из оксида кремния. К примеру,  $\frac{dT}{dy} = 294 \frac{\text{K}}{\mu\text{m}}$  при плотности тока  $j_4 = 4 \times 10^{10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ .

Разница коэффициентов теплового расширения материалов приводит к возникновению термоупругих деформаций в структуре (рис.2). Характер наблюдаемых деформаций (рис.2) свидетельствует о конусной усадке Al пленке (рис.2).

Результаты моделирования термомеханического отклика структуры совпадают с результатами эксперимента [1], как в части температурных полей, так и в части полей деформации структуры. Разработанная методика и полученные результаты позволяют применять методы численного моделирования (наряду с экспериментами) тонкоплёночных структур для оценки температурных полей и напряженно-деформированного состояния в условиях нестационарных внешних возмущений тепловой природы.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 25-79-10123.

### Литература

1. Skvortsov, A.A., Varlamov, D.O., Nikolaev, V.K. et al. Shock-wave Processes in the Electric Explosion of Thin-Film Systems on Silicon. Silicon 15, 1987–1992 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02147-y>.

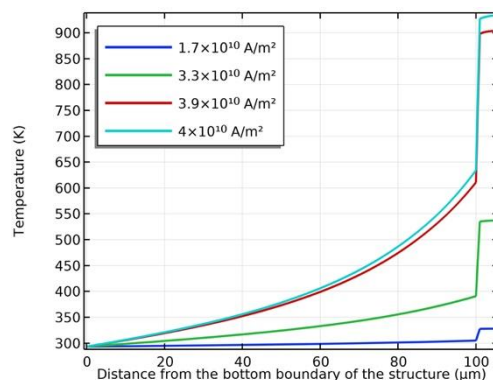


Рисунок 1 – График распределения температуры по структуре вдоль слоёв.

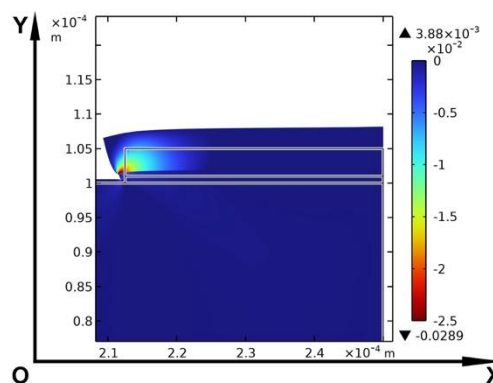


Рисунок 2 – Тангенциальные деформации в области фрагмента структуры на границе раздела материалов Si-SiO₂-Al.



## Анодное окисление кремния, имплантированного большими дозами ионов $\text{CO}^+$

**Попов И.В., Смагина Ж.В., Спесивцев Е.В., Тыщенко И.Е., Попов В.П.**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск*  
e-mail: tys@isp.nsc.ru

Окисление является одной из основных операций кремниевой технологии. Обычно оно проводится термически при температурах от 1000 до 1200 °С. Однако, использование столь высоких температур не всегда приемлемо, например, при переходе к 3-х-мерной интеграции КМОП-транзисторов. Альтернативным методом создания слоев  $\text{SiO}_2$  на кремнии является метод анодного окисления. Анодное окисление является низкотемпературным методом. Оно, как правило, протекает при комнатной температуре и обладает высокой точностью окисления, высокой воспроизводимостью и возможностью создавать слои  $\text{SiO}_2$  толщиной до нескольких единиц нанометров. Взаимосвязь между свойствами анодного оксида и структурными особенностями кремниевой подложки до сих пор остается неизученной. В данной работе исследованы основные закономерности анодного окисления подложек Si, имплантированных большими дозами ионов  $\text{CO}^+$ .

Подложки кремния марки КОФ-2000 с ориентацией (111) были имплантированы ионами  $\text{CO}^+$  с энергией 90 кэВ дозами  $2.5 \times 10^{15}$ – $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . После имплантации пластины отжигались при температуре 700 или 1100 °С в течение 1 часа в атмосфере паров  $\text{N}_2$ . Анодное окисление проводилось при комнатной температуре в гальваностатическом режиме. В качестве электролита использовали раствор 0.04%  $\text{Na}(\text{KNO}_3)$ , 0.5%  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ . Окисление проводилось при плотности тока около 8  $\text{мА/см}^2$ . Толщина окисленного слоя исследовалась методом спектральной эллипсометрии, рельеф поверхности изучался методом атомно-силовой микроскопии.

Установлено, что рост толщины анодного оксида в зависимости от напряжения на образце во время окисления практически не зависит от дозы ионов  $\text{CO}^+$  в образцах, отожженных при температуре 700 °С (Рис. 1). Она является линейной функцией от напряжения. Скорость окисления при этом соответствует скорости окисления неимплантированного кремния и составляет около 0.4  $\text{нм/В}$ . После отжига имплантированных образцов при температуре 1100 °С скорость окисления соответствует скорости неимплантированного кремния лишь при дозах ионов  $\text{CO}^+$  ниже  $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , а при больших дозах скорость окисления увеличивается до 0.7  $\text{нм/В}$ . При этом изменение толщины  $\text{SiO}_2$  также остается линейной функцией от напряжения.

По мере роста толщины пленки её шероховатость увеличивается, и средний перепад высоты рельефа пленки возрастает от 20 до 90  $\text{нм}$ . Увеличение температуры постимплантационного отжига при фиксированной дозе ионов также приводит к увеличению среднего перепада высот в рельефе пленки. При этом также наблюдается увеличение её пористости. Средняя доля микропор растет от нуля до 70% в общем объеме пленки. Наблюдаемые эффекты могут быть связаны с формированием преципитатов SiСв кремнии при высокотемпературном отжиге и различием скоростей окисления областей SiС и Si.

Исследования поддержаны Российским Научным Фондом [Грант № 25-19-20049] и Правительством Новосибирской области [Грант № 30-2025-000924].

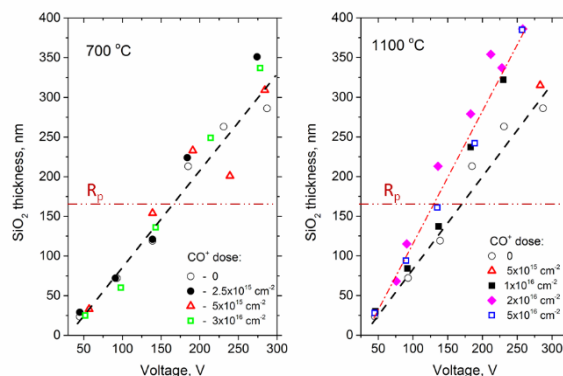


Рисунок 1 — Толщина анодного оксида в зависимости от напряжения на образцах, имплантированных разными дозами ионов  $\text{CO}^+$  и отожженных при температуре 700 и 1100 °С.

## Разработка и калибровка модели постэкспозиционной сушки в резистах с химическим усилением

**Степанова М.Г.<sup>1,2)</sup>, Литаврин М.В.<sup>1)</sup>, Клочкова Е.Л.<sup>1)</sup>, Шарапов А.А.<sup>1,2)</sup>, Шишлянников А.В.<sup>1,2)</sup>,  
Фортунова Е.А.<sup>1,2)</sup>, Горнев Е.С.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Зеленоград,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г.  
Долгопрудный, Московская область, Россия  
e-mail: mastepanova@niime.ru

Фотолитография – один из ключевых этапов формирования интегральной схемы в микроэлектронике [1]. Стоимость и сложность этого этапа создаёт необходимость в его математическом моделировании. Одним из направлений вычислительной литографии является процессное моделирование, основанное на подробном описании физико-химических механизмов экспонирования, сушки и проявления фоторезиста. Этот вид моделирования, несмотря на сложность вычислений, имеет ряд преимуществ. В частности, параметры таких моделей имеют физический смысл, отражающий свойства конкретных материалов [2]. Кроме того, процессные модели позволяют более точно, чем компактные, предсказывать профиль структуры, обеспечивая возможность оценки не только размеров элемента, но и других характеристик результирующего изображения, например, наклона его стенок или амплитуды стоячих волн [3].

Постэкспозиционная сушка является одним из этапов фотолитографии. Для резистов с химическим усилением, активно применяемых в технологиях 180 нм и менее, этот процесс описывается совокупностью реакций компонентов плёнки: кислотно-основной нейтрализацией, деблокированием полимера и другими. Кинетика процессов, протекающих при постэкспозиционной сушке, может быть описана с помощью системы дифференциальных уравнений в частных производных [4], которая включает в себя ряд параметров, характеризующих диффузию вещества и скорости химических реакций.

Процесс диффузии можно описывать с помощью постоянных коэффициентов или с использованием уравнения Фуджиты-Дулиттла. В данной работе проведено сравнение этих двух представлений. Рассмотрены различные реализации численного решения системы уравнений для этапа сушки с использованием специализированных библиотек языка Python. Для определения параметров модели предложен метод, основанный на гибридном использовании известных из эксперимента характеристик материала и подборе оставшихся коэффициентов на небольшом наборе измерений размеров структур.

С помощью предложенного метода построена модель литографического процесса для технологии 180 нм, позволяющая предсказывать размеры и профиль структур с ошибкой менее 2% от целевого размера. Модель сушки и метод подбора параметров являются универсальными и потенциально могут использоваться для процессов проектных норм менее 180 нм.

Работа выполнена в рамках гранта № 24-91-18002 Российского научного фонда.

### Литература

1. Красников Г.Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия, 13, S5-1(102), 2020 стр. 13-19.
2. Литаврин М. В., Шарапов А. А., Шишлянников А. В., Горнев Е. С. Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением // Наноиндустрия, 17, S10-2 (128), 2024 стр. 710-718.
3. Балан Н.Н., Иванов В.В., Кузовков А.В., Соколова Е.В., Шамин Е.С. Основные подходы к моделированию формирования фоторезистивной маски в вычислительной литографии // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники, 22(4), 2019 стр. 279-289.
4. Smith M. D., Byers J. D., Mack C. A. The lithographic impact of resist model parameters //Advances in Resist Technology and Processing XXI. 5376, 2004 P. 322-332.

## Исследование точности совмещения и воспроизводимости критических размеров в технологии двукратной 193-нм сухой литографии

Тихонова Е.Д.<sup>1)</sup>, Горнев Е.С.<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Зеленоград,  
Москва, Россия

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г.  
Долгопрудный, Московская область, Россия

e-mail: etikhonova@niime.ru

Литография играет ключевую роль в технологии производства современных сверхбольших интегральных схем, поскольку именно она определяет минимально достижимые критические размеры элементов топологии и, следовательно, границы дальнейшего масштабирования [1]. Методы многократной литографии (Multiple Patterning, MP), и прежде всего двукратная литография (Double Patterning, DP), стали одним из основных средств дальнейшего повышения разрешающей способности [2]. Их значимость сохраняется и при использовании экстремальной ультрафиолетовой литографии (Extreme Ultraviolet Lithography, EUV), где для наиболее критических слоёв также требуется многократное формирование рисунка [3].

В настоящей работе исследуется технология двукратной литографии, реализованная на сканере ASML PAS 5500/1150C в условиях 193-нм сухой литографии. Для этого был разработан тестовый фотошаблон, содержащий модули для исследования процесса двукратного формирования рисунка, контроля равномерности критического размера и оценки точности совмещения слоёв. Экспериментальная схема предусматривала выполнение двух экспозиций с использованием одного фотошаблона, включающего оба рисунка, что позволило исключить межмасочную составляющую ошибки совмещения (Overlay, OL). Контроль совмещения осуществлялся по специальным структурам типа Box-in-Box. Исследование было ориентировано на формирование структур с критическим размером 65 нм и на определение требований к параметрам процесса, обеспечивающих реализацию двукратной литографии на оборудовании данного поколения.

В результате проведённых экспериментальных измерений выявлено, что для двукратной литографии определяющими параметрами процесса являются ошибка совмещения и неоднородность критического размера (Critical Dimension Uniformity, CDU). Установлено, что реализация целевого критического размера требует жёсткого соблюдения допуска по совмещению, поскольку локальные отклонения приводят к дефектам формирования топологии. Одновременно анализ распределения критических размеров по пластине показал, что параметр CDU должен рассматриваться как самостоятельный критерий технологической пригодности процесса, так как именно он характеризует воспроизводимость линий при двукратном экспонировании. Полученные результаты позволили сформулировать требования к совмещению слоёв и к стабильности критического размера, необходимые для практической реализации технологии двукратной литографии.

### Литература

1. Красников Г.Я. Комплементарные методы усиления разрешения оптической литографии / Г. Я. Красников, О. П. Гущин, М. В. Литаврин, Е. С. Горнев // Наноиндустрия. – 2018. – № S(82). – С. 236-237.
2. Тихонова Е.Д. Использование метода двойного экспонирования со сдвигом маски для улучшения разрешающей способности фотолитографического процесса / Е. Д. Тихонова // Наноиндустрия. – 2025 – Т. 18 (135), № S11. – С. 1045-1047. – DOI 10.22184/1993-8578.2025.18.11s.1045.1047.
3. Тихонова Е.Д. EUV - литография в качестве перспективной технологии для производства наноразмерных элементов микроэлектроники / Е. Д. Тихонова // Молодежь и XXI век - 2021 : Материалы XI Международной молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Курск, 18–19 февраля 2021 года / Отв. редактор М.С. Разумов. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 436-439.

## Особенности формирования плотных линейных структур методом самосовмещённой двукратной литографии с использованием аморфного углерода

**Тихонова Е.Д.<sup>1)</sup>, Степанова М.Г.<sup>1,2)</sup>, Шарапов А.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Зеленоград, Москва, Россия

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

e-mail: etikhonova@niime.ru

В настоящее время развитие технологий кремниевой микро- и нанoeлектроники требует формирования плотных линейных структур с критическими размерами, недостижимыми при использовании однократной оптической литографии [1]. Одним из подходов, обеспечивающих уменьшение шага формируемых элементов, является метод самосовмещённой двукратной литографии (Self-Aligned Double Patterning, SADP) [2]. В отличие от традиционного литографического маршрута, данный метод включает дополнительные технологические операции, связанные с формированием мандрел — жертвенного слоя, из которого создаётся первичный рельеф структуры (рис. 1). После осаждения и анизотропного травления спейсерного материала на боковых поверхностях мандрел формируются спейсеры, которые после удаления мандрел задают положение и критические размеры итоговых плотных линий.

Материал слоя мандрел должен обеспечивать формирование устойчивого первичного рельефа, быть совместимым с операциями осаждения и анизотропного травления спейсерного слоя и селективно удаляться без деформации сформированных элементов. С этой точки зрения одним из наиболее подходящих материалов является аморфный углерод [3]. При этом его использование требует согласования параметров слоя с характеристиками остальных слоёв технологического стека, поскольку они непосредственно влияют на реализацию маршрута самосовмещённой двукратной литографии.

В данной работе проводится исследование технологических особенностей формирования плотных линейных структур методом самосовмещённой двукратной литографии с использованием аморфного углерода в качестве мандрел. Выполняется моделирование технологического стека, в рамках которого определяются функции отдельных слоёв, выбираются материалы и рассчитываются их толщины, необходимые для реализации литографического маршрута. Полученные результаты позволяют установить состав и параметры стека, обеспечивающие формирование плотных линейных структур данным методом.

### Литература

1. Красников Г.Я. Возможности микроэлектронных технологий с топологическими размерами менее 5 нм // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5-1(102). С. 13-19.
2. Тихонова Е. Д. Исследование композиций новых материалов в качестве жестких масок для процесса самосовмещенного мультипаттернирования / Е. Д. Тихонова // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-2(119). – С. 570-572.
3. Дождиков В. С. Аморфный углерод, закаленный из жидкого углерода: структура и свойства в широком диапазоне давлений / В. С. Дождиков, А. Ю. Башарин, П. Р. Левашов // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 21. – С. 32-37.

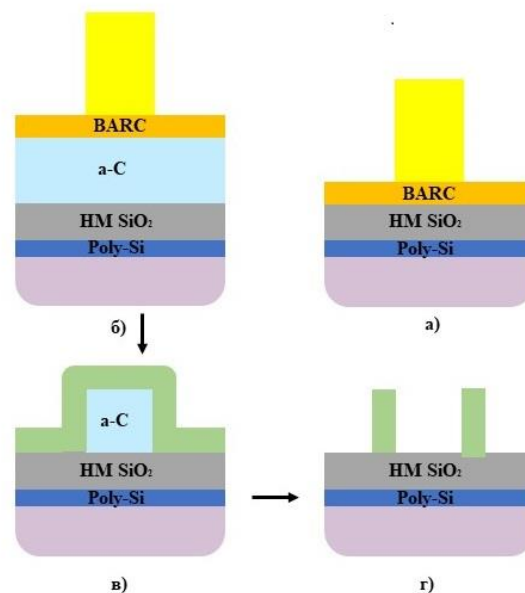


Рисунок 1 — Стек для традиционного литографического процесса формирования линий затвора (а); стек для процесса самосовмещённой двукратной литографии (б); технологический маршрут самосовмещённой двукратной литографии (в-г).

## Оптимизация процесса активации имплантированной примеси в кремнии для мощных полевых транзисторов методом лазерного отжига

**Федорова О.А.<sup>1)</sup>, Демо И.О.<sup>1)</sup>, Смирновский А.А.<sup>1,2)</sup>, Иванов Д.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>ООО «Софт-Импакт», г. Санкт-Петербург

<sup>2)</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

e-mail: olga.fedorova@str-soft.com

Преимущества лазерного термического отжига (ЛО) по сравнению с методами быстрого термического отжига или отжига в реакторах групповой обработки заключается в более точном контроле глубины прогрева и повышенной эффективностью активации легирующих примесей [1]. Компьютерное моделирование в комбинации с экспериментальными исследованиями позволяет снижать затраты в процессе поиска параметров лазера для достижения целевых параметров активации примеси по глубине залегания и эффективности активации. В частности, моделирование позволяет прогнозировать влияние параметров лазерного пучка на эволюцию температурных профилей, степень активации и транспорт примеси, что в конечном итоге определяет характеристики конечного прибора.

В данной работе рассмотрены процессы активационного отжига с помощью лазера в оптическом диапазоне длин волн, в качестве примеси выбраны фосфор и бор, начальные профили залегания которых определяются параметрами имплантации. Численное моделирование процесса ЛО проводилось в нестационарной постановке при различных параметрах лазерного пучка (размеры, плотность энергии, форма и длительность импульса, частота следования), уравнения теплопереноса и лучистого теплообмена комбинировались с уравнениями переноса примеси с учетом активации в твердой фазе и в расплаве. Рассмотрены параметры ЛО для инициирования режима отжига с расплавлением материала, так как в жидкой фазе атомы легирующей примеси распределяются в расплаве существенно быстрее, чем в твердой фазе.

В ходе моделирования было проведено сравнение и показано, что в случае, когда нагрев не превышает температуру плавления кремния, примесь крайне слабо распределяется по глубине, сохраняется изначальный профиль распределения концентрации бор и фосфора. При этом, доля активированной примеси составляет менее 1% от не активированной. В режиме, когда подобранные параметры ЛО обеспечивают формирование расплава, из-за высокого коэффициента диффузии примеси практически равномерно распределяются по глубине. Вместе с этим количество активированной примеси на порядки выше, чем при твердотельной активации. Отдельно в работе рассматриваются вопросы сегрегации примеси при рекристаллизации. В ходе рекристаллизации в профиле концентрации примеси возникают локальные пики концентрации на границе раздела расплава и твердого кремния. Эти неоднородности не могут быть объяснены одной только диффузией. Данный процесс может быть интерпретирован механизмом сегрегации, когда атомы примеси не полностью встраиваются в кристаллическую решетку кремния, скапливаясь на границе расплав-кристалл. Качественное воспроизведение профиля примеси из эксперимента [2] удалось получить при включении в модель учета сегрегации атомов примеси.

### Литература

1. E.V. Monakhov. Boron distribution in silicon after multiple pulse excimer laser annealing // Applied Physics Letters vol. 87, issue 8, 2005, 081901.
2. G. Fisicaro, A. La Magna. Modeling of laser annealing // Journal of Computational Electronics, vol. 13 2014, стр. 70-94.

## Особенности моделирования нагрева межсоединений на кремнии в условиях теплового удара

Худаяров З.Ф.<sup>1)</sup>, Скворцов А.А.<sup>1)</sup>, Скворцов П.А.<sup>2)</sup>, Рыбакова М.Р.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия,

<sup>2)</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

e-mail: zamir2252525@mail.ru

В данной работе рассмотрены особенности нагрева межсоединений на кремнии в условиях теплового удара, отработаны методики моделирования тепловых режимов работы структур, а также проведено сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментов по динамике нагрева межсоединений на кремнии импульсами тока.

В работе использовалась структура, состоящая из кремниевой подложки (Si) и алюминиевого межсоединения (Al). Как и ранее [1], в качестве подложки использовался прямоугольный фрагмент монокристаллической кремниевой пластины. В качестве межсоединения использовалась пленка алюминия в виде прямоугольной дорожки, напыленной на подложку методом электронно-лучевого испарения. Толщина межсоединения составила 3  $\mu\text{m}$ , а ширина – 75  $\mu\text{m}$ . Через такую дорожку пропускались токовые импульсы со значениями величины силы тока  $I=16\text{--}20\text{ A}$  и длительностью от 50–500  $\mu\text{s}$ .

В результате исследований было установлено, что расхождение результатов численного моделирования и экспериментальных данных по динамике нагрева тонкопленочных структур не превышают 10% (рис. 1). Несмотря на это нетрудно видеть, что лучшее согласование наблюдается при прохождении прямоугольных токовых импульсов меньшей амплитуды (рис.1). Авторы полагают, что это связано с началом деградиационных процессов в системе Al-Si. Одна из возможных причин может быть связана с разницей температурных коэффициентов линейного расширения алюминиевой плёнки и кремниевой подложки. При нагревании выше 250 K в плёнке может происходить пластическая деформация, которая может привести к появлению микропор и ухудшению теплового контакта на межфазной границе.

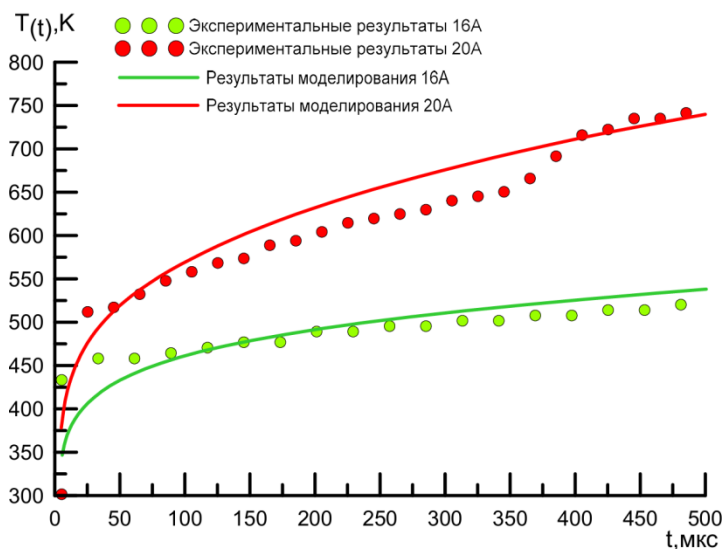


Рисунок 1 – Результаты экспериментального и модельного анализа нагрева межсоединений на кремнии в условиях теплового удара.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 25-79-10123.

### Литература

1. Скворцов, А. А.; Корячко, М. В.; Скворцов, П. А.; Лукьянов, М. Н. По вопросу образования трещин в тонком диэлектрическом слое кремния под термическим ударом // Journal of Materials Engineering and Performance. 2020, 29 (7), 4390–4395. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04925-4>.



## Физико-химическое моделирование профиля и неровности края в фоторезисте

**Шарапов А.А.<sup>1,2)</sup>, Литаврин М.В.<sup>1)</sup>, Горнев Е.С.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>АО «НИИМЭ», г. Зеленоград

<sup>2)</sup>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный

e-mail: asharapov@niime.ru

В сфере интегральной микроэлектроники в целом и в литографии в частности в настоящий момент активно ведутся работы по обеспечению технологической независимости от зарубежных материалов. Для литографических материалов данные работы включают разработку фоторезистов с химическим усилением и антиотражающих покрытий для применения в производственных процессах для технологических норм 180-90 нм.

Работы по созданию новых материалов заключаются, среди прочего, в подборе наиболее удачной композиции химических веществ, образующих фоторезист. При этом каждую новую композицию резиста нужно проверять непосредственно на производственных установках. Поэтому увеличение числа итерационных оптимизаций композиции ведёт к увеличению числа экспериментов на производственном оборудовании, из-за чего увеличится простой оборудования. Поэтому актуальной является задача достоверного моделирования переноса рисунка с фотошаблона в слой фоторезиста на пластине.

Решением этой задачи могут быть два типа моделей – полные и компактные. Компактные модели показывают высокое быстродействие, поэтому они применяются для моделирования всего чипа [2]. Однако ключевым недостатком таких моделей является их неуниверсальность: ввиду того, что модель упрощённая, она не может точно описывать широкий диапазон параметров процесса, и поэтому её коэффициенты калибруются именно под конкретный техпроцесс. Эти коэффициенты также не имеют выраженного физического смысла, поэтому даже небольшое изменение техпроцесса приводит к необходимости повторной перекалибровки модели. Ввиду этого использовать такие модели для отработки техпроцесса нельзя.

В работе представлены результаты построения модели фоторезиста, занимающей некоторое промежуточное положение между компактными и полными моделями. Она включает упрощённый расчёт 3-мерного воздушного изображения, фиковской диффузии фотокислоты и оснований и упрощённую модель проявления [3]. Попытка экстракции части параметров модели проводилась ранее [4]. На основе представленной модели предсказывается профиль в резисте и неровность края линии; приводится сопоставление данной модели с экспериментальными результатами [5].

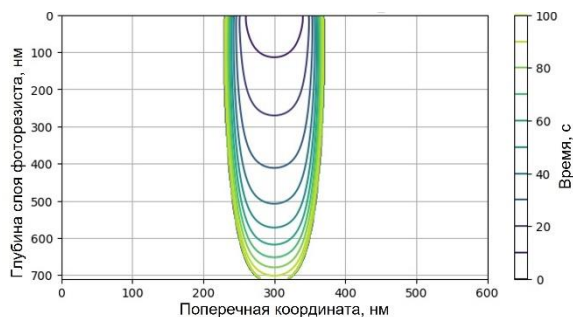


Рисунок 1 – Моделирование профиля фоторезиста в зависимости от времени проявления

### Литература

1. Н.Н. Балан и др. Использование нейросетевых алгоритмов в задачах вычислительной литографии // Наноиндустрия, №S96-2, 2020 стр. 543-548.
2. Е.Л. Харченко, Е.В. Соколова, Е.С. Горнев. Развитие и применение компактных моделей фоторезистивной маски// Наноиндустрия, 16, S9 (119), 2023 стр. 508-511.
3. J. Byers, M. Smith, C. Mack. Lumped Parameter Model for Chemically Amplified Resists // Proc. SPIE, 5377, Optical Microlithography XVII, 2004.
4. М.В. Литаврин и др. Экстракция эмпирических констант экспонирования и постэкспозиционной сушки для фоторезистов с химическим усилением // Наноиндустрия, 2024.
5. А.А. Шарапов, Г.В. Баранов. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур // Труды МФТИ, т. 10, №2(38), 2018 стр. 72-79.

## Исследование каталитической активности наноструктур пористый кремний/платина при электроокислении этанола

**Лазоркина Е.Н.<sup>1)</sup>, Воловликова О.В.<sup>1)</sup>, Горошко Д.Л.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> *Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва*

<sup>2)</sup> *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*

e-mail: lena.lazorkina.00@mail.ru

В настоящее время одним из приоритетных направлений в создании альтернативной энергетики являются топливные элементы, функционирующие за счёт прямого окисления этанола. Такие устройства привлекательны благодаря высокой энергоёмкости данного спирта, его малой токсичности и возможности получения из возобновляемой биомассы [1, 2]. Эффективность данных систем во многом определяется свойствами анодного материала. Среди известных катализаторов платина демонстрирует наивысшую эффективность при окислении спиртов в кислых электролитах [2]. Однако практическое применение платиновых катализаторов ограничено двумя ключевыми факторами: высокой стоимостью благородного металла и низкой адгезионной прочностью наночастиц к поверхности подложки [2]. Эффективным подходом к преодолению данных ограничений является переход от сплошных металлических электродов к наноструктурированным гетерогенным системам, в которых дисперсные частицы Pt встроены в объём проводящей пористой кремниевой матрицы (por-Si), обладающей высокой удельной поверхностью [3].

Образцы были сформированы электрохимическим осаждением частиц Pt на поверхность монокристаллического кремния КДБ-1 в потенциостатическом режиме при  $-0,3$  В в течение 500 секунд. Формирование пористой матрицы осуществляли посредством металл-стимулированного химического травления в растворе  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  с объёмным соотношением компонентов 25:10:4. Длительность процесса травления составляла от 5 до 25 секунд при комнатной температуре. Исследование структуры проводили методом растровой электронной микроскопии. На рисунке 1 представлены РЭМ-изображения боковой поверхности пористого кремния, сформированного при 5 и 15 с травления. Электрокаталитическую активность образцов por-Si/Pt оценивали методом циклической вольтамперометрии в трёхэлектродной ячейке в растворе, содержащем 0,1 М этанола и 0,5 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Установлено, что сформированные образцы проявляют каталитическую активность в реакции электроокисления этанола. Показано, что морфология пористого слоя, определяемая длительностью травления, влияет на величину плотности тока окисления.

Работа выполнена в рамках государственного задания 2026-2028 FSMR-2026-0005 (№075-03-2026-239 от 16.01.2026).

### Литература

1. Y. Wang, S. Zou, W.B. Cai. Recent advances on electro-oxidation of ethanol on Pt-and Pd-based catalysts: from reaction mechanisms to catalytic materials // Catalysts, 5, 2015 p. 1507-1534.
2. G. Yang et al. Platinum-based ternary catalysts for the electrooxidation of ethanol // Particuology, 58, 2021 p. 169-186.
3. Y. Qu et al. Photocatalytic properties of porous silicon nanowires // Journal of materials chemistry, 20, 2010 p. 3590-3594.

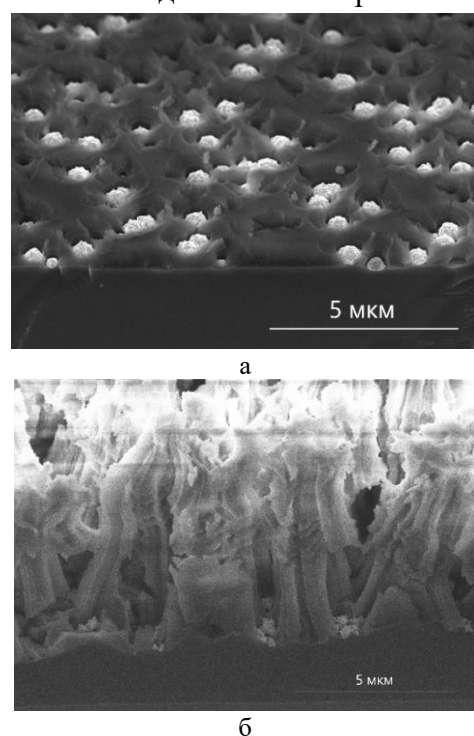


Рисунок 1 – РЭМ изображения сколов структур por-Si/Pt после травления в течение: 5 с (а), 15 с (б)

## Иерархический пористый композиционный материал на основе наноструктурированного кремния и углеродных наноматериалов, легированных металлами

**Спивак Ю.М., Гагарина А.Ю.**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург  
e-mail: ymkanageeva@yandex.ru

Пористые композиционные материалы на основе сочетания наноразмерного кремния (нано-Si) и различных форм углерода представляют интерес для применения в сенсорике, в качестве различных функциональных элементов в альтернативной энергетике, суперконденсаторах, в медицине и т.п. [1, 2]. Несмотря на то, что в настоящее время уже есть коммерческое производство продукции на основе таких материалов, технологии их синтеза продолжают совершенствоваться, а исследование различных свойств в зависимости от строения и состава структурных элементов, их конфигурации и характера сборки, также как и развитие методик характеристики, остаются в фокусе активных научных исследований. Кремний в наноразмерном виде обладает рядом важных достоинств. Так, помимо проявления свойств фотолюминесценции, каталитической активности и др., нано-Si в виде пористых наностержней, нанокластеров, наночастиц за счёт наличия свободного пространства более устойчив к объёмным изменениям кристаллической структуры при литировании и делитировании. Создание такого иерархического пористого наноматериала со сложным составом требует разработки семейства технологических методик и подходов для получения требуемого дизайна каждого иерархического уровня и сборки материала в целом. При инкорпорировании материалов в иерархические пористые матрицы с несколькими уровнями пор, особенно при наличии микро- и мезопор, возникают сложности в равномерном распределении фазы-«гостя». Ситуация усложняется при введении двух и более материалов в пористую систему с заданной локализацией на определенных иерархических уровнях. В рамках данной работы получен микро-мезо-макропористый композиционный наноматериал на основе углеродсодержащего нано-Si, допированного Me-содержащими фуллеренолами по технологии [4] (Рис. 1). Показано, что такой подход позволяет функционализировать слои нано-Si однородно на всю глубину (микро-мезопористый кремний толщиной более 60-80 мкм). Приведены результаты исследования состава поверхностных центров оригинальными методами АСМ. Обсуждаются подходы к повышению производительности технологии получения частиц нано-Si с наноразмерными углеродными оболочками.

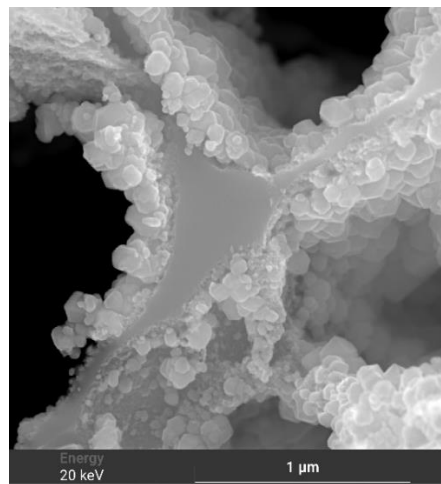


Рисунок 1 – РЭМ скола композиции «por-Si/Me-фуллеренол» (Me: Ag и Cu).

### Литература

1. H. Li, W. Dong, Ch. Li, et al. Three-dimensional ordered hierarchically porous carbon materials for high performance Li-Se battery // Journal of Energy Chemistry, 68, 2022 P. 624-636.
2. K. Ariga, L.K. Shrestha, Q. Ji. Introduction to carbon nanoarchitectonics for advanced applications in energy, environment and bio // Nanoscale Adv., 8, 2026 P. 1447-1449.
3. Ю.М. Спивак. Атомно-молекулярный дизайн наноструктурированных материалов и наноконпозиций. Синтез, контроль технологии, свойства и применение // Дисс. ... док. тех. наук: 05.27.06 Санкт-Петербург, 2022 383 с. НГР 522100400119-7.
4. Спивак Ю.М., Мошников В.А., Смердов Р.С. и др. Способ получения функционализированной наноструктуры на основе пористого кремния. Патент на изобретение RU 2796247 C1, 18.05.2023. Заявка № 2022122510 от 19.08.2022.

## Масштабирование технологии физического атомно-слоевого осаждения на промышленные подложки кремния

**Ануфриев Ю.В., Плюснин Н.И.**

*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва*

*e-mail: anufriev.u@inme-ras.ru*

Технология физического атомно-слоевого (ФАСО) осаждения [1], первоначально разработанная для лабораторных образцов [2], открывает новые возможности для нано- и микроэлектроники, а также для инновационных изделий кремниевой nanoиндустрии. Поэтому, масштабирование этой технологии на промышленные подложки кремния, является весьма актуальной задачей.

Проведенные исследования в ИНМЭ РАН показывают, что масштабирование этой технологии на такие подложки вполне возможно при условии преодоления ограничений по мощности источников электропитания и конструктивных ограничений испарительных элементов для ФАСО.

Для исследования масштабирования технологии физического атомно-слоевого осаждения на промышленные подложки кремния была выбрана полупромышленная установка EvoVac с вакуумом  $5 \times 10^{-9}$  Торр от канадской компании Angstrom Engineering, которая предназначена для электронно-лучевого и термического напыления на промышленные подложки.

В данном докладе, мы приводим описание конструктивных особенностей оснастки этой установки для реализации ФАСО на подложках кремния  $40 \times 60$  мм<sup>2</sup>, близких по размеру к промышленным. Для апробации технологии ФАСО разработан и изготовлен планарный источник термического испарения с областью нагрева  $45 \times 30$  мм<sup>2</sup>. Его главной частью является ленточная спираль из Та фольги, толщиной 20 мкм и размером  $45 \times 30$  мм<sup>2</sup>. Представлены результаты

испытания этого источника в импульсном режиме на мощности 400 Вт (рис. 1). Охарактеризован температурный импульс на источнике и определено, что быстродействие источника составляет порядка 1-ой секунды. Проведена апробация технологии ФАСО с использованием этого источника в различных геометриях осаждения и с различными осаждаемыми материалами.

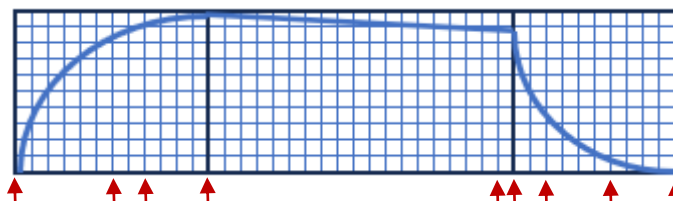


Рисунок 1 - Фрагменты видеозаписи работы источника для ФАСО, изготовленного из Та спирали с размером нагреваемой области  $45 \times 30$  мм<sup>2</sup> в процессе её импульсного нагрева и иллюстрация импульса температуры на спирали.

### Литература

1. Н.И. Плюснин. Физическое атомно-слоевое осаждение (PALD), как новая технология получения наноматериалов и наногетероструктур // Нано- и микросистемная техника, 1, 2026 (февраль). <https://doi.org/10.17587/nmst.28.19-30>
2. Н.И. Плюснин. Физическое осаждение атомных слоев и рост предельно-тонких пленок: четырех-десятилетняя серия исследований системы тугоплавкий металл-кремний. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Т. 18. № 4.1 ASCO-Nanomat 2026.

**V. Диагностика кремния и приборных структур на его основе. Новые приборы, включающие элементы микромеханики, оптоэлектроники, силовой электроники, светоизлучающие структуры и фотоприемники**

## КМОП-интеграция и стабилизация рабочих характеристик энергонезависимой резистивной памяти

*Ананьев А.Д., Рындин Е.А., Мазинг Д.С., Андреева Н.В.*

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им.В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург*

*e-mail: nvandr@gmail.com*

Резистивная память на основе тонких оксидных пленок рассматривается в качестве перспективного кандидата на роль электронной компонентной базы для реализации аналоговых вычислений в памяти, потребность в которых обусловлена быстрой эволюцией алгоритмов искусственного интеллекта, требующих экспоненциального роста производительности и энергоэффективности вычислительных ресурсов.

В основе функционирования устройств резистивной памяти лежат токи утечки в тонких оксидных пленках. С учетом особенностей их интеграции в BEOL-процесс КМОП-технологии, к объемным токам добавляются поверхностные токи утечки.

В работе проведено исследование влияния физических процессов, связанных с поверхностными токами утечки, на электрофизические характеристики, процедуру электроформовки и особенности резистивного переключения устройств резистивной памяти, реализованных в виде конденсаторных структур, копланарных линий и интегрированных в BEOL-процесс КМОП интегральной схемы. Показано, что способ интеграции существенно влияет на напряжение формовки, приводя к необходимости его повышения, в ряде случаев более чем в 3 раза по сравнению со структурами с низкими токами утечки. Результаты анализа квазистатических ВАХ устройств в режиме резистивного переключения свидетельствуют об изменении их характера на нелинейном участке. Данный эффект играет ключевую роль при аппаратном проектировании нейроморфных электронных модулей, поскольку изменение симметрии ВАХ относительно полярности прикладываемого напряжения оказывает влияние на сходимость процесса обучения при его аппаратной реализации.

Технология резистивной памяти находится на этапе своего становления, что определяет актуальность исследований, направленных на повышение стабильности и оптимизацию ее ключевых рабочих характеристик. Выбор материала функциональных слоев резистивной памяти в значительной степени зависит от возможности управления точечными дефектами, определяющей ключевые характеристики устройств, такие как количество циклов перезаписи и время хранения информации. Наиболее часто в качестве функциональных слоев рассматриваются оксиды кремния, тантала, титана, алюминия и гафния.

С этой целью в работе проведено исследование, направленное на разработку правил термодинамического проектирования, которые позволяют корректно описать особенности формирования и временной стабильности резистивных состояний с учетом возможности фазового разделения функционального слоя оксида на область с высокой концентрацией кислородных вакансий, выполняющую функцию проводящего филамента, и область, близкую к стехиометрическому составу. В качестве движущей силы массопереноса, определяющего формирование стабильного филамента, в исследовании рассматривается не градиент концентрации, а градиент химического потенциала. В рамках развиваемого подхода зависимость химического потенциала кислорода от стехиометрического состава рабочего слоя используется при решении уравнения Кана-Хилларда [1], описывающего спинодальный распад и эволюцию филамента. Решение данного уравнения для ряда функциональных оксидов позволило определить области стабильного формирования проводящего филамента, обеспечивающие долговременное сохранение резистивного состояния, а также выработать рекомендации по улучшению ключевых характеристик резистивной памяти на этапе серийного производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – государственное задание в области научной деятельности FSEE-2025-0005.

### Литература

1. J. W. Cahn, J. E. Hilliard, Free Energy of a Nonuniform System. I. Interfacial Free Energy // J. Chem. Phys., 28, 1958 pp. 258–267.



## Светодиоды с дислокационной люминесценцией на основе ионно-имплантированного кремния

**Зотов А.А.<sup>1,3)</sup>, Терещенко А.Н.<sup>1)</sup>, Королев Д.С.<sup>2)</sup>, Михайлов А.Н.<sup>2)</sup>, Белов А.И.<sup>2)</sup>, Тетельбаум Д.И.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, г. Черноголовка

<sup>2)</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

<sup>3)</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»», г. Москва  
e-mail: aleksandr.zotov.99@mail.ru

На сегодняшний день одной из основных задач оптоэлектроники является создание источника излучения на основе кремния. Однако непрямозонность данного полупроводника приводит к низкой величине внешнего квантового выхода люминесценции. Одним из способов решения данной задачи является введение линейных дефектов – дислокаций. В рамках данной работы был использован метод ионной имплантации с последующей термообработкой кристалла как технологичный способ генерации таких дефектов.

Ранее в работах было показано, что применение дополнительной имплантации примеси бора в дислокационную область кремния приводит к появлению эффекта аномальной температурной зависимости дислокационной люминесценции (ДЛ), заключающегося в значительном росте интенсивности линии D1 при увеличении температуры образца [1-2]. В данной работе методом фотолюминесценции детально исследованы образцы кремния, в которых дислокационная структура создавалась имплантацией ионов Si<sup>+</sup> с энергией 100 кэВ и дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  с последующим термическим отжигом при 900°C в смешанной атмосфере (50% O<sub>2</sub> + 50% N<sub>2</sub>). Показано, что такие образцы демонстрируют интенсивную дислокационную люминесценцию, исследована ее температурная зависимость. На основе данных образцов были изготовлены светодиоды и исследованы их спектры электролюминесценции (ЭЛ) (рис.1). Следует отметить, что светодиоды на таких дислокационных структурах были получены впервые. В работе приводятся особенности температурной зависимости спектров ЭЛ, обсуждаются перспективы реализации на таких образцах эффекта аномальной температурной зависимости ДЛ.

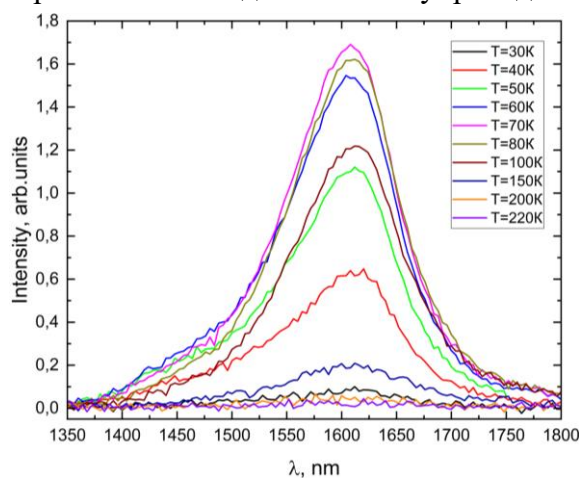


Рисунок 1 – Спектры ЭЛ образца при различных температурах (указаны на рисунке). Величина протекающего тока 30 мкА.

### Литература

1. Терещенко, А.Н. Влияние примеси бора на излучательные свойства дислокационных структур в кремнии, сформированных путем имплантации ионов Si<sup>+</sup> / А.Н. Терещенко, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум, Э.А. Штейнман // Физика и Техника Полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 7. – С. 702–707.
2. Tereshchenko, A.N. The Influence of Heat Treatments on the Temperature Dependence of Dislocation Luminescence in Ion-Implanted Silicon / A.N. Tereshchenko, A.A. Zotov, D.S. Korolev, A.A. Nikolskaya, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.I. Tetelbaum // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, Iss. Suppl. 1. – P. S193–S197.

## Кремниевый чувствительный элемент газового детектора на основе явления автоэлектронной эмиссии

***Карасева Е.П.<sup>1)</sup>, Кондратьев В.М.<sup>1,2)</sup>, Кондратьева А.С.<sup>1,3)</sup>, Мишин М.В.<sup>1)</sup>, Осипов А.А.<sup>1,3)</sup>,  
Большаков А.Д.<sup>1,2)</sup>***

<sup>1)</sup>Академический университет им. Ж.И. Алферова, Санкт-Петербург

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт, Москва

<sup>3)</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
e-mail: liza.karaseva1003@gmail.com

В 1897 году было обнаружено новое явление, в последствии названное полевой (автоэлектронной) эмиссией (АЭ): туннелирование электронов из объема материала в окружающую среду под воздействием внешнего приложенного электрического поля. Большая часть приборов, работающих на основе АЭ, требуют условий высокого вакуума. В последние десятилетия, в свете активного развития полупроводниковых технологий, были разработаны методы уменьшения расстояния между катодом-эмиттером и анодом до длины свободного пробега электрона в воздухе и меньше. Таким образом, появилась возможность добиться практически полного отсутствия взаимодействия между молекулами атмосферы и эмитированными электронами. Одновременно с этим, благодаря уменьшению межэлектродного расстояния, напряжение, необходимое для получения АЭ, снизилось с десятков киловольт до десятков вольт. Таким образом, стало возможным создание таких приборов, как триод, работающий при атмосферном давлении [1]. На автоэлектронный ток влияет работа выхода электронов из материала, на которую, в свою очередь, влияют адсорбаты [2]. Таким образом, появилась идея создания детектора газового состава атмосферы на основе полевой эмиссии. Кремний является одним из наиболее изученных и технологически развитых полупроводников, что делает его наиболее перспективным материалом для изучения особенностей полевой эмиссии при стандартных условиях.

В настоящей работе была разработана структура, состоящая из массива кремниевых микроострий, окруженного разделительным слоем из хрома толщиной 200 нм, который обеспечивает необходимое межэлектродное расстояние. Анодный контакт наносился на предметное стекло, в котором было протравлено сквозное отверстие, боковые стороны которого были покрыты хромом. Данная структура позволила наблюдать явление АЭ при комнатной температуре и атмосферном давлении. Исследованы характерные параметры процесса, такие как площадь эмиссии, динамические изменения протекания эмиссионного тока, а также их зависимость от типа проводимости кремния.

Кроме того проведено моделирование протекания тока в программном пакете COMSOL Multiphysics. Показано, что температура кремниевых микроострий может достигать температуры плавления кремния в процессе эксперимента, в результате чего происходит деградация острий. Экспериментальные данные с высокой точностью совпали с результатами моделирования.

Для проведения экспериментов с изменением состава атмосферы в покровном стекле рядом с анодом также были проделаны отверстия для подачи и вывода газа. Данная система позволила контролировать газовый состав среды в области исследования. Наблюдалось и было описано влияние адсорбции аммиака, влажности воздуха на автоэлектронные эффекты. Таким образом, показана возможность создания чувствительного элемента газовых сенсоров эмиссионного типа.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования, Соглашение № 075-15-2024-560.

### Литература

1. Chang, Wen-Teng, et al. "Field emission air-channel devices as a voltage adder." *Nanomaterials* 10.12 (2020): 2378.
2. MacDonald, J. Ross, and C. A. Barlow Jr. "Work function change on monolayer adsorption." *The Journal of Chemical Physics* 39.2 (1963): 412-422.

## Люминесцентные свойства GeSi наноструктур после облучения ионами Ge<sup>+</sup>

***Смагина Ж.В.<sup>1)</sup>, Зиновьев В.А.<sup>1)</sup>, Зиновьева А.Ф.<sup>1)</sup>, Федина Л.И.<sup>1)</sup>, Гутаковский А.К.<sup>1)</sup>,  
Вдовин В.И.<sup>1)</sup>, Яблонский А.Н.<sup>2)</sup>, Захаров В.Е.<sup>2)</sup>, Мудрый А.В.<sup>3)</sup>, Живулько В.Д.<sup>3)</sup>***

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

<sup>2)</sup>Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

<sup>3)</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению», Минск  
e-mail: smagina\_isp@mail.ru

В настоящее время в мире ведется активный поиск путей создания эффективных светоизлучательных приборов на основе кремниевой технологии. Одним из способов увеличения эффективности излучения кремниевых структур является введение дефектов различного типа посредством ионного облучения [1, 2]. В зависимости от типа ионов, энергии, дозы облучения и температуры отжига могут образовываться комплексы оптически активных дефектов, которые излучают свет на различных частотах в инфракрасном диапазоне.

В данной работе представлены новые данные по созданию и исследованию светоизлучающих структур двух типов: структуры с GeSi квантовыми точками (КТ), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при одновременном облучении ионами Ge<sup>+</sup> с энергией 2 кэВ, и структуры, синтезированные с помощью имплантации ионов Ge<sup>+</sup> с энергией 80 кэВ и дозой облучения 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> в подложки "кремний-на-изоляторе" (КНИ) и последующего термического отжига при температурах 300°–800°С в атмосфере азота. Анализ люминесцентных свойств обоих типов облученных структур показал, что в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) наблюдается широкая полоса с максимумом вблизи 0.78 эВ. Этот максимум может быть связан с оптически активными дефектами типа расщеплённых междоузлий. Спектральное положение максимума интенсивности этой полосы не зависит от мощности фотовозбуждения. Для структур первого типа с GeSi КТ, сформированными в условиях облучения ионами Ge<sup>+</sup>, интенсивность ФЛ в 3 раза превосходит интенсивность ФЛ структур с GeSi КТ, выращенных без ионного облучения. Исследование кинетики ФЛ показало, что время жизни носителей заряда в структурах с GeSi КТ, созданных с помощью МЛЭ с одновременным ионным облучением на подложках КНИ, примерно в 3 раза меньше, чем в структурах, полученных при обычной МЛЭ. Сопоставление с результатами измерений стационарной ФЛ позволило заключить, что в основе эффекта увеличения интенсивности ФЛ лежит уменьшение времени жизни носителей заряда, что вызвано более высоким темпом излучательной рекомбинации в структурах, созданных с использованием ионного облучения. В спектрах ФЛ структур второго типа, отожженных при температурах <500°С, присутствуют узкие пики: 0.767 эВ, 0.789 и 0.97 эВ. Эти пики связаны с излучательной рекомбинацией экситонов на ионно-индуцированных дефектах, в состав которых входят собственные междоузельные атомы Si, атомы углерода и кислорода как остаточные технологические примеси. Пики при 0.89 эВ и 0.936 эВ относятся к дефектам типа {113}. Данные дефекты хорошо различимы на ВРЭМ-изображениях исследуемых структур. Широкий пик при ~ 0.78 эВ (G2) можно отнести к наличию дефектов типа {001}, которые представляют собой кластеры расщеплённых междоузлий, расположенных в плоскости типа {001}. Установлено, что при температуре отжига ≥ 600°С интенсивность пика G2 возрастает. Образцы второго типа, полученные при температуре отжига ~700°С, демонстрируют наибольшую температурную стабильность ФЛ, сигнал G2 наблюдается в спектрах ФЛ вплоть до 250 К.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-22-00424.

### Литература

1. M. Grydlik, M. T. Lusk, F. Hackl, A. Polimeni, T. Fromherz, W. Jantsch, F. Schäffler, M. Brehm. Laser Level Scheme of Self-Interstitials in Epitaxial Ge Dots Encapsulated in Si // Nano Lett., 16(11), 2016 P. 6802–6807.
2. Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, К.Ф. Штельмах, П.Н. Аруев, В.В. Забродский, Е.И. Шек. Кремниевые светодиоды с дислокационной люминесценцией, сформированные с участием кислородных преципитатов // ФТП, 56(9), 2022 стр. 904.

# Высокочувствительный кристалл датчика давления ТДК с ООС на основе биполярного транзистора для диапазонов до 1, 5 и 60 кПа

**Басов М.В.**

ФГУП «Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики  
им Н.Л. Духова», Москва

e-mail: engineerbasovm@gmail.com

Разработан высокочувствительный кристалл датчика давления (ДД) в виде микроэлектромеханической системы (МЭМС) для диапазонов дифференциального давления до 60, 5 и 1 кПа (рис. 1). Кристалл ДД реализован на основе эпитаксиальной структуры кремния Ø76 мм 11КЭФ1,5(100)/380КДБ10. Уникальность научной новизны данного элемента с микромеханикой в виде мембранной структуры заключается в использовании новой для МЭМС электрической схемы в виде тензочувствительного дифференциального каскада с отрицательной обратной связью (ТДК с ООС). Электрическая схема ТДК с ООС основана на работе двух недеформируемых биполярных транзисторов (БТ) с вертикальной структурой n-p-n-типа проводимости (V-NPN) и восьми деформируемых резисторов (p-типа). Топологический рисунок структур и технологический маршрут производства кристалла ТДК с ООС базируется на математической модели реакции электрической схемы на давление и температуру для разных диапазонов, актуальность которой подтверждена последующими экспериментальными исследованиями. Разработка позволяет снизить габаритные размеры кристалла и/или увеличить чувствительность относительно кристаллов ДД с классической электрической схемой моста Уитстона. В табл. 1 представлен сравнительный анализ по выходным характеристикам кристаллов ТДК с ООС с наиболее актуальными аналогами кристаллов ДД с электрической схемой моста Уитстона (аналог ИПД60 производства ФГУП «ВНИИА») [1,2].

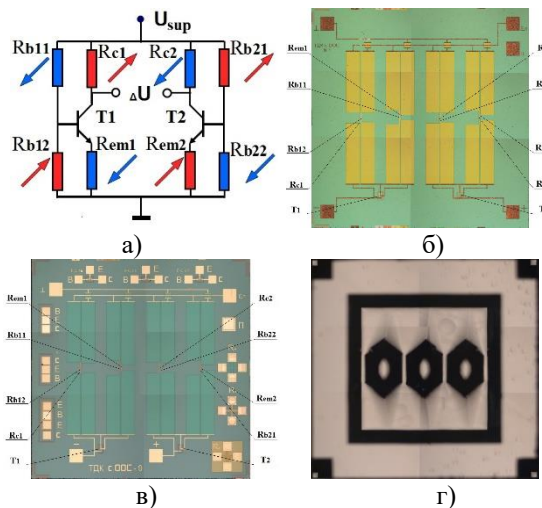


Рисунок 1 – Кремниевый кристалл датчика давления ТДК с ООС: а) электрическая схема, б) фото лицевой стороны для диапазонов до 1 и 5 кПа, в) фото лицевой стороны для диапазона до 60 кПа, г) фото обратной стороны для диапазона до 60 кПа.

Таблица 1 – Выходные характеристики кристаллов ДД

| Вид кристалла ДД                             |                       | ТДК с ООС | ИПД60 | ТДК с ООС | СВМР [1]  | ТДК с ООС | Peninsula [2] |
|----------------------------------------------|-----------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Диапазон давления                            |                       | 60 кПа    |       | 5 кПа     |           | 1 кПа     |               |
| Размер утоненной части мембраны, мм²         |                       | 2.26×2.26 |       | 2.26×2.26 | 2.90×2.90 | 2.26×2.26 | 3.50×3.50     |
| Число образцов в статистике                  |                       | 20        | 1200  | 22        | -         | 14        | -             |
| Чувствительность S, мВ/кПа/В                 |                       | 1.877     | 0.515 | 11.24     | 5.14      | 44.9      | 66.0          |
| Разбаланс начального выходного сигнала, мВ/В |                       | 6.8       | 3.0   | 8.0       | 1.3       | 14.0      | -             |
| Нелинейность 2K <sub>НЛ</sub> , %FS          |                       | 0.059     | 0.055 | 0.27      | 0.28      | 0.26      | 0.33          |
| Механический гистерезис H, %FS               |                       | -         | -     | 0.03      | 0.26      | 0.28      | 0.36          |
| Механическая повторяемость R, %FS            |                       | -         | -     | 0.08      | 0.53      | 0.42      | 0.67          |
| Давление разрушение P <sub>разр</sub> , kPa  |                       | 1600      |       | 600       | -         | 500       | 105           |
| Долговременная стабильность                  | нулевого сигнала, %FS | 0.007     | 0.002 | 0.032     | -         | 0.122     | 0.138         |
|                                              | чувствительности, %FS | 0.006     | 0.003 | 0.023     | -         | 0.166     | -             |
| Темп. гист. нуля, %FS                        | (-30...+20°C)         | 0.065     | 0.033 | 0.042     | -         | 0.341     | -             |
|                                              | (+20...+60°C)         | 0.045     | 0.025 | 0.050     | -         | 0.262     | -             |
| Темп. коэф. нуля, (%/°C)FS                   | (-30...+20°C)         | 0.007     | 0.003 | 0.014     | -         | 0.092     | 0.165         |
|                                              | (+20...+60°C)         | 0.010     | 0.002 | 0.012     | 0.013     | 0.096     |               |

## Литература

1. A.V. Tran, X. Zhang, B. Zhu. Effects of temperature and residual stresses on the output characteristics of a piezoresistive pressure sensor // IEEE Access, 7, 2019, pp. 27668-27676.
2. T. Xu, H. Wang, Y. Xia, Z. Zhao, M. Huang, J. Wang, L. Zhao, Y. Zhao, Z. Jiang. Piezoresistive pressure sensor with high sensitivity for medical application using peninsula-island structure // Front. Mech. Eng., 12, 2017, pp. 546–553.

## Двухканальный акустоэлектронный кремниевый датчик для детектирования вязкости жидкости и её температуры

**Воронова Н.В.**

Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, г. Москва, Зеленоград

e-mail: navoronova@niime.ru

Разработан и исследован двухканальный акустоэлектронный датчик на кремниевой подложке для одновременного измерения вязкости жидкости и её температуры. Выбор кремния в качестве материала датчика объясняется его широким применением в микроэлектронной промышленности [1]. Принцип действия сенсора основан на зондировании исследуемой пробы специально подобранными акустическими волнами, распространяющимися в слоистых структурах на основе непьезоэлектрического кремния с нанесёнными пьезоэлектрическими плёнками ZnO и AlN. Рассматриваемая структура выполняет роль дна жидкостной кюветы и находится в непосредственном механическом и тепловом контакте с тестируемой жидкостью (рис. 1).

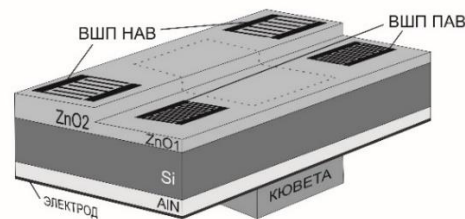


Рисунок 1 – Общий вид двухканального акустоэлектронного датчика жидкости (перевернут на 180°, в реальности кювета расположена сверху)

По аналогии с работой [2], в температурном канале датчика использовалась поверхностная акустическая волна (ПАВ) (рис. 2), распространяющаяся по нижней (нерабочей) поверхности слоистой структуры; откликом сенсора служило изменение фазы волны  $\Delta\phi$ . Чувствительность к температуре  $(1/\Delta t) \phi/\phi = 22 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

В канале измерения вязкости применялась нормальная акустическая волна (НАВ) (рис. 3) квазипродольной поляризации QL, распространяющаяся через всю толщину пластины, а отклик датчика определялся по изменению вносимых потерь НАВ  $\Delta S_{12}$ , возникающему при нанесении вязкой жидкости на рабочую поверхность структуры. Чувствительность датчика к вязкости составила  $\eta = 1.4 \text{ дБ/сПуаз}$  при  $\eta < 100$  и  $0.01 \text{ дБ/сПуаз}$  при  $100 < \eta < 1500 \text{ сПуаз}$ .

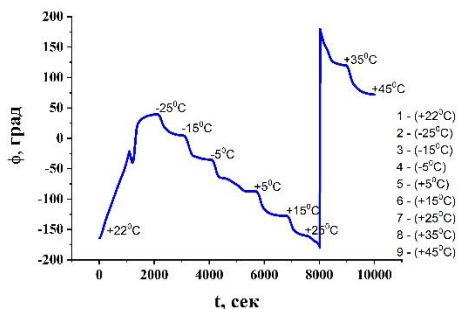


Рисунок 2 – Температурные изменения фазы ПАВ. Структура: ВШП ( $\lambda = 32,1 \text{ мкм}$ )/ZnO ( $h = 3 \text{ мкм}$ )/(001)-Si ( $H = 380 \text{ мкм}$ )/ AlN ( $h = 1.2 \text{ мкм}$ )/металлический электрод, расстояние между ВШП  $L = 11 \text{ мм}$ .

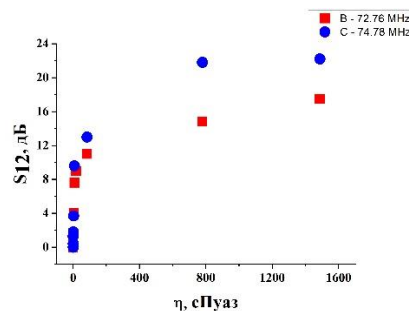


Рисунок 3 – Калибрационные датчика вязкости на НАВ, измеренные для 2-х акустических мод. Структура (001) Si(380 мкм)/ ZnO(10.5 мкм)/ ВШП (200 мкм)/AlN ( $h = 1.2 \text{ мкм}$ )/металл, расстояние между ВШП 17 мм.

Совместное использование QL-волн и ПАВ, распространяющихся в одной и той же структуре, позволяет одновременно определять вязкость и температуру нанесённой жидкости. При этом, благодаря отсутствию пьезоэлектрического эффекта у кремния и металлизации рабочей поверхности, электрофизические параметры жидкости не оказывают влияния на результаты измерений вязкости и температуры.

### Литература

1. Красников Г. Я., Горнев Е. С., Матюшкин И. В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 1. Уровни описания технологии //Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. – 2017. – №. 1. – С. 51-69.
2. Воронова Н.В., Анисимкин В.И., Горнев Е.С., Тельминов О.А., Горбачев И.А., Кузнецова И.Е. Кремниевый датчик микрокапель летучих соединений. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные Технологии. 2025. 17(2): 201-206. DOI: 10.17725/rensit.2.025.17.201.



## Твердотельные нанопоры для детектирования одиночных наночастиц золота

***Еганова Е.М., Комарова Н.В., Кузнецов А.Е.***

*Институт нанотехнологий и микроэлектроники РАН, Москва*

e-mail: eganovaem@mail.ru

Современные нанотехнологии активно развиваются в направлении создания высокочувствительных сенсорных систем, способных детектировать и анализировать отдельные молекулы и наночастицы. Одним из наиболее перспективных инструментов в этом направлении являются твердотельные нанопоры на основе нитрида кремния [1]. Существуют различные методы регистрации и анализа частиц с использованием нанопор, однако наиболее широко применяется метод, основанный на измерении ионного тока. При транслокации аналита через пору происходит кратковременное снижение тока, которое фиксируется в виде характерного сигнала. Исследование такого сигнала позволяет получить информацию о структуре и свойствах частицы.

На процесс транслокации частиц, включая золотые наночастицы, заметное влияние оказывает поверхностный заряд нанопоры. Его распределение на внутренней поверхности поры, а также характер взаимодействия с частицами определяются параметрами среды, в которой находится пора — такими, как уровень pH и концентрация электролита [2,3]. Управляя этими условиями, в некоторых случаях удаётся повысить эффективность анализа частиц с использованием твердотельных нанопор (Рисунок 1). При создании градиента концентрации эффективность анализа увеличивается при прочих равных условиях эксперимента.

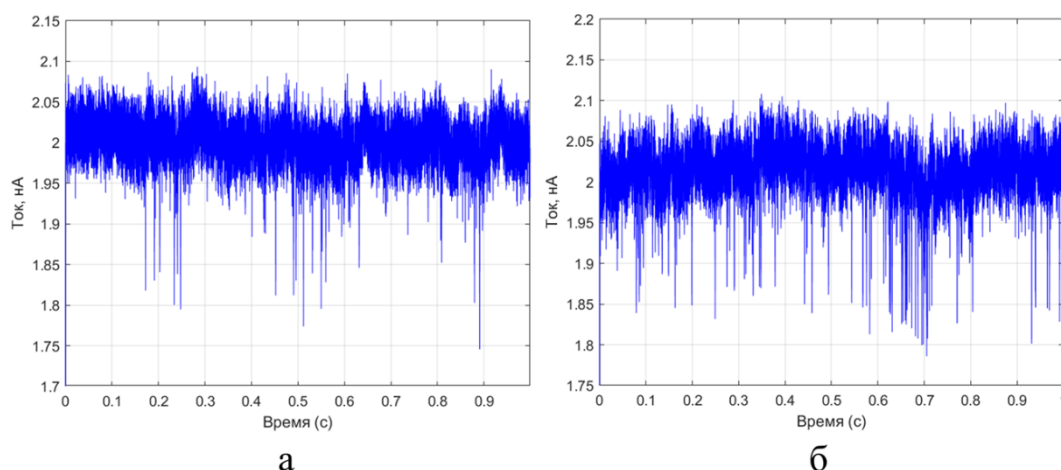


Рисунок 1 — Зависимость тока от времени при транслокации наночастиц золота через твердотельную нанопору: (а) без градиента поверхностного заряда, (б) с градиентом поверхностного заряда.

### Литература

1. Eggenberger O.M., Ying C., Mayer M. Surface coatings for solid-state nanopores. *Nanoscale*, 2019. Vol. 11, no. 42, pp. 19636–19657.
2. Tagliazucchi M., Szeleifer I. Transport mechanisms in nanopores and nanochannels: can we mimic nature? *Materials Today*, 2015. Vol. 18, no. 3, pp. 131–142.
3. Vlassioug I., Smirnov S., Siwy Z. Nanofluidic Ionic Diodes. Comparison of Analytical and Numerical Solutions. *ACS Nano*, 2008. Vol. 2, no. 8, pp. 1589–1602.



## Влияние параметров послеростового отжига на характеристики микрорезонаторов германий-кремний

**Коханенко А.П., Дирко В.В., Кукунов О., Лозовой К.А.**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск*  
e-mail: kokh@mail.tsu.ru

Исследование процессов роста и параметров микрорезонаторов является одной из ключевых задач современной нанофотоники, поскольку данные структуры лежат в основе разработки нового поколения компактных оптических устройств [1]. Оптические характеристики таких резонаторов напрямую определяются их геометрией – размерами и формой. В связи с этим для создания устройств с заранее заданными и воспроизводимыми свойствами требуется прецизионный контроль процессов формирования наноструктур. Дополнительно, с целью упрощения технологии их изготовления, особое внимание уделяется механизмам самоорганизации [2].

В данной работе изучалось влияние условий роста и параметров послеростового отжига на характеристики GeSi микрорезонаторов на кремнии, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) посредством самоорганизации. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии обеспечивает низкую концентрацию примесей и дефектов, а также высокий уровень контроля параметров роста. Использование твердого раствора GeSi для формирования резонаторов является перспективным благодаря его высокому показателю преломления и полной совместимости с КМОП-технологией. Поскольку такие параметры роста, как температура подложки, состав твердого раствора, количество осаждаемого материала, температура и длительность послеростового отжига, оказывают определяющее влияние на конечную геометрию наноструктур, целью данной работы стало установление взаимосвязи между этими параметрами и характеристиками микрорезонаторов GeSi, формируемых на подложке Si со слоем SiO<sub>2</sub>.

Экспериментальные исследования проводились на установке МЛЭ «Катунь–100» в условиях сверхвысокого вакуума ( $\sim 10^{-9}$  Торр). На подложку Si(100) с тонким слоем SiO<sub>2</sub> осаждался слой GeSi, после чего выполнялся отжиг различной продолжительности при температурах 700–800 °С. Контроль морфологии поверхности в процессе формирования наноструктур осуществлялся методом дифракции быстрых электронов, а после завершения синтеза – с использованием атомно-силовой микроскопии. Оптические характеристики полученных образцов исследовались методом спектроскопии на пропускание и отражение. Численные расчеты характеристик микрорезонаторов проводились с использованием программного обеспечения Lumerical.

В ходе исследований установлено, что латеральный размер, высота, форма, а также плотность микрорезонаторов варьируются в зависимости от температуры и времени отжига. Увеличение времени отжига приводит к росту латеральных размеров микрорезонаторов. Кроме того, форма островков изменяется от близкой к округлой до ограненной. Повышение температуры отжига приводит к ускорению всех процессов самоорганизации. Кроме того, комбинация этих параметров оказывает решающее влияние на отношение высоты островков к их диаметру, которое является одной из основных величин, определяющих оптические свойства таких микрорезонаторов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния условий роста на морфологию формируемых структур в более широком диапазоне параметров синтеза и послеростового отжига.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-12-20004, <https://rscf.ru/project/25-12-20004/> и Администрации Томской области.

### Литература

1. A. Dorodnyy, J. Smajic, J. Leuthold. Mie Scattering for Photonic Devices // Laser & Photonics Reviews, 17(19), 2023. P. 2300055.
2. A. A. Shklyayev, A. V. Latyshev. Dewetting behavior of Ge layers on SiO<sub>2</sub> under annealing // Scientific Reports, 10, 2020. P. 13759.

## Термоэлектрические характеристики плёнки $\text{Mg}_2\text{Si}$ и гетероструктуры $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$

**Поляков А.В.<sup>1)</sup>, Фомин Д.В.<sup>1)</sup>, Шолыгин И.О.<sup>1)</sup>, Галкин Н.Г.<sup>2)</sup>, Галкин К.Н.<sup>2)</sup>, Горошко Д.Л.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», г. Благовещенск

<sup>2)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

e-mail: polyakov\_a\_1999@mail.ru

Одной из ключевых задач микроэлектроники является разработка термоэлементов, преобразующих, на основе эффекта Зеебека, тепловую энергию в электрическую. Перспективными материалами для них являются плёнки  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и их гетероструктуры  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  [1].

Рост плёнки  $\text{Mg}_2\text{Si}$  на  $\text{Si}(111)$  проводился реактивной эпитаксией на нагретую подложку (250 °C). Вначале формировался нижний слой  $\text{Si}$  (60 нм), затем 4 бислоя  $\text{Mg}$  (90 нм) +  $\text{Si}$  (30 нм), далее – верхний слой  $\text{Si}$  (5 нм). В итоге был получен образец с плёнкой  $\text{Mg}_2\text{Si}$  толщиной 545 нм.

Измерение термоэлектрических характеристик  $\text{Si}(111)$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$  таких, как сопротивление ( $R_s$  и  $R_t$ ), коэффициент Зеебека ( $S_s$  и  $S_t$ ) и удельная проводимость ( $\sigma_s$  и  $\sigma_t$ ), проводилось четырехзондовым методом. Вычисление этих же параметров для  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ( $R_f$ ,  $S_f$ ,  $\sigma_f$ ), выполнялось по двухслойной модели, описанной в [2]. Результаты данных измерений и расчёта фактора мощности ( $PF = S^2 \cdot \sigma$ ) показаны в таблице 1 и на рисунке 1.

Анализ таблицы показал, что  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ , по сравнению с  $\text{Si}(111)$ , имеет  $S$ ,  $\sigma$  и  $PF$  выше. Большие значения параметров обусловлены тем, что часть атомов  $\text{Mg}$ , внедряясь в решётку  $\text{Si}$ , образуют донорные уровни [3].

На рисунке 1 видно, что при температурах от 260 до 440 К фактор мощности  $\text{Si}(111)$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$  составляет от 246,2 до 162,3 и от 280,9 до 202,1 мкВт/(м·К<sup>2</sup>) соответственно.

$PF$  плёнки  $\text{Mg}_2\text{Si}$  выше и имеет минимальное и максимальное значения, равные 389,8 и 463,7 мкВт/(м·К<sup>2</sup>). Для неё был проведён расчёт коэффициента теплопроводности ( $k$ ), по методике, описанной в [4], и термоэлектрической добротности ( $ZT = T \cdot PF \cdot k^{-1}$ ). Вычисления показали, что при  $T$  от 260 до 440 К значения параметра  $k$  изменяются от 9,9 до 5,6 Вт/(м·К), а  $ZT$  – от 0,010 до 0,034. Низкие величины  $ZT$  для плёнки  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , а также близкие значения параметров  $R$ ,  $S$ ,  $\sigma$ ,  $PF$  для  $\text{Si}(111)$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$  связаны с вкладом подложки (из-за её низкого удельного сопротивления – от 0,1 до 0,5 Ом·см) при измерении термоэлектрических свойств силицида магния и гетероструктуры на его основе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWFV-2026-0007).

### Литература

1. A. Shevlyagin. Probing the  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$  heterojunction for photovoltaic applications // Solar Energy, 211, 2020 pp. 383-395.
2. A. Riss. Criteria for Erroneous Substrate Contribution to the Thermoelectric Performance of Thin Films // Physical Review Applied, 19(5), 2023 pp. 1-9.
3. K. Hayashi. Preparation, thermoelectric properties, and crystal structure of boron-doped  $\text{Mg}_2\text{Si}$  single crystals // AIP Advances, 10(1), 2020 P. 035115.
4. M. Rittiruum High temperature thermal properties of magnesium silicide investigated by molecular dynamics simulation // Journal of Materials Science and Applied Energy, 6(2), 2017 pp. 160-165.

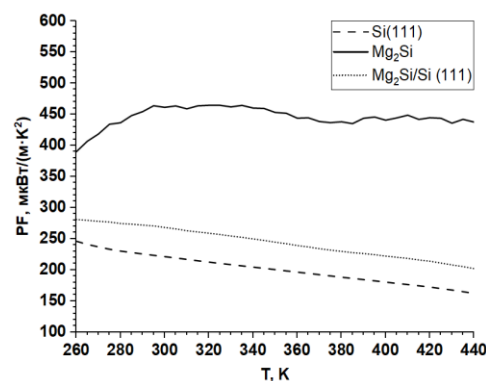


Рисунок 1 – Зависимости фактора мощности от температуры для  $\text{Si}(111)$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$

| Параметр                           |                       | Значения            |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Сопротивление (R)                  | $R_s$ , Ом            | от 17,0 до 43,9     |
|                                    | $R_t$ , Ом            | от 12,3 до 34,9     |
|                                    | $R_f$ , Ом            | от 45,0 до 169,60   |
| Коэффициент Зеебека (S)            | $S_s$ , мкВ/К         | от -425,9 до -559,5 |
|                                    | $S_t$ , мкВ/К         | от -449,2 до -608,2 |
|                                    | $S_f$ , мкВ/К         | от -510,6 до -796,4 |
| Удельная проводимость ( $\sigma$ ) | $\sigma_s$ , 1/(Ом·м) | от 1356,7 до 518,7  |
|                                    | $\sigma_t$ , 1/(Ом·м) | от 1392,1 до 546,5  |
|                                    | $\sigma_f$ , 1/(Ом·м) | от 1495,2 до 690,0  |
| Фактор мощности (PF)               | $PF_s$ , мкВт/(м·К²)  | от 246,2 до 162,3   |
|                                    | $PF_t$ , мкВт/(м·К²)  | от 280,9 до 202,1   |
|                                    | $PF_f$ , мкВт/(м·К²)  | от 389,8 до 463,7   |

## Дислокационная электролюминесценция ионно-имплантированных кремниевых структур

**Терещенко А.Н.<sup>1)</sup>, Зотов А.А.<sup>1,3)</sup>, Королев Д.С.<sup>2)</sup>, Михайлов А.Н.<sup>2)</sup>, Белов А.И.<sup>2)</sup>,  
Тетельбаум Д.И.<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, г. Черноголовка

<sup>2)</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород

<sup>3)</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва  
e-mail: tan@issp.ac.ru

Одной из главных проблем кремниевой оптоэлектроники в настоящее время является отсутствие эффективного источника излучения на кремниевой основе. В силу непрямозонности Si излучательная рекомбинация в нем на несколько порядков ниже, чем в прямозонных полупроводниках. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является использование излучательной способности дислокаций в кремнии. Среди различных методов генерации этих дефектов наиболее оптимальным представляется метод ионной имплантации с последующей термообработкой кристалла. Данный метод является технологичным, позволяет проводить модификацию параметров излучательных центров в широких пределах с помощью изменения режимов облучения, дополнительного ионного легирования и термообработки. Ранее нами было показано, что дополнительная имплантация примеси бора в дислокационную область кремния может приводить к возникновению эффекта аномальной температурной зависимости дислокационной люминесценции (ДЛ), заключающегося в сильном росте интенсивности линии D1 при увеличении температуры образца [1].

В данной работе впервые изготовлены светодиоды на основе ДЛ, в которых дислокационная структура создавалась имплантацией ионов  $\text{Si}^+$  с последующим термическим отжигом. Дополнительная имплантация примеси бора в дислокационную область кристалла осуществлялась как для создания p-n перехода, так и для последующей реализации эффекта аномальной температурной зависимости ДЛ. В работе исследованы особенности спектров электролюминесценции (ЭЛ) изготовленных светодиодов (рис.1), изучена их температурная зависимость, впервые показана реализация эффекта аномальной температурной зависимости электролюминесценции и возможность им управлять посредством дополнительных термообработок. Результаты, полученные в данной работе, важны для разработки технологических решений по внедрению кремниевых оптических межсоединений внутри чипа, что является на сегодняшний день насущной потребностью микроэлектроники.

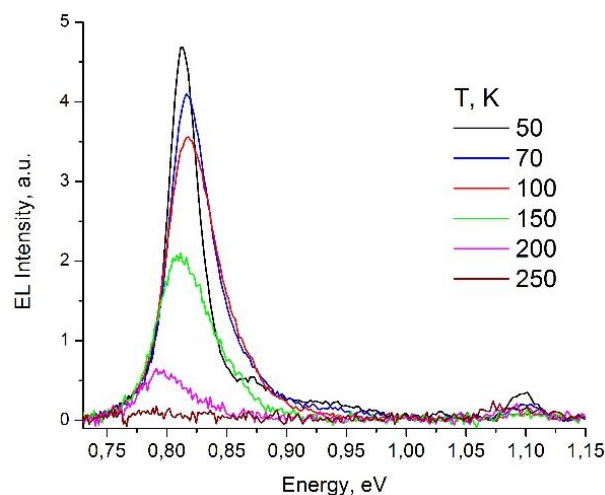


Рисунок 1 – Пример температурной зависимости спектров дислокационной ЭЛ изготовленного кремниевое светодиода.

### Литература

1. A.N. Tereshchenko et al. The Influence of Heat Treatments on the Temperature Dependence of Dislocation Luminescence in Ion-Implanted Silicon // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18, Iss. Supl. 1. – P. S193–S197.

**VI. Методы и аппаратура для исследования  
свойств кремния и структур на его основе,  
включая гетероструктуры с кремнийсодержащими  
соединениями**

## Ограничения бесконтактных методов измерения времени жизни

**Щемеров И.В.<sup>1,2)</sup>, Кобелева С.П.<sup>1,2)</sup>, Анфимов И.М.<sup>2)</sup>, Колоколов Д.Г.<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

<sup>2)</sup>ООО «Разработка и изготовление измерительных систем»

<sup>3)</sup>Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборов»

e-mail: schemerov.iv@misis.ru

Рекомбинационное время жизни неравновесных носителей заряда (ВЖ) это одна из марочных характеристик для непрямозонных материалов, в первую очередь – монокристаллического кремния. ВЖ в таких полупроводниках напрямую зависит от концентрации дефектов, создающих разрешенные состояния в глубине запрещенной зоны. Эти дефекты существенно ухудшают переходные характеристики изготавливаемых приборов.

Один из наиболее простых способов измерения ВЖ – это регистрация спада фотопроводимости [1]. При условии линейной рекомбинации, которая реализуется в условиях низкого уровня инжекции, и однородной генерации, избыточная концентрация спадает после выключения засветки экспоненциально с характерным временем, равным ВЖ. Система стандартов SEMI описывает по меньшей мере три способа регистрации спада фотопроводимости. Это контактный метод (SEMI MF28), бесконтактный СВЧ метод (SEMI MF1535) и бесконтактный ВЧ метод (SEMI PV13). Бесконтактные методы обладают преимуществами перед контактными: нет необходимости наносить омические контакты, изготавливать образцы специальной формы. Бесконтактные методы могут быть неразрушающими. Однако и у бесконтактных методов есть ограничения.

Бесконтактный ВЧ метод оказывается нереализуем в том случае, если толщина образцов очень мала (менее 100 мкм), так как в таком случае поверхность будет подавлять образование вихревых токов. В ходе измерения используется переменное электромагнитное поле (ЭМП) с частотой от 1 МГц. Это резко ограничивает нижнюю границу регистрируемых ВЖ: образцы с ВЖ менее 1 мкс не могут быть измерены таким методом. С другой стороны, верхняя граница регистрируемых таким образом ВЖ, в общем, неограниченна. В [2] показано, что стандартное отклонение в ходе межлабораторных сличений по такому методу при измерении образцов с ВЖ 3400 мкс не превышает 8%.

Бесконтактный СВЧ метод позволяет измерять и более низкие ВЖ, так как для него используется переменное ЭМП с частотой 1-50 ГГц. На таких установках могут быть измерены ВЖ менее 100 нс. Но измерение таким методом ВЖ большой величины (более 1 мс) затруднено. Причина этого - небольшая глубина проникновения ЭМП в образец, порядка долей мм, что ограничивает область анализа только приповерхностными слоями. На результат влияет уменьшение концентрации носителей из-за диффузии вглубь полупроводника. При измерении пластин толщиной более 10 мм с ВЖ более 1 мс на СВЧ установках с кольцевым зазором необходимо введение поправок.

Даже если не учитывать ограничение области анализа, на начальном этапе спад фотопроводимости происходит ускоренно, поэтому измерять ВЖ можно только в нижней части релаксационной кривой. Стандарты SEMI рекомендуют использовать для анализа участок 45 – 5% от максимума, но в [1] было показано, что в образцах большой толщины спад ФП не успевает стать моноэкспоненциальным даже к этому моменту. Для расчета объемного ВЖ по измеренному эффективному необходимо проводить моделирование с учетом этого эффекта.

### Литература

1. И.М. Анфимов, С.П. Кобелева и др. К вопросу об определении объемного времени жизни по спаду фотопроводимости на непассивированных образцах монокристаллического кремния // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники, 19(3), 2016 стр. 210-216.
2. A.L. Bloom, J.S. Swirhun et al. Interlaboratory Study of Eddy-Current Measurement of Excess-Carrier Recombination Lifetime // IEEE Journal of photovoltaics. v.4, N.1. 2014. p.525-531.

## Развитие приборной и методологической базы для решения задач микроэлектроники методами сканирующей зондовой микроскопии

***Новиков И.А.<sup>1,2)</sup>, Козодаев Д.А.<sup>2)</sup>, Сотник Г.П.<sup>1,2)</sup>, Мошников В.А.<sup>1)</sup>***

<sup>1)</sup>*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург*

<sup>2)</sup>*ООО «Активная Фотоника», Москва*

e-mail: i.novikov@ntmdt-russia.com

Традиционно на конференциях «Кремний» компания ООО «Активная Фотоника» рассказывает о новых разработках, представляющих интерес углубления исследований кремния и структур на его основе [1]. За прошедшее время продукция компании пополнилась новыми разработками, позволяющих осуществлять комплексный анализ как промышленно выпускаемых продуктов (полупроводниковых пластин диаметром до 300 мм), так и лабораторных объектов. Прежде всего следует отметить профилометр uSTEP 300, который может быть оснащен стилусным, атомно-силовым и оптическим модулями профилометрии, а также поддерживать режимы атомно-силовой нанолитографии, четырехзондового профилометра и спектрального анализатора Раман-зонд. Для решения задач промышленного контроля выпускаемых изделий на предприятиях микроэлектронной отрасли себя зарекомендовала инспекционная машина uVISION 300, оснащенная нейросетевым алгоритмом поиска и классификации дефектов, способная работать как в белом, так и УФ-свете. Для интеграции в коллаборационных системах используется высокоточный многокоординатный стол uTRACK 300 при решении задач промышленной метрологии, инспекции и литографии. Продолжаются работы по созданию сканирующих зондовых микроскопов нового поколения и модулей на их основе для решения междисциплинарных задач [2].

В данной работе мы уделяем основное внимание новым материаловедческим аспектам, связанными с формированием на кремнии структур с пониженной размерностью, в том числе методами плазмохимического травления. Это позволяет использовать гибридные структуры, сочетающие функциональные элементы с традиционными схемами анализа на кремнии. Обсуждаются вопросы оценки чистоты сформированных структур [3]. Также рассмотрены вопросы дополнительных физических методик, позволяющих оценивать процессы, протекающие на интерфейсе «кремний-функциональный слой», в том числе на примере заготовок для электретных микрофонов [4].

### Литература

1. Новые научные инструменты для наномасштабных исследований современных материалов и диагностики наноструктур / Д. А. Козодаев, С. И. Нестеров, М. А. Трусов [и др.] // Кремний-2024 : Тезисы докладов XV Конференции по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе, Иркутск, 15–20 июля 2024 года. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2024. – С. 51.
2. Патент № 2849975 С1 Российская Федерация. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с магнитооптическим микроскопом, для исследования магнитных материалов с перпендикулярной магнитной анизотропией : заявл. 05.08.2024 : опубл. 01.11.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, А. В. Кимель [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Активная фотоника".
3. Porous silicon photoluminescence enhancement by silver dendrites registered with multiphoton microscopy / P. Lemesko, O. Korepanov, E. Podkovyrina [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2025. – Vol. 181, No. Part B. – P. 111825.
4. Kozodaev, D. A. Investigation of nanosized structures using internal friction effect / D. A. Kozodaev, I. A. Novikov, V. A. Moshnikov // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2024. – Vol. 17, No. S1.1. – P. 37-42.



## Новые электрофизические комплексы для характеристики дефектов структуры и электрических свойств полупроводников: DLTS-спектрометр и установка Ван дер Пау

**Кудрявцев А.С., Базлов Н.В., Бондаренко А.С.**

ООО «Научные технологии и сервис», Черноголовка

e-mail: info@scietex.ru

В докладе представлены два новых измерительных электрофизических комплекса: DLTS-спектрометр (нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней) и установка для измерения удельного сопротивления тонких пленок методом Ван дер Пау. Разработанные комплексы предназначены для измерения электрофизических параметров и исследований дефектов структуры полупроводников в задачах микро-, нано- и силовой электроники, фотовольтаики.

Предложенный в 1974 году Д. Лэнгом [1] метод DLTS до сих пор остается основным методом исследования центров захвата электронов и дырок в полупроводниках. В его основе лежат измерения релаксаций барьерной ёмкости диодной структуры после перезарядки центров, присутствующих в кристаллической решётке полупроводниковых материалов.

Разработанный DLTS-спектрометр позволяет регистрировать и сохранять релаксации емкости в процессе температурного сканирования, что открывает возможности для постобработки данных с применением различных весовых функций, фильтров и математических операций [2] без необходимости проведения повторного измерения. Высокая чувствительность достигается за счет возможности компенсации стационарной емкости образца, что позволяет работать с большими стационарными емкостями без потери динамического диапазона [3]. Для этой цели разработан специальный электронный модуль компенсации емкости. В спектрометре предусмотрена возможность измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик образца. Модульная и компьютеризированная архитектура спектрометра позволяет реализовывать дополнительные методы исследования, такие как оптический DLTS (ODLTS/DLOS), DDLTS, CTS, CTS-FET и др.

Разработанная установка измерения удельного сопротивления тонких пленок произвольной формы по методу Ван дер Пау [4] работает на переменном токе с синхронным детектированием, что позволяет не только получить высокую чувствительность по напряжению порядка единиц нВ, но и устранить вклад в выходной сигнал термо-ЭДС, возникающих на контактах, что особенно важно при исследовании температурных зависимостей удельного сопротивления образца. Установка может быть укомплектована одним или несколькими измерительными модулями, оптимизированными для образцов разной проводимости, либо универсальным модулем.

### Литература

1. D. V. Lang. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // *Journal of Applied Physics*. 45(7), 1974 pp. 3023–3032.
2. A. Istratov, O. F. Vyvenko. Exponential analysis in physical phenomena // *Review of Scientific Instruments*. 70(2), 1999 pp. 1233–1257.
3. F. Schmidt, H. von Wenckstern, O. Breitenstein, R. Pickenhain, M. Grundmann. Low rate deep level transient spectroscopy - a powerful tool for defect characterization in wide bandgap semiconductors // *Solid-State Electronics*. 92, 2014 pp. 40–46.
4. L. J. van der Pauw. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape // *Philips Research Reports*. 13(1), 1958 pp. 1–9.

## Особенности высокочастотной проводимости кремния легированного водородоподобной примесью

**Ормонт М.А., Ляшенко А.А.**

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

e-mail: ormont.73@mail.ru

Как известно, исследование частотных зависимостей проводимости может дать информацию об особенностях механизма переноса носителей заряда и о локальной структуре материала. Для аморфных и легированных полупроводников частотная зависимость проводимости хорошо описывается степенной зависимостью  $\sigma(\omega) \sim \omega^s$ , где  $s$  – постоянная (как правило,  $0.5 < s < 1$ ). Степенная частотная зависимость проводимости указывает на прыжковый характер транспорта; при этом  $1 \gtrsim s$  часто связывается с релаксационным вкладом. Вместе с тем резонансный вклад в низкотемпературную проводимость при учете кулоновских корреляций также имеет близкую к линейной ( $s \approx 0.8$ ) частотную зависимость  $\text{Re} \sigma^{res}(\omega) \sim r_\omega^3 \omega$  [1], где  $r_\omega = a \ln(\omega_c / \omega)$  – оптимальное межцентровое расстояние в паре ( $\omega_c > \omega$ ),  $a$  – эффективный борковский радиус. Важную роль приобретают исследования отклонений  $\sigma(\omega)$  от универсальности ( $1 \gtrsim s$ ). В Si:P [2], Si:B [3] при низких температурах ( $T \approx 1$  К) в терагерцовой области частот с ростом частоты наблюдался переход (кроссовер) от почти линейной ( $1 \gtrsim s$ ) к квадратичной ( $s \approx 2$ ) частотной зависимости вещественной части проводимости. При высоких частотах резонансный вклад в проводимость преобладает над релаксационным. Однако в рамках стандартных представлений о переменной длине прыжка  $r_\omega$  теория резонансной проводимости не описывает поведение низкотемпературной проводимости в области кроссовера; кулоновское взаимодействие между электронами внутри резонансных пар играет основную роль ( $e^2 / \kappa r_\omega > \hbar \omega$ ) и  $\text{Re} \sigma^{res}(\omega)$  остается близкой к линейной. Согласно [4, 5] кроссовер от почти линейной к квадратичной частотной зависимости вещественной части низкотемпературной проводимости с ростом частоты может быть связан с переходом от проводимости с переменной длиной прыжка  $r_\omega$  к проводимости с постоянной длиной прыжка  $r_{opt} \approx 4a$  при  $r_{opt} \approx r_\omega$  ( $\omega_{opt} \approx 0.02 \omega_c$ ); для Si:P  $\omega_c \sim 10^{13}$  рад/сек. При высоких частотах  $\omega > \omega_{opt}$  ( $r_{opt} > r_\omega$ ) в режиме с постоянной оптимальной длиной прыжка  $r_{opt}$  эффекты гибридизации не существенны. Переход к  $\text{Re} \sigma^{res}(\omega) \sim \omega^2$  с ростом частоты при  $\hbar \omega > e^2 / \kappa r_{opt}$  ( $\omega > \omega_{cr}$ ,  $\omega_{cr} \approx 0.1 \omega_c$ ) обуславливается тем, что кулоновским взаимодействием между электронами в парах с межцентровым расстоянием  $r_{opt}$  можно пренебречь. Для характерных значений параметров исследовавшихся экспериментально систем  $r_{opt}$  порядка  $n^{-1/3}$ ;  $n$  – концентрация примеси. В работе проведен расчет низкотемпературной резонансной проводимости неупорядоченного полупроводника в режиме переходов между ближайшими соседями в приближении некоррелированного (пуассоновского) беспорядка в распределении примеси. Показано, что результаты расчета резонансной проводимости, полученные с использованием представлений о переходах между ближайшими соседними центрами локализации, согласуются с частотной зависимостью резонансной проводимости при высоких частотах  $\omega > \omega_{opt}$  в режиме с постоянной длиной прыжка  $r_{opt}$ ,  $\text{Re} \sigma^{res}(\omega) \sim \omega(\hbar \omega + e^2 / \kappa r_{opt})$ .

### Литература

1. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. ЖЭТФ, 81(1), 1981 406 с.
2. E. Helgren, N.P. Armitage, G. Grüner. Phys. Rev. Lett., 89, 2002 P. 246601.
3. M. Lee, M.L. Stutzmann. Phys. Rev. Lett., 87, 2001 P. 056402.
4. М.А. Ормонт, И.П. Звягин. ФТП, 54(1), 2020 36 с.
5. М.А. Ормонт, Н.В. Валенко. ФТТ, 65(7), 2023 1244 с.

# Лазерно-индуцированное пространственно-временное управление синхротронным рентгеновским излучением с использованием динамики кристаллической решётки кремния

**Обыденнов Н.Н.<sup>1,2)</sup>, Мареев Е.И.<sup>2)</sup>, Пиляк Ф.С.<sup>2)</sup>, Куликов А.Г.<sup>2)</sup>, Ефременко В.Ф.<sup>2)</sup>,  
Писаревский Ю.В.<sup>2)</sup>, Потёмкин Ф.В.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2)</sup>НИЦ «Курчатовский Институт», Москва

e-mail: obydenov.nn20@physics.msu.ru

Время-разрешённые рентгеновские дифракционные исследования позволяют изучать динамику кристаллической решётки и фазовых переходов. Для процессов на пико- и фемтосекундных масштабах созданы рентгеновские лазеры на свободных электронах, однако многие физические процессы протекают на нано- и суб-микросекундных временных интервалах [1]. Для их изучения достаточно рентгеновских импульсов сопоставимой длительности, которые может обеспечить синхротронное излучение. Ключевая задача для экспериментов накачка-зондирование — выделение одиночных импульсов из его непрерывного пучка. Одно из решений — кратковременное отклонение рентгеновского пучка, дифрагированного от кремния, после лазерного воздействия.

В работе исследована динамика кристаллической решётки монокристалла кремния 100 после возбуждения наносекундными лазерными импульсами с длиной волны 532 нм, длительностью 4 нс и флюенсом порядка 1 Дж/см<sup>2</sup>. Поглощение излучения в приповерхностном слое кремния инициирует формирование резких температурных градиентов и термоупругих напряжений, что приводит к возникновению бегущей волны деформации и изменению межплоскостных расстояний на уровне  $\Delta d/d \sim 10^{-4}$ . Экспериментально динамика решётки изучалась при помощи время-разрешающей рентгено-дифракционной методики, реализованной на станции РКФМ КИСИ-Курчатова [2].

Показано, что характер изменения эффективности дифракционного отражения существенно зависит от глубины экстинкции. Для рефлекса (111), дифракция для которого происходит в приповерхностной области, наблюдается быстрое снижение интегральной интенсивности кривой дифракционного отражения (КДО), связанное с локальным разупорядочением решётки и частичной аморфизацией поверхностного слоя. Для более глубоких рефлексов, наоборот, обнаружено увеличение интеграла КДО по сравнению с исходным уровнем. Дополнительно зарегистрированы угловые смещения центра масс КДО, превышающие ширину кривой качания, что подтверждает возможность активного управления направлением дифрагированного рентгеновского пучка. На основе полученных результатов предложена схема двухкристального монохроматора с лазерным управлением, позволяющая формировать временное окно пропускания длительностью порядка 40 нс при ослаблении фона примерно в 140 раз.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-73-00039. Обыденнов Н.Н. является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

## Литература

1. F. S. Pilyak, et.al. Charge separation and directed migration of photoelectrons in LiNbO<sub>3</sub>:Fe crystals after excitation by nanosecond laser pulses. *Physical Review B*, (000300), 2024.
2. M. V. Kovalchuk, et.al. Subnanosecond x-ray diffraction technique for the study of photoinduced polarization-dependent processes on the kisi-kurchatov. *Crystallography Reports*, 69:165–172, 2024.

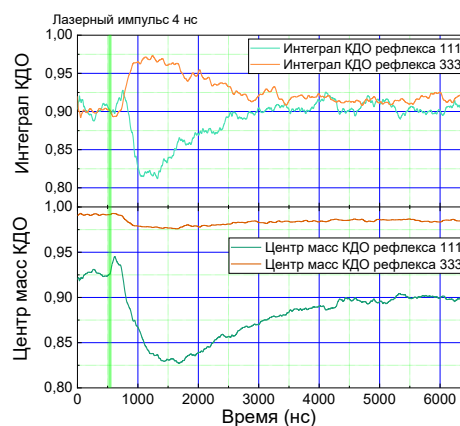


Рисунок 1 – Нормированная динамика интеграла (сверху) и центра масс (снизу) КДО для рефлексов (111) и (333) кристаллического кремния после лазерного воздействия.

## Высокотемпературное поведение SiSiC-керамики в окислительной и защитной средах

**Беляков А.Н., Марков М.А.**

НИИ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург  
e-mail: anton\_belyakov\_n@mail.ru

Реакционно-спеченный карбид кремния (SiSiC) является перспективным материалом для высокотемпературных узлов газотурбинных двигателей, работающих при повышенных температурах [1-3]. Благодаря сочетанию низкой плотности, высокой твердости и способности сохранять форму при нагреве, SiSiC-керамика рассматривается как альтернатива жаропрочным металлическим сплавам в неохлаждаемых элементах горячего тракта. Критически важной характеристикой при обосновании его применения выступает жаропрочность — способность сохранять механические свойства под нагрузкой в экстремальных температурных условиях.

В работе [4] проведены сравнительные испытания прочности при изгибе SiSiC-керамики в интервале температур 20–1400 °С в воздушной (окислительной) и вакуумной (защитной) средах. Образцы изготавливали методом горячего шликерного литья под давлением композиционных порошков с последующим реакционным спеканием при 1500 °С в вакууме. Плотность полученных образцов составляла 3,04–3,10 г/см<sup>3</sup>, остаточное содержание свободного кремния — 8–12 об. %. Трехточечные изгибные испытания проводили по авторской методике с использованием модернизированной высокотемпературной установки, оснащенной вакуумной камерой и системой термопарного контроля. Установлено принципиальное различие в поведении материала в зависимости от среды. На воздухе с ростом температуры до 1200 °С наблюдается повышение прочности с 320 до 420 МПа, что объясняется образованием на поверхности тонкой пленки диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>), «залечивающей» микротрещины и упрочняющей межзеренные границы. Выше 1200 °С прочность снижается из-за размягчения остаточного кремния, заполняющего поровое пространство. В вакууме при 1400 °С прочность падает катастрофически (ниже 100 МПа) вследствие отсутствия защитного оксидного слоя и деградации границ зерен. Полученные данные определяют температурные пределы безопасной эксплуатации SiSiC-изделий сложной геометрии: до 1400 °С в окислительной среде (камера сгорания) и до 1200 °С — в инертной или восстановительной атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 21-73-30019-П).

### Литература

1. A.N. Belyakov, M.A. Markov, I.N. Kravchenko, A.D. Kashtanov, D.A. Dyuskina, A.D. Bykova, A.G. Chekuryaev Contemporary materials and their application in the construction of special engineering high-temperature objects // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. V. 64, № 3. P. 256-264. DOI: 10.1007/s11148-024-00835-3
2. M.A. Markov, A.N. Belyakov, D.A. Dyuskina, A.G. Chekuryaev, A.D. Bykova, S.N. Perevislov, A.D. Kashtanov Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials // Glass and Ceramics. 2023. V. 80, № 7-8. P. 277-282. DOI: 10.1007/s10717-023-00598-2
3. A.N. Belyakov, M.A. Markov, I.N. Kravchenko, A.D. Bykova, D.A. Dyuskina, A.G. Chekuryaev, A.D. Kashtanov Study of the structural, physical, and mechanical characteristics of reaction-sintered silicon carbide ceramics // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, Suppl. 1. P. S74–S81. DOI: 10.1134/S1052618823090029
4. M.A. Markov, S.N. Vikhman, A.N. Belyakov, D.A. Dyuskina, A.D. Kashtanov, S.N. Perevislov, A.G. Chekuryaev, A.D. Bykova High-temperature bending tests of reaction-sintered silicon carbide-based ceramic materials // Russian Journal of Applied Chemistry. 2023. Vol. 96, № 1. P. 16–20. DOI: 10.1134/S1070427223010032

## Фазовая стабильность тугоплавких соединений титана в расплаве кремния при реакционном спекании

**Быкова А.Д., Марков М.А.**

НИИ "Курчатовский институт" - ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург  
e-mail: bykova.ad@gmail.com

Реакционное спекание (силицирование) является перспективным методом получения беспористых изделий из карбида кремния (SiSiC) для высокотемпературных узлов газотурбинных двигателей. Благодаря безупречности процесса и относительно невысоким температурам синтеза этот метод открывает широкие возможности для формирования сложнопрофильных керамических элементов [1-2]. Перспективным направлением повышения надежности SiSiC-керамики является дисперсионное упрочнение путем введения в матрицу тугоплавких соединений, способных инициировать механизмы отклонения и раздвоения трещин. Однако поведение этих модификаторов в специфических условиях силицирования — при контакте с расплавом кремния в присутствии углерода — изучено недостаточно. Целью настоящей работы являлся сравнительный анализ фазовых превращений в системах  $TiB_2-C-Si$  и  $TiC-C-Si$  при температурах реакционного спекания. Образцы получали методом одноосного прессования смесей мелкодисперсных порошков  $TiB_2$  (средний размер частиц 1–2 мкм) и  $TiC$  (0.5–1 мкм) с добавлением технического углерода (15 мас. %) с последующей пропиткой расплавом кремния при 1550 °С в вакууме. Фазовый состав спеченных материалов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА), микроструктуру и элементное распределение — методами сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом. Установлено принципиальное различие в поведении модификаторов. Диборид титана продемонстрировал высокую химическую устойчивость в расплаве кремния: его частицы сохраняют исходную морфологию и четкие границы, а связывание матрицы происходит за счет образования вторичного карбида кремния из углерода шихты. РФА подтверждает наличие только равновесных фаз  $SiC$ ,  $TiB_2$  и незначительного количества остаточного кремния. Напротив, карбид титана активно взаимодействует с расплавом, частично распадаясь с образованием охрупчивающих силицидов титана ( $TiSi_2$ ,  $TiSi$ ), что подтверждается как дифрактограммами, так и появлением характерных светлых межзеренных прослоек на микрофотографиях. Высвобождающийся при распаде  $TiC$  углерод дополнительно участвует в формировании вторичного карбида кремния, однако общая деградация упрочняющей фазы приводит к снижению механических свойств. Термодинамический анализ с расчетом энергий Гиббса показал, что стабильность  $TiB_2$  в системе  $Si-C$  ( $\Delta G = -280$  кДж/моль при 1600 °С) значительно превосходит стабильность  $TiC$  ( $\Delta G = -175$  кДж/моль), что делает диборид титана предпочтительной упрочняющей фазой для реакционно-спеченных композитов на основе карбида кремния. Полученные результаты служат основой для прогнозирования поведения других тугоплавких соединений металлов IV и V групп в условиях силицирования и открывают путь к целенаправленному проектированию керамических материалов с повышенной трещиностойкостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-73-30019-П).

### Литература

1. A.N. Belyakov, M.A. Markov, I.N. Kravchenko, A.D. Kashtanov, D.A. Dyuskina, A.D. Bykova, A.G. Chekuryaev Contemporary materials and their application in the construction of special engineering high-temperature objects // Refractories and Industrial Ceramics. 2023. V. 64, № 3. P. 256-264. DOI: 10.1007/s11148-024-00835-3
2. M.A. Markov, A.N. Belyakov, D.A. Dyuskina, A.G. Chekuryaev, A.D. Bykova, S.N. Perevislov, A.D. Kashtanov Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials // Glass and Ceramics. 2023. V. 80, № 7-8. P. 277-282. DOI: 10.1007/s10717-023-00598-2

# Исследование гетероструктур на основе тонких пленок оксида и нитрида кремния электронно-зондовыми и ионно-зондовыми методами

**Горячев А.В.<sup>1)</sup>, Александров Н.В.<sup>1,2)</sup>, Кириленко Е.П.<sup>1)</sup>, Габдрахманов А.Э.<sup>1)</sup>, Еганова Е.М.<sup>1)</sup>, Гришин Т.С.<sup>1)</sup>, Дудин А.А.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва

<sup>2)</sup>НИТУ МИСИС, Москва

e-mail: andrei.goryachev@mail.ru

Структуры на основе тонких пленок оксида и нитрида кремния имеют широкое применение в опто- и микроэлектронике. Качество получаемых пленок сильно влияет на электрофизические, фотолюминисцентные свойства таких структур – тем сильнее, чем тоньше плёнка. Неоднородность кристаллической структуры и состава отдельной пленки может сильно изменять свойства гетероструктуры в целом. При толщине порядка 10 нм и менее существенно возрастает влияние переходных слоев на границе раздела пленок. Поэтому очень важно контролировать состав и структуру не только пленки, но и переходных слоев на границах раздела пленок с соседними слоями.

Для исследования гетероструктур на основе тонких и ультратонких диэлектрических пленок с высоким разрешением по глубине необходимо разработать специализированные методики анализа электронно-зондовыми и ионно-зондовыми методами, позволяющими исследовать также и границы раздела между слоями.

В работе представлены результаты профильного элементного и химического анализа гетероструктур  $(\text{SiN}_x/\text{SiO}_2)_n/\text{Si}$ , получены оже-спектры сравнения различных химических соединений кремния, отработаны условия оже-анализа с учётом артефактов воздействия электронного и ионного пучков. Определенные по образцам сравнения коэффициенты относительной элементной чувствительности позволили получить распределения концентраций химических соединений по толщине исследуемых гетероструктур. Наилучшее разрешение по глубине при количественном элементном и химическом анализе обеспечивается комбинацией методов электронной оже-спектроскопии и времяпролетной вторично-ионной масс-спектрометрии, а анализ кристаллической структуры – методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

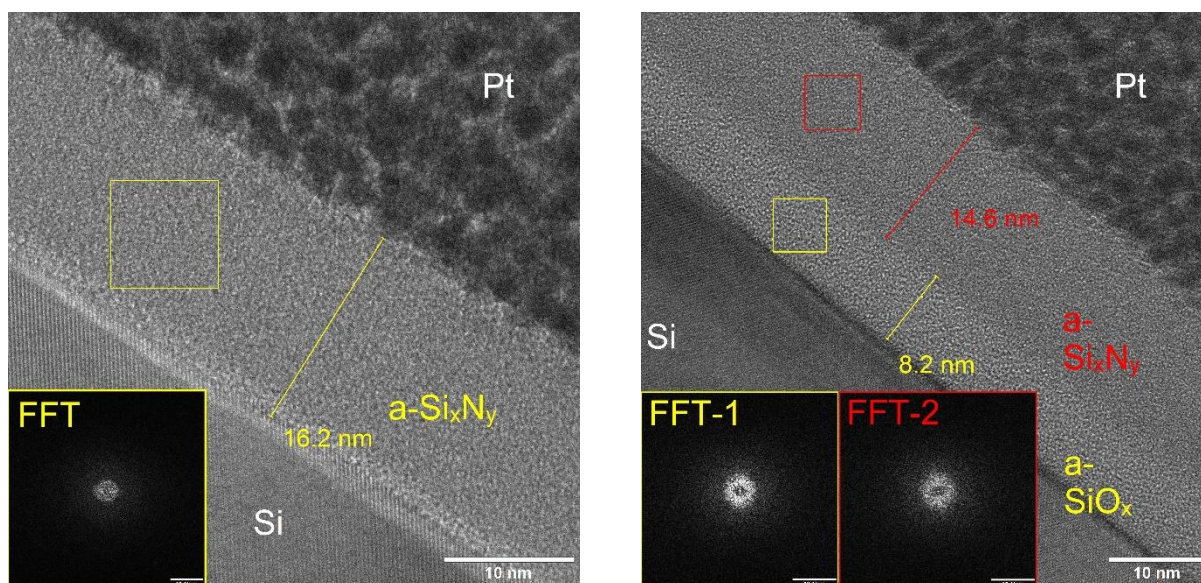


Рисунок 3 – Изображения плёнки  $\text{SiN}_x$ , (слева) и структуры  $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  (справа) полученные методом ПЭМ. На вставках показаны фурье преобразования от кристаллической решетки, полученные в указанных на изображениях областях.



## Перспективные методы синтеза и изучения плёнок на Si

Гуральник А.С.<sup>1)</sup>, Субботин Е.Ю.<sup>1)</sup>, Чернев И.М.<sup>1)</sup>, Маслов А.М.<sup>1)</sup>, Доценко С.А.<sup>1)</sup>, Герасименко А.В.<sup>2)</sup>, Козлов А.Г.<sup>3)</sup>, Волкова Л.С.<sup>4)</sup>, Дудин А.А.<sup>4)</sup>, Поляков М.В.<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>2)</sup>Институт Химии ДВО РАН, Владивосток

<sup>3)</sup>Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток

<sup>4)</sup>Институт Нанотехнологий Микроэлектроники РАН, Москва

e-mail: fun\_era@mail.ru

1. Температура (Т) подложки - важнейший параметр, позволяющий контролировать множество физико-химических явлений на поверхности Si, как в производственных процессах, так и в научных исследованиях. Изучение зависимостей процессов от Т обычно требует многочисленных повторений эксперимента при разных Т, что занимает много времени и ресурсов. Применяя образцы с клинообразным распределением Т на поверхности, можно радикально уменьшить объём работы и повысить эффективность исследований. Такие распределения Т легко получаются при пропускании постоянного тока через высоколегированные образцы Si между контактами из Та. В дополнение к Джоулевому теплу, один край образца нагревается за счёт эффекта Пельтье, а другой край охлаждается (Рис.1). Благодаря непрерывности распределения Т, можно в одном эксперименте найти точные значения интересующих температур (например, изучая фазовые диаграммы или механизм/смену механизма некоторого процесса на поверхности/интерфейсе).



Рисунок 1 – Образец Si (КЭМ ~ 0.002 Ом×м), нагреваемый постоянным током.



Рисунок 2 – Две стадии импульсного осаждения магния на структуру Si-Sn/Si(111) с градиентом Т. Неоднородная чёрно-голубая плёнка видна на образце в конце вспышки.

2. Свойства материала часто зависят от его наноструктуры. Для получения нужной наноструктуры, исследуются разнообразные методы синтеза материалов. Мы хотим привлечь внимание к синтезу силицидов методом высокотемпературного импульсного осаждения (ВТИО), (см. Рис. 2). В частности, при росте  $Mg_2Si$  на кремнии этот метод оказался удачным [1,2,3]. Причина в том, что малые концентрации Mg не могут реагировать с кремнием [2]; с другой стороны - из-за высокой летучести, Mg быстро реиспаряется и при обычных скоростях осаждения достаточная для реакции концентрация не образуется [1]. Важное свойство импульсного осаждения – возможность инициации процесса, подобного Самораспространяющемуся Высокотемпературному Синтезу (СВС), в котором ключевую роль играет выделяющееся тепло экзотермической реакции. В отличие от СВС, при ВТИО реагенты не контактируют при низкой Т, новая фаза зарождается при заданной высокой Т, что отражается в наноструктуре полученного материала. Мы демонстрируем этот метод на примере синтеза термоэлектрика  $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ , методом ВТИО Mg на смесь Sn-Si/Si.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FFWF-2026-0007).

## Литература

1. Gouralnik, A.S.; Shevlyagin, A.V.; Chernev, e.a. Synthesis of crystalline  $Mg_2Si$  films by ultrafast deposition of Mg on Si(111) and Si(001) at high temperatures. Mg/Si intermixing and reaction mechanisms. *MatChemPhys.* **258** (2021), 123903. 10.1016/matchemphys.2020.123903
2. A.S. Gouralnik, Yu.V. Luniakov. Mg/Si interface reaction: How and Why. Towards rational technologies of Mg/Si film growth for energy conversion. *Vacuum* **196**, (2022), 110798. 10.1016/j.vacuum.2021.110798
3. A.S. Gouralnik, I.M. Chernev, A.M. Maslov, S.A. Dotsenko. A promising experimental paradigm and mechanism of  $Mg_2Si$  UHV growth on a non-uniformly heated Si(111) sample. *Vacuum* **202** (2022), 111193. 10.1016/j.vacuum.2022.111193

## Современные подходы к созданию биосенсоров: ковалентное закрепление фермента на оксиде тантала

**Смолин Е.С., Комарова Н.В., Кузнецов А.Е.**

*Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва*  
e-mail: evg-smolin@yandex.ru

Современная медицина и биотехнологии сталкиваются с возрастающей потребностью в точных, быстрых и надежных методах определения биомаркеров. Особый интерес представляют ферментативные биосенсоры, сочетающие высокую специфичность биологических молекул с преимуществами современных микроэлектронных систем. Среди различных подходов к созданию таких устройств наиболее перспективными являются системы на основе оксида тантала ( $Ta_2O_5$ ) [1]. Этот материал обладает уникальным сочетанием свойств: высокой химической стабильностью, биосовместимостью, оптимальными электрохимическими характеристиками и способностью к эффективной иммобилизации биомолекул.

Ключевым этапом разработки биосенсоров является создание стабильного биочувствительного слоя путем иммобилизации фермента на поверхности оксида тантала. В отличие от физической адсорбции, ковалентное закрепление фермента через сшивающие агенты, обеспечивает значительное повышение стабильности биосенсорного слоя при сохранении каталитической активности [2].

Процесс включает несколько последовательных этапов [3], каждый из которых играет важную роль в формировании стабильного биосенсорного слоя.

В результате работы было показано, что данный метод позволяет создавать биосенсоры, отвечающие возрастающим требованиям к точности и скорости диагностики, добиться многократного использования чипа, а также снижать пределы обнаружения аналитов.

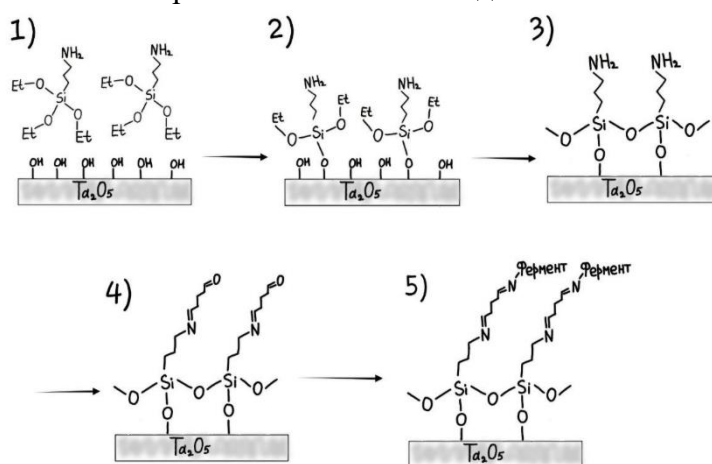


Рисунок 1 – Схема ковалентной иммобилизации фермента на поверхности  $Ta_2O_5$ . (1) – Образование гидроксильных групп на подложке. (2) – Связывание АПТЭС с гидроксильрованной поверхностью. (3) – Образование устойчивого аминного слоя. (4) – Обработка поверхности глутаровым альдегидом с формированием альдегидных групп. (5) – Ковалентное связывание фермента, получение стабильного ферментсодержащего биосенсорного слоя.

### Литература

1. Kulisch, W., Gilliland, D., Ceccone, G., Sirghi, L., Rauscher, H., Gibson, P.N., Zürn, M., Bretagnol, F., Rossi, F. Tantalum pentoxide as a material for biosensors: deposition, properties and applications // Nanostructured Materials for Advanced Technological Applications, 2009, pp. 509-524.
2. Sassolas, A., Blum, L.J., Leca-Bouvier, B.D. Immobilization strategies to develop enzymatic biosensors // Biotechnology Advances, 2012, Vol. 30, № 3, pp. 489-511.
3. López-Gallego, F., Guisán, J. M., Betancor, L. Glutaraldehyde-mediated protein immobilization // Methods in Molecular Biology, 2013, Vol. 1051, pp. 33-41.

## Формирование и исследование свойств черных металлов на оксинитриде кремния

**Наумова О.В., Ярошевич А.С., Демьяненко М.А., Пономарев С.А.**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск*  
e-mail: naumova@isp.nsc.ru

Одним из основных этапов изготовления различных фотоприемных устройств является формирование высокоэффективных поглотителей электромагнитного излучения (ЭИ) [1]. Независимо от используемого для этого материала, основной тенденцией является увеличение длины волны  $\lambda_m$ , соответствующей максимуму поглощения, с увеличением толщины поглощающего слоя. Так для эффективного поглощения ЭИ в ИК диапазоне структурированным кремнием требуются толщины в единицы микрометров. Альтернативой, позволяющей на порядок уменьшить толщину поглотителя с сохранением его механической прочности, являются многослойные структуры на основе пленок черных металлов (ВМе)/диэлектрик. Проблемой формирования таких поглотителей является высокая смачиваемость диэлектрика металлом, результатом которой являются 2D рост пленок (например, Al на SiO<sub>2</sub>) и, соответственно, их высокое отражение. В работе [2] мы показали, что замена части кислорода азотом, т.е. переход к слоям SiON, позволяет при магнетронном распылении алюминия реализовать 3D рост пленок с формированием пор и столбчатых кластеров, состоящих из более мелких зерен Al. Многослойные структуры n(Al/SiON) при их эффективной толщине ~320 нм обеспечивают поглощение до 82% в диапазоне 0.8-4.2 мкм. Другим решением проблемы смачиваемости является использование металлов с высокой поверхностной энергией (например, Ti и V).

В данной работе исследовались морфология поверхности и электрические свойства пленок ВМе, полученных магнетронным распылением Al, Ti и V на слои оксинитрида кремния. Для исследования оптических свойств в УФ-среднем ИК и дальнем ИК диапазонах использовались структуры ВМе/SiON/Al-зеркало и ВМе/SiON/полиимид/Al-зеркало, соответственно. Показано, что при магнетронном распылении реализуется механизм роста Странского-Крастанова тонких пленок Al, Ti и V на слоях SiON независимо от типа металла. Многослойные 25-30 нм пленки металлов с разделительным 20 нм SiON обеспечивают линейную зависимость  $\lambda_m$  от числа слоев n (рис.1) и высокоэффективное поглощение ( $\geq 89\%$ ) в УФ-дальнем ИК диапазонах. Проведено сравнение с традиционными аналогами поглотителей на основе тонких металлических пленок (NiCr).

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ, №-23-72-30003 (в части формирования/исследования черного Al и NiCr) и ГЗ FWGW-2025-0014 (результаты по Ti и V).

### Литература

1. E.-T. Hu, K.-Y. Zang, J.-R. Zhang, A.-Q. Jiang, H.-B. Zhao, Y.-X. Zheng, S.-Y. Wang, W. Wei, O. Yoshie, Y.-P. Lee, J.-P. Guo, D. W. Lynch, L.-Y. Chen // Book: Optical Properties of Solar Absorber Materials and Structures. In Topics in Applied Physics. 142, 2021 P. 1-165.
2. O. Naumova, A. Petin, E. Zaytseva, Y. Zhivodkov, A. Jaroshevich, S. Ponomarev, D. Shcheglov. Morphology, optical and electric properties of porous Al films on SiON layers // Surfaces and Interfaces, 72, 2025 P.10693.

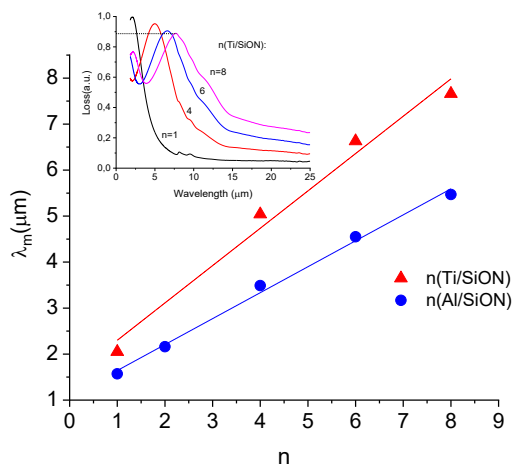


Рисунок 1 – Зависимости пика поглощения  $\lambda_m$  от числа n многослойных структур n(Al/SiON) и n(Ti/SiON) и типичные оптические потери (на вставке) для многослойных структур n(Ti/SiON).

## Моделирование ориентационных взаимосвязей зёрен в поликристаллических материалах на основе графовых нейронных сетей

**Чуешова А.Г.<sup>1)</sup>, Пещерова С.М.<sup>2)</sup>, Осипова Е.А.<sup>3)</sup>, Непомнящих А.И.<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

<sup>2)</sup>Иркутский государственный университет г. Иркутск

<sup>3)</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск  
e-mail: trill6521@yandex.ru

На сегодняшний день использование искусственного интеллекта (ИИ) для решения задач материаловедения и инженерии дефектов уже зарекомендовало себя ввиду способности эффективно обрабатывать большие объемы экспериментальных данных, выявляя корреляции, недоступные традиционным методам анализа [1]. Одной из таких задач, где применение ИИ открывает новые перспективы является моделирование структуры поликристаллических материалов, поскольку именно структурные характеристики (размер зёрен, их ориентация, тип межзёренных границ) определяют ключевые физические, оптические, механические свойства материала. В свою очередь, формирование этой структуры представляет собой сложный эволюционный процесс конкурентного роста зерен, в ходе которого одни ориентации получают преимущество перед другими, что приводит к формированию специфических текстур и закономерностей во взаимном расположении зерен [2]. Количественное описание предпочтительных и редких типов соседства ориентаций зёрен создает основу для моделирования микроструктуры и последующей 3D-реконструкции поликристаллических слитков.

В данной работе предложен подход к восстановлению трехмерной структуры поликристаллических материалов, основанный на статистическом анализе ориентационных переходов между соседними зернами в двумерных EBSD-сечениях и последующем использовании полученных вероятностных распределений в качестве ограничений при 3D-реконструкции.

Для моделирования вероятностей соседства ориентаций и последующей 3D-реконструкции микроструктуры предлагается использовать графовые нейронные сети (GNN) [3]. Такой выбор обоснован тем, что зёренная структура представима в виде графа, где узлы соответствуют зернам с их кристаллографическими ориентациями, а ребра — границам между ними, характеризуемым углом и осью разориентации. Таким образом, графовые архитектуры позволяют учитывать физические ограничения (например, одно зерно — одна ориентация) и моделировать кристаллографические зависимости между соседними зернами, что критически важно для достоверного восстановления трехмерной структуры по ограниченному набору двумерных сечений.

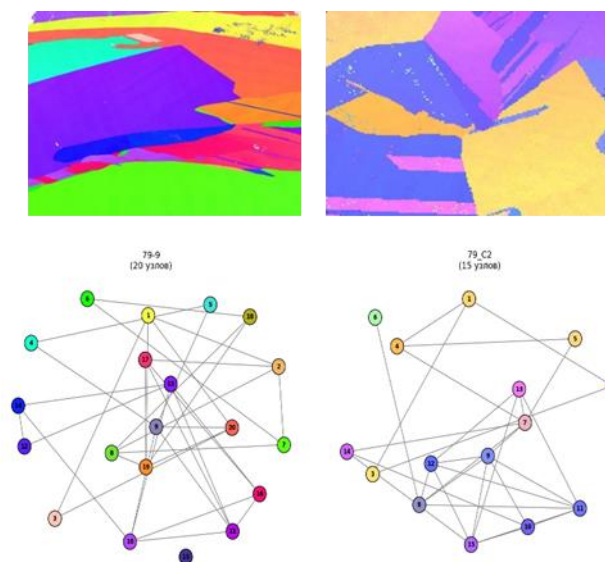


Рисунок 1 — Построение графов для анализа последовательностей ориентаций зёрен.

### Литература

1. Pratap A., Verma A. S. Recent Research Challenges While Applying Machine Learning in Materials Science //Smart Materials Engineering: Data-Driven Approaches and Multiscale Modelling. – 2026. – С. 165-186.
2. Bodelot L., Ravichandran G. Experimental determination of a representative texture and insight into the range of significant neighboring grain interactions via orientation and misorientation statistics //International journal of materials research. – 2014. – Т. 105. – №. 2. – С. 117-129.
3. Qin Y. et al. GrainGNN: A dynamic graph neural network for predicting 3D grain microstructure //Journal of Computational Physics. – 2024. – Т. 510. – С. 113061.

# Авторский указатель

## А

Александров Н.В. .... 45, 114  
Алиев В.Ш. .... 72  
Ананьев А.Д. .... 96  
Андреева Н.В. .... 96  
Аникин А.В. .... 77  
Аношин О.С. .... 21, 32  
Антонов А.В. .... 18  
Антонов В.А. .... 80  
Ануфриев Ю.В. .... 42, 94  
Анфимов И.М. .... 22, 107

## Б

Базлов Н.В. .... 109  
Балашев В.В. .... 68, 69  
Басов М.В. .... 100  
Бацанов С.А. .... 46  
Белов А.И. .... 97, 105  
Беляков А.Н. .... 112  
Бердников В.С. .... 19, 30  
Бильгенов А. .... 27  
Большаков А.Д. .... 98  
Большаков В.О. .... 81  
Бондаренко А.С. .... 109  
Бондаренко Л.В. .... 44, 52, 53, 55, 65  
Борисов Д.В. .... 29  
Бородаенко Ю.М. .... 67  
Брыкин Л.О. .... 55  
Бурковская П.В. .... 51, 52  
Быкова А.Д. .... 113

## В

Ван Ю. .... 62  
Вдовин В.И. .... 99  
Вдовина Т.Н. .... 31  
Вековшинин Ю.Е. .... 52, 53, 55, 65  
Вербус В.А. .... 64  
Винокуров В.А. .... 19  
Винокуров В.В. .... 19  
Войцеховский А.В. .... 41  
Волкова Л.С. .... 43, 70, 115  
Воловликова О.В. .... 92  
Володин В.А. .... 39, 48  
Воронова Н.В. .... 101

## Г

Габдрахманов А.Э. .... 114  
Гагарина А.Ю. .... 93  
Галкин К.Н. 43, 47, 56, 57, 58, 59, 70, 104  
Галкин Н.Г. 43, 47, 56, 57, 58, 59, 70, 104  
Герасименко А.В. .... 56, 115  
Гисматулин А.А. .... 66, 72  
Голяшов В.А. .... 61  
Горнев Е.С. .... 86, 87, 91  
Горошко Д.Л. .... 47, 56, 57, 58, 59, 92, 104  
Горошко О.А. .... 47, 58, 59  
Горшков Д.В. .... 66

Горячев А.В. .... 45, 114  
Гречкина М.В. .... 50  
Гриценко В.А. .... 66, 72  
Гришин Т.С. .... 43, 70, 114  
Гришков В.А. .... 19  
Гришнова Н.Д. .... 21  
Громов В.Д. .... 45  
Громов Д.Г. .... 77  
Грузнев Д.В. .... 52, 53, 55, 65  
Гуральник А.С. .... 115  
Гутаковский А.К. .... 99

## Д

Давыденко А.В. .... 73, 74  
Данилюк А.Л. .... 57  
Двуреченский А.В. .... 48, 62  
Демидов Е.В. .... 18, 64  
Демо И.О. .... 29, 89  
Демьяненко М.А. .... 117  
Денисов Н.В. .... 65  
Дирко В.В. .... 41, 103  
Домашевская Э.П. .... 37  
Доценко С.А. .... 43, 47, 70, 115  
Дроздов М.Н. .... 18  
Дубков С.А. .... 40, 49  
Дубкова А.С. .... 40, 49  
Дудин А.А. .... 43, 45, 70, 114, 115

## Е

Еганова Е.М. .... 102, 114  
Елисеев И.А. .... 23, 28  
Ермина А.А. .... 81  
Ефременко В.Ф. .... 111

## Ж

Жабоедов А.П. .... 23  
Жарова Ю.А. .... 81  
Жданов В.С. .... 51, 52, 53, 65  
Живулько В.Д. .... 99  
Жилицкий Е.В. .... 80

## З

Зайцев А.В. .... 21, 32  
Захаров В.Е. .... 64, 71, 99  
Зиновьев В.А. .... 46, 48, 62, 99  
Зиновьева А.Ф. .... 48, 62, 99  
Зотов А.А. .... 97, 105  
Зотов А.В. .... 51, 52, 53, 55, 65

## И

Иванов Д.А. .... 89  
Ильюшина Н.Д. .... 40  
Ищенко Д.В. .... 61

## К

Кадыров А.Д. .... 82  
Калаев В.В. .... 29  
Камаев Г.Н. .... 48, 62  
Карасев К.П. .... 79

Карасев П.А. .... 79  
Карасева Е.П. .... 98  
Кацуба А.В. .... 48, 62  
Ким К.Б. .... 50  
Кириленко Е.П. .... 45, 114  
Киселев Ю.В. .... 27  
Кислицын С.А. .... 19  
Клочкова Е.Л. .... 86  
Кобелева С.П. .... 22, 107  
Ковалев А.Н. .... 78  
Козлов А.Г. .... 73, 74, 115  
Козодаев Д.А. .... 108  
Колоколов Д.Г. .... 22, 107  
Комарова Н.В. .... 102, 116  
Кондратьев В.М. .... 98  
Кондратьева А.С. .... 98  
Королев Д.С. .... 97, 105  
Котков А.П. .... 21, 32  
Котляр В.Г. .... 51, 52  
Коханенко А.П. .... 41, 103  
Красильник З.Ф. .... 18  
Красильникова Л.В. .... 18  
Кропачев О.В. .... 47, 56, 58, 70  
Крохан Н.В. .... 77  
Кудрявцев А.С. .... 109  
Кузнецов А.Е. .... 102, 116  
Кузнецова М.А. .... 73  
Кукенов О. .... 41, 103  
Куликов А.Г. .... 111  
Кумар Н. .... 61  
Кучмижак А.А. .... 67  
Кырова Е.Д. .... 61

## Л

Лазоркина Е.Н. .... 92  
Лебедев Е.А. .... 77  
Леньшин А.С. .... 37, 50  
Литаврин М.В. .... 86, 91  
Лозовой К.А. .... 41, 103  
Лопаев Д.В. .... 78  
Лукин А.Н. .... 50  
Лукичев В.Ф. .... 16  
Любимова О.О. .... 29  
Ляшенко А.А. .... 110

## М

Мазинг Д.С. .... 96  
Манцурова С.В. .... 38  
Мараров В.В. .... 69  
Мареев Е.И. .... 111  
Маркелова А.К. .... 72  
Марков Д.П. .... 81  
Марков М.А. .... 112, 113  
Мартовицкий В.П. .... 61  
Маслов А.М. .... 58, 115  
Махмудиан М.М. .... 72  
Махмудиан Мехрдад М. .... 72  
Машанов В.И. .... 46  
Мигас Д.Б. .... 43, 57  
Милехин И.А. .... 61  
Миловзоров Д.Е. .... 83  
Митин К.А. .... 19, 30  
Митина А.В. .... 30



Михайлов А.В. .... 19  
 Михайлов А.Н. .... 64, 71, 97, 105  
 Михалюк А.Н. .... 44, 52, 53, 55, 65  
 Мишин М.В. .... 98  
 Мошников В.А. .... 108  
 Мудрый А.В. .... 99  
 Мухин А.А. .... 40  
 Мяконьких А.В. .... 16, 17, 80

## Н

Наумова О.В. .... 117  
 Непомнящих А.И. .... 23, 118  
 Нехамин С.М. .... 27  
 Никитин В.В. .... 84  
 Николаев В.К. .... 84  
 Никольская А.А. .... 71  
 Нифталиев С.И. .... 50  
 Новиков А.В. .... 18, 64, 71  
 Новиков И.А. .... 108  
 Новосельцев А.И. .... 77

## О

Обыденнов Н.Н. .... 111  
 Олянич Д.А. .... 52, 53, 68  
 Ормонт М.А. .... 110  
 Осипов А.А. .... 98  
 Осипова Е.А. .... 118

## П

Панкратов А.Л. .... 18  
 Пашенко А.С. .... 73, 74  
 Пещерова С.М. .... 118  
 Пиляк Ф.С. .... 111  
 Писаревский Ю.В. .... 111  
 Писаренко Т.А. .... 68, 69  
 Плюснин Н.И. .... 27, 42, 94  
 Полежаев Д.М. .... 21  
 Полковникова Ю.А. .... 37  
 Поляков А.В. .... 104  
 Поляков М.В. .... 115  
 Пономарев С.А. .... 117  
 Попов В.П. .... 17, 39, 80, 85  
 Попов И.В. .... 39, 85  
 Потёмкин Ф.В. .... 111  
 Пригода К.В. .... 81  
 Пуха В.Е. .... 79  
 Пухов Д.В. .... 49

## Р

Радьков Ю.Ф. .... 21  
 Ревин Л.С. .... 18  
 Резванов А.А. .... 78, 82  
 Резник А.А. .... 82  
 Родякина Е.Е. .... 64

Руденко К.В. .... 16, 17, 80  
 Рыбакова М.Р. .... 84, 90  
 Рыжкова М.В. .... 44, 51, 54  
 Рындин Е.А. .... 96  
 Рябов В.Н. .... 40

## С

Самардак А.С. .... 20  
 Саранин А.А. .... 51, 52, 53, 55, 65  
 Селезнев В.А. .... 60  
 Ситников С.В. .... 18  
 Скворцов А.А. .... 84, 90  
 Скворцов И.В. .... 46  
 Скворцов П.А. .... 90  
 Смагина Ж.В. .... 64, 85, 99  
 Смирнов С.И. .... 29  
 Смирнова А.К. .... 49  
 Смирновский А.А. .... 89  
 Смолин Е.С. .... 116  
 Солодовченко Н.С. .... 81  
 Сотник Г.П. .... 108  
 Спесивцев Е.В. .... 39, 85  
 Спивак Ю.М. .... 93  
 Степанова М.Г. .... 86, 88  
 Степина Н.П. .... 61  
 Степихова М.В. .... 70  
 Стрижкин Д.А. .... 79  
 Субботин Е.Ю. .... 57, 59, 68, 115  
 Супрун С.П. .... 61  
 Суровцев Н.В. .... 61  
 Суханов А.Ю. .... 32  
 Сухих А.С. .... 61

## Т

Тарасов И.В. .... 40  
 Тарков М.С. .... 17  
 Тельминов О.А. .... 25  
 Терещенко А.Н. .... 97, 105  
 Терещенко О.Е. .... 61  
 Тетельбаум Д.И. .... 64, 97, 105  
 Тимофеев В.А. .... 46  
 Тихоненко Ф.В. .... 17  
 Тихонова Е.Д. .... 87, 88  
 Тумашев В.С. .... 60  
 Тупчая А.Ю. .... 52, 53, 55, 65  
 Турпак А.А. .... 73, 74  
 Тыныштыкбаев К.Б. .... 75  
 Тыщенко И.Е. .... 39, 85

## У

Утас Т.В. .... 51, 52, 53, 55, 65

## Ф

Федина Л.И. .... 99

Федоров А.М. .... 23  
 Федорова Е.С. .... 81  
 Федорова О.А. .... 89  
 Фомин Д.В. .... 104  
 Фортунова Е.А. .... 86

## Х

Халимов А. .... 34, 35  
 Халимова К.А. .... 49  
 Худаяров З.Ф. .... 90

## Ц

Цуканов Д.А. .... 44, 54, 68, 69

## Ч

Чернев И.М. .... 58, 115  
 Черненко С.С. .... 37, 50  
 Черноусов Н.Н. .... 73, 74  
 Чуешова А.Г. .... 118  
 Чукавин А.И. .... 50  
 Чуков В.Н. .... 33

## Ш

Шалеев М.В. .... 18, 64  
 Шарاپов А.А. .... 86, 88, 91  
 Шаропов У.Б. .... 34, 35  
 Шварц Н.Л. .... 38  
 Шевлягин А.В. .... 67  
 Шибанов Д.Р. .... 78  
 Шишляников А.В. .... 86  
 Шмырин Д.А. .... 18  
 Шолыгин И.О. .... 104  
 Штриплинг Л.О. .... 31

## Щ

Щеглов Д.В. .... 18  
 Щемеров И.В. .... 22, 107

## Э

Энтин М.В. .... 72

## Ю

Юнин П.А. .... 61, 70  
 Юрасов Д.В. .... 18, 64, 71

## Я

Яблонский А.Н. .... 64, 71, 99  
 Якимов Е.Б. .... 24  
 Яковлев А.А. .... 68, 69  
 Ярошевич А.С. .... 117



***XVI Конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения,  
технологии и диагностики кремния, нанометровых структур  
и приборов на его основе  
(Кремний 2026)***

г. Владивосток, 13-17 июля 2026 года

***Тезисы докладов***

Редактор: Галкин Н.Г.

Дизайн и вёрстка: Чусовитина С.В.

Отпечатано с оригинал-макета, подготовленного в  
Институте автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
минуя редподготовку в издательстве «Дальнаука»  
Подписано к печати 30.06.2026 г.

Отпечатано в ООО «Дальнаука»  
690106, г. Владивосток, пр-т Красного знамени, 10