



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматизации и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
(ИАПУ ДВО РАН)

«СОГЛАСОВАНО»

Зам. директора по научно-образовательной деятельности, ученый секретарь, к.т.н.

 С.Б. Змеу

«29» декабря 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИАПУ ДВО РАН  
член-корреспондент РАН

 Р.В. Ромашко

«29» декабря 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)**

**Специальные методы создания полупроводниковых структур**

**Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,  
научная специальность «Физика полупроводников»**

**Основная образовательная программа «Физика полупроводников»**

**Форма подготовки (очная)**

Междисциплинарная кафедра подготовки кадров высшей квалификации (МК ПКВК) ИАПУ ДВО РАН

курс 2 семестр 4  
лекции 18 час. / 0.5 з.е.  
практические занятия – 18 час. / 0.5 з.е.  
лабораторные работы – нет  
всего часов аудиторной нагрузки 36 (час.) / 1.0 з.е.  
самостоятельная работа 20 (час.) / 0.56 з.е.  
контрольные работы  
курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены.  
зачет 4 семестр  
экзамен \_\_\_\_\_ семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, условиям их реализации и срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий обучающихся, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования РФ от 20 октября 2021 № 951.

Рабочая программа обсуждена на заседании МК ПКВК ИАПУ ДВО РАН, протокол № 3 от «17» ноября 2021 г.

Заведующий кафедрой: д-р физ.- мат. наук, профессор Н.Г. Галкин

Составитель (ли): д-р физ.- мат. наук, в.н.с. лаборатории оптики и электрофизики Д.Л. Горошко.

**Оборотная сторона титульного листа РПУД**

**I. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись) (И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Специальные методы создания полупроводниковых структур» предназначена для аспирантов, обучающихся по основной образовательной программе «Физика полупроводников» и входит в число дисциплин по выбору вариативной части учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по группе научных специальностей 1.3. – «Физические науки» и научной специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» и учебный план подготовки аспирантов по научной специальности «Физика полупроводников».

**Цель** Основная цель изучения дисциплины – подготовка к сдаче кандидатского минимума по физике полупроводников.

### **Задачи:**

1. Способствовать освоению аспирантами основных разделов курса «Физика полупроводников», необходимых для дальнейшей успешной научной деятельности.
2. Формирование компетенций, соответствующих направлению подготовки по группе специальностей «Физические науки».

**Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины.**

### **Универсальные компетенции:**

- УК-1. Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях,

### **Общепрофессиональные компетенции:**

- ОПК-1. Способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области физики полупроводников с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

### **Профессиональные компетенции:**

- ПК-2. Способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и

характеристик низкоразмерных структур, в том числе различного функционального назначения

- ПК-3. Готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций

### **Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.**

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

-знать:

- основные методы создания полупроводниковых структур в сверхвысоком вакууме
- основные типы лабораторных установок (оборудования) для экспериментального исследования процессов формирования полупроводниковых структур
- основные методы исследования физических свойств полупроводниковых структур
- методы исследования функциональных характеристик полупроводниковых структур
- современное состояние науки в выбранной области физики полупроводников
- современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в области физики полупроводников.

Уметь:

- выбирать модели, необходимые для описания физических процессов, протекающих при создании полупроводниковых структур
- критически оценивать область применимости выбранных моделей для описания протекающих при создании полупроводниковых структур физических процессов
- обосновано выбирать методы формирования полупроводниковых структур с заданными параметрами
- использовать современное лабораторное оборудование для проведения эксперимента
- выбирать и применять методы исследования физических свойств полупроводниковых структур

- выбирать и применять методы исследования функциональных характеристик полупроводниковых структур
  - рационально организовывать научную работу в выбранной области физики полупроводников
  - представлять результаты научной работы
  - Готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в выбранной области физики полупроводников.
- **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов)**
    - 1. Газофазная эпитаксия (2 часа)**  
Введение, химическая кинетика, влияние температуры, легирование, автолегирование, технологическое оборудование, выбор оптимальной технологии.
    - 2. Молекулярно-лучевая эпитаксия (2 часа)**  
Введение, описание процесса, качество вакуума, система роста, подготовка подложки, легирование, кинетика легирования, легирование вторичной имплантацией, ионное легирование, сегрегация примеси, кинетика сегрегации.
    - 3. Твердофазная эпитаксия (3 часа)**  
Введение, структурное различие между аморфным и кристаллическим кремнием, способы приготовления аморфного кремния, кинетика кристаллизации, основные закономерности кристаллизации, ориентационная зависимость, влияние примесей на кинетику кристаллизации, процессы, сопутствующие эпитаксиальной кристаллизации.
    - 4. Импульсное лазерное напыление (2 часа)**  
Введение. Импульсное лазерное осаждение (ИЛО). Общие характеристики. Взаимодействие материала с лазерным излучением. Генерация плазмы. Производство макроскопических частиц. Расширение плазмы и переконденсация. Рост пленки. Фемтосекундная абляция. Реактивная импульсная лазерная абляция в скрещенных пучках. Основные особенности. Реактивные процессы рассеяния.
    - 5. Реактивная молекулярно-лучевая эпитаксия (2 часа)**  
Вакуумные методы испарения соединений: прямое испарение, реактивное, пучковое. Механизмы реактивной молекулярно-лучевой эпитаксии: где происходит реакция, конденсация металла и газовых молекул, реакции и

процессы роста при формировании оксидов, карбидов и нитридов. Процесс активированного реактивного осаждения. Реактивная МЛЭ нитридов и карбидов. МЛЭ с газовыми источниками: газовые источники для элементов V группы. Металлоорганические газовые источники

#### **6. Эпитаксия на инородных подложках (гетероэпитаксия) (3 часа)**

Введение, силициды, гетероструктура фториды/кремний, система германий/кремний, кремний на изоляторе, боковая эпитаксия.

#### **7. Методы исследования эпитаксиальных слоев (2 часа)**

Кристаллическое качество и дефекты, метод сопротивления растекания, вольт-емкостной метод, методы определения подвижности основных носителей, времени жизни неосновных носителей, параметров ловушек.

#### **8. Приборные приложения вакуумных методов эпитаксии (2 часа)**

Сравнительный анализ P-N-перехода и барьера Шоттки, униполярные двухполюсные приборы, униполярные транзисторные структуры.

### **• СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 ЧАСОВ)**

1. Выращивание монокристаллических слоев кремния методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке «Катунь». Контроль скорости роста с помощью дифракции быстрых электронов на отражение. (6 часов)
2. Выращивание пленок оксида железа методом реактивной молекулярно-лучевой эпитаксии. Определение фазового состава полученных пленок методом спектральной эллипсометрии. (6 часов)
3. Отработка химических методов очистки поверхности кремниевой подложки для вакуумных методов осаждения пленок и создания меза-структур в выращенных слоях различного типа для исследования их электрофизических характеристик. (6 часов)

### **• САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА АСПИРАНТОВ (20 ЧАСОВ)**

1. Знакомство с научными периодическими изданиями по развитию вакуумных методов выращивания полупроводниковых структур.
2. Овладение методикой работы на сверхвысоковакуумном оборудовании.
3. Подготовка отчетов по лабораторным работам

- **КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

**Вопросы к зачету:**

1. Газофазная эпитаксия: Химическая кинетика.
2. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Вольт-емкостной метод.
3. Газофазная эпитаксия: Легирование, автолегирование.
4. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Метод сопротивления растекания.
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия: Описание процесса, система роста, качество вакуума, подготовка подложки.
6. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Методы определения подвижности основных носителей.
7. Молекулярно-лучевая эпитаксия: Легирование, кинетика легирования.
8. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Методы определения времени жизни неосновных носителей.
9. Молекулярно-лучевая эпитаксия: Легирование вторичной имплантацией, ионное легирование.
10. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Методы определения параметров ловушек.
11. Молекулярно-лучевая эпитаксия: Сегрегация примеси, кинетика сегрегации.
12. Приборные приложения вакуумных методов эпитаксии: Сравнительный анализ P-N-перехода и барьера Шоттки.
13. Твердофазная эпитаксия: Структурное различие между аморфным и кристаллическим кремнием, способы приготовления аморфного кремния.
14. Приборные приложения вакуумных методов эпитаксии: Униполярные двухполюсные приборы.
15. Твердофазная эпитаксия: Кинетика кристаллизации, основные закономерности кристаллизации.
16. Приборные приложения вакуумных методов эпитаксии Транзисторные структуры.
17. Твердофазная эпитаксия: Влияние примесей на кинетику кристаллизации, процессы.
18. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Кристаллическое качество и дефекты.

19. Твердофазная эпитаксия: Процессы, сопутствующие эпитаксиальной кристаллизации.
20. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Вольт-емкостной метод.
21. Эпитаксия на инородных подложках: Система германий/кремний.
22. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Методы определения времени жизни неосновных носителей.
23. Эпитаксия на инородных подложках: Кремний на изоляторе, боковая эпитаксия.
24. Методы исследования эпитаксиальных слоев: Методы определения параметров ловушек.

## • УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### Основная литература

- В. Г. Лифшиц, С. М. Репинский. Процессы на поверхности твердых тел / В. Г. Лифшиц, С. М. Репинский; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Институт автоматизации и процессов управления ; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт физики полупроводников. Владивосток, Дальнаука, 2003 - 703с.  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:5227&theme=FEFU>
- Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман ; пер. с англ. А. Я. Шика. Москва, Мир 1989 - 240 с.  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:669615&theme=FEFU>
- Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры : пер. с англ. / под ред. Л. Ченга, К. Плога. Москва Мир 1989. 582 с.
- Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов : учебник для вузов / Л. П. Павлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва. Высшая школа 1987. - 239 с.
- Технология СБИС . в 2 кн. : кн. 1 / [К. Пирс, А. Адамс, Л. Кац и др.]; пер. с англ. В. М. Звероловлева [и др.] ; под ред. С. Зи. Москва. Мир. 1986. - 404 с.
- Технология СБИС. в 2 кн. : кн. 2 / [К. Могэб, Д. Фрейзер, У. Фичтнер и др.] ; пер. с англ. В. Н. Лейкина [и др.]; под ред. С. Зи. Москва. Мир. 1986. - 453 с.



- Громов, Д. Г. Металлизация ультрабольших интегральных схем [Электронный ресурс] : учебное пособие / Д. Г. Громов, А. И. Мочалов, А. Д. Сулимин и др. - 2-е изд. (эл.). - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 277 с. : ил. ; 60x90/16. - ISBN 978-5-9963-0915-3.
- Королёв, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс] : в 2 ч. Ч. 1 / М. А. Королёв, Т.Ю. Крупкина, М. А. Ревелева ; М. А. Королёв [и др.] ; под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. - 2-е изд. (эл.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 397 с. : ил. - ISBN 978-5-9963-0912-2 (Ч. 1), ISBN 978-5-94774-583-2. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=476068>
- Королёв, М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем [Электронный ресурс] : в 2 ч. Ч. 2 / М. А. Королёв, Т. Ю. Крупкина, М. Г. Путря и др. ; под общей ред. чл.-корр. РАН проф. Ю. А. Чаплыгина. - 2-е изд. (эл.). - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 422 с. ; 60x90/16. ISBN 978-5-9963-0913-9 (Ч. 2), ISBN 978-5-94774-583-2. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=366622>
- Коркишко, Ю. Н. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов : в 2 т. Т. 1 / под общ. ред. Ю. Н. Коркишко. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. - 392 с.: 60x90/16. - (Нанотехнологии). - ISBN 978-5-9963-0335-9 (Т. 1), 978-5-9963-0341-0. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=366702>
- Коркишко, Ю. Н. Введение в процессы интегральных микро- и нанотехнологий [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов : в 2 т. Т. 2 / под общ. ред. Ю. Н. Коркишко. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 252 с.: ил. - 60x90/16. - (Нанотехнологии). - ISBN 978-5-9963-0336-6 (Т.2), ISBN 978-5-9963-0341-0. <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=366692>
- Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 195 с. <http://window.edu.ru/resource/740/63740>
- Дубровский В.Г. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур: Учебное пособие. - СПб.: СПбГПУ, 2006. - 347 с. <http://window.edu.ru/resource/346/63346>

### Дополнительная литература

- Борисенко, В. Е. Нанoeлектроника: теория и практика [Электронный ресурс]: учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина.—3-е изд. (эл.).— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 366 с. <http://znanium.com/bookread.php?book=485670>
- Дубровский, В. Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур / В. Г. Дубровский. — М.: Физматлит., 2009. — 350 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:290022&theme=FEFU>
- Ионная имплантация и лучевая технология / [Дж.С Вильямс, Д.М Поут, Д.Ф Гиббонс], пер. с англ. А.М Евстигнеев; под ред. О.В. Снитко. Киев. Наукова думка, 1988. — 357с.
- Физика полупроводниковых приборов . в 2 кн. : кн. 1 / С. Зи ; под ред. Р. А. Сурица ; пер. с англ. : В. А. Геркеля, В. В. Ракитина. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва. Мир. 1984. - 455 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:413169&theme=FEFU>
- Физика полупроводниковых приборов . в 2 кн. : кн. 2 / С. Зи ; под ред. Р. А. Сурица ; пер. с англ. : В. А. Гергеля, Н. В. Зыкова, Б. И. Фукса [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва. Мир 1984. 455 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:413171&theme=FEFU>
- Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Введение в лазерные технологии. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 143 с.
- Pulsed Laser Deposition of Thin Films / (ed. by Eason R). New York: Wiley-Interscience. 2007. - 682 pages.
- Бобыль А.В., Карманенко С.Ф. Физико-химические основы технологии полупроводников. Пучковые и плазменные процессы в планарной технологии: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. - 113 с. <http://window.edu.ru/resource/345/63345>
- Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 195 с. <http://window.edu.ru/resource/740/63740>
- Статьи из базы данных отдела физики поверхности ИАПУ ДВО РАН (3000 статей по различным направлениям) физики поверхности кремния. <http://silicon.dvo.ru/>