



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»**

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

 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)**

**Методы in situ диагностики низкоразмерных структур**

Группа научных специальностей 1.3. – «Физические науки»,  
научная специальность 1.3.11 «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 – нет  
лабораторные работы – 18 час. / 0.5 з.е.  
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): член-корр. РАН, профессор, зам. директора по НР Саранин А.А.

**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 «Методы *in situ* диагностики низкоразмерных 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 «Методы *in situ* диагностики низкоразмерных структур», необходимых для дальнейшей успешной научной деятельности.
2. Формирование компетенций, соответствующих направлению подготовки по группе специальностей «Физические науки».

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

### **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:

- современное состояние науки в области физики низкоразмерных структур
- существующие современные методы исследования поверхности твердого тела
- основные методы математического описания физических процессов, протекающих в низкоразмерных структурах,
- современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в сфере физики низкоразмерных структур.

Уметь:

- выбирать математические методы необходимые для описания физических процессов, протекающих на поверхности твердого тела,
- критически оценивать область применимости выбранных математических методов для описания протекающих на поверхности,
- обосновано выбирать методы экспериментального исследования поверхности низкоразмерных структур,
- использовать современное лабораторное оборудование для проведения эксперимента,
- выбирать и применять методы исследования физических свойств низкоразмерных структур,
- выбирать и применять методы исследования функциональных характеристик низкоразмерных структур,
- рационально организовывать научную работу в выбранной области физики поверхности,
- представлять результаты научной работы.
- Готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в выбранной области физики низкоразмерных структур.

- **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов часа)**

### **1. Вводная лекция (1 час).**

Проблемы анализа локального состава, структуры и физико-химических свойств поверхности. Современные методы исследования поверхности твердого тела и их классификация. Историческое развитие методов и обзор их возможностей. Ограничения, характерные для каждого метода. Анализ некоторых важных приложений.

### **2. Электронная оже-спектроскопия (ЭОС) (2 часа).**

Физические основы метода. Оже-переходы, энергия оже-электронов в твердом теле. Электронные спектрометры. Блок-схема спектрометра. Химические сдвиги в оже-спектрах твердого тела и форма пиков. ЭОС как метод анализа состава поверхности. Количественная оже-спектроскопия. Применение ЭОС для послойного анализа.

### **3. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) (3 часа).**

Процесс фотоэлектронной эмиссии. Источники фотонов. Электронная эмиссия, возбуждаемая рентгеновским излучением. РФЭС-спектрометры. Спектры фотоэмиссии основных уровней атома. Энергии связи валентных электронов и электронов внутренних оболочек по данным РФЭС. РФЭС - как спектроскопия для анализа состава поверхности. Сопоставление методов исследования поверхности ЭОС и РФЭС.

### **4. Спектроскопия ХПЭ (2 часа).**

Физические основы метода спектроскопии ХПЭ. Коллективное возбуждение электронов проводимости в твердом теле. Плазмоны. Неупругое рассеяние фононов. Спектры ХПЭ поверхности кремния и поверхностных фаз. Спектроскопия ХПЭ для анализа поверхности.

### **5. Дифракция медленных электронов (ДМЭ) (2 часа).**

Кристаллография поверхности твердого тела. Обратная решетка и дифракция электронов в кристаллах. Построение Эвальда. Домены и ступени. Описание структур верхних слоев кристаллических структур. Схема установки для измерения дифракции медленных электронов. Определение структуры поверхности методами ДМЭ.

**6. Дифракция отражения быстрых электронов (ДОБЭ) (2 часа).**

Физические основы метода. Схема экспериментальной установки для ДОБЭ. Построение сферы Эвальда при ДОБЭ. Применение метода для изучения эпитаксиального роста и других процессов на многослойных поверхностях. Сопоставление ДОБЭ и ДМЭ.

**7. Ультрафиолетовая фотоэмиссионная спектроскопия (УФЭС) (2 часа).**

Основы метода. Основные сведения о процессе фотоэмиссии. Изучение зонной структуры методом УФЭС. УФЭС как метод исследования электронной структуры твердых тел.

**8. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) (4 часа).**

Физические основы метода. Концепция сканирования. СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRON MULTIPROBE. Описание графического интерфейса Solaris (OpenWindows) и системы контроля сканирования Omicron SCALA. Получение данных (СТМ-картин) на базе СТМ. Применение метода СТМ для анализа структуры поверхности твердого тела и поверхностных фаз.

**• СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА (18 часов)**

1. Анализ состава поверхности при формировании поверхностных фаз In на Si(111) методом ЭОС. СВВ установка отечественного производства "Чайка-1" и фирмы RIBER LAS-600 (4 часа).
2. Получение и анализ спектров ХПЭ поверхности кремния и поверхностных фаз. СВВ установка отечественного производства "Чайка-1", фирмы RIBER (DEL-300 и LAS -600) - (3 часа).
3. Определение структуры поверхности методами ДМЭ. СВВ установки фирмы RIBER (DEL-300 и LAS-600) - (4 часа).
4. Применение метода ДОБЭ для изучения эпитаксиального роста кремния. СВВ установка отечественного производства КАТУНЬ - (3 часа).
5. Получение данных (СТМ-картин) при формировании поверхностных фаз на Si(111). СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRON MULTIPROBE - (4 часов).

- **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА АСПИРАНТОВ (20 ЧАСОВ)**

1. Знакомство с мировой периодической литературой по материалам лекций.
2. Знакомство с учебными пособиями по курсу.
3. Подготовка отчетов по лабораторным работам.

- **КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

**Вопросы к дифференцированному зачету:**

1. Современные методы исследования поверхности твердого тела и их классификация.
2. Неупругое рассеяние электронов на поверхности. Физические основы ЭОС.
3. Оже-переходы, энергия оже-электронов в твердом теле.
4. Анализ состава поверхности твердого тела методом ЭОС.
5. Оже-спектры для количественного анализа поверхности твердого тела.
6. Типы оже-анализаторов. Блок-схема оже-спектрометра.
7. Послойный анализ с применением метода ЭОС.
8. Фотоэлектронная эмиссия. Источники фотонов.
9. Спектры РФЭС для анализа состава поверхности.
10. Изучение наружной энергетической полосы проводников методом РФЭС.
11. Спектры фотоэмиссии остовных уровней атома по данным РФЭС.
12. Энергии связи валентных электронов и электронов внутренних оболочек по данным ФЭС.
13. РФЭС - как спектроскопия для анализа состава поверхности.
14. Физические основы метода спектроскопии ХПЭ.
15. Коллективное возбуждение электронов проводимости в твердом теле. Плазмоны.
16. Спектроскопия ХПЭ для анализа поверхности.
17. Кристаллография поверхности твердого тела.
18. Обратная решетка и дифракция электронов в кристаллах. Построение Эвальда.
19. Описание структур верхних слоев кристаллических структур.
20. Схема установки для измерения дифракции медленных электронов.
21. Определение структуры поверхности методами ДМЭ.

22. Физические основы метода ДОБЭ.
23. Схема экспериментальной установки для ДОБЭ.
24. Построение сферы Эвальда при ДОБЭ.
25. Применение метода ДОБЭ для изучения эпитаксиального роста полупроводников и других процессов на многослойных поверхностях.
26. Основные сведения о процессе фотоэмиссии.
27. Изучение зонной структуры методом УФЭС.
28. УФЭС как метод исследования электронной структуры твердых тел.
29. Физические основы метода СТМ. Концепция сканирования.
30. СВВ установка для сканирующей туннельной микроскопии OMICRON MULTIPROBE
31. Описание графического интерфейса Solaris (OpenWindows) и системы контроля сканирования Omicron SCALA.
32. Применение метода СТМ для анализа структуры поверхности твердого тела и поверхностных фаз.

• **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Основная литература**

1. Введение в физику поверхности/ К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.в. Зотов, М. Катаяма. М.: Наука, 2006, 490 с.
2. Николичев Д.Е., Боряков А.В. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии": Учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2011. - 110 с. <http://window.edu.ru/resource/857/77857>
3. Смирнов, В.И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур: учебное пособие / В.И. Смирнов. - Ульяновск: УлГТУ, 2012. - 75 с. <http://window.edu.ru/resource/280/77280>
4. Серба П.В., Мирошниченко С.П. Учебное пособие по курсу "Кристаллография". Контроль параметров микроструктуры материалов методами дифракционного анализа. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. - 40 с. <http://window.edu.ru/resource/950/73950>
5. Дорохин М.В., Кудрин А.В. Гальваномагнитные и оптические методы



исследования полупроводниковых наноструктур. Электронное учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. - 80 с. <http://window.edu.ru/resource/285/79285>

6. Михайлин В.В. Синхротронное излучение в спектроскопии: Учебное пособие / МГУ им. М.В. Ломоносова; Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. - М., 2007. - 161 с. <http://window.edu.ru/resource/708/74708>

### Дополнительная литература

1. Бахтизин Р.З. Сканирующая туннельная микроскопия - новый метод изучения поверхности твердых тел // Соросовский образовательный журнал, 2000, №11, с. 83-89. <http://window.edu.ru/resource/150/21150>
2. Metallic Adsorbates on Semiconductor Surfaces in "Physics of Covered Solid Surfaces, Lifshits V.G., Oura K., Saranin A.A., Zotov A.V. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2001, V., N, P.259-419.
3. Миндолин С.Ф. Определение типа и периода кристаллической решётки вещества методом дифракции электронов: Методические указания к лабораторной работе. - Белгород, БГТУ им. В. Г. Шухова. - 4 с. <http://window.edu.ru/resource/784/29784>
4. Ищенко А.А., Гиричев Г.В., Тарасов Ю.И. Дифракция электронов [Электронный ресурс]: структура и динамика свободных молекул и конденсированного состояния вещества/— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.— 616 с. <http://www.iprbookshop.ru/24441>
5. Самойлов А.М. Современные методы исследования и описания кристаллических структур: Методические указания. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1999. - 32 с. <http://window.edu.ru/resource/200/27200>
6. Никитенков Н.Н. Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики [Электронный ресурс]: учебное пособие— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский политехнический университет, 2013.— 203 с. <http://www.iprbookshop.ru/34691>
7. Введение в мессбауэровскую спектроскопию конверсионных электронов: Учебно-методическое пособие для студентов Института физики / Н.Г. Ивойлов, Е.Н. Дулов. - Казань: Издательство Казанского федерального университета, 2012. - 45 с. <http://window.edu.ru/resource/327/78327>
8. Павлова Е.Д., Волкова Н.С., Горшков А.П., Марычев М.О. Исследование квантово-размерных гетероструктур In(Ga)As/GaAs методами фотоэлектрической

спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Электронное учебно-методическое пособие. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. - 42 с. <http://window.edu.ru/resource/399/79399>

9. Surface Science. An Introduction. K. Oura, V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, M. Katayama, Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2003, 440 p.
10. "Surface Phases on Silicon" V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov, 1994, Wiley, p. 460.
11. Учебное пособие по физике поверхности. В.Г. Лифшиц, ДВГУ, 1999г., 140 стр.
12. Введение в химическую физику поверхности твердых тел. С.М. Репинский, Новосибирск, "Наука", 1993, 216 стр.
13. Шишкин Г.Г., Агеев И.М. Нанoeлектроника. Элементы, приборы, устройства [Электронный ресурс]: учебное пособие— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.— 413 с. <http://www.iprbookshop.ru/6462>.

#### МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Основы физики поверхности полупроводников. Учебное пособие. Лифшиц В.Г. Изд. ДВГУ, ИАПУ ДВО РАН, 1999, 158 стр.
2. Процессы на поверхности твердых тел. Лифшиц В.Г., Репинский С.М., Владивосток, «Дальнаука», 2003, 700 с.
3. Введение в сканирующую туннельную микроскопию А. В. Зотов, А.А. Саранин. – Владивосток: ИАПУ, ДВГУ, ВГУЭС, 2002, 62 с.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Сверхвысоковакуумные установки для роста гетерoэпитаксиальных структур, сверхрешеток с квантовыми проволоками и квантовыми точками (фирм RIBER (DEL-300 – 1 шт., LAS-600 - 2 шт., OMICRON – 2 шт., VARIAN – 1 шт., КАТУНЬ – 1 шт., отечественного производства – 4 шт.)).