



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт автоматизации и процессов управления

Дальневосточного отделения Российской академии наук»

(ИАПУ ДВО РАН)

**«СОГЛАСОВАНО»**

Руководитель направления  
подготовки аспирантов 03.06.01  
«Физика и астрономия», д.ф.-м.н.

Н.Г. Галкин

«14» августа 2014 г.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Заместитель директора по научно-  
образовательной и инновационной  
деятельности, д.ф.-м.н.

Н.Г. Галкин

«14» августа 2014 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)**

**Физика поверхности атомно-молекулярных структур**

Направление подготовки 03.06.01 – «Физика и астрономия»,  
профиль «Физика полупроводников»

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 з.е.

самостоятельная работа 27 (час.) / 0.75 з.е.

контрольные работы не предусмотрены

курсовая работа / курсовой проект не предусмотрены.

зачет 4 семестр

экзамен \_\_\_\_\_ семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 867.

Рабочая программа обсуждена на заседании МК ПКВК, протокол № 1 от «14» августа 2014 г.

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

Составитель (ли): д-р физ.- мат. наук, профессор, зав. лаб. А.В. Зотов

**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 «Физика поверхности атомно-молекулярных структур» предназначена для аспирантов, обучающихся по образовательной программе «Физика полупроводников» и входит в вариативную часть учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 03.06.01 – «Физика и астрономия», учебный план подготовки аспирантов по профилю «Физика полупроводников»

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

### **Задачи:**

1. Способствовать освоению аспирантами основных разделов курса «Физика поверхности атомно-молекулярных структур», необходимых для дальнейшей успешной научной деятельности.
2. Формирование компетенций, соответствующих профилю подготовки «Физика полупроводников»

**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-1. Способность строить новейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств наноэлектроники различного функционального

назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования

- 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 положения физики атомно-молекулярных структур
- основные определения и иметь представление об атомной структуре чистых поверхностей элементарных полупроводников, а также поверхностей с адсорбатами
- физические принципы и возможности основных методов исследования атомно-молекулярных структур
- основные методы математического описания физических процессов, протекающих в атомно-молекулярных структурах
- современные способы использования информационно-коммуникационных технологий в сфере физики атомно-молекулярных структур.

Уметь:

- критически оценивать область применимости выбранных математических методов для описания протекающих в атомно-молекулярных структурах,
- выбирать математические методы необходимые для описания физических процессов, протекающих в атомно-молекулярных структурах,
- анализировать первичные данные дифракции и электронной спектроскопии с целью получения информации о структуре и составе поверхности
- обосновано выбирать методы экспериментального исследования атомно-молекулярных структур,
- использовать современное лабораторное оборудование для проведения эксперимента,

- выбирать и применять методы исследования физических свойств атомно-молекулярных структур,
  - выбирать и применять методы исследования функциональных характеристик низкоразмерных структур,
  - рационально организовывать научную работу в выбранной области физики атомно-молекулярных структур,
  - представлять результаты научной работы.
  - Готовить заявки на получение научных грантов и заключения контрактов по НИР в выбранной области физики атомно-молекулярных структур.
- **СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА (18 часов часа)**
    - 1. Основы двумерной кристаллографии (2 часа).**  
Решетка, базис и кристаллическая структура поверхности, двумерные решетки Браве, индексы Миллера плоскостей кристалла, низкоиндексные и высокоиндексные плоскости, индексы направлений, запись для описания структуры поверхности (запись Вуд и матричная запись), двумерная обратная решетка.
    - 2. Методы анализа поверхности кристаллов (2 часа).**  
Дифракция медленных электронов (ДМЭ), построение Эвальда для ДМЭ, аппаратура ДМЭ, интерпретация картины ДМЭ, электронная оже-спектроскопия (ЭОС), физические принципы и аппаратура ЭОС, основы оже-анализа, Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ), физические принципы и аппаратура СТМ, основные режимы работы СТМ.
    - 3. Атомная структура чистых поверхностей полупроводников (2 часа)**  
Релаксация и реконструкция, типы реконструкций, структура поверхности элементарных полупроводников: Si(100), Ge(100), Si(111), Ge(111), способы получения атомарно-чистых поверхностей полупроводников.
    - 4. Структура поверхностей с адсорбатами (2 часа).**  
Физосорбция и хемосорбция, поверхностные фазы, состав поверхностных фаз, покрытие адсорбата, покрытие атомов подложки, экспериментальные методы определения состава, фазовая диаграмма, типы фазовых переходов, типичные примеры поверхностных фаз адсорбатов на кремнии.
    - 5. Структурные дефекты поверхности (2 часа).**

Общее рассмотрение, точечные дефекты, ступени, сингулярные и вицинальные поверхности, фасетки, адатомы, вакансии, дефекты замещения, дислокации, доменные границы.

#### **6. Элементарные процессы на поверхности (3 часа).**

Адсорбция, кинетика адсорбции, зависимость от покрытия, температуры, угла падения и кинетической энергии атомов адсорбата, термическая десорбция, кинетика десорбции, десорбционная спектроскопия, нетермическая десорбция, поверхностная диффузия, основные уравнения, атомные механизмы поверхностной диффузии (прыжковый механизм, механизм атомного обмена, механизм туннелирования, вакансионный механизм), поверхностная диффузия кластеров, поверхностная диффузия и формирование фаз, экспериментальные методы изучения поверхностной диффузии.

#### **7. Механизмы роста тонких пленок (3 часа).**

Основные механизмы роста тонких пленок, механизм Франка – ван дер Мерве, механизм Вольмера – Вебера, механизм Странского – Крастанова, зарождение и рост островков, кинетические эффекты в гомоэпитаксии, эффекты механических напряжений в гетероэпитаксии, сверхвысоковакуумные методы роста тонких пленок, молекулярно-лучевая эпитаксия, твердофазная эпитаксия, химическая лучевая эпитаксия, рост пленок в присутствии сурфактантов.

#### **8. Атомные манипуляции и рост наноструктур (2 часа).**

Объекты нанометрового масштаба и пониженной размерности, атомные манипуляции с помощью СТМ (перемещение атомов вдоль поверхности, удаление атомов, осаждение атомов), формирование наноструктур с использованием механизмов самоорганизации, фуллерены, углеродные нанотрубки, графен.

#### **• СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ (18 часов)**

1. Определение кристаллической решетки поверхности из данных дифракции медленных электронов (5 часа).
2. Построение Эвальда для рассеяния электронов низких энергий на поверхности с реконструкцией (4 часа).
3. Определение химического состава поверхности из данных электронной оже-спектроскопии (4 часа).

4. Анализ СТМ-изображений с целью определения состава поверхностных фаз, в том числе концентрации атомов подложки, встроенных в поверхностную фазу - (5 часов).

- **САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА АСПИРАНТОВ (27 ЧАСОВ)**

1. Знакомство с научными периодическими изданиями по физике поверхности полупроводников и физики наноструктур.
2. Овладение методикой работы на сверхвысоковакуумном оборудовании.
3. Решение задач на построение прямой и обратной решетки для различных суперструктур на поверхности.
4. Подготовка отчетов по лабораторным работам.

- **КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

**Вопросы к экзамену:**

1. Кристаллическая решетка, базис, структура, элементарная и примитивные ячейки, ячейка Вигнера-Зейтца.
2. Двумерные решетки Браве.
3. Индексы Миллера плоскостей кристаллов: определение, примеры низкоиндексных и высокоиндексных плоскостей.
4. Запись для описания структуры поверхности: матричная запись и запись Вуд.
5. Двумерная обратная решетка.
6. Дифракция медленных электронов: физические принципы и аппаратура.
7. Построение Эвальда для дифракции медленных электронов.
8. Интерпретация картин дифракции медленных электронов.
9. Электронная спектроскопия для анализа химического состава поверхности.
10. Сканирующая туннельная микроскопия.
11. Атомно-силовая микроскопия.
12. Атомная структура чистых поверхностей: релаксация и реконструкция.
13. Структура атомарно-чистой поверхности Si(111).
14. Структура атомарно-чистых поверхностей Si(100) и Ge(100).
15. Поверхности с адсорбатами: физическая и химическая адсорбция.
16. Поверхностные фазы в субмонослойных системах адсорбат/подложка.



17. Состав поверхностных фаз: покрытие адсорбата, покрытие атомов подложки, экспериментальные методы определения состава.
18. Фазовые диаграммы.
19. Типы фазовых переходов в субмонослойных системах адсорбатов.
20. Структурные дефекты поверхности: типы дефектов, реальные примеры (адатомы, вакансии, дефекты замещения, дислокации, доменные границы, ступени).
21. Процессы адсорбции и десорбции на поверхности.
22. Поверхностная диффузия: основные атомные механизмы, экспериментальные методы изучения диффузии.
23. Основные механизмы роста тонких пленок.
24. Кинетические эффекты в гомоэпитаксии.
25. Методы роста тонких пленок в вакууме.
26. Атомные манипуляции на поверхности с помощью сканирующего туннельного микроскопа.
27. Рост наноструктур на поверхности с использованием механизмов самоорганизации.

- **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. Основы физики поверхности полупроводников. Учебное пособие. Лифшиц В.Г. Изд. ДВГУ, ИАПУ ДВО РАН, 1999, 158 стр.
3. Мамонова М.В. Прудников В.В., Прудникова И. А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы [Электронный ресурс]— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.— 400 с. <http://www.iprbookshop.ru/24606>.
4. 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>
5. Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.—



241 с.— <http://www.iprbookshop.ru/4585>

6. 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>

#### **Дополнительная литература**

1. Surfaces and Interfaces of Solid Materials/ Н. Lueth. Berlin.: Springer-Verlag, 1995, 495 P..
2. Surface Science – An Introduction/ J.B. Hudson. NY.: John Wiley & Sons, Inc. 1998, 321 P.
3. 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>
4. Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз/ В.Г. Лифшиц, Ю.В. Луняков. Владивосток.: Дальнаука. 2004, 314 с.
5. 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>

#### **ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Сверхвысоковакуумные установки для роста гетероэпитаксиальных 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.)).