

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

  
«13» 04 2022 г.



Рабочая программа дисциплины

**ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ**

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.5 Физическая электроника

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.



Рабочая программа дисциплины «Физика поверхности» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.5 Физическая электроника (далее-программа аспирантуры)

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями учебной дисциплины являются:

- создание у аспирантов комплекса знаний о фундаментальных свойствах поверхности твердого тела, экспериментальных методах их исследования и специфике физико-химических процессов, протекающих на поверхности конденсированного вещества;
- формирование представлений об особенностях атомного строения, электронной структуры и магнитных свойств поверхности кристаллов, об основных элементарных процессах, определяющих механизм роста тонких пленок и лежащих в основе методов создания структур нанометрового масштаба;
- ознакомление аспирантов с последними достижениями физики поверхности и перспективами их применения в физической электронике, микро- и нанoeлектронике.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАТУРЫ**

Дисциплина «Физика поверхности» входит в обязательную часть образовательного компонента программы аспирантуры и направлена на подготовку к сдаче кандидатского экзамена. При ее изучении используются знания и навыки, полученные аспирантами при изучении курсов общей и теоретической физики и предшествующих курсов специальных дисциплин по специализации «Физическая электроника». Методической основой изучения дисциплины являются курсы физики твердого тела, статистической физики и термодинамики.

Актуальность изучения дисциплины определяется важной ролью физики поверхности в современной науке и технике, необходимостью комплекса знаний и умений, приобретаемых в ходе изучения курса, для практических применений. Тематика курса соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации: «Индустрия наносистем и материалов», «Информационно-телекоммуникационные системы».

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Физика поверхности» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с программой аспирантуры:

#### **3.1. Универсальные компетенции:**

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

#### **3.2. Общепрофессиональные компетенции:**

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

#### **3.3. Профессиональные компетенции:**

- способность формулировать задачи экспериментальных исследований, планировать и реализовывать постановку экспериментов, направленных на решение поставленных задач (ПК-1);

- способность анализировать и систематизировать научно-техническую информацию о новых разработках систем автоматизации физического эксперимента (ПК-2).

- способность организовывать разработку систем автоматизации физического эксперимента (ПК-3),

- способность к компьютерному моделированию (ПК-4).

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут

#### **знать:**

- основные методы очистки и анализа поверхности, роста тонких пленок на поверхности конденсированного вещества;

- основы двумерной кристаллографии, дифракции электронов и рентгеновских лучей, электронной спектроскопии и микроскопии, рассеяния ионов и масс-спектрометрии;

- свойства релаксированных и реконструированных поверхностей металлов и полупроводников, особенности атомной структуры поверхностей с адсорбатами, специфику дефектов поверхности, электронные свойства наиболее характерных поверхностей металлов и полупроводников;

- основные явления и эффекты, наблюдающиеся на поверхности твердого тела, их теоретическое описание и области практического применения;

**уметь:**

определять основные характеристики поверхности кристаллов (в том числе ее структуру и ее элементный состав) на основе анализа картин дифракции медленных электронов, а также спектров оже- и фотоэлектронов;

- феноменологически описывать процессы адсорбции, десорбции, поверхностной диффузии, механизмы зарождения островков и роста тонких пленок;

**владеть опытом:**

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики поверхности;

- экспериментальных исследований свойств поверхности твердых тел на современном инновационном оборудовании.

**4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ****4.1. Разделы дисциплины и виды занятий**

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану 72 часа, 2 ЗЕ.

**4.2. Разделы дисциплины и виды занятий**

Наименование разделов и тем	Грудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			лекции	Лаб. / практ	самостоятельная работа	контроль
1	2	3	4	5	6	7
<b>Раздел 1. Поверхность твердого тела</b>						
Тема 1.1 Специфика поверхности и методы получения атомно-чистых поверхностей		8	4		4	
Тема 1.2. Методы анализа элементного и химического состава поверхности		12	4		8	
Тема 1.3. Атомная структура поверхности кристаллов		11	4		7	
Тема 1.4. Электронное строение и магнитные свойства поверхности		11	4		7	
<b>Всего по разделу</b>	<b>1</b>	<b>42</b>	<b>16</b>		<b>26</b>	
<b>Раздел 2. Атомные процессы на поверхности</b>						
Тема 2.1. Адсорбция, десорбция, поверхностная диффузия		9	3		6	
Тема 2.2. Зародышеобразование и механизмы роста тонких пленок		12	4		8	

Тема 2.3. Атомные манипуляции и формирование наноструктур		9	3		6	
<b>Всего по разделу</b>	<b>1</b>	<b>30</b>	<b>10</b>		<b>20</b>	
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>26</b>		<b>46</b>	Зачет

#### *4.3. Содержание разделов и тем*

### **Раздел 1. Поверхность твердого тела**

#### **Тема 1.1. Специфика поверхности и методы получения атомно-чистых поверхностей.**

Поверхность и объем твердого тела (Задача курса, история развития физики поверхности, специфика физико-химических свойств поверхности, ее основные характеристики, явления на границе раздела фаз). Техника сверхвысокого вакуума, методы приготовления атомно-чистой поверхности (Необходимость проведения исследований в сверхвысоком вакууме, основные понятия вакуумной техники, современное сверхвысоковакуумное оборудование и материалы, методы очистки поверхности, источники напыления, кварцевые измерители толщины пленок).

#### **Тема 1.2. Методы анализа элементного и химического состава поверхности.**

Спектр вторичных электронов, анализаторы энергии электронов (Явление вторичной электронной эмиссии, угловое и энергетическое распределение электронов, принцип действия и основные типы энергоанализаторов электронов, устройство и основные параметры серийно выпускаемых спектрометров). Электронная оже-спектроскопия и спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (Физические принципы, чувствительность метода к поверхности, экспериментальное оборудование, количественный элементный анализ поверхности методом электронной оже-спектроскопии, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов с высоким энергетическим разрешением, примеры практических приложений). Фотоэлектронная спектроскопия (Фотоэлектронический эффект, энергии связи электронов в различных оболочках атомов, сдвиги энергии связи в зависимости от химического окружения атома, количественный анализ поверхности методом рентгено-электронной спектроскопии, сопоставление возможностей различных методов электронной спектроскопии). Зондирование поверхности ионами, послойный анализ поверхности (Взаимодействие ионов с поверхностью твердого тела, спектроскопия рассеяния медленных ионов и Резерфордского обратного рассеяния, ионное распыление, вторично-ионная масс-спектрометрия).

### **Тема 1.3. Атомная структура поверхности кристаллов.**

Основы двумерной кристаллографии (Двумерные решетки, индексы Миллера плоскостей и направлений кристалла, способы описания структуры поверхности, двумерная обратная решетка и зона Бриллюэна). Дифракция медленных электронов (Построение Эвальда для дифракции медленных электронов, интерпретация дифракционных картин, аппаратура и методика структурного анализа поверхности, основы динамической теории дифракции электронов). Дифракция быстрых электронов (ДБЭ) и рентгеновская дифракция под скользящими углами (РДСУ) (Экспериментальное оборудование ДБЭ и РДСУ, анализ дифракционных картин в кинематическом приближении, дифракция оже-электронов, фотоэлектронов и неупруго рассеянных электронов средней энергии). Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопии (Полевая эмиссионная и ионная микроскопии, принцип действия и устройство сканирующего туннельного микроскопа, режимы постоянного тока и постоянной высоты, сканирующая туннельная спектроскопия, атомно-силовая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия). Релаксация и реконструкция поверхности металлов и полупроводников (Основные типы релаксации и реконструкции поверхности, релаксированные поверхности металлов, реконструированные поверхности металлов, структура поверхностей Si(100)2x1, Si(111)7x7, основных граней германия и полупроводников типа АЗВ5). Атомная структура поверхностей с адсорбатами (Поверхностные фазы в субмонослойных системах адсорбат-подложка, фазовые диаграммы и структурные фазовые переходы, семейства структур  $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$  на поверхности (111) металлов и простых полупроводников). Структурные дефекты и динамика поверхности (Адаптомы, вакансии, дефекты замещения, дислокации, доменные границы, ступени, фасетирование, тепловые колебания поверхностных атомов, поверхностное плавление).

### **Тема 1.4. Электронное строение и магнитные свойства поверхности**

Поверхностные состояния, работа выхода (Поверхностные состояния и условия их появления, состояния Шокли и Тамма, основы теории функционала плотности, модель желе, осцилляции Фриделя, методы измерения работы выхода, работа выхода разных граней металлов и полупроводников, изменение работы выхода при адсорбции). Электронное строение реконструированных поверхностей металлов и полупроводников, поверхностная проводимость (Примеры исследования электронной структуры типичных поверхностей: Cu(111), Si(100)2x1, Si(111)7x7 и Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -In; методы измерения поверхностной проводимости, влияние структуры и морфологии поверхности на ее проводимость). Методы анализа поверхности, основанные на использовании синхротронного излучения (Источники синхротронного излучения, фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением и анализом спиновой поляризации электронов, анализ ближней и протяженной структуры спек-

тров поглощения рентгеновского излучения, магнитный циркулярный и линейный дихроизм поглощения рентгеновских лучей, магнитный линейный дихроизм в фотоэмиссии остовных электронов). Квантово-размерные эффекты в тонких пленках и кластерах, магнитные свойства квазидвумерных и слоистых систем (Различные типы низкоразмерных структур, понятие о размерности системы, влияние типа локализации электронов на плотность состояний, спектры квантовых состояний в пленках простых *sp*-металлов, зависимость спектров от электронной и кристаллической структуры подложки и формируемой пленки, кластеры как нуль-мерные системы, магнитные свойства слоистых систем, эффекты осциллирующего обменного взаимодействия и гигантского магнитного резонанса сопротивления, взаимосвязь эффектов магнитного взаимодействия между слоями и квантово-размерными эффектами, особенности магнитных свойств сверхтонких пленок металлов).

## **Раздел 2. Атомные процессы на поверхности**

### **Тема 2.1. Адсорбция, десорбция, поверхностная диффузия**

Физосорбция и хемосорбция, кинетика адсорбции, адсорбция Лэнгмюра, прекурсорная адсорбция, термическая десорбция, десорбционная спектроскопия, изотермы адсорбции, двумерная конденсация, электронно-стимулированная десорбция, случайное блуждание адатомов, законы Фика, анизотропия поверхностной диффузии, атомные механизмы диффузии, миграция кластеров, поверхностная диффузия и формирование фаз.

### **Тема 2.2. Зародышеобразование и механизмы роста тонких пленок**

Размер критического островка, зависимость поверхностной концентрации островков от покрытия, разветвленные и компактные островки, модель агрегации при ограниченной диффузии, равновесная форма двумерных островков, распределение островков по размеру, магические островки, коалесценция островков, «дозревание» Смолуховского и «дозревание» Оствальда, островки вакансий, послойный и островковый механизмы роста пленок, рост пленок по механизму Странского-Крастанова. Гомо- и гетероэпитаксия, молекулярно-лучевая эпитаксия, твердофазная эпитаксия, химическое осаждение из пара, химическая лучевая эпитаксия, кинетические эффекты при гомоэпитаксии, внутрислойный и межслойный массоперенос, Барьер Эрлиха-Швобеля и его влияние на механизм роста пленки, эффекты механических напряжений при гетероэпитаксии, напряженный псевдоморфный рост эпитаксиальных слоев, релаксированный дислокационный рост.

### **Тема 2.3. Атомные манипуляции и формирование наноструктур на поверхности твердого тела**

Метод атомной сборки, перемещение атомов вдоль поверхности, удаление атомов, осаждение атомов, методы самоорганизации низкоразмерных систем, использование вици-

нальных поверхностей с периодически расположенными ступенями и фасетками, метод химической селективной адсорбции, использование напряженных структур и дислокаций.

## **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Технология процесса обучения по дисциплине «Физика поверхности» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- самостоятельная работа студентов;
- контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;

В учебном процессе используются как активные, так и интерактивные формы проведения занятий: дискуссия, метод поиска быстрых решений в группе, мозговой штурм.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физика поверхности» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.



### *Комплект оценочных средств для текущего контроля*

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов реализуется в виде выступлений на семинарах по индивидуальным домашним заданиям, проведением теоретических зачетов.

***Перечень контрольных вопросов, позволяющих оценить качество усвоения учебного материала:***

1. Основные понятия вакуумной техники, получение сверхвысокого вакуума.
2. Методы очистки поверхности кристаллов.
3. Анализаторы энергии электронов.
4. Электронная оже-спектроскопия.
5. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов.
6. Фотоэлектронная спектроскопия.
7. Спектроскопия рассеяния медленных ионов.
8. Ионное распыление, вторично-ионная масс-спектрометрия.
9. Двумерные решетки, двумерная обратная решетка и зона Бриллюэна.
10. Построение Эвальда для дифракции медленных электронов (ДМЭ).
11. Структурный анализ поверхности методом ДМЭ.
12. Основы динамической теории дифракции электронов.
13. Дифракция быстрых электронов.
14. Дифракция оже-электронов и фотоэлектронов.
15. Полевая эмиссионная и ионная микроскопии.
16. Сканирующая туннельная микроскопия.
17. Атомно-силовая микроскопия.
18. Релаксация и реконструкция поверхности металлов.
19. Атомная структура поверхностей  $\text{Si}(100)2 \times 1$  и  $\text{Si}(111)7 \times 7$ .
20. Поверхностные фазы в субмонослойных системах адсорбат-подложка.
21. Фазовые диаграммы и структурные фазовые переходы на поверхности.
22. Структурные дефекты поверхности.
23. Тепловые колебания поверхностных атомов, поверхностное плавление.
24. Поверхностные состояния и условия их появления.
25. Модель желе, осцилляции Фриделя.
26. Работа выхода разных граней металлов и полупроводников.

27. Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия и зонная энергетическая структура поверхности.
28. Электронная структура реконструированных поверхностей кремния.
29. Поверхностная проводимость.
30. Оже- и фотоэлектронная спектроскопия с анализом спиновой поляризации электронов.
31. Квантово-размерные эффекты в тонких пленках.
32. Кластеры как нуль-мерные системы.
33. Магнитный циркулярный и линейный дихроизм поглощения рентгеновских лучей.
34. Магнитные свойства слоистых систем.
35. Магнитные свойства поверхности металлов.
36. Физосорбция и хемосорбция, кинетика адсорбции.
37. Термическая десорбция и термодесорбционная спектроскопия.
38. Атомные механизмы поверхностной диффузии.
39. Зародышеобразование и рост островков.
40. Послойный и островковый рост пленок, механизм Странского-Крастанова.
41. Молекулярно-лучевая и твердофазная эпитаксии.
42. Химическая лучевая эпитаксия.
43. Кинетические эффекты при гомоэпитаксии, Барьер Эрлиха-Швобеля.
44. Эффекты механических напряжений при гетероэпитаксии.
45. Атомные манипуляции и формирование наноструктур.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***7.1. Основная литература***

1. Зенгуил, Эндрю. Физика поверхности: Пер. с англ. / Э. Зенгуил.- Москва : Мир, 1990. 536 с.
2. К. Оура [и др.] Введение в физику поверхности; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Институт автоматки и процессов управления.- М. : Наука, 2006.- 490 с.
3. В.Ф.Киселев, С.Н.Козлов, А.В. Зотеев. Основы физики поверхности твердого тела. М., Издательство МГУ, 1999, - 288 с.
4. А.М. Шикин. Взаимодействие фотонов и электронов с твердым телом. СПб, ВВМ, 2008, - 294 с.

### ***7.2. Дополнительная литература***

1. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектро-

скопии: Пер. с англ. / М.П. Сих, Д. Бриггс, Дж.К. Ривьер и др. ; Под ред. Д. Бриггса, М.П. Сиха .- Москва : Мир, 1987 .- 598 с.

2. Н.Р. Галль, Е.В. Рутков. Физика поверхности твердых тел. Графен и графит на поверхности твердых тел. СПб, Издательство Политехнического университета, 2013, 160 с.

3. А.М. Шикин. Формирование, электронная структура и свойства низкоразмерных структур на основе металлов. СПб, ВВМ, 2011, - 430 с.

### **7.3. Интернет-ресурсы**

#### **Отечественные журналы:**

1. Известия вузов. Материалы электронной техники ((<http://met.misis.ru/index.php/jour> ;
2. Квантовая электроника (<http://www.quantum-electron.ru/pa.phtml?page=onlcont>;
3. Микроэлектроника ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7900](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7900)

#### **Отечественные журналы в переводе:**

1. Quantum Electronics (<http://iopscience.iop.org/1063-7818/>;
2. Russian Microelectronics (<http://link.springer.com/journal/11180> ;

#### **Иностранные журналы:**

1. Advanced Electronic Materials (<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%292199-160X> ;
2. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291931-4981>;
3. Journal of Electronic Materials (<http://link.springer.com/journal/11664>;
4. Microelectronic Engineering (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01679317>;
5. Microelectronics Journal (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00262692>;
6. Microwave Journal (<http://www.microwavejournal.com/publications/> ;
7. Nature Photonics (<http://www.nature.com/nphoton/index.html>;
7. Opto-Electronics Review (<http://link.springer.com/journal/11772>;
8. Progress in Quantum Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796727>;
9. Solid-State Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00381101>;

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Компьютерный класс
5. Учебно-научная лаборатория, оборудованная установкой дифракции медленных

электронов.

6. Учебно-научная лаборатория, оборудованная аппаратурой для анализа поверхности методом электронной оже-спектроскопии.

Программу разработал:

в.н.с. лаборатории физики  
сегнетоэлектричества и магнетизма,  
д-р физ.-мат. наук, Пронин И.И.