

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

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора Института по научной работе
С.В. Лебедев
02 2015 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ

основной образовательной программы подготовки
научно-педагогических кадров в аспирантуре
по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

профиль 01.04.04 Физическая электроника

Квалификация:
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Принято Ученым советом
Протокол №1 от 20 февраля 2015 г.

Санкт-Петербург
2015

Шерин

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 наноэлектронике.

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

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Рассматриваемая дисциплина является вариативной в плане подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.04 Физическая электроника.

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 ООП по направлению подготовки «Физика и астрономия»:

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).

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	Трудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			лекции	Лаб. / практ	самостоятельная работа	контроль
1	2	3	4	5	6	7
Раздел 1. Поверхность твердого тела						
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	
Всего по разделу	1	42	16		26	
Раздел 2. Атомные процессы на поверхности						
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	
Всего по разделу	1	30	10		20	
Всего по дисциплине	2	72	26		46	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 $\text{Si}(100)2\times 1$, $\text{Si}(111)7\times 7$, 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 (Адатомы, 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 спектров 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

Физическая адсорбция 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 вицинальных 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:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- г) 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 Si(100)2x1 и Si(111)7x7.
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, Эндрью. 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 автоматики 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 спектроскопии: 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>; доступ с 2012 по текущий год)
2. Квантовая электроника (<http://www.quantum-electron.ru/ra.phtml?page=onlcont>; доступ с 1971 по 2012)
3. Микроэлектроника (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7900; доступ с 2007 по текущий год)

Отечественные журналы в переводе:

1. Quantum Electronics (<http://iopscience.iop.org/1063-7818/>; доступ с 1971 по текущий год)
2. Russian Microelectronics (<http://link.springer.com/journal/11180>; доступ с 2009 по текущий год)

Иностранные журналы:

- Advanced Electronic Materials
(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%292199-160X>; доступ с 2015 года)
1. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering
(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291931-4981>; доступ с 2006 по текущий год)
 2. Journal of Electronic Materials (<http://link.springer.com/journal/11664>; доступ с 1972 по текущий год)
 3. Microelectronic Engineering (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01679317>; доступ с 2006 по текущий год)
 4. Microelectronics Journal (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00262692>; доступ с 2006 по текущий год)
 5. Microwave Journal (<http://www.microwavejournal.com/publications>; доступ с 2002 по текущий год)
 6. Nature Photonics (<http://www.nature.com/nphoton/index.html>; доступ с 2007 по текущий год)
 7. Opto-Electronics Review (<http://link.springer.com/journal/11772>; доступ с 2006 по 2014)

8. Progress in Quantum Electronics
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796727>; доступ с 2006 по текущий год)
9. Solid-State Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00381101>; доступ с 2006 по текущий год)

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.