

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  
**ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**  
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

*Шергина*

## 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 и др.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Рассматриваемая дисциплина является основной 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 «Физическая электроника» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ООП по направлению подготовки 03.06.01 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.

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
<b>Раздел 1. Физические основы эмиссионной электроники</b>						
Тема 1.1 Электронные свойства твердых тел		6	2		4	
Тема 1.2. Основы электронных свойств поверхности твердых тел		12	4		8	
Тема 1.3. Основы атомной и молекулярной физики		12	4		8	
Тема 1.4. Элементарные процессы		12	4		8	
Всего по разделу	1	42	14		28	
<b>Раздел 2. Применение методов физической электроники</b>						
Тема 2.1. основы оптики заряженных частиц		9	3		6	
Тема 2.2. Основы эмиссионных процессов		12	4		8	
Тема 2.3. Физические основы методов диагностики атомных и электронных процессов		9	3		6	
Всего по разделу	1	30	10		20	
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>24</b>		<b>48</b>	К.экзамен



## **4.2. Содержание разделов и тем**

### **Раздел 1. Физические основы эмиссионной электроники**

#### **Тема 1.1. Электронные свойства твердых тел**

Особенности динамики электронов в идеальном твердом теле. Теорема Блоха. Волновая функция. Квазиимпульс. Зонный энергетический спектр.

Методы ионной спектроскопии: масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режимы МСВИ.

Энергетический спектр электронов в ограниченном кристалле. Условия локализации. Локализованные состояния Тамма. Поверхностные состояния Шокли.

#### **Тема 1.2. Основы электронных свойств поверхности твердых тел**

Энергетическая диаграмма поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость.

Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.

Автоэлектронная и взрывная эмиссия.

Законы движения заряженных частиц в статических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Параксиальные пучки.

Квантовые ямы, нити и сверхрешетки. Электронные состояния в наноструктурах.

#### **Тема 1.3. Основы атомной и молекулярной физики**

Строение атома. Принцип Паули. Классификация уровней в атоме. Электронные переходы в атоме: излучательные переходы, автоионизация, Ожэ-эффекты.

Исследование структуры кристаллов методом Резерфордского рассеяния ионов и атомов.

Основные типы элементарных процессов при столкновениях электронов и ионов с атомами. Упругое рассеяние, возбуждение, ионизация.

Исследования переходов между уровнями в атомах методами оптической и электронной спектроскопии.

Классификация уровней двухатомной молекулы. Колебательное и вращательное возбуждение. Электронные переходы в молекуле. Энергия диссоциации.

#### **Тема 1.4. Элементарные процессы**

Методы описания элементарных процессов столкновений атомных частиц при разных энергиях: борновское приближение, адиабатическое приближение, атомный и молекулярный базис.

Фотопроцессы. Взаимодействие квантов излучения с атомами и молекулами.

Модель квазимолекулы для столкновения атомных частиц (ионов, атомов) друг с другом при малых энергиях. Корреляционные диаграммы Фано-Лихтена. Неадиабатические переходы в квази-молекуле.

Модели межатомных потенциалов. Обратная задача рассеяния.

Экспериментальные методы исследования элементарных процессов атомных столкновений: Анализ зарядовых состояний и потерь энергии, электронная спектроскопия, методы совпадений.

Столкновения электронов с атомами и молекулами. Возбуждение, ионизация. Мультипольности переходов, автоионизационные состояния. Пороговое поведение сечений процессов.

Методы исследования элементарных процессов взаимодействия частиц путём использования пересекающихся, совмещённых, догоняющих пучков. Создание газовых ми-

шеней: струйной, атомарной из молекулярных газов. Обеспечение условий однократности столкновений.

## **Раздел 2. Применение методов физической электроники**

### **Тема 2.1. Основы оптики заряженных частиц**

Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза диафрагма. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Обоснование применения статистики Ферми-Дирака к электронам в идеальном твердом теле. Примесные состояния. Невырожденные и вырожденные полупроводники. Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Особенности электрооптических систем. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Аберрации линз. Основные свойства аксиально-симметричных электростатических и магнитных систем электронной и ионной оптики. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект). Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов.

### **Тема 2.2. Основы эмиссионных процессов**

Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования энергии в электрическую. Основные типы анализаторов энергии заряженных частиц и методы диагностики на их основе. Обратное резерфордовское рассеяние. Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело-вакуум. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизм распыления. Формулы для коэффициента распыления. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия.

### **Тема 2.3. Физические основы методов диагностики атомных и электронных процессов**

Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор). Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы и конструкции микроскопов. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в атомах и твердом теле. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Химические сдвиги уровней. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА). Взаимодействие электронов с твердым телом. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция. Дифракция медленных электронов как метод исследования структуры поверхности. Зоны Бриллюэна. Зонный энергетический спектр твердых тел. Закон дисперсии. Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.

## **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.

Результатом оценки знаний является экзамен.

#### **Билеты к экзамену**

Билет №1

1. Особенности динамики электронов в идеальном твердом теле. Теорема Блоха. Волновая функция. Квазиимпульс. Зонный энергетический спектр.
2. Методы ионной спектроскопии: масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). Стигматический и растровый режимы МСВИ.

Билет №2

1. Энергетический спектр электронов в ограниченном кристалле. Условия локализации. Локализованные состояния Тамма. Поверхностные состояния Шокли.
2. Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза диафрагма.

Билет №3

1. Статистика носителей заряда в полупроводниках. Обоснование применения статистики Ферми-Дирака к электронам в идеальном твердом теле. Примесные состояния. Невырожденные и вырожденные полупроводники.

2. Электронные микроскопы. Общие принципы работы. Особенности электронооптических систем.

Билет №4

1 Энергетическая диаграмма поверхности. Поверхностные состояния. Эффект поля и поверхностная проводимость.

2. Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.

Билет №5

1. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.

2. Законы движения заряженных частиц в статических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Параксиальные пучки.

Билет №6

1. Квантовые ямы, нити и сверхрешетки. Электронные состояния в наноструктурах.

2. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Аберрации линз.

Билет №7

1. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело-вакуум.

2. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизм распыления. Формулы для коэффициента распыления.

Билет №8

1. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия.

2. Основные свойства аксиально-симметричных электростатических и магнитных систем электронной и ионной оптики

Билет №9

1. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект).

2. Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов.

Билет №10

1. Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования энергии в электрическую.

2. Основные типы анализаторов энергии заряженных частиц и методы диагностики на их основе. Обратное резерфордское рассеяние.

Билет №11

1. Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона.

2. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор).

Билет №12

1. Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры.

2. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы и конструкции микроскопов.

Билет №13

1. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в атомах и твердом теле.

2. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Химические сдвиги уровней. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА).

Билет №14

1. Взаимодействие электронов с твердым телом. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция.

2. Дифракция медленных электронов как метод исследования структуры поверхности.



Билет №15

1. Зоны Бриллюэна. Зонный энергетический спектр твердых тел. Закон дисперсии.
2. Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.

Билет №16

1. Строение атома. Принцип Паули. Классификация уровней в атоме. Электронные переходы в атоме: излучательные переходы, автоионизация, Ожэ-эффекты.
2. Исследование структуры кристаллов методом Резерфордовского рассеяния ионов и атомов.

Билет №17

1. Основные типы элементарных процессов при столкновениях электронов и ионов с атомами. Упругое рассеяние, возбуждение, ионизация.
2. Исследования переходов между уровнями в атомах методами оптической и электронной спектроскопии.

Билет №18

1. Классификация уровней двухатомной молекулы. Колебательное и вращательное возбуждение. Электронные переходы в молекуле. Энергия диссоциации.
2. Методы описания элементарных процессов столкновений атомных частиц при разных энергиях: борновское приближение, адиабатическое приближение, атомный и молекулярный базис.

Билет №19

1. Фотопроцессы. Взаимодействие квантов излучения с атомами и молекулами.
2. Модель квазимолекулы для столкновения атомных частиц (ионов, атомов) друг с другом при малых энергиях. Корреляционные диаграммы Фано-Лихтена. Неадиабатические переходы в квази-молекуле.

Билет №20

1. Модели межатомных потенциалов. Обратная задача рассеяния.
2. Экспериментальные методы исследования элементарных процессов атомных столкновений: Анализ зарядовых состояний и потерь энергии, электронная спектроскопия, методы совпадений.

Билет №21

1. Столкновения электронов с атомами и молекулами. Возбуждение, ионизация. Мультипольности переходов, автоионизационные состояния. Пороговое поведение сечений процессов.
2. Методы исследования элементарных процессов взаимодействия частиц путём использования пересекающихся, совмещённых, догоняющих пучков. Создание газовых мишеней: струйной, атомарной из молекулярных газов. Обеспечение условий однократности столкновений.

## **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. Рутьков. 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/pa.phtml?page=onlcont>; доступ с 1971 по 2012)
3. Микроэлектроника ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7900](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**

Лекционная аудитория

Мультимедийный проектор

Персональный компьютер

Компьютерный класс

Учебно-научная лаборатория, оборудованная установкой дифракции медленных электронов.

Учебно-научная лаборатория, оборудованная аппаратурой для анализа поверхности методом электронной оже-спектроскопии и масс-спектрометрами для определения изотопного состава пробы в газовой фазе, и элементного и молекулярного состава жидких проб.