

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

2022 г.



Рабочая программа дисциплины

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

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 «Физическая электроника» 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 АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Физическая электроника» 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 «Физическая электроника» 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 описания движения заряженных частиц в вакууме и газе;

- основы методов диагностики поверхности, основанные на движении электронов в вакууме и их эмиссии и твердых тел.

- свойства заряженных частиц (электронов, атомных и молекулярных ионов) в отношении движения в электрических, магнитных и радиочастотных полях. в том числе скрещенных;

- основные явления и эффекты, наблюдающиеся при взаимодействии заряженных частиц и излучения с поверхностью твердых тел;

уметь:

- определять состава веществ. сложных смесей. поверхностей. как элементных. так и молекулярный на основе данных масс-спектрометрии и электронной спектроскопии;

- феноменологически описывать процессы эмиссии электронов. ионов и нейтральных частиц с поверхности твердых тел;

владеть опытом:

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики поверхности;
- экспериментальных исследований процессов эмиссии с поверхности твердых тел и движения заряженных частиц в вакууме и газовых средах 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.

Наименование разделов и тем	Трудоемкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			Лекции	Лаб. / пр акт	СР	Контроль
Раздел 1. Физические основы эмиссионной электроники						
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	
Раздел 2. Применение методов физической электроники						
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	
Всего по дисциплине	2	72	24		48	Канд. 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 мишеней: 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 электронооптических 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 резерфордское 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 твёрдом 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:

- 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 соответствие 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.

Вопросы для подготовки к сдаче кандидатского экзамена:

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.

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

4. Основные типы электростатических линз. Тонкие линзы. Линза диафрагма.

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

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

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

8. Фотоэлектронная эмиссия. Трехступенчатый механизм эмиссии.
9. Автоэлектронная и взрывная эмиссия.
10. Законы движения заряженных частиц в статических и магнитных полях. Показатель преломления в корпускулярной оптике. Параксиальные пучки.
11. Квантовые ямы, нити и сверхрешетки. Электронные состояния в наноструктурах.
12. Магнитные линзы. Расчет фокусных расстояний. Аберрации линз.
13. Контактные явления. Различные типы контактов. Контакт твердое тело-вакуум.
14. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Распыление. Механизм распыления. Формулы для коэффициента распыления.
15. Ионно-электронная эмиссия. Потенциальная и кинетическая эмиссия.
16. Основные свойства аксиально-симметричных электростатических и магнитных систем электронной и ионной оптики
17. Особенности энергетического спектра электронов в тонких пленках (квантовый размерный эффект).
18. Основы энергоанализа заряженных частиц. Основные типы энергоанализаторов.
19. Термоэлектронная эмиссия (ТЭЭ). Работа выхода. Основное уравнение ТЭЭ. Термоэмиссионный метод прямого преобразования энергии в электрическую.
20. Основные типы анализаторов энергии заряженных частиц и методы диагностики на их основе. Обратное резерфордское рассеяние.
21. Поглощение и испускание света полупроводниками. Механизмы поглощения. Поглощение и излучение при оптических переходах зона-зона.
22. Методы регистрации частиц. Вторичный электронный умножитель. Детекторы для быстрых частиц (поверхностно-барьерный детектор).
23. Спонтанное и вынужденное излучение. Полупроводниковые лазеры.
24. Туннельная и атомно-силовая микроскопия. Физические основы и конструкции микроскопов.
25. Одночастичные и многочастичные возбуждения электронов в атомах и твердом теле.
26. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Химические сдвиги уровней. Электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА).
27. Взаимодействие электронов с твердым телом. Спектры вторичных электронов. Оже-электроны. Электронно-стимулированная десорбция.
28. Дифракция медленных электронов как метод исследования структуры поверхности.
29. Зоны Бриллюэна. Зонный энергетический спектр твердых тел. Закон дисперсии.

30. Электронная Оже-спектроскопия. Основное уравнение. Методы количественной Оже-спектроскопии.

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

32. Исследование структуры кристаллов методом Резерфордского рассеяния ионов и атомов.

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

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

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

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

37. Фотопроцессы. Взаимодействие квантов излучения с атомами и молекулами.

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

39. Модели межатомных потенциалов. Обратная задача рассеяния.

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

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

42. 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, Эндрыю. 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> ;

2. Квантовая электроника (<http://www.quantum-electron.ru/pa.phtml?page=onlcont>;

3. Микроэлектроника (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>;
8. Opto-Electronics Review (<http://link.springer.com/journal/11772>;
9. Progress in Quantum Electronics
(<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796727> ;
10. Solid-State Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00381101>).

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ 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.

Программу разработал:

г.н.с., заведующий лабораторией
лаб. атомных столкновений в твердых телах,
д-р физ. мат.-наук Зиновьев А.Н.