**Рабочая программа дисциплины**

**1. Электронная спектроскопия поверхности и тонких пленок**

**2. Лекторы.**

**2.1.** Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Зыкова Екатерина Юрьевна, кафедра физической электроники физического факультета МГУ, zykova@phys.msu.ru, +7(495)9392937.

**3. Аннотация дисциплины.**

В лекционном курсе рассмотрены основы наиболее распространенных в настоящее время электронно-спектроскопических методов анализа поверхности: электронной оже-спектроскопии (ЭОС), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), дифракции медленных электронов (ДМЭ), спектроскопии потерь энергии электронов (СПЭЭ), сканирующей туннельной микроскопии. В рамках курса студенты познакомятся с принципом энергоанализа заряженных частиц и конструкциями энергоанализаторов, используемых в методах анализа поверхности, с физическими принципами, используемыми для получения и измерения сверхвысокого вакуума.

**4. Цели освоения дисциплины.**

Овладеть современными профессиональными методиками исследования свойств поверхности и тонкопленочных структур, знать физические основы методов, области их применения и аппаратуру, необходимую для их реализации.

**5. Задачи дисциплины.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать теоретические основы методов электронной спектроскопии, их достоинства и области применения, аппаратуру; уметь подобрать метод исследования, позволяющий наиболее оптимально решать поставленную исследовательскую задачу.

**6. Компетенции.**

 **6.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.**

ОНК-1, ОНК-5, ОНК-6

**6.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.**

М-ОНК-2, М-ИК-2, М-ИК-3, М-ПК-1, М-ПК-2, М-ПК-3, М-ПК-5, М-ПК-6, М-ПК-8.

**7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины**

В результате освоения дисциплины студент должен:

знать физические основы методов электронной спектроскопии, их области применения и аппаратуру;

уметь применять полученные знания для выбора наиболее подходящих методов исследования для решения конкретных исследовательских задач.

**8. Содержание и структура дисциплины.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Вид работы** | **Семестр** | **Всего** |
| **1** |
| **Общая трудоёмкость, акад. часов** | 72 | 72 |
| **Аудиторная работа:** | 36 | 36 |
|  Лекции, акад. часов | 36 | 36 |
|  Семинары, акад. часов |  |  |
|  Лабораторные работы, акад. часов |  |  |
| **Самостоятельная работа, акад. часов** | 36 | 36 |
| **Вид промежуточной аттестации (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)** | зачет |  |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nраз-дела** | **Наименованиераздела** | **Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий** | **Форматекущегоконтроля** |
| **Аудиторная работа** | **Самостоятельная работа** |
| **Лекции** | **Семинары** | **Лабораторные работы** |
| **1** | Введение.Основные понятия | 2 часа.Способы классификации методов диагностики поверхности твердых тел. Электронная спектроскопия, её значение в исследовании твердых тел. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции.*.* | *ДЗ,**КР,**Оп* |
| **2** | Аппаратура и оборудование для анализа поверхности методами электронной спектроскопии | 2 часа.Физические принципы энергоанализа электронов. Основные характеристики электростатических анализаторов. Разрешение по энергиям, дисперсия, светосила, светимость.  |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Основные типы дисперсионных электростатических анализаторов. Расчет характеристик простейшего дисперсионного энергоанализатора типа плоское зеркало.  |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Понятие о степенях вакуума. Методы получения и измерения сверхвысокого вакуума. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| **3** | Взаимодействие электронов и фотонов с веществом | 2 часа.Дифференциальные и полные сечения упругого и неупругого рассеяния электронов. Ионизация внутренних уровней. Квантовомеханическое и классическое рассмотрение рассеяния электронов. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. | *ДЗ,**КР,**Оп* |
| 2 часа.Спектры вторичных электронов. Упругорассеянные и неупругорассеянные электроны, оже-электроны. Основные закономерности вторичной электронной эмиссии. Использование вторичных электронов в методах электронной спектроскопии. Дифференцирование спектров вторичных электронов. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| **4** | Применение методов электронной спектроскопии для анализа поверхности и тонкослойных структур. | 2 часа.Электронная оже-спектроскопия (ЭОС). Физические основы метода. Энергия оже-электронов. Факторы, влияющие на выход оже-электронов. Сечение ионизации внутреннего уровня. Вероятность оже-процесса. Средняя длина свободного пробега электронов. Быстрые обратно-рассеянные электроны. Химические сдвиги.  |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Количественная оже-спектроскопия. Основное уравнение оже-спектроскопии. Метод внешних эталонов. Метод, использующий коэффициенты элементной чувствительности. Абсолютная чувствительность методики электронной оже-спектроскопии. Применение электронной оже-спектроскопии. Специальные методы для изучения тонкослойных структур. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Электронная спектроскопия характеристических потерь энергии электронов на просвет и отражение. Физические основы метода. Спектроскопия ионизационных потерь. Потери на поверхностных и объёмных плазмонах. Функция потерь. Применение метода. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Дифракция медленных электронов (ДМЭ). Дифракционные картины от чистых поверхностей и адсорбированных слоев. Основы кинематической и динамической теории ДМЭ. Применение методики. Аппаратура. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции |
| 2 часа.Методы фотоэлектронной (ФЭС) и ультрафиолетовой электронной спектроскопии (УФЭС). Физические основы методов. Применение синхротронного излучения. Использование методик. Аппаратура. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |
| 2 часа.Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС). Физические основы метода. Факторы, влияющие на величину фотоэмиссионного тока. Количественная РФЭС. Химические сдвиги. Учет зарядки поверхности. Использование РФЭС в химии поверхности. Применение РФЭС для послойного анализа. Аппаратура. |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции |
| 2 часа.Другие методы анализа поверхности. Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции |
| **5** | Инструментальные эффекты в методиках электронной спектроскопии | 2 часа.Инструментальные эффекты в методиках электронной спектроскопии. Нагрев поверхности, электронно-стимулированная десорбция |  |  | 2 часа.Работа с лекционным материалом, решение задач по теме лекции. |

**Предусмотрены следующие формы текущего контроля успеваемости.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. Защита лабораторной работы (ЛР);2. Расчетно-графическое задание (РГЗ);3. Домашнее задание (ДЗ); | 4. Реферат (Р);5. Эссе (Э);6. Коллоквиум (К); | 7. Рубежный контроль (РК);8. Тестирование (Т);9. Проект (П); | 10. Контрольная работа (КР);11. Деловая игра (ДИ);12. Опрос (Оп); | 15. Рейтинговая система (РС);16. Обсуждение (Об). |

**9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО**

1. Дисциплина по выбору.
2. Вариативная часть, блок профессиональной подготовки.
3. Для освоения дисциплины студент должен знать основные разделы физики и математики.
	1. До начала освоения дисциплины должны быть освоены дисциплины модулей «Общая физика», «Квантовая теория»,
	2. НИП, НИР, НИС.

**10. Образовательные технологии**

* дискуссии,
* круглые столы,
* использование средств дистанционного сопровождения учебного процесса,
* преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ.

**11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**

Перечень вопросов:

1. Способы классификации методов диагностики поверхности твердых тел
2. Принципы энергоанализа электронов. Блок-схема и основные характеристики спектрометров.
3. Дисперсионные электростатические анализаторы. Основные характеристики электростатических анализаторов.
4. Основные типы дисперсионных электростатических анализаторов.
5. Дисперсионный анализатор типа плоское зеркало.
6. Понятие о степенях вакуума. Сверхвысокий вакуум.
7. Средства получения и измерения сверхвысокого вакуума.
8. Спектры вторичных электронов. Упругорассеянные и неупругорассеянные электроны, оже-электроны. Зарядка поверхности при облучении электронным пучком.
9. Электронная оже-спектроскопия (ЭОС). Физические основы метода. Энергия оже-электронов. Ширина оже-линий. Факторы, влияющие на интенсивность оже- сигналов.
10. Количественный анализ в электронной оже- спектроскопии (ЭОС).
11. Схематическое устройство оже- спектрометра. Растровый оже- спектрометр.
12. Применение ЭОС. Послойный анализ пленок методом ЭОС.
13. Основы метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).
14. Определение энергии связи электрона в РФЭС. Химические сдвиги энергетических уровней в РФЭС.
15. Особенности, наблюдаемые в рентгеновских фотоэлектронных спектрах. Устройство спектрометра для РФЭС.
16. Количественный анализ в РФЭС.
17. Спектры потерь. Применение метода СПЭЭ. Количественный анализ в СПЭЭ.
18. Пороговые методы электронной спектроскопии. Спектроскопия потенциалов исчезновения.
19. Оптические аналогии ДМЭ. ДМЭ на одномерной и двумерной решетках.
20. Основы метода дифракции медленных электронов (ДМЭ). Сфера Эвальда для двумерной решетки.
21. Оборудование для метода ДМЭ. Применение метода. I-V анализ в ДМЭ.
22. Дополнительные возможности метода дифракции быстрых электронов.
23. Физические основы метода сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Устройство туннельного микроскопа.
24. Режимы работы сканирующего туннельного микроскопа. Применение метода. Туннельная спектроскопия.
25. Понятие об инструментальных эффектах в методах электронной спектроскопии. Нагрев поверхности электронными пучками.
26. Основные модели ЭСД: десорбция компонентов, входящих в состав твердого тела (оже-нейтрализационная модель). Загрязнение поверхностей твердых тел углеродосодержащими соединениями

Примеры задач:

1. Используя данные энергетической диаграммы кремния, приведенные на рисунке, вычислить соответствующие пороговые энергии первичных электронов для каждого одночастичного возбуждения в кремнии. Электронное сродство кремния принять равным 4,05 эВ.
2. Энергия связи К-уровня углерода равна 284 эВ, L-уровня 7 эВ. Вычислите энергию Оже -перехода KLL в углероде.
3. Для возбуждения линии Fe 2p использовалось рентгеновское излучение Al Kα. Определите кинетическую энергию фотоэлектронов линий 2p1/2 и 2p3/2. Работу выхода спектрометра принять равной 2,0 эВ.
4. Определить среднюю длину пробега молекулы N2 в вакууме 10-10 Торр при температуре 300К.
5. Адсорбция никеля на поверхности Si(111), имеющей гексагональную решетку приводит к образованию соразмерной суперструктуры $\sqrt{7}х\sqrt{7}-Rφ°$. Определите величину угла $φ°$.
6. Используя построение Эвальда, определите число дифракционных рефлексов от поверхности с квадратной решеткой с периодом 3 Å. Картина ДМЭ получена при энергии 50 эВ в системе со 120°-ным сферическим экраном.
7. Алюминий осаждается на поверхность подложки Si(100) при низкой температуре и формирует непрерывную однородную пленку Al без перемешивания на границе раздела. Оценить затухание оже-сигнала Si LVV (92 эВ) после напыления пленки Al толщиной 0,25, 1, 5 и 10 монослоев. Считать длину затухания электронов с энергией 92 эВ в алюминии $λ\_{Al}=4,09$Å и толщину одного монослоя алюминия 1,13Å.
8. Обзорный энергетический спектр фотоэлектронов, возбуждаемых рентгеновским излучением Al Kα, демонстрирует присутствие в материале углерода, азота и кислорода. Используя данные об энергиях связи и площадях пиков фотоэлектронов, приведенные в таблице, рассчитать относительную концентрацию этих элементов. Считать, что длина свободного пробега электронов в материале зависит от их энергии как $λ\~E^{0.7}$
9. Пленка никеля толщиной 1000 Å на подложке Si облучается пучком электронов с энергией 10 кэВ. Рассчитайте отношение выходов рентгеновского К-излучения и КLL оже-электронов.
10. Найти среднюю длину свободного пробега электронов с энергией 100кэВ, проходящих сквозь алюминиевую пленку, в которой энергия объемного плазмона равна 15,3 эВ.

**12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины**

Основная литература

1. С.С.Еловиков. Электронная спектроскопия поверхности и тонких пленок, Изд. МГУ, 1992, - 94 с.

2. ″Методы анализа поверхности″. Под ред. А.Зандерны. М.: Мир, 1979.

3. Афанасьев В.П., Явор С.Я. ″Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц″. М.: Наука, 1978.

4. Валиев К.А., Раков А.В. ″Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике″. М., 1984.

5. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. ″Эмиссионная электроника″. М., 1966.

6. Л.Фелдман, Д.Майер. ″Основы анализа поверхности и тонких пленок″. М.: Мир, 1989.

7. ″Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотолектронной спектроскопии″. Под ред.Д Бриггса и М.П.Сиха. М.: Мир, 1989.

8. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. ″Введение в физику поверхности″. М., Наука, 2006.

9. Вудраф Д., Делчар Т. ″Современные методы исследования поверхности″. М.: Мир, 1989.

10. В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Изд. Ин-та физики микроструктур РАН, Н. Новгород, 2004.

11.А.В.Зотов, А.А.Саранин. Введение в сканирующую туннельную микроскопию.

Дополнительная литература

1. Surface Analysis – The Principal Techniques, 2nd Edition. Edited by John C. Vickerman and Ian S. Gilmore, John Wiley & Sons, 2009
2. H.Luth. Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films, Fifth Edition, Springer, 2010, 577 p.

Периодическая литература

1. С.С. Еловиков, Е.Ю. Зыкова, Р.С.Гвоздовер, Д.С. Коллигон, В.Е.Юрасова. Оже-электронная эмиссия из ферромагнитных сплавов (2006) Известия РАН. Сер. физ., 70 (6), 1014-1019

2. C.J. Powell , A. Jablonski, W.S.M. Werner, W. Smekal. Characterization of thin ﬁlms on the nanometer scale by Auger electron spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. // Applied Surface Science 239 (2005) 470–480.

3. C.R. Brundle, G. Conti, P. Mack, XPS and angle resolved XPS, in the semiconductor industry: Characterization and metrology control of ultra-thin films. // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, V. 178-179, 2010, P. 433-448

4. С.С. Еловиков, Е.Ю. Зыкова, А.А.Хайдаров, В.Е. Юрасова. Десорбция атомных частиц и модификация поверхности фторидов при электронном облучении, Поверхность. №6 (2010) 10-17.

5. H.-H. Strehblow, D. Lützenkirchen-Hecht, Spectroscopies, Scattering and Diffraction Techniques, Shreir's Corrosion, 2010, P. 1374-1404

Интернет-ресурсы

physelec.phys.msu.ru

**13. Материально-техническое обеспечение**

13.1. Помещения

Лекционные и семинарские занятия по дисциплине проводятся в соответствии с требованиями к материально-техническим условиям реализации ООП (п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика»).

13.2. Оборудование

Для проведения лекционных занятий в аудитории предусмотрены: учебная доска большого формата, компьютер, проектор, экран.