

Рабочая программа дисциплины

1. Методы исследования структуры и состава твёрдых тел

2. Лекторы.

2.1. К.ф.-м.н., доцент, Кытин Владимир Геннадьевич, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ, e-mail: kytin@mig.phys.msu.ru, телефон.: +7(495) 939-11-47

3. Аннотация дисциплины.

В настоящее время для получения качественных научных результатов в физике конденсированного состояния вещества необходима максимально подробная информация о структуре и составе исследуемого материала. Для получения такой информации необходимо знать методы исследования структуры и состава веществ и уметь проводить анализ экспериментальных данных, получаемых этими методами. В трёх разделах данного курса представлены основы дифракционных методов исследования структуры кристаллов, методов электронной и зондовой микроскопии, электронного микроанализа, Оже-спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии. Для каждого метода излагаются его теоретические основы, состав и схема необходимой аппаратуры, приводятся примеры первичных экспериментальных данных и даются основы методик их анализа. Изучение курса включает освоение лекционного материала, а также выполнение домашних заданий, включающих задачи и упражнения на применение полученных на лекциях знаний.

4. Цели освоения дисциплины.

Овладение студентами современными профессиональными знаниями о наиболее распространённых экспериментальных методах исследования структуры и состава материалов. Приобретение студентами способности использовать эти знания для правильного выбора набора экспериментальных методов и анализа полученных результатов при решении конкретных задач профессиональной деятельности.

5. Задачи дисциплины.

Изучение теоретических основ дифракции рентгеновского излучения и электронов в кристаллах, основных механизмов взаимодействия электронных пучков и рентгеновского излучения с твёрдыми телами, устройства и работы рентгеновских и электронных дифрактометров, электронных и зондовых микроскопов и спектрометров используемых для электронного микроанализа, Оже-спектроскопии и фотоэлектронной спектроскопии, а также овладение методиками анализа первичных экспериментальных данных с целью определения структуры и состава материалов.

6. Компетенции.

7.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ОНК-5, ОНК-6, ПК-1, ПК-2

7.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПК-1, ПК-2

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен

знать основы теории дифракции рентгеновского излучения и электронов в кристаллах, основные механизмы взаимодействия электронных пучков и рентгеновского излучения с конденсированными средами, основы методов анализа структуры материалов, основанных на дифракции рентгеновского излучения и электронов; электронной и зондовой микроскопии, электронного микроанализа и Оже-микроскопии и фотоэлектронной спектроскопии.

уметь выбирать наиболее эффективные методы для анализа структуры и состава материалов при проведении научных исследований, проводить интерпретацию первичных эксперимен-

тальных данных, извлекать из них информацию о структуре и составе исследуемых материалов;

владеть основными методиками анализа экспериментальных данных, полученных с помощью методов излагаемых в рамках данного курса, с целью определения структуры и состава исследуемых материалов;

иметь опыт деятельности в анализе рентгеновских и электронных дифрактограмм, изображений, полученных с помощью электронной и зондовой микроскопии, спектров характеристического рентгеновского излучения, фотоэлектронов, Оже-спектров, спектров энергетических потерь электронов.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр			Всего
	8			
Общая трудоёмкость, акад. часов	72			72
Аудиторная работа:	36			36
Лекции, акад. часов	30			30
Семинары, акад. часов	-			-
Лабораторные работы, акад. часов	-			-
Самостоятельная работа, акад. часов	36			36
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)	зачёт или экзамен			зачёт

№ раз-дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа		Самостоятельная работа		
		Лекции	Семинары			Лабораторные работы
1.	Дифракционные методы анализа структуры кристаллов.	№1. 2 часа. Дифракция волн на пространственной решётке. Уравнение Лауэ и уравнение Брегга. Индексы Миллера.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по явлению дифракции, строению кристаллов, решёткам Браве. Решение задач на нахождение дифракционных рефлексов.	Оп, ДЗ. КР
		№2. 2 часа. Векторное представление закона Брегга. Построение ограничивающей сферы. Обратная решётка. Рапрещённые рефлексы.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на нахождение дифракционных рефлексов.	
		№3. 2 часа. Получение рентгеновского излучения. Белое и характеристическое излучение. Классификация линий характеристического излучения. Поглощение рентгеновского излучения. Рентгеновские монохроматоры. Рентгеновские дифрактометры.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по электронному строению атомов. Решение задач на поглощение рентгеновского излучения.	
		№4 2 часа. Порошковая дифракция. Примеры спектров. Определение периодов решётки. Дифракция Лауэ на монокристаллах.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Выполнение упражнений на нахождение периодов решётки	
		№ 5 2 часа. Интенсивность дифракционных максимумов. Рассеяние на атоме и элементарной ячейке. Структурный фактор. Влияние размеров кристаллитов.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по электронному строению атомов.	
		№6. 2 часа. Волновые свойства электронов.. Длина свободного пробега электронов. Методы получения электронных пучков. Получение и анализ дифрактограмм в просвечивающей электронной микроскопии. Дифрактограммы решётки.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по взаимодействию заряженных частиц с электромагнитным полем. Подготовка к контрольной работе.	

		№7. 2 часа. Дифракция электронов на отражение. Дифракция медленных электронов. Схема аппаратуры. Геометрия дифракционной картины. Определение структуры поверхности.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Выполнение упражнений на анализ электронных дифрактограмм и определение структуры поверхности.	
		№8. 2 часа. Дифракция быстрых электронов. Аппаратура. Примеры дифрактограмм.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Выполнение упражнений на моделирование и анализ электронных дифрактограмм	
2.	Электронная и зондовая микроскопия	№9. 2 часа. Оптическая и электронная микроскопия. Магнитные линзы. Сферическая и хроматическая аберрация. Астигматизм магнитных линз и методы его уменьшения.. Предел разрешения. в электронной микроскопии. Требования к вакууму.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение законов геометрической оптики и принципов формирования изображений в оптических приборах	Оп, ДЗ, КР
№10. 2 часа. Просвечивающая электронная микроскопия. Подготовка образцов. Устройство просвечивающего электронного микроскопа. Увеличение. Глубина резкости. Контраст. Разрешение. Режимы светлого и тёмного поля. Примеры изображений и их интерпретация.				2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на расчёт характеристик электронного микроскопа.		
№11. 2 часа. Растровая (сканирующая) электронная микроскопия. Подготовка образцов. Устройство микроскопа. Методы формирования изображения. Увеличение. Разрешение. Примеры изображений. Стереоскопические изображения. Анализ рельефа.				2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на характеристики растрового электронного микроскопа.		
№12. 2 часа. Сканирующая туннельная микроскопия. Туннелирование в квантовой механике. Плотность туннельного тока. Принцип действия и устройство сканирующего туннельного микроскопа. Разрешение. Методы изготовления иглы. Режимы работы. Примеры изображений.				2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по эффекту туннелирования в квантовой механике. Подготовка к контрольной работе		

		№13. 2 часа Силы ван-дер-Ваальса. Атомно-силовая микроскопия. Принцип действия и варианты устройства атомно-силового микроскопа. Методы измерения вертикальных смещений кантилевера. Контактный, бесконтактный и полуконтактный режимы сканирования. Изображения и их анализ.			2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение материала по силам взаимодействия между атомами и молекулами.	
--	--	--	--	--	---	--

3..	Методы исследования состава и электронной структуры твёрдых тел.	<p><i>№14. 2 часа.</i> Электронного микроанализа. Энергия электронов в атоме и в твёрдом теле Рентгеновский микроанализ. Спектры характеристического рентгеновского излучения возбуждаемого электронными пучками.. Методы регистрации спектров. Элементные карты.</p>			<p>2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение лекционных переходов с излучением рентгеновских фотонов. Решение задач на предел чувствительности и разрешение электронного микроанализа.</p>	Оп ДЗ
		<p><i>№15. 2 часа.</i> Спектроскопия энергетических потерь электронов. Спектры энергетических потерь электронов. Возбуждение фононов. Электронные переходы. Возбуждение плазмонов, ионизация атомов. Предел обнаружения и разрешающая способность.</p>			<p>2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на расчёт потерь энергии электронов в твёрдом теле.</p>	
		<p><i>№16. 2 часа.</i> Оже-переходы. Обозначения Оже-переходов. Энергии Оже-электронов. Вероятность перехода. Экспериментальная техника. Примеры Оже-спектров и методики их анализа. Получение Оже-изображений.</p>			<p>2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на расчёт потерь энергии электронов в твёрдом теле. Решение задач на расчёт вероятности Оже-переходов и излучательных переходов.</p>	
		<p><i>№17 2 часа.</i> Фотоэффект. Энергетический спектр фотоэлектронов. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Источники рентгеновского излучения. Устройство спектрометра. Примеры спектров и их интерпретация.</p>			<p>2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение законов фотоэффекта. Решение задач на расчёт энергии и вероятности выхода фотоэлектронов.</p>	
		<p><i>№18, 2 часа</i> Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия. Аппаратура. Источники фотонов. Спектроскопия фотоэлектронов с угловым разрешением. Исследование структуры валентной зоны.</p>			<p>2 часа. Работа с лекционным материалом. Повторение зонной структуры твёрдых тел.</p>	

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина по выбору.
2. Вариативная часть, профессиональный блок, модуль «Спецкурс кафедры (по выбору)».
3. Данный курс базируется на знаниях физики конденсированного состояния вещества, приобретённых и является логическим продолжением и дополнением дисциплин «Введение в специальность-физика низких температур», «Введение в физику конденсированного состояния», «Квантовая теория твёрдого тела», «Экспериментальные методы физики низких температур», «Введение в физику полупроводников». Курс является частью теоретического базиса, необходимого для выполнения научно-исследовательской работы и подготовки выпускной квалификационной работы. Для освоения курса студент должен освоить дисциплины преподаваемые в рамках модуля «Математика» и владеть методами математической физики. Необходимо также овладеть знаниями и умениями входящими в ряд дисциплин модулей «Общая физика» и «Теоретическая физика»

3.1. Дисциплины и практики, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины.

«Математический анализ», «Методы математической физики», «Механика», «Молекулярная физика», «Введение в квантовую физику», «Введение в квантовую физику», «Электродинамика», «Квантовая теория», «Введение в физику конденсированного состояния», «Квантовая теория твёрдого тела», «Экспериментальные методы физики низких температур» «Введение в физику полупроводников».

3.2. Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее.

Научно-исследовательская работа, выпускная квалификационная работа.

10. Образовательные технологии

- вовлечение студентов к научно-исследовательской деятельности,
- 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

Примеры контрольных вопросов:

1. Почему неупругое рассеяние электронов не позволяет получить резко сфокусированное изображение в электронном микроскопе?
2. В какой степени дифрактограмма решётки, полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа, отражает положения атомов?
3. Назовите факторы, приводящие к уширению рефлексов при дифракции рентгеновского излучения в кристаллах.
4. Чем определяется минимальный период кристаллической решётки, который можно определить с помощью дифракции рентгеновского излучения?
5. Чем определяется минимальный размер области пригодной для микроанализа при использовании растрового электронного микроскопа.
6. Почему предел детектирования в спектроскопии энергетических потерь электронов зависит от атомного номера элемента.
7. Как отличить Оже-пики от пиков потерь в спектре вторичных электронов?

Примеры домашних заданий:

1. Определить межплоскостные расстояния соответствующие рефлексам на заданной рентгеновской дифрактограмме порошкового образца.
2. Определить индексы рефлексов на заданной порошковой рентгеновской дифракто-

грамме никеля, используя JCPDS-данные.

3. По заданной электронной дифрактограмме α -Fe определить постоянную камеры λL электронного микроскопа, индексы рефлексов и зональную ось.

4. Даны две электронные дифрактограммы монокристалла кремния относительно одной зональной оси, полученные в областях кристалла разной толщины. Необходимо идентифицировать рефлексы и найти зональную ось.

5. Нарисуйте схему в реальном пространстве и картину дифракции электронов низких энергий для сверхструктуры (3x1) на поверхности (100) кубического кристалла.

6. Алмаз имеет ГЦК структуру, характеризуемую дополнительными запрещёнными дифракционными рефлексами. Найти первые три запрещённых рефлекса и объяснить их происхождение.

7. Для измерений методом просвечивающей электронной микроскопии при энергии 120 кэВ с помощью камеры длиной L рассчитать постоянную камеры λL и радиусы дифракционной картины для плоскостей Ni (220) и (311)

Примеры вопросов и задач для контрольных работ:

1. Как расстояние от управляющей линзы до поверхности образца влияет на минимальный размер электронного пучка в растровом электронном микроскопе.

2. Как величина оптимальной энергии электронного пучка при микроанализе зависит от плотности образца?

3. Чему равна длина волны электрона в электронном микроскопе при ускоряющем напряжении 150 кВ.

4. Алюминий является металлом со структурой ГЦК и плотностью 2,7 г/см³. Рассчитать параметр решетки a и межплоскостное расстояние между плоскостями (111).

5. В примитивной кубической решетке рефлексы (221) и (300) соответствуют одному Брэгговскому углу. Найти другую накладывающуюся пару рефлексов.

6. Никель используется для ослабления излучения CuK_β от рентгеновского источника на Cu . Какова толщина фильтра, если излучение ослабляется в 1000 раз?

7. Оценить стабильность ускоряющего напряжения в электронном микроскопе, требуемую для получения разрешения 0,2 нм, если величина ускоряющего напряжения равна 100 кВ.

Полный перечень вопросов к зачёту или экзамену:

1. Соотношение между энергией и длиной волны электрона.

2. Электронная пушка и магнитные линзы.

3. Принцип действия, схема и режимы работы просвечивающего электронного микроскопа.

4. Принцип действия и формирование изображения в растровом электронном микроскопе.

5. Сферическая и хроматическая аберрации магнитных линз.

6. Дифракционный предел разрешения и глубина резкости в электронной микроскопии.

7. Подготовка образцов для электронной микроскопии.

8. Эффект квантового туннелирования электронов. Плотность туннельного тока.

9. Принцип действия, устройство и режимы работы сканирующего электронного микроскопа.

10. Силы ван-дер-Ваальса. Принцип действия и режимы работы атомно-силового микроскопа.

11. Уравнение Брэгга и уравнение Лауэ. Обратная решётка. Разрешённые и запрещённые рефлексы.

12. Построение ограничивающей сферы.

13. Характеристическое тормозное и синхротронное рентгеновское излучение.

14. Устройство рентгеновского дифрактометра.

15. Идентификация рефлексов и определение периодов решётки по порошковым рентге-

новским дифрактограммам.

16. Дифракция Лауэ на монокристаллах. Структурный фактор в рентгеновской дифракции.
17. Дифрактограммы в просвечивающей электронной микроскопии. Дифрактограммы решётки и их интерпретация.
18. Анализ структуры поверхности методом дифракции медленных электронов на отражение.
19. Дифракция быстрых электронов на отражение и её применение для анализа поверхности.
20. Энергия электронов внутренних оболочек атомов в твёрдом теле.
21. Возбуждение характеристического рентгеновского излучения электронными пучками.
22. Методы регистрации спектров рентгеновского излучения в электронном микроанализе. Определение элементного состава материалов.
23. Механизмы потерь энергии электронами в твёрдом теле.
24. Предел обнаружения и разрешающая способность спектроскопии энергетических потерь электронов.
25. Оже-переходы. Экспериментальная техника Оже-спектроскопии.
26. Фотоэффект. Законы сохранения энергии и импульса при фотоэффекте.
27. Энергетический спектр фотоэлектронов выбиваемых квантами рентгеновского излучения.
28. Устройство спектрометра в методе рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.
29. Определение состава вещества с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.
30. Аппаратура для ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии.
31. Определение законов дисперсии электронов в валентной зоне методом ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением.
32. Сечение рассеяния ионов на ядрах атомов твёрдого тела. Формула Резерфорда и отклонения от неё.
33. Аппаратура для спектрометрии обратного рассеяния. Определение состава вещества методом спектрометрии обратного рассеяния.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Д. Брандон, У. Каплан, Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. Москва «Техносфера», 2004.
2. Д. Вудраф, Т. Делчар, Современные методы исследования поверхности, Москва «Мир», 1989.
3. С. Жж. Б. Рид, Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии, Москва: «Техносфера», 2004.
4. К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма, Введение в физику поверхности. Москва «Наука», 2006.

Дополнительная литература

1. Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев, Кристаллография рентгенография и электронная микроскопия, Москва «Металлургия», 1982..
2. Л. Фельдман, Д. Майер, Основы анализа поверхности и тонких плёнок, Москва «Мир», 1989.
3. Д.Бриггс, М.П.Сих., Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Москва, «Мир» 1987.
4. Карлсон Т.А., Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия., Ленинград «Машиностроение», 1981.
5. Миронов В.Л., Основы сканирующей зондовой микроскопии, Издательство РАН Институт физики микроструктур, 2004.

6. Д. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Э. Лифшин, Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, Москва «Мир», 1984.
7. Д. Синдо, Т. Оикава, Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия, Москва: «Техносфера», 2006.

Периодическая литература

1. Вайштейн Б.К. Электронная микроскопия атомного разрешения, УФН, **152**, 75-122 (1987)
2. Гомоюнова М.В. Электронная спектроскопия поверхности твёрдого тела, УФН, **136**, 105-148 (1982)
3. Маслова Н.С., Панов В.И. Сканирующая туннельная микроскопия атомной структуры, электронных свойств и поверхностных химических реакций, УФН, **157**, 185-195 (1989)

Интернет-ресурсы

1. <http://www.bruker.com/ru/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/single-crystal-x-ray-diffraction.html>
2. <http://www.megabook.ru/Article.asp?AID=689837>
3. http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/2309ФОТОЭЛЕКТОННАЯ

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки “Физика”.

Лекции читаются в аудитории 2-05 криогенного корпуса (кафедра физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ), оборудованной мультимедийным проектором, компьютером, экраном и учебной доской.