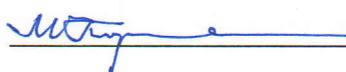


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

СОГЛАСОВАНО
зам. директора института
по научной работе
доктор физ.-мат. наук

УТВЕРЖДАЮ
Директор института
академик РАН



 М.А. Короткин

 Н.В. Мушников

« 01 » сентября 2025 г.

« 02 » сентября 2025 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА-МИНИМУМ
кандидатского экзамена по специальности
1.3.8. Физика конденсированного состояния
по физико-математическим наукам

Специализация: **Рентгеновская и электронная
спектроскопия твердых тел**

Екатеринбург

2025

Тормозное рентгеновское излучение

Основные эмпирические закономерности для тормозного спектра: непрерывное спектральное распределение, коротковолновая граница и максимум интенсивности в спектре, поляризация излучения. Электромагнитное поле произвольно движущегося заряда, интегральная интенсивность тормозного спектра, пространственное распределение непрерывного спектра для одного электрона (нерелятивистский и релятивистский случаи).

Характеристическое рентгеновское излучение

Эмпирические закономерности для характеристического рентгеновского излучения: зависимость интенсивности от анодного тока, критическое напряжение, серийный характер возбуждения, тонкая структура рентгеновских линий, относительные интенсивности линий в сериях, зависимость интенсивности от анодного напряжения, постоянство формы линии, закон Мозли. Основные принципы номенклатуры характеристических рентгеновских линий. Элементы систематики атомных спектров: спектр состояний одноэлектронного атома. Правила отбора для радиационных переходов в одноэлектронном и многоэлектронном атоме. Рентгеновские термы. Квантовомеханическая теория Зоммерфельда характеристических рентгеновских спектров: водородоподобный характер рентгеновских термов, выражение для энергии рентгеновского уровня и терма, постоянные экранирования, диаграмма рентгеновских уровней. Недиаграммные линии - сателлиты, спиндублеты рентгеновских характеристических линий, дублеты экранирования. Относительные интенсивности эмиссионных линий в мультиплете (правило Бургера-Доргело). Вероятность перехода в нестационарной теории возмущений.

Поглощение рентгеновского излучения и фотоэффект

Основные процессы взаимодействия рентгеновского излучения с веществом: фотоионизационное поглощение, сопровождаемое фотоэффектом, и рассеяние упругое (когерентное или томсоновское) и неупругое (некогерентное:

комптоновское и рамановское), коэффициенты ослабления излучения (линейный, массовый и атомный), сечение поглощения.

Эмпирические закономерности для рентгеновского поглощения: преобладание над рассеянием, аддитивность сечений поглощения, зависимость коэффициентов поглощения от длины волны и атомного номера, скачки поглощения.

Классическая теория поглощения и ее недостатки. Связь линейного коэффициента поглощения с коэффициентами Эйнштейна и силой осциллятора. Элементы квантовомеханического описания рентгеновского поглощения.

Оже-эффект и флуоресценция

Оже-эффект и флуоресценция - основные процессы распада возбужденных состояний атомов с вакансиями во внутренних электронных оболочках. Оже-переходы в атомах: двухчастичный характер, обозначения, костер-крониговские и супер-костер-крониговские переходы, энергия и интенсивность Оже-переходов. Каскад Оже-переходов. Выход флуоресценции. Зависимость выхода флуоресценции от характеристик атомов.

Источники рентгеновского излучения

Рентгеновские трубки. Физические принципы работы электронных рентгеновских трубок. Конструктивные особенности и факторы, влияющие на работу электронных рентгеновских трубок. Классификация рентгеновских трубок. Рентгеновские аппараты, их устройство и принципы функционирования. Методы разложения рентгеновского излучения в спектр. Кристаллы, дифракционные решетки.

Синхротронное излучение, его природа, спектр, пространственное распределение, поляризация. Источники синхротронного излучения. Устройство синхротронов и накопительных колец. Виглеры и ондуляторы. Использование синхротронного излучения в научных исследованиях.

Рентгеновские эмиссионные полосы и электронная структура ближнего порядка

Связь между рентгеновскими эмиссионными спектрами и парциальными плотностями электронных состояний. Пространственная анизотропия излучения в полосах. Возможность изучения распределения химического состава образцов по глубине. Рентгеновская эмиссионная спектроскопия с вариацией энергии возбуждающих электронов. Резонансные явления в рентгеновской эмиссии кристаллов. Спектроскопия резонансного неупругого рентгеновского рассеяния

Рентгеноспектральный анализ

Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. Избирательное поглощение и возбуждение характеристического излучения. Определение концентрации элементов с помощью рентгеновского флуоресцентного анализа. Приборы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа.

Рентгеноспектральный микроанализ. Устройство рентгеновского микрозонда, принципы работы. Определение концентрации элементов. Метод трех поправок в рентгеновском микроанализе: атомный фактор, фактор поглощения, поправка на флуоресценцию.

Рентгеновская абсорбционная спектроскопия

Спектры поглощения свободных атомов. Методы описания спектров поглощения многоатомных систем, рентгеновские спектры поглощения твердых тел (XANES-спектры) и функция плотности состояний зоны проводимости. Определение зарядовых состояний ионов и локализации электронных дырок в допированных моттовских изоляторах по спектрам поглощения.

Спектроскопия протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS-спектроскопия) как метод изучения атомного строения ближнего порядка.

Оптимизация условий получения рентгеновских спектров поглощения. Измерения спектров поглощения массивных тел: режимы выхода фотоэлектронов и выхода флуоресценции.

Дихроизм рентгеновского поглощения.

Фотоэлектронная спектроскопия

Толщина анализируемого слоя. Описание фотоэмиссионного процесса: трехступенчатая и одноступенчатая модели. Экспериментальная техника. Электростатические и магнитные электронные спектрометры. Калибровка спектрометров.

Основные закономерности в рентгеновских фотоэлектронных спектрах. Химический сдвиг. Цикл Борна-Хабера в изоляторах. Степень окисления.

Фотоэмиссия из валентных полос твердых тел. Связь фотоэлектронной спектроскопии с другими методами исследования. Представление рентгеновских спектров эмиссии, поглощения и фотоэлектронных спектров валентной полосы в единой энергетической шкале.

Сателлиты рентгеновских фотоэлектронных спектров. Сателлиты внутренних ($2p$, $3p$) линий сильнокоррелированных систем. Мультиплетности рентгеновских фотоэлектронных спектров. Расщепление $3s$ -полос для соединений переходных элементов (могтовских изоляторов). Плазмоны.

Резонансная фотоэмиссия. Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов. Фотоэлектронная дифракция. Фотоэлектронная спектроскопия со спиновым разрешением. Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением. Оже-спектроскопия.

Количественная Оже-электронная и фотоэлектронная спектроскопия. Послойный анализ.

Обращенная фотоэмиссия и изохроматы.

Синхротронное излучение (СИ)

Открытие СИ. Источники синхротронного излучения. Характеристики

синхротронного излучения. Синхротрон. Ондюлятор, вигглер, поворотный магнит. Современные методы исследования материалов с использованием СИ.

Литература

1. **Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии/ Под ред. Д.Бриггса и М.П.Сиха; Пер. с англ. под ред. В.И.Раховского и И.С.Реза. - М.: Мир, 1987. - 600 с.: ил.**
2. **Баринский Р.Л., Нефедов В. И.**
Рентгено-спектральное определение заряда атомов в молекулах – М.: Наука, 1966. - 247 с. : черт.; 22 см.
3. **Бернер А. И., Гиммельфарб Ф. А., Тарасов В. К.**
Послойный рентгеноспектральный микроанализ поверхностных слоев твердых тел. // Рентгеновская и электронная спектроскопия (Теория, методы и применение в промышленности), Черноголовка, 1985.
4. **Блохин, Михаил Арнольдович.**
Методы рентгено-спектральных исследований - М.: Физматгиз, 1959. - 386 с. : ил.; 23 см.
5. **Блохин М.А.**
Физика рентгеновских лучей. - М.: Гостехиздат, 1953. - 456 с.: ил.
6. **Боровский И.Б.**
Физические основы рентгеноспектральных исследований: Учеб.пособие для гос.ун-тов.- М.: Изд-во Моск.ун-та, 1956. - 463 с.:ил.
7. **Галахов Вадим Ростиславович**
Рентгеновские лучи. Свойства и применение: Учеб.-метод. пособие по физике для студентов ИГиГ УГГУ. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ. - 2008. - 80с.
8. **Электронная спектроскопия/ К.Зигбан, К.Нордлинг, А.Фальман и др.; Пер. с англ.; Под ред. И.Б.Боровского. - М.: Мир, 1971. - 494 с.**
9. **Зеркальная рентгеновская оптика/ А.В.Виноградов, И.А.Брытов, А.Я.Грудский и др.; Под общ.ред. А.В.Виноградова. - Л.: Машиностроение, 1989. - 463 с.: ил. ISBN 5-217-00598-X**

10. **Зимкина Т.М., Фомичев В.А.**
Ультратягкая рентгеновская спектроскопия. - Л.: Изд-во Ленингр.ун-та, 1971. - 132 с.
11. **Курмаев Э.З., Черкашенко В.М., Финкельштейн Л.Д.**
Рентгеновские спектры твердых тел / Отв.ред.С.В.Вонсовский; АН СССР. УНЦ. Ин-т физики металлов. - М.: Наука, 1988. - 175 с.: ил.: табл. ISBN 5-02-000713-7
12. **Лосев Н.Ф.**
Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. - М.: Наука.Гл.ред.физ.-мат.лит., 1969. - 336 с.: ил. - (Физ.-мат.б-ка инженера).
13. **Майзель А., Леонхардт Г., Сарган Р.**
Рентгеновские спектры и химическая связь/ Пер. с нем. Е.А.Жураковского; Под ред. В.В.Немошкаленко. - Киев: Наукова думка, 1981. - 420 с.
14. **Мазалов Л. Н.**
Рентгеновские спектры молекул АН СССР. СО. Ин-т неорган. химии; Отв. ред. А. Н. Николаев Новосибирск Наука. Сибирское отделение 1977 334 с. Библиогр.: с. 313-330
15. **Михайлин В.В.**
Синхротронное излучение в спектроскопии. Учебн. пособие, издательство МГУ, 2007.
16. **Немошкаленко В.В.**
Рентгеновская эмиссионная спектроскопия металлов и сплавов/ АН УССР. Ин-т металлофизики. - Киев: Наукова думка, 1972. - 318 с.:черт.
17. **Немошкаленко В. В., Алешин В.Г.**
Теоретические основы рентгеновской эмиссионной спектроскопии. - Киев : Наук. думка, 1974. - 376, [6] с. : черт.
18. **Немошкаленко В.В., Алешин В.Г.**
Электронная спектроскопия кристаллов/ АН УССР. Ин-т металлофизики. - Киев: Наукова думка, 1976. - 336 с.
19. **Нефедов В.И.**
Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений: Справочник. - М.: Химия, 1984. - 255 с.: ил.

20. **Нефедов Вадим Иванович, Черепин Валентин Тихонович**
Физические методы исследования поверхности твердых тел. - М.: Наука, 1983. - 296 с.: ил. - (Физика, химия и механика поверхности).
21. **Рид С.Дж.Б.**
Электронно-зондовый микроанализ/ Пер.с англ. А.И.Козленкова.
- М.: Мир, 1979. - 423 с.: ил. - Библиогр.: с. 401-411.
22. **Синхротронное излучение. Свойства и применения/ Под ред. К.Кунца; Пер. с англ. под ред. С.П.Капицы и И.М.Гернова.** - М.: Мир, 1981. - 526 с.
23. **Собельман И.И.**
Введение в теорию атомных спектров. - М.: Наука, 1977. - 319 с.
24. **Гернов И.М.**
Обзор. Синхротронное излучение. Успехи физических наук. т.165, № 4, 1995.
25. **Фетисов, Г. В.**
Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ: учебное пособие – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 672 с.
26. **Рентгеновские спектры молекул / Отв. ред. акад. А. В. Николаев ; - Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1977. - 334 с. : ил.; 20 см.**
27. **Электронная и ионная спектроскопия твердых тел/ Дж.Маан,В.Спайсер,А.Либш и др.; Под ред.Л.Фирмэнса и др; Пер.с англ.под ред.В.И. Раховского.** - М.: Мир, 1981. - 467 с.: ил.
28. **An Introduction to Synchrotron Radiation: Techniques and Applications. By Philip Willmott J. Wiley, 2011.**
29. **Hüfner S.**
Photoelectron spectroscopy: principles and applications. – Springer Science & Business Media, 2013.
30. **Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications By David Attwood Cambridge University Press, 2007**
31. **Synchrotron Radiation. Basics, Methods and Applications. Eds Settimio Mobilio, Federico Boscherini, Carlo Meneghini. Springer, 2015.**
32. **The Physics of Synchrotron Radiation. By Albert Hofmann Cambridge University Press, 2004.**