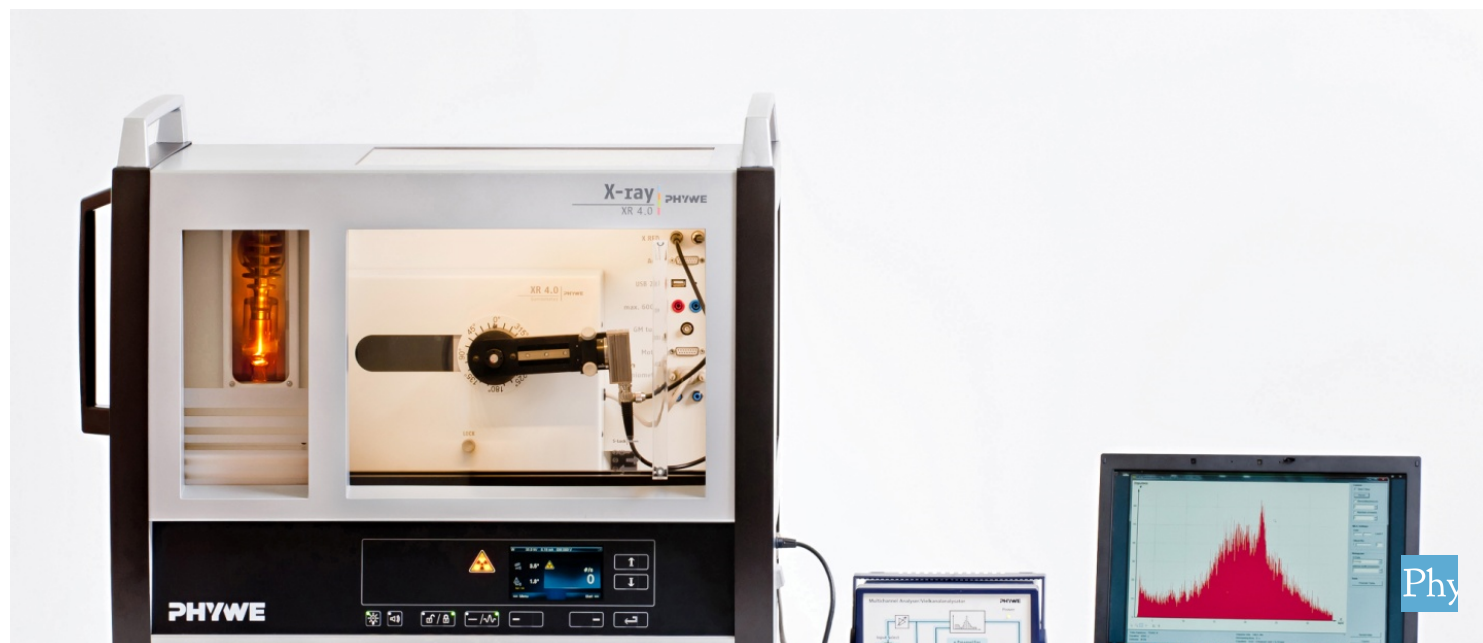


Качественная рентгеновская флуоресцентная спектроскопия металлов - закон Мозли



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



Время выполнения

45+ Минут

PHYWE
excellence in science

Общая информация

Описание

PHYWE
excellence in science

Экспериментальная установка

Большинство применений рентгеновских лучей основано на их способности проходить сквозь вещество. Поскольку эта способность зависит от плотности вещества, становится возможным получение изображений внутренних частей объектов и даже людей. Это находит широкое применение в таких областях, как медицина или безопасность.

Дополнительная информация (1/2)

Предварительные

знания



Принцип



Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, приведены в разделе "Теория".

Различные металлические образцы подвергаются полихроматическому рентгеновскому излучению. Энергия возникающего флуоресцентного излучения анализируется с помощью полупроводникового детектора и многоканального анализатора. Определяется энергия соответствующих характеристических рентгеновских линий, а полученная диаграмма Мозли используется для определения частоты Ридберга и постоянных экранирования.

Дополнительная информация (2/2)

Цель



Задачи



Цель этого эксперимента - исследовать спектры флуоресцентного излучения.

1. Откалибруйте детектор энергии с помощью характеристического излучения вольфрамовой или медной рентгеновской трубки.
2. Запишите спектры флуоресцентного излучения, создаваемого металлическими образцами.
3. Определите значения энергии соответствующих характеристических K_α - и K_β -линий.
4. Определите частоту Ридберга и постоянные экранирования с помощью полученных диаграмм Мозли.

Теория (1/3)

Когда рентгеновские лучи взаимодействуют с веществом, они теряют энергию из-за комптоновского рассеяния, образования пар и фотоэлектрических эффектов. В диапазоне энергии, доступной во время этого эксперимента, фотоэлектрический эффект играет наиболее важную роль. Это означает, что в атоме на одной из нижних оболочек электрон выбрасывается за счет поглощенной энергии фотона.

Теперь свободное пространство занимает электрон одной из высших оболочек. Энергия, выделяющаяся при этом процессе, может быть использована для выброса другого электрона из одной из высших оболочек (эффект Оже) или для генерации фотона (флуоресцентное излучение). В первом приближении незадействованные электроны считаются неподвижными во время этих процессов. Их влияние учитывается введением так называемой постоянной экранирования σ , уменьшающей влияние заряда ядра.

Если пренебречь эффектами релятивистского и спин-орбитального взаимодействия, энергия связи E_n электрона на n -й оболочке атома может быть приближенно описана моделью атома Бора:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} (Z - \sigma)^2 \frac{1}{n^2} \quad (1)$$

Теория (2/3)

С введением частоты Ридберга

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3}$$

$$(1) \text{ приводит к } E_n = -R \cdot h (Z - \sigma)^2 \frac{1}{n^2} \quad (2)$$

Постоянная экранирования зависит от положения возбужденного электрона и от конфигурации других электронов. За счет миграции электрона из n_2 в n_1 ($n_2 > n_1$) и в соответствии с (2), энергия выделяемого излучения равна:

$$E_n = -R \cdot h \left(\frac{(Z - \sigma_{n_1})^2}{n_1^2} - \frac{(Z - \sigma_{n_2})^2}{n_2^2} \right) \quad (3)$$

Масса электрона $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31}$ кг

Элементарный заряд $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл

Постоянная Планка $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Джс

Диэлектрическая проницаемость
 $\epsilon = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м

Атомный номер Z

Постоянная экранирования σ

Главное квантовое число n

Теория (3/3)

Вместо двух постоянных экранирования для перехода от n_2 в n_1 , вводится средняя постоянная экранирования $\sigma = 1, 2$. В результате (3) упрощается до:

$$E_n = -R \cdot h(Z - \sigma_{1,2})^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (4)$$

Если $\sqrt{E}$ строится как функция Z , получается так называемая диаграмма Мозли. С $n_2 = 2$ и $n_1 = 1$ (характеристическая K_α -линия), (4) приводит к:

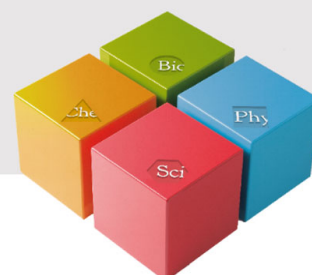
$$\sqrt{E} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{Rh} \cdot Z - \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{Rh \cdot \sigma_{2,1}} \quad (5)$$

Соответственно, следующее относится к переходу от n_3 в n_1 со средней постоянной экранирования (характеристическая K_β -линия):

$$\sqrt{E} = \frac{\sqrt{8}}{2} \sqrt{Rh} \cdot Z - \frac{\sqrt{8}}{2} \sqrt{Rh \cdot \sigma_{3,1}} \quad (6)$$

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ	09057-99	1
2	XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки, 35 кВ	09057-10	1
3	XR4 Съёмная рентгеновская трубка Plug-in Cu tube	09057-51	1
4	XR 4.0 X-ray Рентгеновский анализ материалов, расширение	09165-88	1

PHYWE
excellence in science

Подготовка и выполнение работы

Подготовка (1/2)

PHYWE
excellence in science

- Навинтите переходное кольцо на входную трубку детектора энергии и подключите сигнальный и питающий кабели к соответствующим портам детектора с помощью угловых штекеров.
- Подключите сигнальный и питающий кабели к соответствующим портам в экспериментальной камере рентгеновской установки. На рис.1 порт для сигнального кабеля обозначен красным цветом, а порт для кабеля питания - зеленым. Подключите внешние порты X RED рентгеновской установки (см. рис. 2) к многоканальному анализатору (MCA). Подключите сигнальный кабель к порту "Вход", а питающий кабель - к порту "Детектор энергии рентгеновского излучения" MCA.

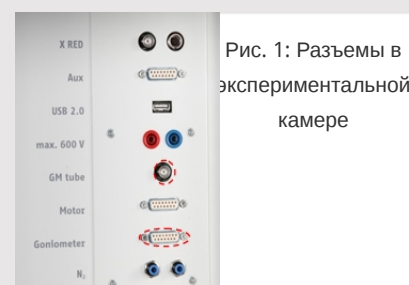


Рис. 1: Разъемы в экспериментальной камере



Рис. 2: Подключение многоканального анализатора

Подготовка (2/2)

- Закрепите детектор энергии в держателе поворотного кронштейна гониометра. Проложите два кабеля достаточной длины, чтобы гониометр мог свободно поворачиваться во всем диапазоне. Подключите многоканальный анализатор и компьютер с помощью USB-кабеля.
- Вставьте трубку с отверстием 2 мм.
- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения слева. Приведите детектор в положение 90° в режиме сопряжения 1:2.

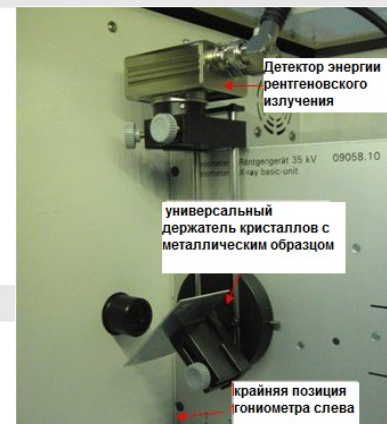


Рис. 3: Установка гониометра

Выполнение работы (1/4)

- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения справа.
- Вставьте трубку с диаметром отверстия 1 мм в выходную трубку рентгеновской трубки.
- Включите рентгеновскую установку и заблокируйте дверцу, переведите детектор в положение 0°. Затем сместите детектор на несколько десятых градуса от нулевого положения, чтобы уменьшить общую скорость.
- Рабочие характеристики вольфрамовой или медной рентгеновской трубки: Выберите анодное напряжение $U_A = 25$ кВ и анодный ток $I_A = 0,02$ мА и подтвердите эти значения нажатием кнопки Enter.
- Включите рентгеновское излучение.

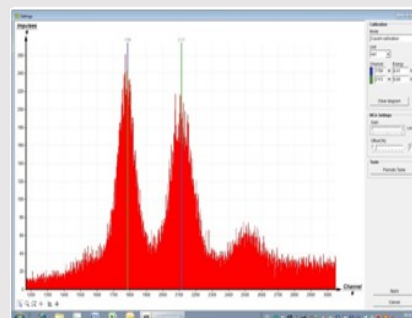


Рис. 4: калибровка многоканального анализатора

Выполнение работы (2/4)

- В программе MEASURE выберите "Многоканальный анализатор" в разделе "Датчик". Затем выберите "Настройки и калибровка". После нажатия кнопки "Калибровка" можно измерить спектр. Скорость счета должна быть < 300 имп/с. Настройки калибровки по энергии: - калибровка по 2 точкам, - единица измерения = кэВ, усиление = 2 - установите смещение так, чтобы подавить низкоэнергетические сигналы шума (обычно достаточно нескольких процентов), см. рис. 4.
- Время измерения: 5 минут. Используйте таймер рентгеновской установки.
- Сделайте две цветные калибровочные линии совпадающими с центрами линий двух характеристических рентгеновских линий. Соответствующие значения энергии (см., например, P2544705) $E(L_3M_5/L_3M_4) = 8,41 \text{ кэВ}$ и $E(L_2N_4) = 9,69 \text{ кэВ}$ вводятся в соответствующие поля, в зависимости от цвета. (Примечание: Поскольку разделение линий L_3M_4 и L_3M_5 не представляется возможным, в качестве энергии линии вводится среднее значение обеих линий).
- Назовите и сохраните калибровку.

Выполнение работы (3/4)

Задание 2: Запись спектра

- Вставьте трубку с отверстием 2 мм.
- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения слева. Приведите детектор в положение 90° в режиме сопряжения 1:2.
- Вставьте металлический образец с помощью универсального держателя кристаллов (образец находится под углом 45°).
- Рабочие характеристики рентгеновской трубки: Выберите анодное напряжение $U_A = 35 \text{ кВ}$ и анодный ток такой, что скорость счета составляет ≤ 300 имп/с.
- Время измерения: 3 минуты (используйте таймер рентгеновской установки).

Выполнение работы (4/4)

Задание 3. Оценка кривых измерения

- Чтобы определить энергию линии, переключитесь с отображения полос на отображение кривых. Для этого нажмите "Параметры отображения", а затем "Интерполяция и прямые линии". 
- Увеличить соответствующий участок линии с помощью функции масштабирования 
- Затем выберите участок кривой с помощью  Откройте окно "Подгонка функции". Затем выберите "Масштабированное нормальное распределение" и подтвердите нажатием кнопки Enter.
- Найдите центр линии нормального распределения с помощью функции "Анализ пиков"  или определите его с помощью функции "Обзор" 



Оценка

Задание 2

Запишите спектры флуоресцентного излучения, генерируемого металлическими образцами.

На рис. 5 показаны спектры флуоресценции различных металлов.

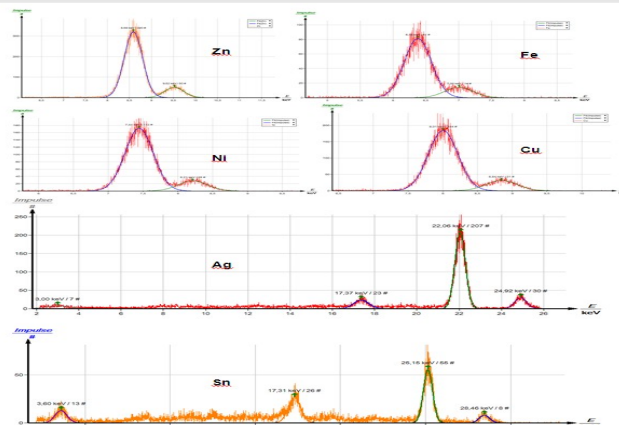


Рис. 5: Спектры флуоресценции различных металлов

Задание 3

A	B	C	D	E	F
Элемент Z		$E(K_\alpha)$	$E(K_\beta)$	$E(K_\alpha)$	$E(K_\beta)$
		эксп., кэВ	эксп., кэВ	табл. , кэВ	табл., кэВ
Fe	26	6.39	7,03	6,397	7,056
Ni	28	7.47	8,26	7,474	8,265
Cu	29	8.04	8,90	8,039	8,905
Zn	30	8.63	9,57	8,627	9,572
Mo*	42	17.38	19,56	17,427	19,608
Ag	47	22.07	24,91	22,076	24,942

* Спектр *Mo* был получен в результате анализа первичного излучения молибденовой рентгеновской трубки и, следовательно, не вызван каким-либо из металлических образцов.

Определите значения энергии соответствующих характеристических K_α - и K_β -линий.

Результаты оценки спектров приведены в таблице. В столбцах \C\ и \D\ указаны значения энергии характеристических K_α - и K_β -линий, которые были получены из спектров, показанных на рисунке 6. Для сравнения, в столбцах \E\ и \F\ приведены соответствующие табличные данные, со средним значением K_{α_1} - и K_{α_2} -линий как энергия K_α -линии.

Задание 4

Определите частоту Ридберга и постоянные экранирования с помощью полученных диаграмм Мозли.

На рис. 6 показаны линии Мозли для характеристических K_α и K_β линий. R можно вычислить с помощью градиентов добавленных линий регрессии.

Градиент линии регрессии от K_α -линии определяется следующим образом:

$$m = \frac{\sqrt{3Rh}}{2}$$

Преобразование дает:

$$m^2 = \frac{4Rh}{4}$$

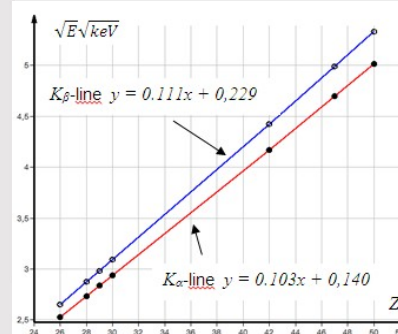


Рис. 6: Линии Мозли K_α - и K_β -линий

Задание 4 (часть 2)

Введите значение для наклона K_α -линии Мозли и переведите кэВ в Дж. Таким образом:

$$R = 3.41 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

При $Z = 0$ и $Rh = 13,6$ эВ пересечения соответствующих линий Мозли приводят к: $\sigma_{2,1} \approx 1.5$ и $\sigma_{3,1} \approx 2.2$.

Значения постоянных экранирования, которые были определены с помощью модели атома Бора, имеют лишь ограниченную применимость, поскольку более подробные расчеты (Хартри) показывают, что радиальное распределение плотности заряда некоторых электронов, например $3p$ -электрона имеют вторичный максимум вблизи ядра. Тем не менее, вероятно, что $\sigma_{2,1} > 1$ и $\sigma_{3,1} > \sigma_{2,1}$. Поскольку во время процесса K_α , оставшийся $1s$ электрон и, кроме того, не вовлеченные $2s$ электроны экранируют заряд ядра, тогда как во время перехода K_β все электроны L -уровня обладают дополнительным экранирующим эффектом.