

Качественная рентгеновская флуоресцентная спектроскопия металлов - закон Мозли



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

2



Время подготовки

45+ Минут



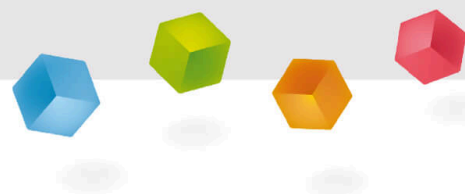
Время выполнения

45+ Минут

This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/6169b837bf0b2d00030ef096>

PHYWE



Общая информация

Описание

PHYWE



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)

PHYWE

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)

PHYWE

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)

PHYWE

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)

PHYWE

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)

PHYWE

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:

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

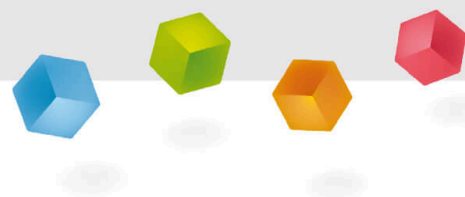
Соответственно, следующее относится к переходу от n_3 в n_1 со средней постоянной экранирования (характеристическая K_β -линия):

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

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



Подготовка и выполнение работы

Подготовка (1/2)

PHYWE

- 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 (МСА). Подключите сигнальный кабель к порту "Вход", а питающий кабель - к порту "Детектор энергии рентгеновского излучения" МСА.

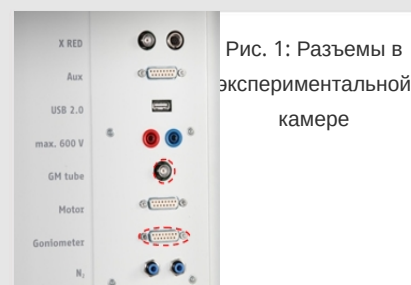


Рис. 1: Разъемы в экспериментальной камере



Рис. 2: Подключение многоканального анализатора

Подготовка (2/2)

PHYWE

- 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.

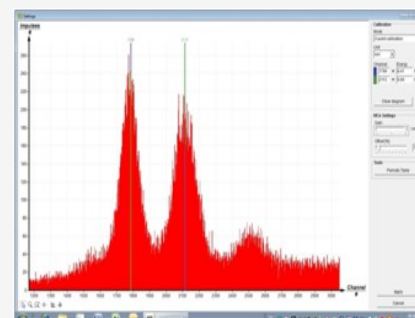


Рис. 4: калибровка многоканального анализатора

Выполнение работы (2/4)

PHYWE

- 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)

PHYWE

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)

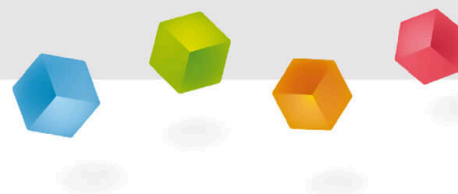
PHYWE

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" 

PHYWE

Оценка



Задание 2

PHYWE

Запишите спектры флуоресцентного излучения, генерируемого металлическими образцами.

На рис. 5 показаны спектры флуоресценции различных металлов.

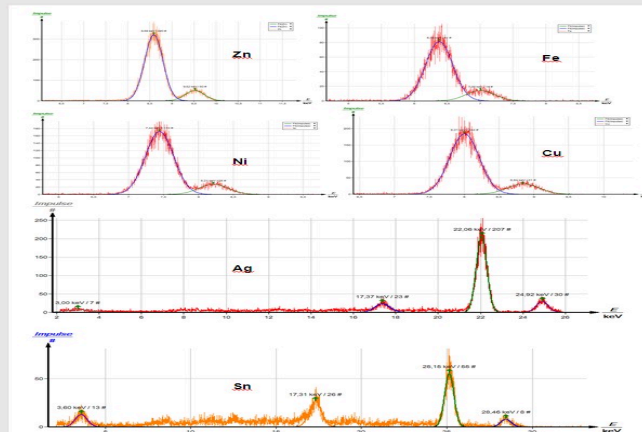


Рис. 5: Спектры флуоресценции различных металлов

Задание 3

PHYWE

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

PHYWE

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:

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

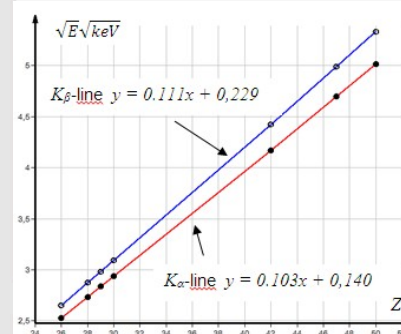


Рис. 6: Линии Мозли K_α - и K_β -линий

Задание 4 (часть 2)

PHYWE

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.