

Разрешение энергетического детектора



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)

PHYWE
excellence in science

Предварительные

знания



Принцип



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

Различные образцы металлов подвергаются полихроматическому рентгеновскому излучению. Полученное флуоресцентное излучение анализируется с помощью полупроводникового детектора и многоканального анализатора. Определяется энергия характеристических рентгеновских линий и их полная ширина на уровне половины максимума. Кроме того, изучается зависимость полной ширины на уровне половины высоты и смещение центра линии в зависимости от скорости счета.

Дополнительная информация (2/2)

PHYWE
excellence in science

Обучение

цель



Задачи

Цель этого эксперимента - научиться работать с многоканальным анализатором.

- Откалибруйте детектор с помощью характеристического излучения медной рентгеновской трубки.
- Определите уровни энергии и полную ширину на половине максимума характеристических K_{α} -линий различных металлов и представьте их графически.
- На примере K_{α} -линии циркона определите и представьте графически полную ширину на половине максимума в зависимости от скорости счета.
- На примере K_{α} -линии циркона определите и представьте графически смещение центра линии в зависимости от скорости счета.

Теория (1/3)

Из-за принципа неопределенности Гейзенберга энергетические уровни термов атома не являются определенными. Вместо этого они имеют конечную, хотя и небольшую ширину, так что естественная ширина рентгеновской линии зависит от суммы естественных ширин энергетических уровней, участвующих в переходе. Ширина линий, например, характеристических рентгеновских линий, которые измеряются с помощью энергетического анализатора, больше естественной ширины линий на несколько порядков. Энергетическое разрешение детектора особенно высоко, если он может четко разделить две близко расположенные линии. Если две близко расположенные линии A и B имеют полную ширину на половине максимума (FWHM = Full Width Half Maximum) ΔA и ΔB , и если их центроиды линий имеют расстояние W (см. рис. 3), то эти две линии могут быть представлены отдельно, если W приблизительно равно $\geq \Delta A + \Delta B$. Если рентгеновская линия энергетического уровня E_0 измеряется с помощью детектора энергии, то разрешающая способность детектора определяется как $E_0 / \Delta E_{FWHM}$. Обратная величина коэффициента называется разрешением. Кратко описан энергетический анализ рентгеновского излучения с помощью полупроводникового детектора на примере Si -pin-детектора (p -контакт - собственный - n -контакт). Падающие рентгеновские кванты с достаточным уровнем энергии создают свободные электроны в кристалле Si за счет фотоэлектрического эффекта. Кинетическая энергия этих электронов коррелирует с энергией рентгеновских квантов.

Теория (2/3)

Помимо фононного возбуждения, электроны также создают электронно-дырочные пары на своем пути через обедненный слой полупроводника. Число этих электронно-дырочных пар является мерой энергии падающего кванта. Дырки и электроны отводятся под действием внешнего напряжения и, таким образом, создается импульс заряда. С другой стороны, величина импульса заряда является мерой энергии падающего кванта рентгеновского излучения. Результирующий амплитудный спектр импульса затем будет проанализирован многоканальным анализатором. Продление линии естественного рентгеновского излучения через детектор имеет множество причин (например, от неупругого рассеяния падающей частицы/кванта в твердом теле до возникновения фотоэлектрического эффекта). Другими причинами являются недостатки многоканального анализатора, например, шум, который влияет на распределение высоты импульса. Таким образом, результаты этого эксперимента относятся ко всей системе, состоящей из детектора и многоканального анализатора. Если рентгеновские линии анализируются с помощью полупроводникового детектора, то их полная ширина на половине максимума ΔE_{FWHM} зависит от их уровня энергии E_0 .

Теория (3/3)

Применяется следующее (см. приложение):

$$\frac{\Delta E_{\text{FWHM}}}{E_0} = 2.35 \sqrt{\frac{E_1}{E_0}} (1)$$

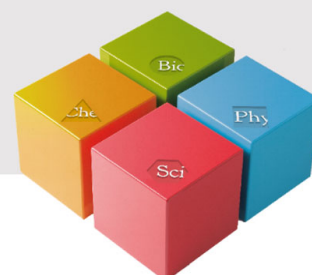
(E_1 = энергия для создания электронно-дырочной пары)

Уравнение (1) приводит к

$$\Delta E_{\text{FWHM}} \propto \sqrt{E_0} \Rightarrow (\Delta E_{\text{FWHM}})^2 \propto E_0$$

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.
- Закрепите детектор энергии в держателе поворотного кронштейна гониометра. Проложите два кабеля достаточной длины, чтобы гониометр мог свободно поворачиваться во всем диапазоне.

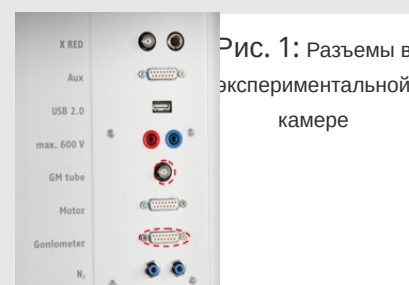


Рис. 1: Разъемы в экспериментальной камере



Рис. 2: Подключение многоканального анализатора

Подготовка (2/2)

PHYWE
excellence in science

- Соедините многоканальный анализатор и компьютер с помощью USB-кабеля.
- Вставьте диафрагму с отверстием 2 мм.
- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения слева. Приведите детектор в положение 90° в режиме сопряжения 2:1 (рис. 3).



Рис. 3: Установка гониометра

Выполнение работы (1/6)

PHYWE
excellence in science

- Переместите блок гониометра и детектор в соответствующие крайние положения справа.
- Вставьте трубку с отверстием 1 мм перед отверстием 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.

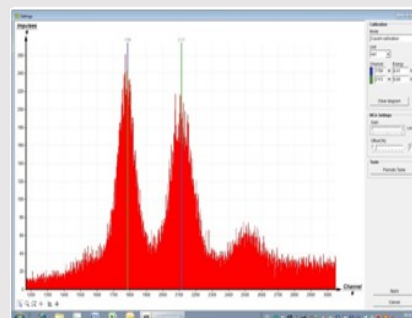


Рис. 4: калибровка многоканального анализатора

Выполнение работы (2/6)

- 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 (3/6)

Запись спектра

- 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 молибденовой или медной рентгеновской трубки: Выберите анодное напряжение $U_A = 35 \text{ кВ}$

1. Относительно задания 1 и 2: Измерение полной ширины на половине максимума в зависимости от функции энергии.

Оцениваются только соответствующие K_α -линии

- Вставьте диафрагму с отверстием 2 мм.

Выполнение работы (4/6)

- Выберите коэффициент усиления 4 (переключитесь на коэффициент усиления 2 для измерений образцов серебра и цинка).
- Время измерения: 5 минут для каждого образца (используйте таймер рентгеновской установки).

2. Относительно задания 4 и 5: Измерение полной ширины на половине максимума и определение смещения центроида линии в зависимости от скорости счета.

Для этого измерения используется только образец цинка и и будет оцениваться только соответствующая ему K_{α} -линия.

- Вставьте диафрагму с отверстием 5 мм.
- Выберите коэффициент усиления 4.
- Настройте необходимую скорость счета с помощью анодного тока.

Выполнение работы (5/6)

- Чтобы определить энергию линии, переключитесь с отображения полос на отображение кривых. Для этого нажмите "Параметры отображения", а затем "Интерполяция и прямые линии". На рисунке 7a показан результат для спектра образца цинка.
- Увеличить соответствующий участок линии с помощью функции масштабирования 
- Затем выберите различные участки кривой с помощью 
- Откройте окно "Подгонка функции" 
- Затем выберите "Масштабированное нормальное распределение" (см. рис. 5b).

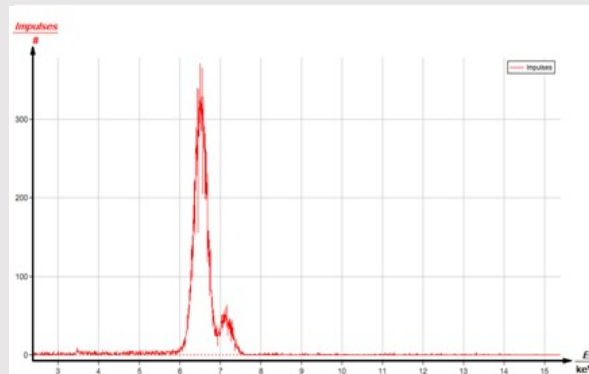


Рис. 5a: Спектр флуоресценции железа

Выполнение работы (6/6)

PHYWE
excellence in science

- Скройте исходную кривую измерения и повторно выберите участки нормального распределения. Найдите центроиды линий нормального распределения с помощью "Анализ пиков"  (см. рис. 5с) или определите их с помощью функции "Обзор" 

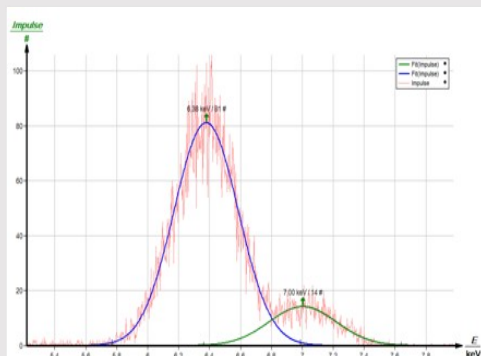
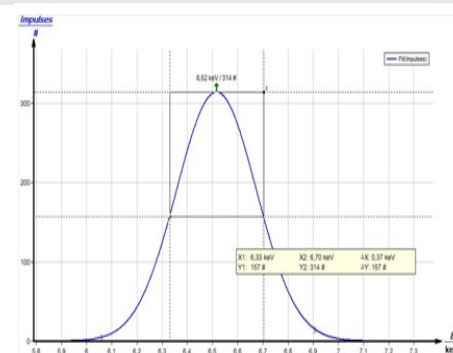


Рис. 5б: Линии флуоресценции железа с подобранным нормальным распределением

Рис. 5с: Нормальное распределение линий флуоресценции железа для определения положения их канала (исходная кривая измерения не показана)



PHYWE
excellence in science



Оценка

Задание 2

Определите уровни энергии и полную ширину на половине максимума характеристических K_α -линий различных металлов и представьте их графически.

В таблице 1 приведены энергии линий $E(K_\alpha)$ (столбец B) используемых элементов, а также соответствующие значения полной ширины на половине максимума ΔE_{FWHM} (столбец C).

A	B	C
Элемент	$E(K_\alpha)$ [кэВ]	ΔE_{FWHM} [кэВ]
Fe	6,39	0,360
Ni	7,46	0,369
Cu	8,03	0,371
Zn	8,62	0,377
Zr	15,78	0,420
Mo	17,50	0,429
Ag	22,17	0,512

Таблица 1: Полная ширина на половине максимума ΔE_{FWHM} как функция энергии линии $E(K_\alpha)$

Задание 2 (часть 2)

На рисунке 6 показан соответствующий график функции. Квадратичная зависимость полной ширины на половине максимума от уровня энергии, которую можно было бы ожидать в соответствии с (2), не может быть четко продемонстрирована, что, вероятно, связано с доступным узкополосным интервалом энергий (приблизительно 6 кэВ - приблизительно 24 кэВ). Добавленные линии регрессии показывают, что для малых интервалов энергии можно предположить приблизительную линейную зависимость.

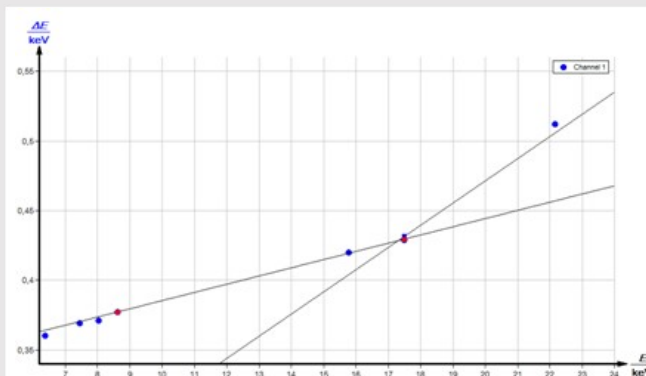


Рис. 6: $\Delta E_{FWHM} = f(E)$

Задание 3

На примере K_{α} -линии циркона определите и представьте графически полную ширину на половине максимума в зависимости от скорости счета,

Зависимость полной ширины на половине максимума и центраида линии флуоресценции от скорости счета может быть особенно хорошо определена с помощью линии циркона K_{α} , поскольку характеристические линии K_{α} - и K_{β} - уже хорошо отделены друг от друга (см. рис. 7a и 7b).

На рисунках 8 и 9 показана зависимость полной ширины на половине максимума ΔE_{FWHM} линии циркона K_{α} в зависимости от скорости счета. Видно, что полная ширина на половине максимума линии растет экспоненциально при увеличении скорости счета. Небольшая и почти постоянная полная ширина на половине максимума может быть достигнута только на небольшом участке при скорости счета приблизительно < 150 имп/с.

Задание 3 (часть 2)

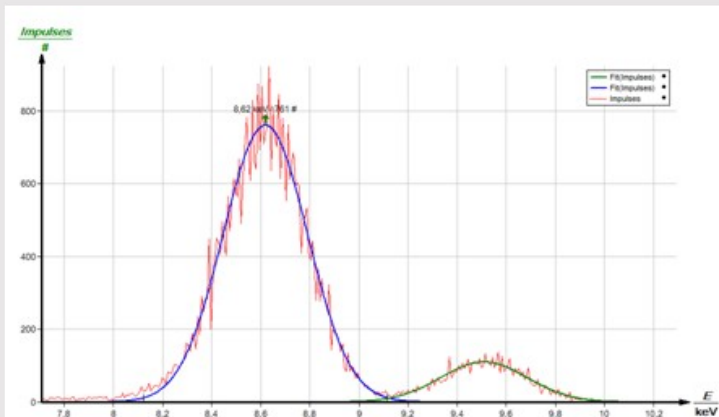


Рис. 7а: Линии флуоресценции циркона с подобранным нормальным распределением

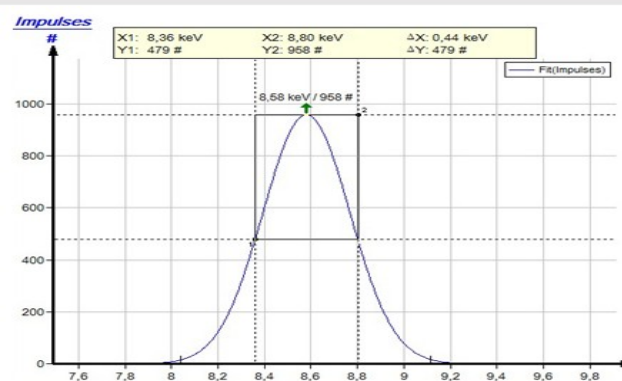


Рис. 7б: Нормальные распределения линии циркона K_{α} для определения энергии линии и полной ширины на половине максимума (исходная кривая измерения скрыта)

Задание 4

PHYWE
excellence in science

Задание 4: На примере K_α -линии циркона определите и представьте графически смещение центра линии в зависимости от скорости счета.

При увеличении скорости счета центроид линии смещается в сторону более низких значений энергии. Это лишь небольшой сдвиг, но его можно четко измерить (см. рис. 8). Результаты на рисунках 8 и 9 показывают, что хорошее разрешение линии может быть достигнуто только при низких скоростях счета. То же самое справедливо и для достаточно точного определения их уровня энергии.

Рис. 8: Полная ширина на половине максимума $\Delta EFWHM$ K_α -линии циркона в зависимости от скорости счета

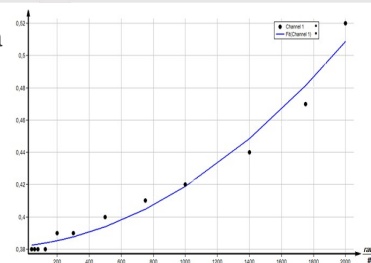
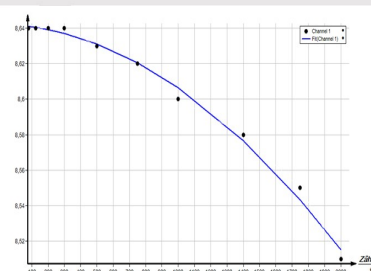


Рис. 9: Смещение центроида K_α -линии циркона в зависимости от скорости счета



PHYWE
excellence in science



Приложение

Примечание

Энергия E_0 падающего рентгеновского кванта расходуется в полупроводнике на образование электронно-дырочных пар и на возбуждение фононов.

Фононным возбуждением для дальнейшего анализа можно пренебречь. Это пренебрежение допустимо, поскольку целью не является определение абсолютного значения разрешающей способности.

Если E_1 - энергия образования электронно-дырочной пары, то среднее число электронно-дырочных пар, образующихся в процессе поглощения равно:

$$\bar{n} = \frac{E_0}{E_1} \quad (3)$$

В упрощенном виде можно предположить, что статистическая флуктуация σ среднего числа пар может быть представлена нормальным распределением.

$$\sigma = \sqrt{\bar{n}} = \sqrt{\frac{E_0}{E_1}} \quad (4)$$

Примечание (часть 2)

(Если же учесть фононное возбуждение, то произведение $E_0 \cdot F$ будет стоять в числителе подкоренного выражения (F = коэффициент Фано = 0,13 для кремния).

Следующее относится к полной ширине на половине максимума нормального распределения:

$$\Delta \bar{n}_{1/2} = \sqrt{8 \ln(2) \cdot \sigma} = 2.35 \cdot \sqrt{\frac{E_0}{E_1}} \quad (5)$$

Если предположить, что спектральная линия с уровнем энергии E_0 также имеет нормальное распределение, то аналогично применяется следующее:

$$\frac{\Delta E_{\text{FWHM}}}{E_0} = \frac{\Delta \bar{n}_{1/2}}{\bar{n}} = 2.35 \cdot \sqrt{\frac{E_0}{E_1}} \quad (6)$$

Для полной ширины на половине максимума ΔE_{FWHM} линии, (4) приводит к:

$$\Delta E_{\text{FWHM}} \propto \sqrt{E_0} \Rightarrow (\Delta E_{\text{FWHM}})^2 \propto E_0 \quad (7)$$