

Комптоновское рассеяние рентгеновских лучей



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

тяжелый



Кол-во учеников

2



Время подготовки

45+ Минут



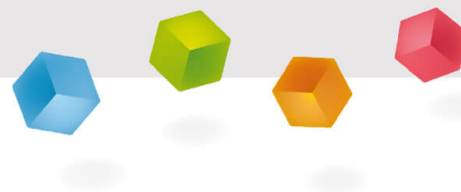
Время выполнения

45+ Минут

This content can also be found online at:

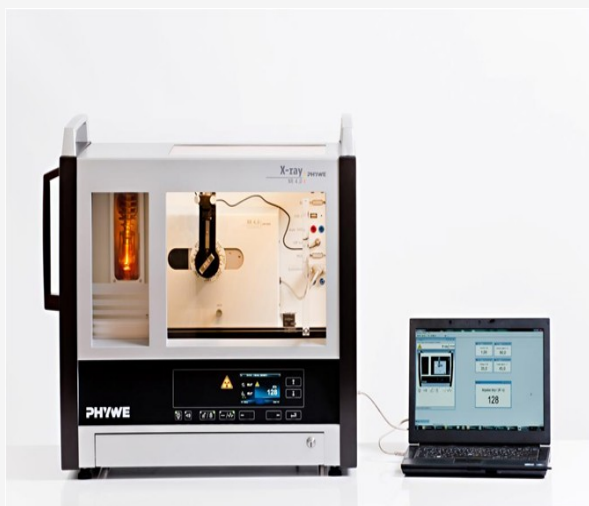
<http://localhost:1337/c/616e6d0875764d0003c8605b>

PHYWE



Общая информация

Описание



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.

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".

В ходе этого эксперимента комптоновская длина волны определяется косвенно с помощью рентгеновских лучей. Для этого рентгеновские лучи рассеиваются на блоке из акрилового стекла. Интенсивность рассеянного излучения измеряется с помощью счетчика. Затем длина волны Комптона определяется на основе характеристик пропускания и кривой пропускания, которая была измерена заранее.

Дополнительная информация (2/2)

PHYWE



Обучение

цель



Задачи

Цель этого эксперимента - определить комптоновскую длину волны электрона

1. Определите коэффициент пропускания алюминиевого поглотителя в зависимости от угла Брэгга и постройте график в зависимости от длины волны излучения.
2. Измерьте интенсивность излучения, рассеянного под углом а) 60° б) 90° и с) 120° на блоке из акрилового стекла с поглотителем и без него.
3. Определите комптоновскую длину волны электрона по кривой пропускания.

Теория (1/4)

PHYWE

Поглощение материала определяется тремя различными процессами взаимодействия. Их относительный вклад зависит от атомного номера (числа заряда ядра) Z и от массового числа A экранирующего материала. Наиболее важными процессами являются:

- Фотоэлектрический эффект; затухание $\approx Z^4/A$
- Комptonовское рассеяние; затухание $\approx Z/A$
- Образование пар; затухание $\approx Z^2/A$

В результате зависящий от энергии коэффициент поглощения материала μ состоит из коэффициента поглощения при образовании пары μ_{P_a} фотоэлектрического эффекта μ_{P_h} и эффекта Комптона μ_{C_0} . Для эффекта экранирования обычно можно пренебречь двумя дополнительными механизмами - ядерным фотоэлектрическим эффектом и нормальным упругим рассеянием.

Теория (2/4)

PHYWE

$$\mu = \mu_{P\alpha} + \mu_{Ph} + \mu_{Co}$$

Для диапазона X-излучения, на котором мы сосредоточились ($E \approx 1-100$ кэВ), величиной $\mu_{P\alpha}$ можно пренебречь (см. рис. 1). Слагаемое μ_{Ph} также не имеет значения для данного эксперимента, поскольку испускаются только электроны, а не фотоны. В результате детектор обнаруживает почти исключительно комптоновскую составляющую.

Схематическое представление эффекта Комптона показано на рис. 2. В результате взаимодействия со свободным электроном в твердом материале падающий фотон теряет энергию и рассеивается от своего первоначального направления под углом рассеяния θ . Ранее покоившийся электрон поглощает дополнительную кинетическую энергию и покидает место столкновения под углом ϕ .

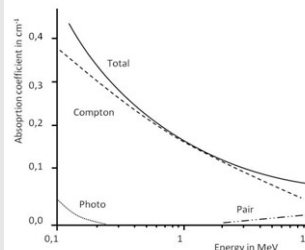


Рис. 1: Коэффициент поглощения алюминия в зависимости от энергии

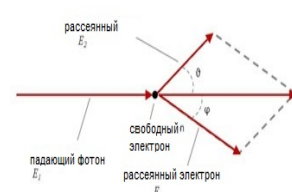


Рис.2: Соотношение импульса и энергии в комптоновском рассеянии

Теория (3/4)

PHYWE

Исходя из закона сохранения энергии и импульса, энергия рассеянного фотона зависит от угла рассеяния:

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_0 c^2} (1 - \cos(\theta))} \quad (1)$$

После столкновения фотон имеет меньшую энергию E_2 и, следовательно, большую длину волны λ_2 чем до столкновения. При $E = h\nu$, (1) можно преобразовать в:

$$\frac{1}{h\nu_2} - \frac{1}{h\nu_1} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos(\theta)) \quad (2)$$

Энергия фотона до или после столкновения:
 E_1 или E_2

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

Скорость света $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

Масса покоя электрона $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг

Угол рассеяния θ

Частота фотонов ν

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 Рентгеновские характеристики, расширение	09135-88	1

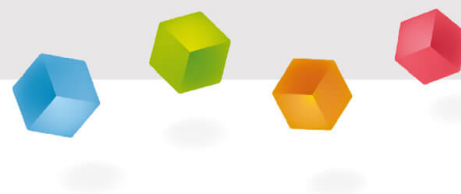
Оборудование

PHYWE

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 Рентгеновские характеристики, расширение	09135-88	1

PHYWE

Подготовка и выполнение работы

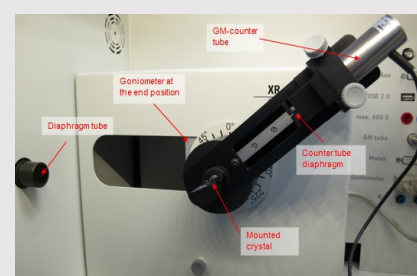
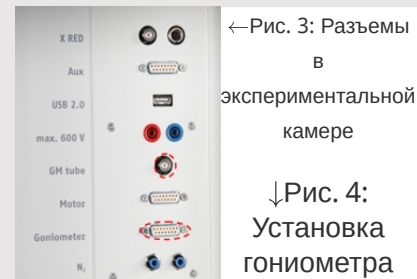


Подготовка

PHYWE

Подключите гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красная маркировка на рис. 3). Блок гониометра с кристаллом анализатора должен находиться в крайнем положении с правой стороны. Закрепите трубку счетчика Гейгера-Мюллера с держателем на заднем упоре направляющих. Не забудьте установить перед счетчиком диафрагму (см. рис. 4). Вставьте диафрагменную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока подключения трубки.

Для калибровки: Убедитесь, что в параметры гониометра введен правильный кристалл. Затем выберите "Меню", "Гониометр", "Автокалибровка". Теперь прибор определит оптимальные положения кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем и положения пиков.



Выполнение работы (1/3)

PHYWE

- Подключите рентгеновскую установку через USB-кабель к USB-порту компьютера (нужный порт рентгеновской установки отмечен на рисунке 5).
- Запустите программу measure. На экране появится виртуальная рентгеновская установка.
- Вы можете управлять рентгеновской установкой, нажимая на различные функции на виртуальной рентгеновской установке и под ней. Кроме того, Вы можете изменить параметры на реальной рентгеновской установке. Программа автоматически примет настройки.



Рис. 5: Подключение компьютера

Выполнение работы (2/3)

PHYWE



Рис. 6: Часть интерфейса программного обеспечения

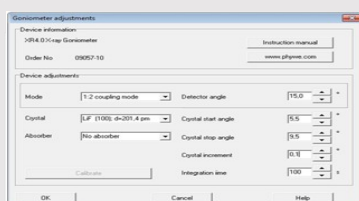


Рис. 7: Настройки гониометра, задание 1

- Нажмите на экспериментальную камеру (см. красную маркировку на рисунке 6), чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите параметры для задачи 1, как показано на рисунке 7.
- Если Вы нажмете на рентгеновскую трубку (см. красную маркировку на рис. 6), можно изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите параметры, как показано на рис. 8.

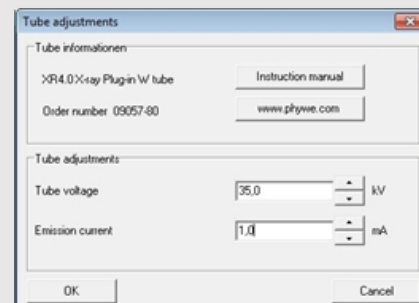
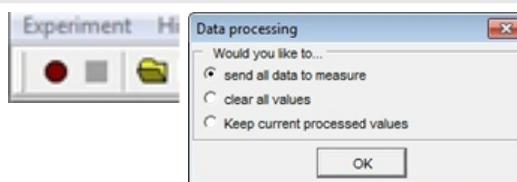


Рис. 8: Настройки напряжения и тока

Выполнение работы (3/3)

PHYWE

- Начните измерение, нажав на красный круг:
- После измерения появится следующее окно:

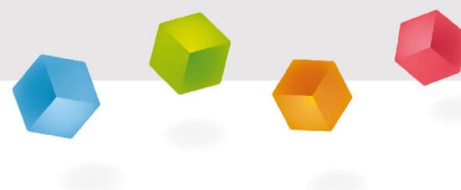


- Выберите первый пункт и подтвердите выбор нажатием кнопки ОК. Теперь измеренные значения будут переданы непосредственно в программу measure.

Обзор настроек гониометра и рентгеновской установки:

- Режим сопряжения 1:2
- Время переключения 100 с (таймер переключения); ширина углового шага $0,1^\circ$
- Диапазон сканирования $5,5^\circ < \theta < 9,5^\circ$
- Анодное напряжение $U_A = 35 \text{ кВ}$; анодный ток $I_A = 1 \text{ мА}$

PHYWE



Оценка

Задание 1

PHYWE

Определите коэффициент пропускания алюминиевого поглотителя в зависимости от угла Брэгга и постройте график в зависимости от длины волны излучения.

На основе углов скольжения θ , а также из соотношения Брэгга, соответствующие длины волн λ равны:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (4)$$

при $d = 201,4$ пм = межплоскостное расстояние LiF – (200) и здесь: $n = 1$.

Для заданного времени стробирования Δt и частоте пульсаций n общее число N составляет $N = n \cdot \Delta t$.

Для измеренного числа N относительная ошибка определяется соотношением:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

Задание 1 (часть 2)

При высоких частотах импульсов необходимо также учитывать мертвое время τ счетной трубки, поскольку она не регистрирует все падающие фотоны. Для счетчика Гейгера-Мюллера, используемого в данном эксперименте, она составляет 90 мкс. Истинная частота импульса n^* может быть получена из измеренной частоты импульса n с помощью:

$$n^* = \frac{n}{1 - \tau n} \quad (6)$$

Скорректируйте измеренную скорость счета в диапазоне $5,5^\circ < \theta < 9,5^\circ$ и с мертвым временем $\tau = 90$ мкс трубки счетчика Гейгера-Мюллера. Это можно сделать с помощью программного обеспечения measure:

$$T(\lambda) = \frac{n_2^* (\text{с поглотителем})}{n_1^* (\text{без поглотителя})}$$

Затем строится график как функция λ (см. рис. 9)

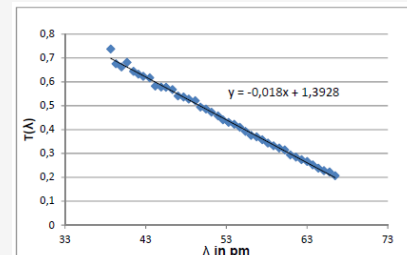


Рис. 9: Кривая пропускания алюминия в узком диапазоне длин волн

Задание 1 (часть 2)

PHYWE

При высоких частотах импульсов необходимо также учитывать мертвое время τ счетной трубки, поскольку она не регистрирует все падающие фотоны. Для счетчика Гейгера-Мюллера, используемого в данном эксперименте, она составляет 90 мкс. Истинная частота импульса n^* может быть получена из измеренной частоты импульса n с помощью:

$$n^* = \frac{n}{1 - \tau n} \quad (6)$$

Скорректируйте измеренную скорость счета в диапазоне $5,5^\circ < \theta < 9,5^\circ$ и с мертвым временем $\tau = 90$ мкс трубки счетчика Гейгера-Мюллера. Это можно сделать с помощью программного обеспечения measure:

$$T(\lambda) = \frac{n_2^* (\text{с поглотителем})}{n_1^* (\text{без поглотителя})}$$

Затем строится график как функция λ (см. рис. 9)

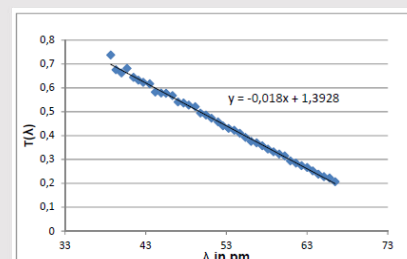


Рис. 9: Кривая пропускания алюминия в узком диапазоне длин волн

Задание 2 и 3

PHYWE

Задание 2 и 3: Измерьте интенсивность излучения, рассеянного под углом а) 60° б) 90° и с) 120° на блоке из акрилового стекла с поглотителем и без него и определите комптоновскую длину волны электрона на основе кривой пропускания.

В этом эксперименте алюминиевый поглотитель действует как своего рода сильный цветной фильтр. Он поглощает более короткие волны меньше, чем более длинные волны. Это означает, что, если он расположен перед рассеивателем, он оказывает иное влияние, чем длинноволновое рассеянное излучение за рассеивателем. Это дает возможность определять длину волны рассеянного и неотраженного излучения. Поместив поглотитель на пути прохождения луча между рентгеновской трубкой и рассеивателем (положение 1, рис. 8), можно определить пропускание $T_1 = n_4/n_3$ еще нерассеянного рентгеновского излучения. Когда поглотитель находится в положении 2, получаете рассеянное рентгеновское излучение. Поскольку в задаче 1 мы уже определили зависимость коэффициента пропускания алюминия от длины волны, то теперь необходимо напрямую сделать вывод о длине волны рентгеновского излучения, которое проходит через поглотитель. Два разных коэффициента пропускания, которые получаются из рассеяния под углом 90°, затем приводят к соответствующим длинам волн.

Результаты

PHYWE

На рис. 9 показана кривая пропускания алюминия в узком диапазоне длин волн, включая уравнение линии регрессии:

$$y = -0.018x + 1.3928$$

Результаты выполнения задания 2 для n_3^* , n_4^* и n_5^* приведены в таблице 1

Пример расчета для рассеяния на 90°:

$$T_1 = \frac{n_4^* \cdot \Delta t}{n_3^* \cdot \Delta t} = 0.347 \pm 1.27\%$$

$$T_2 = \frac{n_5^* \cdot \Delta t}{n_3^* \cdot \Delta t} = 0.315 \pm 1.32\%$$

Отклонение $\pm 1,27\%$ и $\pm 1,32\%$ рассчитывается с помощью уравнения (2) и следующего уравнения (используйте для расчета общее количество взаимодействий N^*):

$$\Delta T_1 = \sqrt{\frac{1}{|\Delta N_4^*|} + \frac{1}{|\Delta N_3^*|}}$$

Таблица 1 результаты выборки

θ	n_3^*	n_4^*	n_5^*	T_1	T_2	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda$
60°	241.121	186.625	76.017	0.347	0.315	58.095	59.871	1.78
90°	178.833	59.315	51.235	0.332	0.286	58.936	61.482	2.56
120°	216.124	70.444	58.81	0.336	0.272	58.716	62.263	3.56