

# Зависимость интенсивности характеристического рентгеновского излучения от силы тока и напряжения на аноде



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



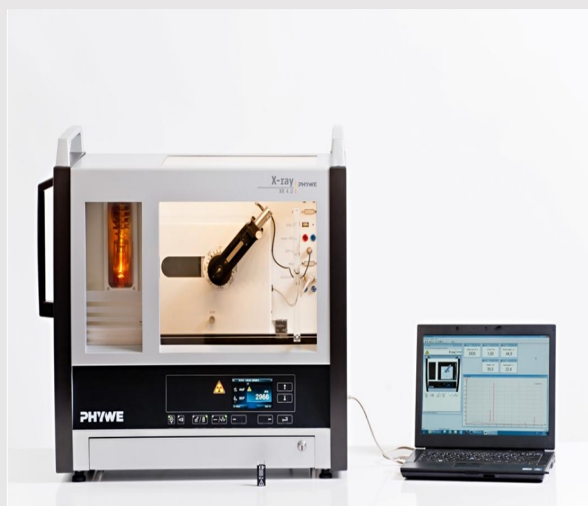
Время выполнения

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".

Рентгеновский спектр рентгеновской трубки с медным анодом выбирается по длине волны с помощью монокристалла LiF в качестве анализатора и регистрируется с помощью трубки-счетчика Гейгера-Мюллера. Интенсивность характеристических линий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  определяется в зависимости от анодного тока и напряжения.

## Дополнительная информация (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science



### Обучение

цель



### Задачи

Цель этого эксперимента - исследовать интенсивность характеристического рентгеновского излучения в зависимости от анодного тока и анодного напряжения.

- Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения молибдена как функцию угла Брэгга и с помощью монокристалла LiF.
- Определите интенсивность характеристических рентгеновских линий в зависимости от анодного напряжения и тока.
- Сравните результаты эксперимента с результатами, которых можно ожидать теоретически.

Параметры для эксперимента с вольфрамовой трубкой приведены в приложении.

## Теория (1/3)

Электроны, выходящие из катода, ускоряются по направлению к аноду под действием напряжения  $U_A$  между катодом и анодом. Благодаря высокой кинетической энергии электроны способны выбрасывать электроны из внутренних оболочек атомов материала анода. Если это происходит на К-оболочке атомов, электрон из более высокой оболочки, например, L- или M-оболочки, может занять освободившееся место, испуская при этом квант рентгеновского излучения. Энергия этого рентгеновского кванта соответствует разности энергий двух оболочек, участвующих в этом процессе. Поскольку эта разность энергий зависит от атома, результирующее излучение также называется характеристическим рентгеновским излучением. Рентгеновское излучение, возникающее при переходе от L-оболочки к К-оболочке, называется  $K_\alpha$ -излучением, а излучение, возникающее после перехода от M-оболочки к К-оболочке, называется  $K_\beta$ -излучением.

Интенсивность  $I_K$  излучения равна:

$$I_K = B \cdot I_A (U_A - U_K)^{1.5} \quad (1)$$

( $I_A$  - анодный ток,  $U_A$  - анодное напряжение,  $B = \text{const}$  и  $U_K$  - потенциал ионизации К-оболочки).

## Теория (2/3)

Глубина проникновения ионизирующих электронов в материал анода, а также глубина выхода генерируемых рентгеновских лучей ограничены. Когда они оба достигают своего максимума, соотношение, указанное в (1), теряет свою силу.

В соответствии с рис. 1, закон Брэгга применим к конструктивной интерференции:

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

( $d$  - межплоскостное расстояние;  $n = 1, 2, 3, \dots$ )

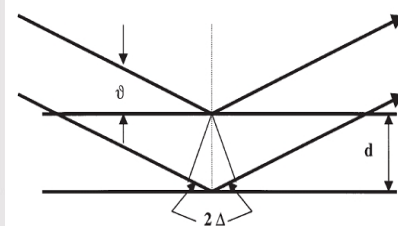


Рис. 1: Брэгговское рассеяние на паре плоскостей решетки

## Теория (3/3)

Если известно межплоскостное расстояние  $d$ , то с помощью угла скольжения  $\theta$  можно определить длину волны  $\lambda$ . Энергия излучения возникает в результате:

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

Объединяя (2) и (3), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (4)$$

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

Скорость света  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Межплоскостное расстояние LiF (200)  $d = 2,014 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Эквивалент 1 эВ =  $1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

## 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 Физика твердого тела, расширение	09125-88	1
	альтернативно XR 4.0 базовый набор	09117-88	1

**PHYWE**  
excellence in science



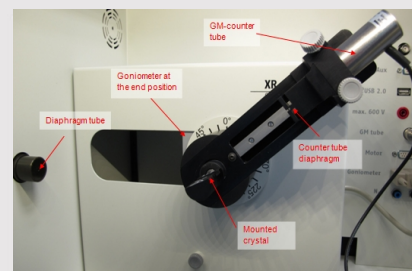
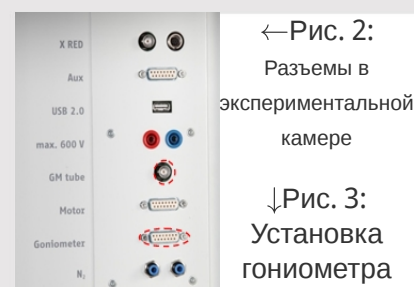
# Подготовка и выполнение работы

## Подготовка

**PHYWE**  
excellence in science

Подключите гониометр и счетную трубку Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красная маркировка на рис. 2). 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 диафрагму перед счетной трубкой (см. рис. 3). Вставьте трубку с диафрагмой диаметром 2 мм в выходное отверстие съемного блока 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 (1/4)

- Подключите рентгеновскую установку через USB-кабель к USB-порту компьютера (нужный порт рентгеновской установки отмечен на рисунке 5).
- Запустите программное обеспечение "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. 4: Подключение компьютера

## Выполнение работы (2/4)



Рис. 5:  
Часть  
интерфейса  
ПО

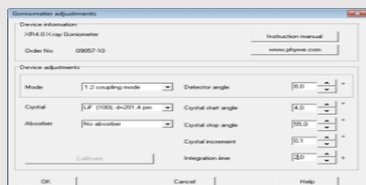


Рис. 6: Настройки  
гониометра (кристалл LiF)

- Нажмите на экспериментальную камеру (см. красную маркировку на рис. 5), чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите параметры, как показано на рис. 6, для кристалла LiF.
- Если вы нажмете на рентгеновскую трубку (см. красную маркировку на рис. 5), вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите параметры, как показано на рис. 7.

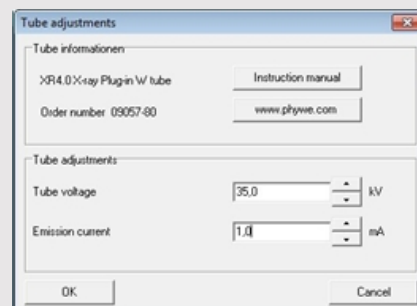
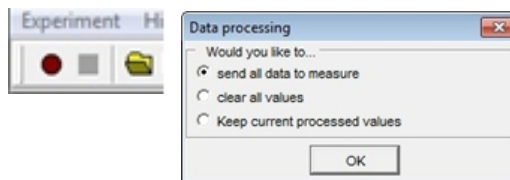


Рис. 7: Настройки  
напряжения и силы тока



## Выполнение работы (3/4)

- 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.
- В конце данного руководства Вы найдете краткое введение в оценку полученных спектров.

## Выполнение работы (4/4)

### Определите интенсивность характеристических рентгеновских линий меди как функцию анодного напряжения и тока.

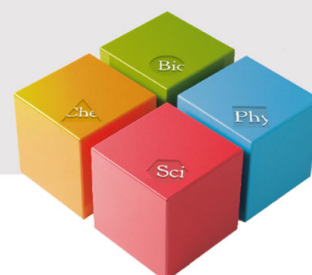
- Нажмите на экспериментальную камеру (см. красную маркировку на рис. 5), чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите диапазон сканирования  $19^{\circ}$ - $24^{\circ}$ .
- Если Вы хотите определить интенсивность в зависимости от анодного тока, запишите спектр с различными анодными токами. Параметры:  $U_A = 35 \text{ кВ} = \text{const}$ ;  $I_A = 35 \text{ кВ} \dots 11 \text{ кВ}$  с шагом 2-3 кВ.
- Если Вы хотите определить интенсивность в зависимости от анодного напряжения, запишите спектр с различными анодными напряжениями. Параметры:  $I_A = 1 \text{ мА} = \text{const}$ ;  $U_A = 1 \text{ мА} \dots 0,1 \text{ мА}$  с шагом 0,1 мА.
- Оценка такая же, как и для задания 1.

### Обзор настроек гониометра и рентгеновской установки:

- Режим сопряжения 1:2
- Время выхода 2 с; ширина углового шага  $0,1^{\circ}$

### Для записи полного спектра:

- Диапазон сканирования  $4^{\circ}$ - $55^{\circ}$  (монокристалл LiF)
- Анодное напряжение  $U_A = 35 \text{ кВ}$ ; анодный ток  $I_A = 1 \text{ мА}$



# Оценка

## Задание 1

**Задача 1: Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристалла LiF.**

На рис. 8 показан рентгеновский спектр меди до интерференции второго порядка. В таблице приведены результирующие углы скольжения  $\theta$  характеристических линий, а также соответствующих длин волн, которые были рассчитаны на основе (2).

	n = 1		n = 2	
	$\theta/^\circ$	$\lambda/\text{pm}$	$\theta/^\circ$	$\lambda/\text{pm}$
<b>Cu (Z=29)<math>K_\alpha</math></b>	22.6	154.8	50.2	154.7
<b>Cu (Z=29)<math>K_\beta</math></b>	20.4	140.4	43.9	139.6

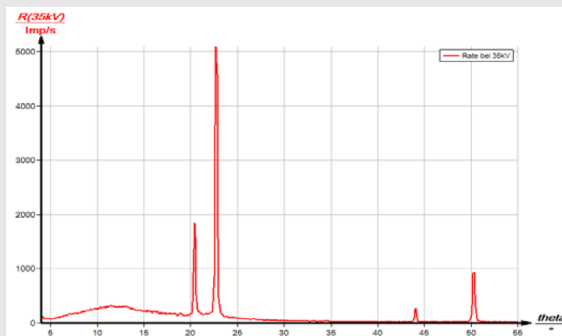


Рис. 8: Рентгеновский спектр меди, монокристалл LiF в качестве анализатора

## Задание 2

**PHYWE**  
excellence in science

**Задание 2: Определите интенсивность характеристических рентгеновских линий меди в зависимости от анодного напряжения и тока.**

### Интенсивность в зависимости от анодного напряжения

На рис. 9 показан соответствующий диапазон сканирования с частотой импульсов для различных выбранных анодных напряжений. На рис.10 нижние кривые показывают измеренную интенсивность (частоту импульсов) характеристических линий (максимум интенсивности линий) в зависимости от анодного тока  $I_A$  при постоянном анодном напряжении  $U_A = 35$  кВ. Тем не менее, слишком высокая частота импульсов приводит к насыщению счетчика Гейгера-Мюллера. Отклонение кривых измерения от ожидаемой линейности может быть устранено путем учета мертвого времени трубки Гейгера-Мюллера при высоких значениях частоты импульсов. Эти скорректированные значения представлены верхними кривыми на рис. 10.

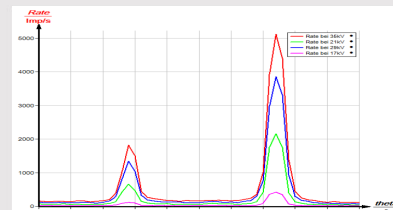


Рис. 9: Диапазон сканирования  $19^\circ < \theta < 24^\circ$  при разных анодных напряжениях

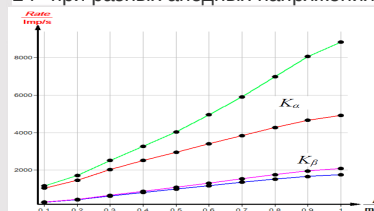


Рис. 10: Интенсивность  $K_\alpha$  и  $K_\beta$  линии ( $n = 1$ ) в зависимости от  $I_A$ .

## Задание 2 (часть 2)

**PHYWE**  
excellence in science

Если  $\tau$  ( $\tau \approx 90 \mu\text{s}$ ) - мертвое время трубки счетчика Гейгера-Мюллера и  $N_0$  - измеренная частота импульса, то истинная частота импульсов  $N$  равна:

$$N = \frac{N_0}{1 - \tau \cdot N_0}$$

### Интенсивность в зависимости от анодного тока

На рис. 11 показан соответствующий диапазон сканирования с частотой импульсов для разных выбранных анодных токов.

На рис. 12 показан ход интенсивности двух характеристических линий в зависимости от анодного напряжения  $U_A$  ( $I_A = \text{const} = 1$  мА). Нижние кривые представляют измеренные частоты импульсов, а верхние кривые показывают частоты импульсов, скорректированные с учетом мертвого времени счетчика Гейгера-Мюллера.

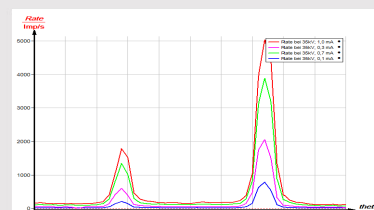


Рис.11: Диапазон сканирования  $19^\circ < \theta < 24^\circ$  при различных анодных

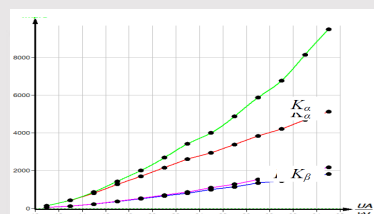


Рис. 12: Интенсивность  $K_\alpha$  и  $K_\beta$  линии ( $n = 1$ ) в зависимости от  $U_A$ .

## Задание 3

### Задание 3: Сравните результаты эксперимента с результатами, которые можно ожидать теоретически.

Если сравнить экспериментальные результаты с результатами, которые можно ожидать теоретически, то линейная зависимость между  $U_A - U_K$  и частота импульса в (1) подтверждается. Если построить график частоты импульсов характеристических линий на рис. 12 в зависимости от  $(U_A - U_K)^{1.5}$  (с  $U_K = 8,979$  кэВ для меди, см. эксперимент P2540105), то получается прямая линия.

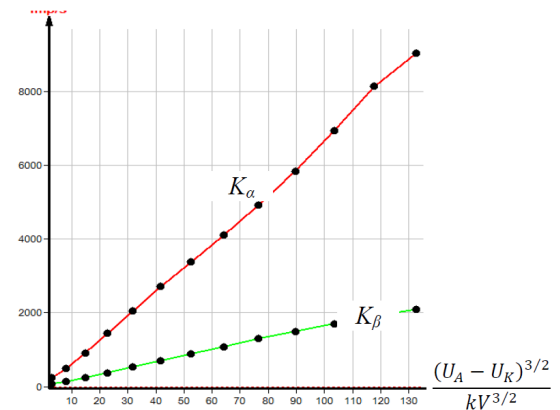


Рис. 13: Истинная частота импульса  $K_\alpha$  и  $K_\beta$  линии в зависимости от  $(U_A - U_K)^{1.5}$ ; ( $I_A = \text{const} = 1$  мА)

## Примечание

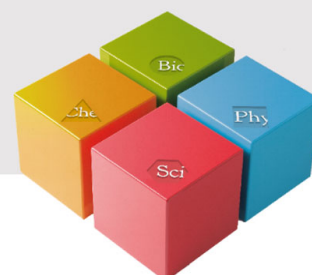
### Программное обеспечение measure

С помощью программного обеспечения measure пики в спектре могут быть определены довольно легко:

- Нажмите кнопку "Маркировка" и выберите область для определения пика.
- Нажмите на кнопку "Анализ пика".
- Появится окно "Анализ пиков" (см. рис. 14). Затем нажмите "Рассчитать".
- Если вычислены не все желаемые пики (или их слишком много), скорректируйте допуск на погрешность.
- Выберите «Визуализировать результаты», чтобы отображать данные пиков непосредственно в спектре.



Рис. 14: Автоматический анализ пиков с помощью measure.



# Приложение

## Выполнение работы

Процедура с использованием  
вольфрамовой трубки:

**Задача 1: Запишите весь спектр:**

**Обзор настроек гониометра и  
рентгеновской установки:**

- Режим сопряжения 1:2
- Время выхода 5 - 6 с; ширина углового шага  $0,1^\circ$
- Диапазон сканирования  $4^\circ$ - $80^\circ$  (монокристалл LiF)
- $U_A = 35$  кВ;  $I_A = 1$  мА

**Задание 2: Определите интенсивность отдельной  
линии**

Для оценки изучите  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  линии, которые отображаются как одна линия

**Определение интенсивности характеристических  
линий в зависимости от  $U_A$  и  $I_A$ .**

- Время выхода 3 с; ширина углового шага  $0,1^\circ$
- Диапазон сканирования  $4^\circ$ - $25^\circ$  (монокристалл LiF)
- $U_A = 35$  кВ;  $I_A = 1$  мА ...  $0,1$  мА с шагом  $0,1$  мА
- $I_A = 1$  мА;  $U_A = 35$  кВ ...  $11$  кВ с шагом 2 - 3 кВ

## Теория и оценка

Поскольку энергия К-оболочки составляет примерно 70 кэВ, максимально доступная энергия первичного пучка рентгеновского блока 35 кэВ недостаточна для возбуждения К-оболочки. Ионизировать можно только уровень L (P2542805 включает соответствующую диаграмму энергетических уровней).

Для оценки, рассматриваются  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  линии. Они являются результатом  $L_3M_5/L_3M_4$  переходов. Эти две линии настолько близки друг к другу, что их невозможно разделить, а скорее они выглядят как одна линия.

Оценка соответствует оценке меди, но в данном случае только с одной единственной линией. Для задачи 3 используется потенциал ионизации оболочки  $L_3$   $U_K = 10,206$  кэВ, поскольку переход происходит в эту оболочку.

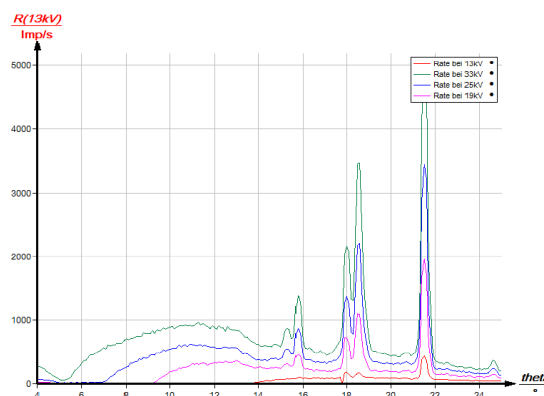


Рис. 15: Диапазон сканирования  $4^\circ < \theta < 25^\circ$  при различных анодных напряжениях для вольфрамовой трубки