

# Характеристическое рентгеновское излучение вольфрама



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**

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

### Принцип



Рентгеновский спектр рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом генерирует рентгеновское излучение, которое выбирается с помощью монокристалла в зависимости от угла Брэгга. Счетчик Гейгера-Мюллера измеряет интенсивность излучения. Углы скольжения характеристических рентгеновских линий используются затем для определения энергии.

## Дополнительная информация (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

### Обучение

**цель**

### Задачи

Цель этого эксперимента - исследовать характеристическое рентгеновское излучение вольфрама.

- Запишите рентгеновский спектр, испускаемый вольфрамовым анодом, в зависимости от угла Брэгга и с помощью монокристалла LiF, который используется в качестве анализатора.
- Определите значения энергии характеристического рентгеновского излучения вольфрама на основе спектров и сравните их со значениями, которые были определены на основе соответствующей диаграммы уровней энергии.

## Теория (1/3)

**PHYWE**  
excellence in science

Когда электроны попадают на металлический анод рентгеновской трубки с высокой кинетической энергией, генерируются рентгеновские лучи с непрерывным распределением энергии (тормозное излучение). На тормозное излучение накладываются дополнительные дискретные линии. Если атом материала анода ионизируется, например, в более глубокой оболочке электронным ударом, электрон из более высокой оболочки может занять теперь свободное место, испуская, среди прочего, квант рентгеновского излучения. Энергия этого рентгеновского кванта соответствует разности энергий двух уровней, участвующих в этом процессе. Поскольку разность энергий зависит от атома, генерируемое этим процессом излучение также называют характеристическим рентгеновским излучением. Когда рентгеновские лучи с длиной волны  $\lambda$  падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения  $\theta$ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, конструктивно интерферируют друг с другом при условии, что их разность хода  $\Delta$  соответствует целому числу длин волн (см. рис. 1). Это условие представлено так называемым законом Брэгга:

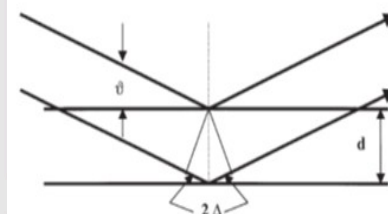


Рис. 1: Брэгговское рассеяние на плоскостях решетки

## Теория (2/3)

**PHYWE**  
excellence in science

$$2d \sin(\theta) = n\lambda(1)$$

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

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

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda} (2)$$

Объединяя (2) и (1), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} (3)$$

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

## Теория (3/3)

На рис. 2 показана диаграмма энергетических уровней атома вольфрама. Поскольку энергия К-оболочки составляет приблизительно 70 кэВ, максимально доступная энергия первичного пучка рентгеновского блока 35 кэВ недостаточна для возбуждения К-оболочки. Ионизация возможна только для L-уровня.

Для наглядности на рис. 2 показаны L-переходы для дипольного излучения (см. 4), которые возможны в соответствии с квантово-механическими правилами отбора только до N-оболочки. Квадрупольным излучением с гораздо меньшей интенсивностью можно пренебречь.

$\Delta l = \pm 1$  и  $\Delta j = 0, \pm 1$  правила отбора для дипольного излучения (4)

( $l$  = орбитальный угловой момент,  $j$  = полный угловой момент)

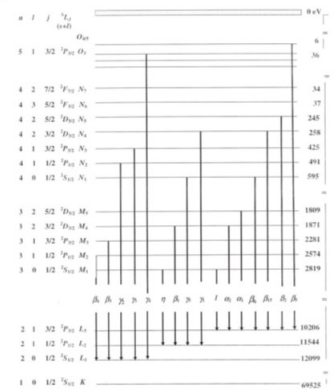


Рис. 2: Схематическое изображение энергетического уровня вольфрама ( $Z = 74$ )

## Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	<a href="#">XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ</a>	09057-99	1
2	<a href="#">XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки, 35 кВ</a>	09057-10	1
3	<a href="#">XR4 Съёмная рентгеновская трубка Plug-in W tube</a>	09057-81	1
4	<a href="#">XR 4.0 X-ray Физика твердого тела, расширение</a>	09125-88	1

**PHYWE**  
excellence in science



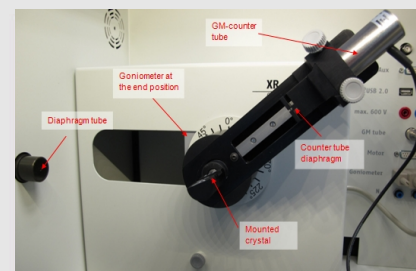
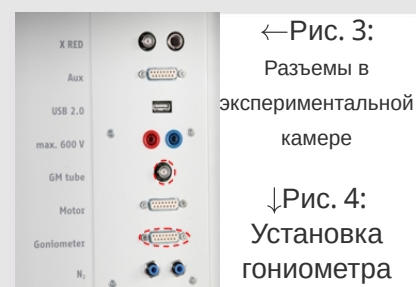
# Подготовка и выполнение работы

## Подготовка

**PHYWE**  
excellence in science

Подключите гониометр и счетную трубку Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красная маркировка на рис. 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 диафрагму перед счетной трубкой (см. рис. 4). 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 (1/3)

**PHYWE**  
excellence in science

- 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 самой рентгеновской установке. Программа автоматически примет настройки.



Рис. 5: Подключение компьютера

## Выполнение работы (2/3)

**PHYWE**  
excellence in science

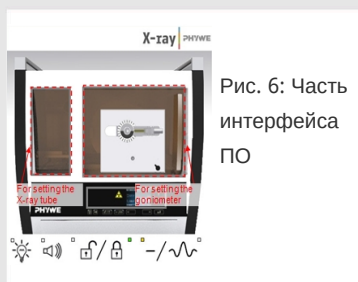


Рис. 6: Часть интерфейса ПО

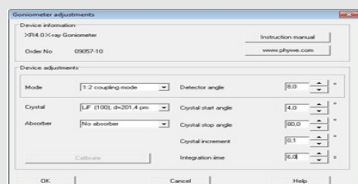


Рис. 7: Настройки гониометра

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

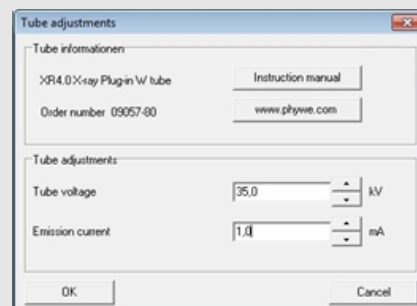


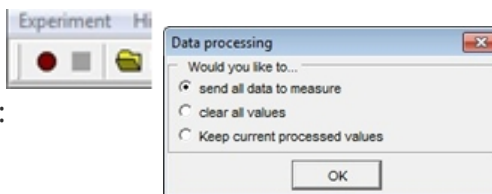
Рис. 8: Настройки напряжения и силы тока



## Выполнение работы (3/3)

**PHYWE**  
excellence in science

- 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.

### Обзор настроек гониометра и рентгеновской установки:

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

**PHYWE**  
excellence in science



## Оценка

## Задание 1

**PHYWE**  
excellence in science

**Анализируйте интенсивность рентгеновского излучения вольфрама в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристалла LiF.**

На рисунке 9 показан рентгеновский спектр вольфрама, который был проанализирован с помощью монокристалла LiF. Четкие линии накладываются на непрерывный тормозной спектр. На углы скольжения этих линий не влияет анодное напряжение. Это позволяет идентифицировать их как характеристические рентгеновские линии. Оценка (см. таблицу) показывает, что существуют только линии первого порядка в угловом диапазоне  $10^\circ < \theta < 30^\circ$ . Они достигают наивысшего уровня интенсивности. Диапазон  $30^\circ < \theta < 80^\circ$  включает линии с  $n = 2$  и  $n = 3$ . Разделение линий с номерами 2 и 10 на  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  или  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  можно наблюдать только в диапазоне при  $n = 2$ . Линия под номером 11 может быть четко отнесена к  $K_\alpha$  линии меди. Маленький круглый вольфрамовый анод фактически встроен в цилиндрический медный стержень, на который также частично попадают электроны.

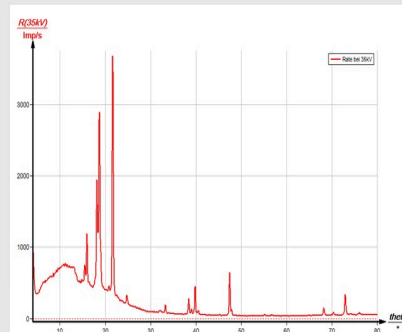


Рис. 9: Рентгеновский спектр вольфрама

## Задание 2

**PHYWE**  
excellence in science

**Определите значения энергии характеристического рентгеновского излучения вольфрама на основе спектров и сравните их со значениями, которые были определены на основе соответствующей диаграммы уровней энергии.**

В столбце В таблицы показаны углы скольжения  $\theta$ , определенные с помощью рис. 9, а также значения энергии для характеристических рентгеновских линий вольфрама, которые были рассчитаны с помощью уравнения (4). Длина волны  $\lambda$  и соответствующие энергии  $E_{\text{exp}}$ , рассчитанные с помощью (1) и (3), показаны в колонках D и E. В колонке H показаны значения энергии  $E_{\text{lit}}$ , рассчитанные с помощью рис. 8. Соответствие между двумя значениями энергии дает основания для отнесения линий к различным переходам. Как и ожидалось, существуют только те линии, которые соответствуют правилам отбора. Невозможно выделить все возможные переходы, так как для некоторых из них интенсивность слишком мала.

## Задание 2 (часть 2)

A	B	C	D	E	F	G	H
Линия	$\theta$ [°]	$n$	$\lambda$ [нм]	$E_{\text{exp}}$ [эВ]	Линия	Переход	$E_{\text{lit}}$ [эВ]
1	14.69	1	102.15	12138	$\gamma_4$	$L_1O_3$	12063
2	15.23	1	105.81	11717	$\gamma_{3/2}$	$L_1N_3/L_1N_2$	
3	15.74	1	109.27	11346	$\gamma_1$	$L_2N_4$	11286
4	16.28	1	112.92	10980	$\gamma_5$	$L_2N_1$	10949
5	17.92	1	123.94	10003	$\beta_2$	$L_3N_5$	9961
6	18.21	1	125.87	9849	$\beta_3$	$L_1M_3$	9818
7	18.47	1	127.61	9716	$\beta_1$	$L_2M_4$	9673
8	18.79	1	129.74	9556	$\beta_4$	$L_1M_2$	9525
9	20.60	1	141.72	8748	$\eta$	$L_2M_1$	8725

A	B	C	D	E	F	G	H
Линия	$\theta$ [°]	$n$	$\lambda$ [нм]	$E_{\text{exp}}$ [эВ]	Линия	Переход	$E_{\text{lit}}$ [эВ]
10	21.47	1	147.43	8409	$\alpha_{1/2}$	$L_3M_5/L_3M_4$	
11	22.51	1	154.21	8040	Cu-K $\alpha_{1/2}$		
12	24.57	1	167.49	7402	l	$L_3M_1$	7387
13	31.80	2	106.13	11682	$\gamma_3$	$L_1N_3$	11674
14	32.01	2	106.76	11613	$\gamma_2$	$L_2N_4$	11608
15	33.03	2	109.79		$\gamma_1$	$L_3N_5$	11286
16	38.12	2	124.33	9972	$\beta_2$	$L_1M_3$	9961
17	38.80	2	126.20	9824	$\beta_3$	$L_1M_2$	9818
18	39.52	2	128.16	9674	$\beta_1$	$L_2M_4$	9673

## Задание 2 (часть 3)

A	B	C	D	E	F	G	H
Линия	$\theta$ [°]	$n$	$\lambda$ [нм]	$E_{\text{exp}}$ [эВ]	Линия	Переход	$E_{\text{lit}}$ [эВ]
19	40.24	2	130.10	9529	$\beta_4$	$L_1M_2$	9525
20	47.12	2	147.58	8401	$\alpha_1$	$L_3M_5$	8397
21	47.58	2	148.68	8339	$\alpha_2$	$L_3M_4$	8335
22	54.88	3	109.71	11300	$\gamma_1$	$L_2N_4$	11286
23	56.47	2	167.88	7385	l	$L_3M_1$	7387
24	67.90	3	124.28	9976	$\beta_2$	$L_3N_5$	9961
25	70.09	3	126.12	9831	$\beta_3$	$L_1M_3$	9818
26	72.66	3	128.04	9683	$\beta_1$	$L_2M_4$	9673
27	75.79	3	130.03	9535	$\beta_4$	$L_1M_2$	9525



Таблица 1

## Примечание

**PHYWE**  
excellence in science

### 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.

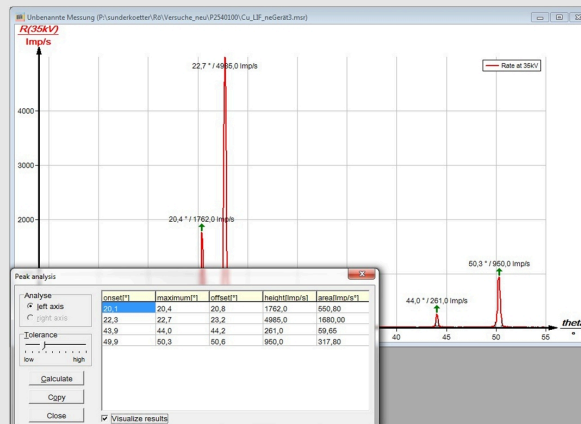


Рис. 10: Автоматический анализ пиков с помощью measure.