

# К-альфа дублетное расщепление рентгеновских лучей молибдена / тонкая структура



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твердый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



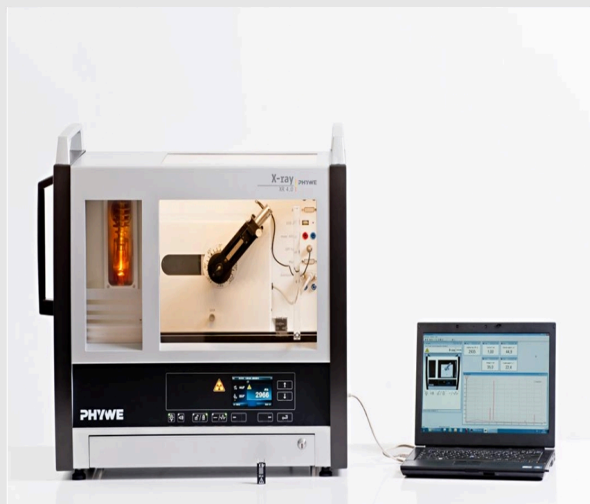
Время выполнения

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



Рентгеновское излучение, генерируемое рентгеновской трубкой с молибденовым анодом, выбирается в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристалла и регистрируется трубкой-счетчиком Гейгера-Мюллера. Полученные рентгеновские линии используются для определения разделения линий дублета  $K_{\alpha}$ , а также их соответствующих интенсивностей.

## Дополнительная информация (2/2)

**PHYWE**  
excellence in science

### Обучение

цель



### Задачи

Цель этого эксперимента - исследовать характеристическое рентгеновское излучение молибдена.

1. Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения молибдена в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристалла LiF.
2. Определите длины волн и интенсивности линий  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  и сравните полученные значения с теоретическими.

## Теория (1/3)

На рисунке 1 показана диаграмма уровней энергии молибдена ( $Z = 42$ ).

Когда электрон удаляется из К-оболочки атома, образовавшаяся дырка заполняется электроном из более высокой оболочки. Разность энергий энергетических уровней, участвующих в этом процессе, может быть преобразована в рентгеновское излучение. Когда s-электрон пропадает из К-оболочки, образуется  $^2S_{1/2}$ . То же самое относится и к оболочке  $L_1$ . Отсутствие p-электрона на оболочке  $L_2$  или  $L_3$  приводит к термам  $^2P_{1/2-3/2}$  или  $^2P_{3/2}$ . Поскольку квантово-механические правила отбора допускают только излучательные переходы,  $\Delta l = \pm 1$  переход  $L_1 \rightarrow K$  не допускается. Действительно, вместо трех линий  $K_\alpha$ , можно наблюдать только две линии  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$ . Поскольку условия  $^2P_{1/2}$  и  $^2P_{3/2}$  четырехкратно и двукратно вырождены, интенсивности линий  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  имеют соотношение 4: 2.

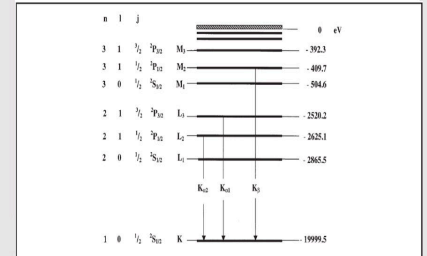


Рис. 1: Энергетическая диаграмма молибдена ( $Z = 42$ )

## Теория (2/3)

Когда рентгеновские лучи с длиной волны  $\lambda$  падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения  $\theta$ , то отраженные лучи от плоскостей решетки конструктивно интерферируют друг с другом при условии, что их разность хода соответствует целому кратному длин волн. Это условие объясняется законом Брэгга:

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

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

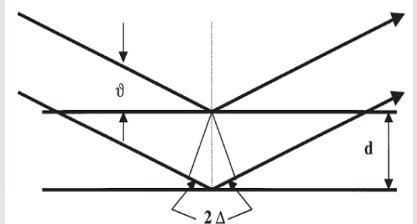


Рис. 2: Брэгговское рассеяние на паре плоскостей решетки

## Теория (3/3)

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

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

### Примечание:

Данные диаграммы уровней энергии были взяты из «Справочника по химии и физике», CRC Press Inc., Флорида.

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)  $d = 2,014 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

Межплоскостное расстояние KBr (200)  $d = 3,290 \cdot 10^{-10} \text{ м}$

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

## 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 Mo tube</a>          | 09057-61  | 1          |
| 4       | <a href="#">XR 4.0 X-ray Рентгеновские характеристики, расширение</a>     | 09135-88  | 1          |

**PHYWE**  
excellence in science



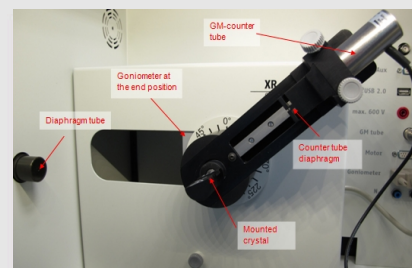
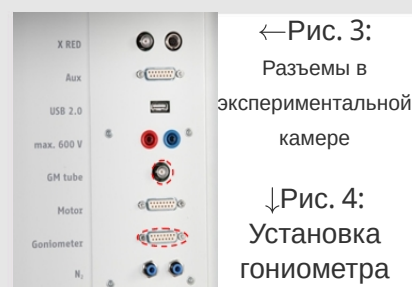
# Подготовка и выполнение работы

## Подготовка

**PHYWE**  
excellence in science

Подключите гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красная маркировка на рис. 3). Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться 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 1 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**  
excellence in science

- 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 самой рентгеновской установке. Программа автоматически примет настройки.



Рис. 5: Подключение компьютера

## Выполнение работы(2/3)

**PHYWE**  
excellence in science



Рис. 6:  
Часть  
интерфейса  
ПО

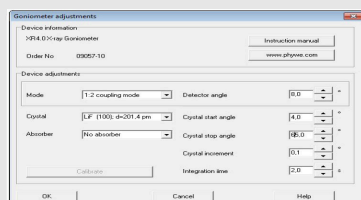


Рис. 7: Настройки  
гониометра (кристалл LiF)

- 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), можно изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите параметры, как показано на рис. 8.
- Если Вы измеряете сечение линий  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$ , выберите следующий диапазон сканирования:  $44^\circ - 46^\circ$  ( $n = 4$ ) и  $61^\circ - 63^\circ$  ( $n = 5$ ) и время стробирования 30 - 60 с.

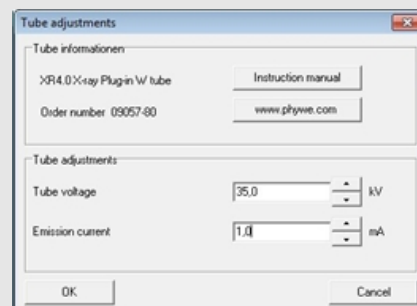


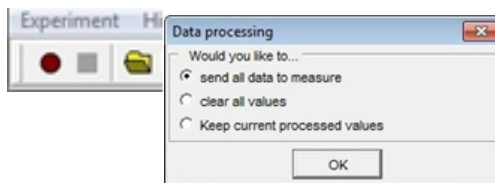
Рис. 8: Настройки  
напряжения и силы тока



## 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 30 - 60 с; ширина углового шага 0,1°
- Диапазон сканирования 44° - 64° и 61° - 63° (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

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

На рисунке 9 показан рентгеновский спектр молибдена, который был проанализирован с помощью монокристалла LiF. С помощью закона Брэгга (1) длины волн характеристических линий могут быть определены на основе их углов скольжения  $\theta$ .

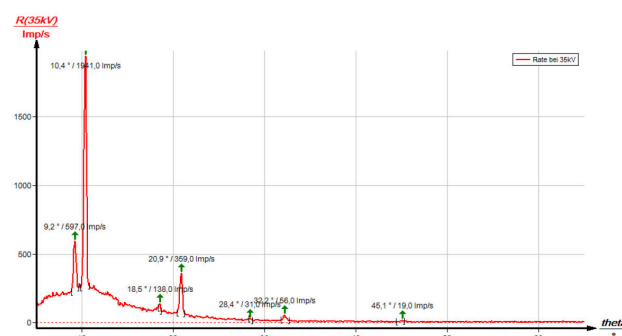


Рис. 9: Рентгеновский спектр молибдена; монокристалл LiF в качестве анализатора

## Задание 1 (часть 2)

**PHYWE**  
excellence in science

В таблице 1 показаны значения углов скольжения  $\theta$  которые были определены из рис. 9, а также значения длин волн  $\lambda$  характеристической рентгеновской линии молибдена, рассчитанные с помощью уравнения (1).

Для сравнения, в таблице 2 показаны значения  $\lambda$ , вычисленные с помощью уравнения (2) и основанные на значениях энергии, показанных на рис. 1. На рис. 9 расщепление дублета  $K_\alpha$  становится почти видимым при интерференции четвертого порядка ( $n = 4$ ). Анализ рентгеновского спектра см. также P2540205.

|            | $\theta(K_\alpha)/^\circ$ | $\theta(K_\beta)/^\circ$ | $\lambda(K_\alpha)/\text{pm}$ | $\lambda(K_\beta)/\text{pm}$ |
|------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| <b>n=1</b> | 10.4                      | 9.2                      | 71.3                          | 63.7                         |
| <b>n=2</b> | 20.9                      | 18.5                     | 71.2                          | 63.2                         |
| <b>n=3</b> | 32.2                      | 28.4                     | 71.2                          | 63.4                         |
| <b>n=4</b> | 45.1                      | -                        | 71.2                          | -                            |
|            |                           |                          | 71.22                         | 63.43                        |

Таблица 1: Длины волн линий  $K_\alpha$  и  $K_\beta$ , рассчитанные с помощью экспериментальных значений

| $\lambda(K_{\alpha 1})/\text{pm}$ | $\lambda(K_{\alpha 2})/\text{pm}$ | $\lambda(K_\beta)/\text{pm}$ |
|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| <b>71.36</b>                      | 70.93                             | 63.29                        |

Таблица 2: Длины волн линий  $K_\alpha$  и  $K_\beta$ , вычисленные с помощью значений энергии (см. рис. 1)

## Задание 2

**Задание 2: Определите длины волн и интенсивности линий  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  и сравните полученные значения с теоретическими.**

На рис.10 и 11 показаны некоторые участки рентгеновского спектра молибдена. Хорошо видно расщепление  $K$  линий. Соответствующие значения приведены в таблице 3. Длина волны была определена с помощью уравнения (1).

В первом приближении интенсивность рентгеновской линии определяется ее максимумом. В результате на рис. 10 и 11 отношение интенсивностей составляет  $I(K_{\alpha_1}) / I(K_{\alpha_2}) \approx 1.8$ .

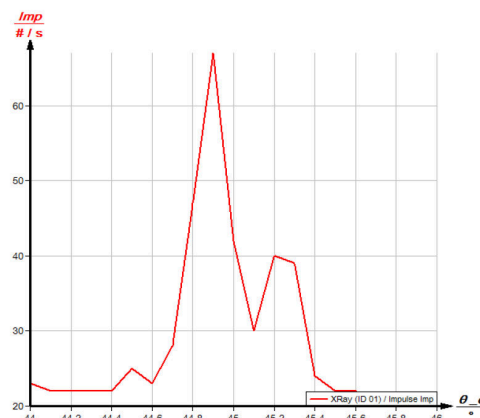


Рис. 10: Расщепление линий молибдена  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  ( $n = 4$ )

## Задание 2 (часть 2)

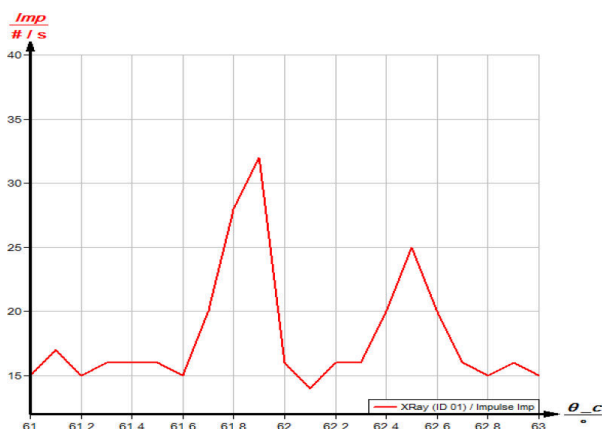


Рис. 11: Расщепление линий молибдена  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  ( $n = 5$ )

|                | $\vartheta$<br>$n = 4$ | $\vartheta$<br>$n = 5$ | Среднее<br>значение<br>$\lambda$ |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| $K_{\alpha_1}$ | 44.8                   | 61.8                   | 70.84                            |
| $K_{\alpha_2}$ | 45.1                   | 62.45                  | 71.22                            |

Таблица 3

## 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. 11). Затем нажмите "Рассчитать".
- Если вычислены не все пики (или их слишком много), скорректируйте допустимую погрешность.
- Выберите "Визуализация результатов", чтобы отобразить данные пиков непосредственно в спектре.

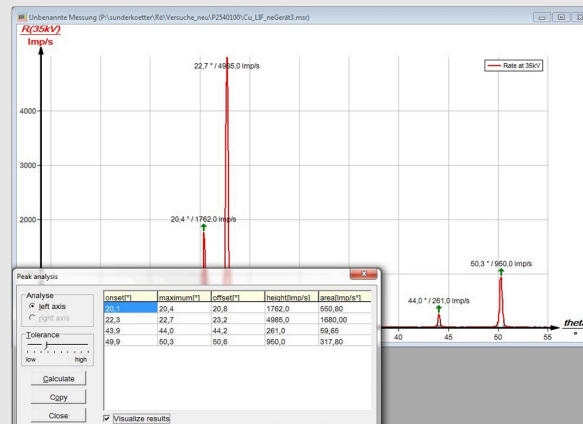


Рис. 12: Автоматический анализ пиков с помощью measure.