

Характеристическое рентгеновское излучение вольфрама



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)

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)



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)

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 λ падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения θ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, конструктивно интерферируют друг с другом при условии, что их разность хода Δ соответствует целому числу длин волн (см. рис. 1). Это условие представлено так называемым законом Брэгга:

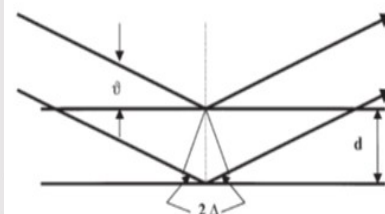


Рис. 1: Брэгговское рассеяние на плоскостях решетки

Теория (2/3)

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

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

Если известно межплоскостное расстояние d , то с помощью угла скольжения θ можно определить длину волны λ . 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)

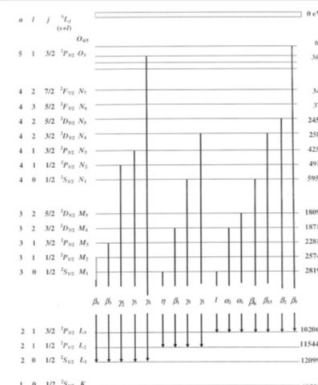


Рис. 2: Схематическое изображение энергетического уровня вольфрама ($Z = 74$)

Оборудование

Позиция	Материал	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 W tube	09057-81	1
4	XR 4.0 X-ray LiF кристалл	09056-05	1
5	XR 4.0 Диафрагма 2 мм	09057-02	1
6	Счетчик Гейгера-Мюллера, тип Б	09005-00	1

PHYWE
excellence in science

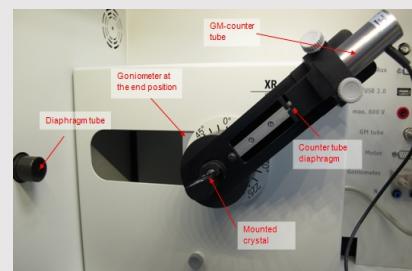
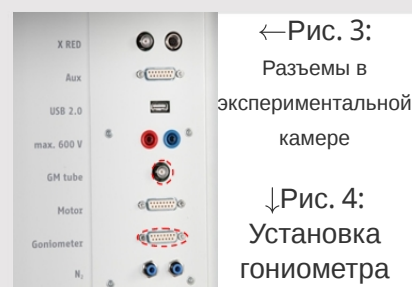
Подготовка и выполнение работы

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)

- 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)

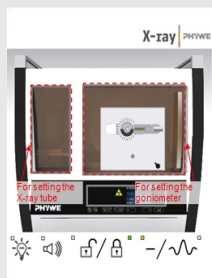


Рис. 6: Часть интерфейса ПО

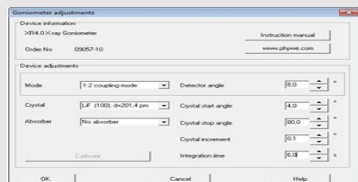


Рис. 7: Настройки гониометра

- 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.

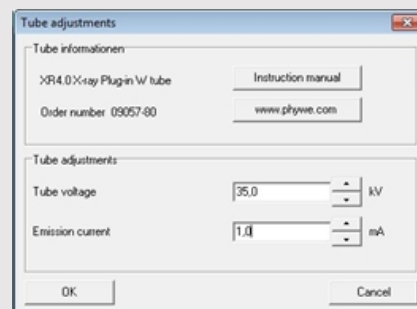
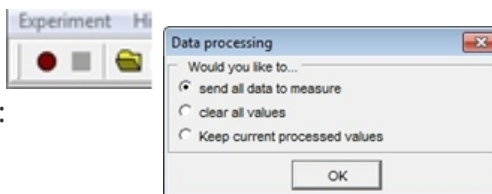


Рис. 8: Настройки напряжения и силы тока

Выполнение работы (3/3)

- 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



Оценка

Задание 1

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 α_1 и α_2 или γ_2 и γ_3 можно наблюдать только в диапазоне при $n = 2$. Линия под номером 11 может быть четко отнесена к K_α линии меди. Маленький круглый вольфрамовый анод фактически встроен в цилиндрический медный стержень, на который также частично попадают электроны.

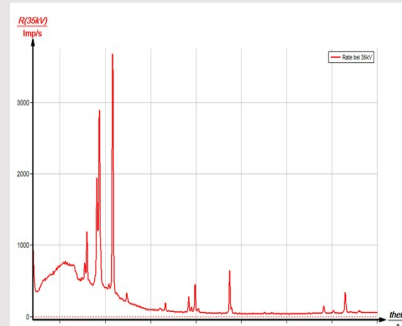


Рис. 9: Рентгеновский спектр вольфрама

Задание 2

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 B таблицы показаны углы скольжения θ , определенные с помощью рис. 9, а также значения энергии для характеристических рентгеновских линий вольфрама, которые были рассчитаны с помощью уравнения (4). Длина волны λ и соответствующие энергии E_{exp} , рассчитанные с помощью (1) и (3), показаны в колонках D и E. В колонке H показаны значения энергии E_{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	θ [°]	n	λ [нм]	E_{exp} [эВ]	Линия	Переход	E_{lit} [эВ]
1	14.69	1	102.15	12138	γ_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	γ_1	L_2N_4	11286
4	16.28	1	112.92	10980	γ_5	L_2N_1	10949
5	17.92	1	123.94	10003	β_2	L_3N_5	9961
6	18.21	1	125.87	9849	β_3	L_1M_3	9818
7	18.47	1	127.61	9716	β_1	L_2M_4	9673
8	18.79	1	129.74	9556	β_4	L_1M_2	9525
9	20.60	1	141.72	8748	η	L_2M_1	8725

A	B	C	D	E	F	G	H
Линия	θ [°]	n	λ [нм]	E_{exp} [эВ]	Линия	Переход	E_{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	I	L_3M_1	7387
13	31.80	2	106.13	11682	γ_3	L_1N_3	11674
14	32.01	2	106.76	11613	γ_2	L_2N_4	11608
15	33.03	2	109.79		γ_1	L_3N_5	11286
16	38.12	2	124.33	9972	β_2	L_1M_3	9961
17	38.80	2	126.20	9824	β_3	L_1M_2	9818
18	39.52	2	128.16	9674	β_1	L_2M_4	9673

Задание 2 (часть 3)

A	B	C	D	E	F	G	H
Линия	θ [°]	n	λ [нм]	E_{exp} [эВ]	Линия	Переход	E_{lit} [эВ]
19	40.24	2	130.10	9529	β_4	L_1M_2	9525
20	47.12	2	147.58	8401	α_1	L_3M_5	8397
21	47.58	2	148.68	8339	α_2	L_3M_4	8335
22	54.88	3	109.71	11300	γ_1	L_2N_4	11286
23	56.47	2	167.88	7385	I	L_3M_1	7387
24	67.90	3	124.28	9976	β_2	L_3N_5	9961
25	70.09	3	126.12	9831	β_3	L_1M_3	9818
26	72.66	3	128.04	9683	β_1	L_2M_4	9673
27	75.79	3	130.03	9535	β_4	L_1M_2	9525

Таблица 1

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.

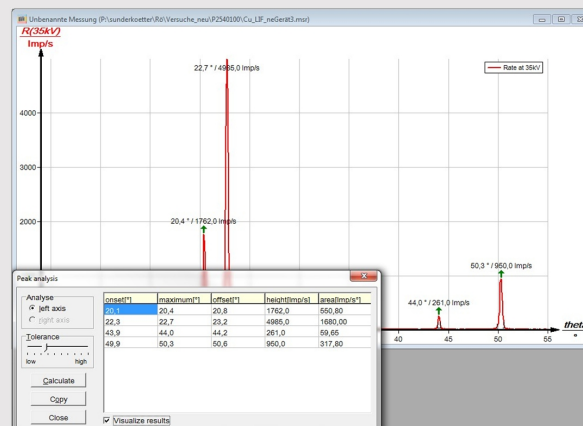


Рис. 10: Автоматический анализ пиков с помощью measure.