

Дифракция электронов



Физика

Современная физика

Квантовая физика



Уровень сложности



Кол-во учеников



Время подготовки



Время выполнения

This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/5f70d9e18573d50003957a94>

PHYWE



Общая информация

Описание

PHYWE



Сканирующий электронный микроскоп

Электронная дифракция наиболее часто используется в физике и химии твердого тела для изучения кристаллических структур твердых тел с помощью дифракционной картины.

В сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) электроны взаимодействуют с атомами в образце, производя различные сигналы, которые содержат информацию о рельефе поверхности и составе образца.

Другие области применения - просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) и дифракция обратного рассеяния электронов.

Дополнительная информация (1/2)



предварительные знания



В квантовой механике двойственность волновых частиц объясняется тем, что каждая частица может быть описана как частица или как волна. Поскольку электронный пучок имеет волнообразный характер, он дифрагирует при прохождении через кристалл.

Научный принцип



Этот знаменитый эксперимент демонстрирует волновой дуализм материи волна-частица на примере электронов. Дифракционная картина быстрых электронов, проходящих через поликристаллический слой графита, визуализируется на флуоресцентном экране. Межплоскостное расстояние в графите определяется диаметром колец и ускоряющим напряжением.

Дополнительная информация (2/2)



Цель обучения



Понимание основных взаимодействий дифракции электронов через кристаллическую решетку и дуализма волна-частица.

Задачи



1. Измерьте диаметр самых маленьких дифракционных колец при разных напряжениях на аноде.
2. Рассчитайте длину волны электронов по напряжениям на аноде.
3. Определите межплоскостное расстояние графита по соотношению между радиусом дифракционных колец и длиной волны

Инструкции по технике безопасности



Для этого эксперимента применяются общие инструкции по безопасному проведению экспериментов при преподавании естественных наук.

Лампы с горячим катодом представляют собой тонкостенные стеклянные трубы с высоким уровнем вакуумирования. Обращайтесь с ними осторожно, так как существует опасность взрыва! Не подвергайте трубку механическим нагрузкам.

Когда трубка работает, конец трубы может нагреться. При необходимости дайте трубке остыть перед демонтажем. Пожалуйста, не трогайте лучевую трубку во время эксперимента.

Теория (1/9)



В 1926 году Де Бройль в своей знаменитой гипотезе предсказал, что частицы при определенных условиях могут вести себя как волны. Эта гипотеза была подтверждена для электронов тремя годами позже независимо Джорджем Томсоном и Клинтоном Дэвиссоном, наблюдавшими дифракционные картины пучка электронов, проходящего через металлическую пленку и кристаллическую решетку соответственно. Все они получили за свои исследования Нобелевскую премию: Де Бройль в 1929 году и Томсон и Дэвиссон в 1937 году.

Дифракция электронов используется для исследования кристаллической структуры твердых тел подобно дифракции рентгеновских лучей. Кристаллы содержат периодические структурные элементы, служащие дифракционной решеткой, которая предсказуемо рассеивает электроны. Таким образом, дифракционная картина электронного луча, проходящего через слой кристаллического материала, содержит информацию о соответствующей кристаллической структуре.

В отличие от рентгеновских лучей, электроны являются заряженными частицами и поэтому взаимодействуют с веществом посредством кулоновских сил, предоставляя иную информацию о структуре, чем дифракция рентгеновских лучей.

Теория (2/9)

Чтобы объяснить явление интерференции в этом эксперименте, длина волны λ , зависящая от импульса, присваивается электронам в соответствии с уравнением де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

где $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ Джс - постоянная Планка.

Импульс можно рассчитать по скорости ν , которую электроны приобретают под действием ускоряющего напряжения U_A :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = e \cdot U_A \quad (2)$$

Теория (2/9)

Чтобы объяснить явление интерференции в этом эксперименте, длина волны λ , зависящая от импульса, присваивается электронам в соответствии с уравнением де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1)$$

где $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ Джс - постоянная Планка.

Импульс можно рассчитать по скорости ν , которую электроны приобретают под действием ускоряющего напряжения U_A :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = e \cdot U_A \quad (2)$$

Теория (3/9)

Таким образом, длина волны равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU_A}} \quad (3)$$

где $m = 9.109 \cdot 10^{-31}$ кг - масса покоя электрона и $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл - элементарный электрический заряд.

При напряжениях U_A релятивистская масса может быть заменена массой покоя с погрешностью всего 0,5%. Электронный луч попадает на пленку поликристаллического графита, нанесенную на медную решетку, отражается в соответствии с условием Брэгга:

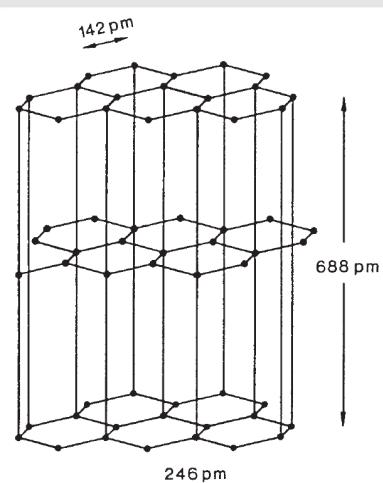
$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

где d - расстояние между плоскостями атомов углерода и θ - угол Брэгга (угол между плоскостями пучка электронов и решетки).

Теория (4/9)

В поликристаллическом графите связь между отдельными слоями нарушена, поэтому их ориентация является случайной.

Таким образом, электронный луч распространяется в форме конуса и создает интерференционные кольца на флуоресцентном экране.



Кристаллическая решётка графита

Теория (5/9)

Угол Брэгга θ можно рассчитать по радиусу интерференционного кольца, но следует помнить, что угол отклонения α в два раза больше:

$$\alpha = 2\theta$$

На рисунке это считывается как:

$$\sin 2\alpha = \frac{r}{R} \quad (5)$$

где $R = 50$ мм, радиус стеклянной колбы.

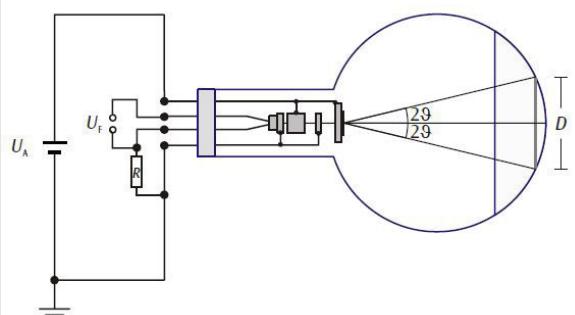


Схема электронно-лучевой трубы

Теория (6/9)

Так как по формулам приведения $\sin 2\alpha = 2\sin \alpha \cos \alpha$

для малых углов α (потому что $10^\circ = 0,985$) может записать как:

$$\sin 2\alpha \cong 2\sin \alpha \quad (6)$$

так что для малых углов θ получаем:

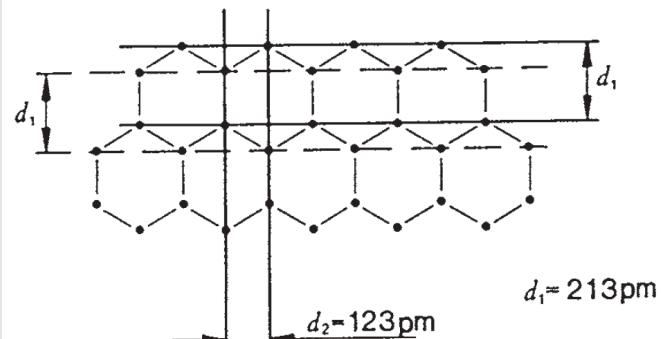
$$\sin 2\alpha = \sin 4\theta \cong 4\sin \theta \quad (6a)$$

С помощью этого приближения мы получаем

$$r = \frac{2R}{d} \cdot n \cdot \lambda \quad (7)$$

Теория (7/9)

Два внутренних интерференционных кольца возникают в результате отражения от плоскостей решетки с шагом d_1 и d_2 для $n = 1$ (7).



Плоскости графита для первых двух интерференционных колец

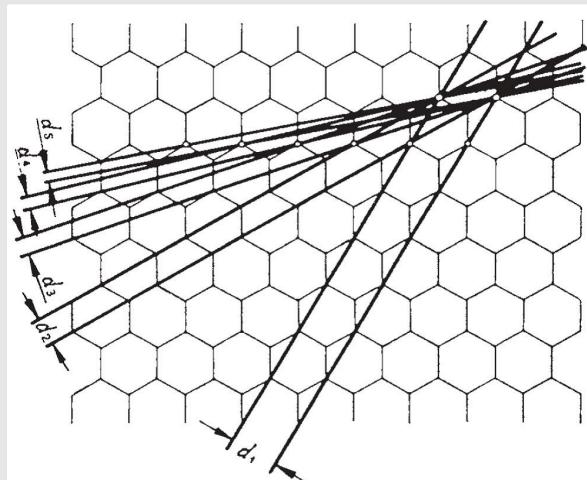
Теория (8/9)

Примечания

Интенсивность интерференционных колец более высокого порядка значительно ниже, чем у колец первого порядка.

Так, например, кольцо второго порядка для d_1 трудно определить и ожидаемое кольцо четвертого порядка для d_1 просто не видно. Кольцо третьего порядка d_1 легко увидеть, потому что графит всегда имеет две плоскости решетки вместе, разнесенные на расстояние $1/3.d$.

В шестом кольце первый порядок кольца d_4 явно совпадает со вторым порядком кольца d_2 .



Межплоскостное расстояние в графите

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт №.	Количество
1	Электронная дифракционная трубка	06721-02	1
2	Держатель для электронно-дифракционной трубы	06721-03	1
3	Блок управления для электронно-дифракционной трубы 230 В	06721-04	1
4	Набор кабелей	06721-05	1

Оборудование



Позиция	Материал	Пункт №.	Количество
1	Электронная дифракционная трубка	06721-02	1
2	Держатель для электронно-дифракционной трубы	06721-03	1
3	Блок управления для электронно-дифракционной трубы 230 В	06721-04	1
4	Набор кабелей	06721-05	1



Подготовка и выполнение работы

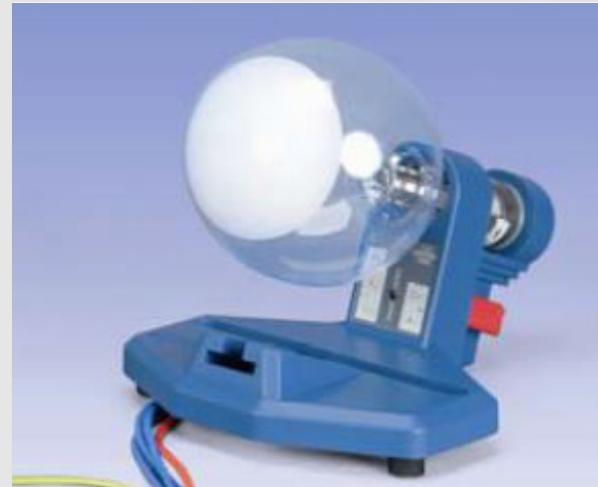
10/14

Подготовка (1/2)

PHYWE

Вставьте электронно-лучевую трубку для дифракции электронов в держатель трубы, убедившись, что контактные штыри трубы входят в правильные отверстия держателя. Средний штифт трубы должен немного выступать за заднюю часть держателя.

Подключите гнезда $F3$ и $F4$ держателя трубы к выходным клеммам напряжения нагревателя высоковольтного источника питания 5 кВ.



Электронно-лучевая трубка

Подготовка (2/2)

PHYWE



Экспериментальная установка

Подключите "-" клемму источника высокого напряжения 5 кВ к разъему $C5$ держателя трубы, а "+" клемму - к разъему $G7$, также подключите клеммы защитного заземления.

Выполнение работы



Подайте высокое напряжение 5000 В и измерьте диаметры двух дифракционных колец на изогнутом флуоресцентном экране.

Измерьте внутренний и внешний край колец штангенциркулем (в затемненном помещении) и возьмите среднее значение.

Уменьшайте напряжение с шагом 500 В и измеряйте дифракционные кольца в каждом случае.

Оценка (1/4)



$U_{A\text{кВ}}$	$\lambda, \text{пм}$
5.0	19.4
5.5	18.3
6.5	15.2
7.0	14.7

Расчетные длины волн электронов при различных напряжениях ускорителя

Расстояние до люминесцентного экрана L , радиус R стеклянной сферы электронно-дифракционной трубы и постоянные решетки и постоянной решетки $/(d\backslash)$ равны:

$$L = 130 \text{ мм}$$

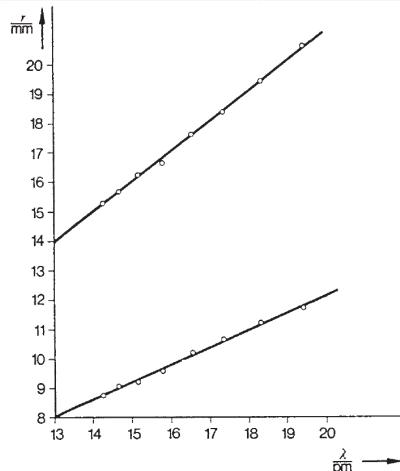
$$R = 50 \text{ ммм}$$

$$d_1 = 123 \text{ пм}$$

$$d_2 = 213 \text{ пм}$$

Длина волны вычисляется по напряжению на аноде в соответствии с (3).

Оценка (2/4)



Радиусы первых двух интерференционных колец как функция длины волнны электронов

Применяя линии регрессии, выраженные как $Y = AX + B$, к измеренным значениям из рисунка, можно получить наклоны

$$A_1 = 0.62(2) \cdot 10^9 \quad \text{и}$$

$$A_2 = 1.03(2) \cdot 10^9$$

и постоянные решетки:

$$d_1 = 211 \text{ пм} \quad \text{и}$$

$$d_2 = 126 \text{ пм}$$

в соответствии с (7).

Оценка (3/4)

Что происходит при увеличении ускоряющего напряжения?

Если ускоряющее напряжение увеличивается, то электроны имеют большую

уменьшаются

и, следовательно, более короткую

длину волны

Следовательно, волны дифрагируют, и поэтому диаметры дифракционных колец

меньше

энергию

Проверить

Оценка (4/4)



Что из этого происходит при дифракции электронов через кристалл?

- Рассеяние электронов
- Конструктивная интерференция
- Ядерные взаимодействия

 Проверить

Полученные результаты дифракции электронов зависят от них:

- Расстояние между атомными слоями
- Количество атомных слоев
- Состав кристалла

 Проверить