

Содержание

	стр.
Лабораторная работа №85 «Дифракция электронов»	4
1. Цель работы	4
2. Теоретическая часть	4
2.1. Гипотеза де-Бройля	4
2.2. Дифракция электронов	5
3. Экспериментальная часть	7
3.1. Принцип работы электронографа	7
3.2. Устройство компаратора	8
4. Порядок выполнения работы	10
5. Требования к отчету	10
6. Контрольные вопросы	11
Список литературы	11

ЭЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 85

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

1. Цель работы

Изучение гипотезы де-Бройля о волновых свойствах микрочастиц.
Определение длины волны де-Бройля электронов, дифрагированных на образцах с кубической кристаллической решеткой.

2. Теоретическая часть

2.1. Гипотеза де-Бройля

В 1924 г. французский физик Луи де-Броль пришел к выводу, что корпускулярно-волновой дуализм свойств характерен не только для света, но и для электрона. Он обобщил отношение $\rho_{\phi} = \frac{h}{\lambda}$, связывающее волновые (λ) и корпускулярные (ρ_{ϕ}) свойства, фотона, предположив, что оно имеет универсальный характер для любых волновых процессов, связанных с частицами, обладающими импульсом.

Согласно гипотезе де-Бройля, с каждым движущимся электроном связан волновой процесс, длина волны которого определяется соотношением

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2.1)$$

где h – постоянная Планка, m и v – соответственно, масса и скорость электрона.

Если электрон ускоряется электрическим полем с разностью потенциалов U , то его кинетическая энергия определяется соотношением

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = eU, \quad (2.2)$$

где e – заряд электрона.

Так как импульс частицы связан с её кинетической энергией соотношением

$$p = mv = \sqrt{2mW_k}, \quad (2.3)$$

то из формул (2.1), (2.2) и (2.3) следует

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2meU}}, \quad (2.4)$$

Подставляя в последнее равенство численные значения h , m , e , получаем расчетную формулу для длины волны де-Бройля в нанометрах (нм)

$$\lambda_e = \frac{1,225}{\sqrt{U}} \text{ (нм)}, \quad (2.5)$$

где разность потенциалов U выражается в вольтах.

В формуле де-Бройля (2.1) нет ничего специфического для электрона как определенной частицы. Волновые свойства должны быть присущи любой частице вещества с массой m , движущейся со скоростью v . Длина волны де-Бройля очень мала; она тем меньше, чем больше масса частицы и её энергия, поэтому волновые свойства обнаруживаются только у микрочастиц, т.е. у объектов, размеры которых сравнимы с размерами атома.

Волны де-Бройля не являются ни электромагнитными, ни механическими, ни какими-либо другими волнами, известными в классической физике они имеют специфическую квантовую природу.

2.2. Дифракция электронов

Экспериментальным доказательством гипотезы де-Бройля являются опыты по дифракции электронов. Из соотношения (2.5) следует, что длина волны де-Бройля электронов, ускоренных электрическим полем с разностью потенциалов порядка десятков киловольт, имеет значение $\lambda \approx 10^{-10}$ м, т.е. сравнима с длиной волны рентгеновского излучения. Поэтому при наблюдении дифракции электронов в качестве дифракционных решеток можно использовать различные монокристаллы, как и для рентгеновских лучей. Всякий монокристалл состоит из упорядоченно расположенных частиц (атомов, ионов, молекул), образующих пространственную кристаллическую решетку. Расстояния между этими частицами, то есть периоды решеток (d) очень малы (порядка 10^{-10} м). Известно, что для наблюдения дифракции необходимо выполнение условия $d > \lambda$. Следовательно, для волн де-Бройля и рентгеновских лучей монокристаллы являются идеальными естественными дифракционными решетками.

Рассмотрим систему кристаллографических плоскостей, образованных атомами в кристалле кубической системы (рис. 2.1)

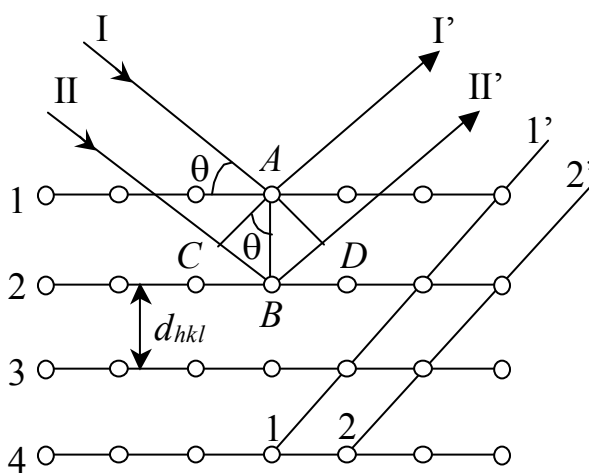


Рис. 2.1

Пусть на поверхность монокристалла падает пучок электронов, обладающих одной и той же энергией, с каждым из которых связана волна де-Бройля λ_e . Каждый атом A, B (рис. 2.1), на который падает электрон и связанная с ним волна де-Бройля I и II , становится источником когерентных вторичных волн (I' и II'), интерферирующих между собой подобно вторичным волнам от щелей обычной дифракционной решетки. Наблюдать волны I' и II' можно лишь в случае выполнения условия интерференционного максимума $\Delta = \pm n\lambda_e$ ($n = 1, 2, \dots$). Из рис. 2.1 видно, что $\Delta = BC + BD = 2d_{hkl} \sin \theta$, поэтому условие дифракционного максимума определяется соотношением

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda_e, \quad (2.6)$$

где θ – угол скольжения; d_{hkl} – межплоскостное расстояние; n – положительное целое число, порядок дифракционного максимума.

Выражение (2.6) было получено первоначально для рентгеновских лучей и получило название формулы Вульфа-Брэгга.

Межплоскостное расстояние d_{hkl} зависит от ориентации системы плоскостей к падающему электронному пучку. Например, для системы плоскостей, параллельных $1 - 1'$ и $2 - 2'$ (рис. 2.1), межплоскостное расстояние будет различным. Положение системы плоскостей и межплоскостные расстояния определяются тремя числами h, k, l – индексами Миллера (d_{hkl}). Для кристаллической решетки кубической системы межплоскостное расстояние вычисляется по формуле

$$d_{hkl} = \frac{d}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (2.7)$$

где d – кратчайшее расстояние между одинаковыми ионами или атомами в кристалле.

Дифракцию электронов удастся наблюдать не только от монокристаллов, но и от поликристаллических образцов. В этом случае пучок электронов пропускается через поликристаллическую пленку (во избежание сильного поглощения электронов, пленки берутся очень тонкими, $\sim 10^{-7}$ м). В такой пленке отдельные монокристаллики ориентированы хаотично друг относительно друга. Если на такой поликристаллический образец падает узкий параллельный пучок электронов, то среди множества монокристалликов образца всегда есть целый ряд таких, кристаллографические плоскости которых наклонены к пучку под углами θ , удовлетворяющими условию (2.6). На рис. 2.2 показано направление кристаллографической плоскости для одного из таких кристалликов. Отраженные от него лучи отклоняются вверх на угол 2θ . Если теперь мысленно вращать кристаллик вокруг оси SO , совпадающей с направлением электронного пучка, так, чтобы угол θ сохранялся неизменным, то отраженные от кристалликов лучи будут описывать коническую поверхность. Очевидно, что такой же результат дает множество различным образом ориентированных кристалликов, плоскости которых образуют один и

тот же угол θ с пучком SO . Поэтому на фотопластинке P , расположенной позади образца перпендикулярно к электронному пучку, области потемнения фотоэмульсии в местах попадания электронов образуют кольцо, радиус которого, как видно из рис. 2.2, определяется соотношением

$$r = L \cdot \operatorname{tg} 2\theta,$$

где L – расстояние от кристаллической пленки до экрана. При малых углах $\operatorname{tg} 2\theta \approx \sin 2\theta \approx 2\theta$ (рад), поэтому

$$\theta = \frac{r}{2L}, \quad (2.8)$$

Подставляя выражения (2.7) и (2.8) в (2.6), получим

$$\frac{d}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \cdot \frac{r}{2L} = n\lambda, \quad (2.9)$$

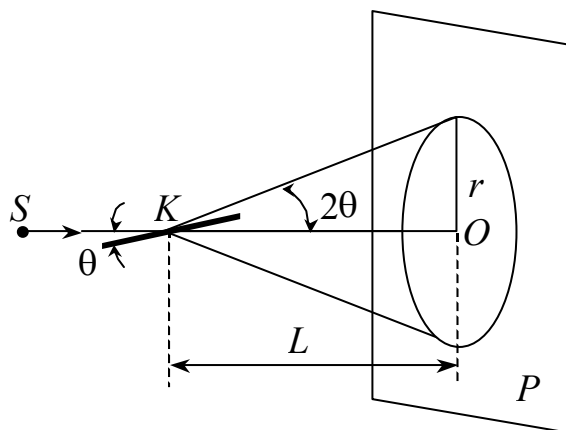


Рис. 2.2

Из соотношения (2.9) следует, что дифракционные кольца, образованные электронами, рассеянными от систем плоскостей с различными межплоскостными расстояниями, будут иметь разный радиус r . Следовательно, электронограмма представляет собой систему концентрических колец.

Дифракция электронов находит успешное применение для анализа кристаллических структур и лежит в основе метода электронографии.

3. Экспериментальная часть

3.1. Принцип работы электронографа

В данной работе объектами исследования являются электронограммы поликристаллических образцов из окиси магния и золота, полученные на электронографе ЭГ-100М.

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 3.1. Источником электронов является электронная пушка ЭП. Электроны, испускаемые раскаленной нитью, пройдя через ряд диафрагм, ускоряются высоким напряжением

до 100 кВ. Ускоренные электроны попадают в систему электромагнитных линз, которая состоит из двух конденсоров L_1 и L_2 и двух юстировочных катушек K_1 и K_2 . Конденсоры представляют собой электромагниты с катушками, намотанными на общий корпус. Магнитные поля конденсоров, действуя на электроны, фокусируют их в узкий пучок. Сфокусированный пучок электронов попадает на образец, изготовленный в виде тонкого поликристаллического слоя исследуемого вещества, нанесенного на органическую пленку. Пройдя сквозь образец и испытав в нем отклонения, электроны попадают на экран, где расположена камера, предназначенная для визуального наблюдения и фотографирования электронограммы объекта.

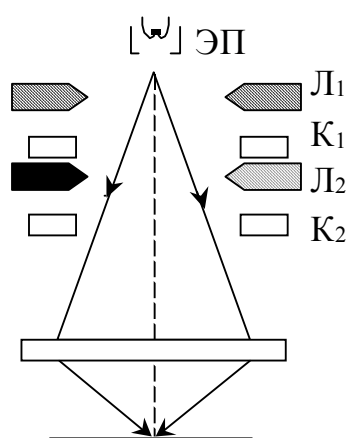


Рис. 3.1

3.2. Устройство компаратора

Компаратор является прибором, измеряющим расстояния с точностью до 10^{-3} мм. Его внешний вид дан на рис. 3.2. Компаратор имеет два микроскопа, жестко связанных между собой. Негатив рассматривается через левый микроскоп 1, называемый визирным.

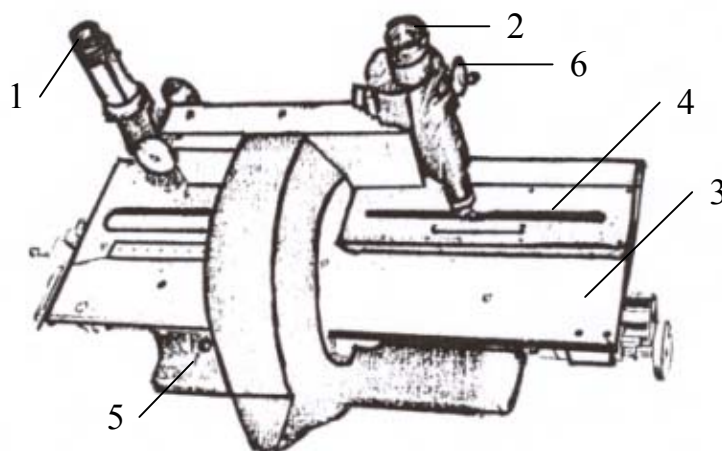


Рис. 3.2

С помощью правого микроскопа 2, называемого отсчетным, определяется положение передвижного столика 3 с фотопластинкой, по закрепленной в нем стеклянной миллиметровой шкале 4, рассматриваемой через окуляр микроскопа. Шкала прибора и измеряемый объект должны быть равномерно освещены, что достигается с помощью зеркал, закрепленных в задней части прибора. В процессе измерения не следует менять положение и освещенность зеркал.

Открыв винт 5, подвижной столик перемещают до тех пор, пока в центре поля зрения визирного микроскопа не будет видна левая часть исследуемого дифракционного кольца, после чего винт 5 закрепляют.

После точной наводки на штрих объекта (дугу дифракционного кольца) производят отсчет по спиральному окулярному микрометру, помещенному внутри отсчетного микроскопа. В поле зрения отсчетного микроскопа (рис. 3.3) одновременно видны: два-три штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами («83», «84», «85»), неподвижная шкала (1) десятых долей миллиметра с делениями от 0 до 10, круговая шкала (2) для отсчета сотых и тысячных долей миллиметра и десять двойных витков спирали (3).

Чтобы произвести отсчет, необходимо предварительно маховичком 6 (рис. 3.2) подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих, находящийся в зоне двойных витков, оказался точно посередине между линиями двойного витка. Индексом для отсчета миллиметровых делений шкалы компаратора является нулевой штрих неподвижной (горизонтальной) шкалы десятых долей миллиметра. Если штрих миллиметровой шкалы расположен вправо от индекса, то это означает, что данный миллиметровый штрих уже прошел индекс, а ближайший, больший миллиметровый штрих, еще не дошел до индекса. На рис. 3.3 миллиметровый штрих «84» уже прошел индекс (отметку «0»), а ближайший штрих «85» еще не дошел до него. Отсчет будет 84 мм плюс отрезок от штриха шкалы десятых долей миллиметра. Этот отрезок содержит десятые, сотые, тысячные и десятитысячные доли миллиметров. Число десятых долей миллиметра показывает цифра последнего пройденного штриха шкалы 1 (на рис. 3.3 – «3»).

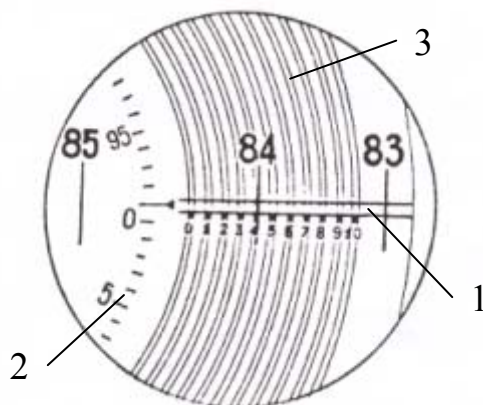


Рис. 3.3

Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитываются по шкале 2, индексом служит указатель шкалы (4 на рис. 3.3); цена деления круговой шкалы – 0,001 мм. Десятитысячные доли миллиметра оцениваются на глаз. На рис. 3.3 индекс точно совпадает со штрихом «99» круговой шкалы, поэтому окончательный отсчет будет 84,3990 мм.

После того, как произведен отсчет, перемещением стола вводят дугу правой половины того же дифракционного максимума в центр визирного микроскопа и вновь производят отсчет по правому (отсчетному) микроскопу. Разность двух отсчетов дает диаметр дифракционного кольца.

4. Порядок выполнения работы

- 1) Измерить на компараторе диаметры трех центральных дифракционных колец (рис. 3.4) на электронограммах окиси магния (MgO) и золота (Au), полученных при напряжении на электронографе 60 кВ. Определить радиусы (r) колец.
- 2) Используя результаты измерений электронограмм, вычислить по формуле (2.9) длину волны де-Бройля электронов. Для трех указанных колец порядок $n = 1$. Период идентичности для Au равен $d = 0,406$ нм, для MgO $d = 0,447$ нм. Для электронографа ЭГ = 100М, на котором были получены и сфотографированы исследуемые электронограммы $L = 755$ мм. Индексы Миллера для простой кубической решетки Au и MgO указаны на рис. 3.4.



Индексы Миллера:

1 – (1,1,1);

2 – (2,0,0);

3 – (2,2,0).

Рис. 4.1

- 3) Повторить пункты 1 и 2 для электронограмм MgO и Au, полученных при напряжениях 80 и 100 кВ.
- 4) Сравнить полученные экспериментально длины волн де-Бройля с вычисленными по формуле (2.5) и по более точной формуле (3.1), учитывающей релятивистскую зависимость массы электрона от скорости:

$$\lambda_e = \frac{1,225}{\sqrt{U}} (1 - 0,489 \cdot 10^{-6}) \text{ нм.} \quad (4.1)$$

5. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- а) название и номер лабораторной работы;

б) основные положения теории;

в) основные формулы для выполнения расчетов.

Результаты измерений и рассчитанные по ним длины волн де-Бройля должны быть представлены в виде следующей таблицы:

Номер кольца	Положение концов диаметра		Радиус кольца r	Длина волны де- Бройля, λ_e (нм)		
	левого	правого		эксп.	теор.	релят.

6. Контрольные вопросы

1. В чем смысл гипотезы де-Бройля о двойственной природе электрона?
2. Почему волновыми свойствами обладают только микрочастицы?
3. Какие экспериментальные данные являются доказательством гипотезы де-Бройля?
4. Каковы условия возникновения максимумов при дифракции электронов?
5. Почему электронограмма имеет вид системы концентрических колец?
6. Каков принцип работы электронографа?
7. Какова зависимость длины де-Бройля релятивистской частицы от ее кинетической энергии?

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн.5. – М.: Наука, 1999.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1998.
3. Детлаф А.А., Яворский Б. М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1998.