

## Работа 5.3

### Изучение дифракции электронов

**Оборудование:** измерительный микроскоп, фотография электронограммы.

#### Введение

Потоку движущихся частиц соответствуют волновые процессы с длиной волны (*волны де Бройля*):

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $m$  — масса частицы,  $v$  — скорость частицы.

Чаще всего движение потока частиц обусловлено действием электрического поля. Так, в электронном микроскопе скорость движения электронов определяется величиной напряжения:  $v = \sqrt{2eU/m_e}$ , откуда получим выражение для длины волны:  $\lambda = h/\sqrt{2m_e eU}$ .

Если подставить численные значения  $m_e$ ,  $e$ ,  $h$  в последнюю формулу, получим:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1,50}{U}} = \frac{1,225}{\sqrt{U}}, \quad (1)$$

где  $U$  выражается в вольтах,  $\lambda$  — в нм.

Если учесть зависимость массы электрона от его скорости, то для  $\lambda$  получим:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + 9,76 \cdot 10^{-7} U}} \sqrt{\frac{1,50}{U}}. \quad (2)$$

После открытия волновых свойств электронного пучка *электронография*, как и *рентгенография*, стали важным средством структурного анализа, особенно при изучении структуры тонких пленок и молекул газов. Электронный микроскоп позволяет наблюдать дифракцию электронов от объектов, толщина которых не должна превышать (0,01 — 0,03) мкм.

В основу расчета электронограмм положена формула Вульфа — Брэгга:

$$2d \sin \varphi = m\lambda, \quad (3)$$

где  $d$  — межплоскостное расстояние (рис. 5.11),  $m$  — порядок дифракции,  $\varphi$  — угол, образуемый пучками электронов с кристаллической плоскостью.

Свяжем некоторую прямоугольную систему координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  с кристаллической решеткой. Каждую плоскость отражения можно определить отрезками, которые отсекаются ею на соответствующих осях, т. е.  $a/h$ ,  $a/k$ ,  $a/l$ ,

где  $a$  — постоянная решетки кристалла. Величины  $h, k, l$  называются *индексами Миллера*. Для кубической решетки расстояние между кристаллическими плоскостями определяется формулой:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (4)$$

При падении на поликристаллическое вещество электронная волна на своем пути встречает множество кристаллов, по-разному ориентированных относительно координатных осей. Это означает, что имеется достаточное количество кристаллических плоскостей в положениях, которые характеризуются индексами  $h, k, l$  и удовлетворяют условию (3).

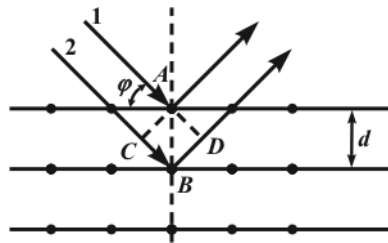


Рис. 5.11

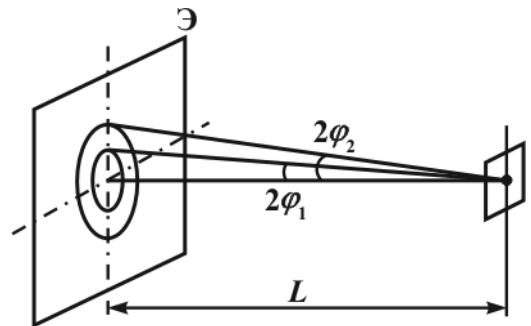


Рис. 5.12

В результате дифракции волны образуют серию конусов вокруг пучка, падающего на вещество. Пересечения плоскости экрана или фотопластинки, перпендикулярной падающему пучку, с конусами образуют серию концентрических окружностей. На экране получаются для каждой системы плоскостей  $h, k, l$  окружности радиуса  $r$ .

Из рис. 5.12 имеем:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{D}{2L},$$

где  $L$  — расстояние между объектом и фотопластинкой,  $D$  — диаметр кольца.

Углы дифракции малы и обычно не превышают  $5 - 6^\circ$ , поэтому  $\operatorname{tg} 2\varphi \approx \sin 2\varphi \approx 2\varphi$ ,  $2\varphi = D/2L$ . Таким образом,  $Dd = 2mL\lambda$ , откуда

$$\lambda = \frac{Dd}{2mL}. \quad (5)$$

Теория дифракции электронов дает возможность установить связь между расположением и формой максимумов на электронограмме с одной стороны, и некоторыми структурными характеристиками исследуемых веществ, с другой. Так, определяя взаимное расположение отдельных кристаллов, симметрию решетки и размеры электронной ячейки, можно вычислить некоторые межатомные расстояния при изучении структуры молекул.

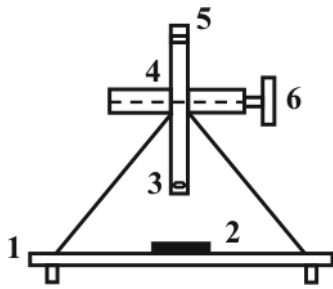


Рис. 5.13

**Описание установки.** Для точного измерения диаметров колец дифракционной картины (фотоснимки электронограммы для золота) используется измерительный микроскоп (рис. 5.13.). На столике микроскопа 1 перед объективом 3 зрительной трубы 4 размещается фотография электронограммы 2, которая рассматривается в окуляр 5. Зрительная труба с помощью микрометрического винта 6 с точностью до 0,01 мм может смещаться в горизонтальной плоскости относительно фотографии.

### Порядок выполнения работы

1. С помощью измерительного микроскопа измерьте диаметры колец дифракционной картины для исследуемого вещества.
2. Определите  $d$  по формуле:  $d = Nm/D$  при  $m = 1$ . Постоянная установки  $N = 3,4 \cdot 10^6$  (нм)<sup>2</sup>.
3. По формуле (4) определите индексы  $h, k, l$  соответствующих плоскостей отражения ( $a = 0,407$  нм) и сравните с данными таблицы:

$d$ , нм	$h, k, l$	$d$ , нм	$h, k, l$	$d$ , нм	$h, k, l$
0,235	111	0,123	311	0,094	331
0,203	200	0,117	322	0,091	420
0,144	220	0,102	400	0,083	422

4. Учитывая, что  $L = 0,3$  м, по формуле (5) определите длину волны электронов.
5. Определите длину волны  $\lambda$  по формулам (1) и (2). Сравните полученные результаты с предыдущим результатом для  $\lambda$ . Приведенная дифракционная картина соответствует напряжению  $U = 50$  кВ.
6. Результаты измерений запишите в таблицу:

№ п/п	$n_1$	$n_2$	$D$ , мм	$d$ , нм	$h, k, l$	$\lambda$ , нм	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается гипотеза де Бройля?
2. Какими опытами эта гипотеза была проверена?
3. Какими параметрами должен обладать объект, чтобы на нем можно было наблюдать дифракцию электронов?

4. Чему равна длина волны де Бройля?
5. Чем определяется скорость движения электронов в электронном микроскопе?
6. Каким образом связана длина волны электронов с ускоряющим напряжением  $U$ ?
7. Запишите формулу Вульфа — Брэгга и объясните ее смысл.
8. Каким образом можно объяснить вид дифракционной картины (электронограммы)?
9. Как связаны между собой длина волны и диаметр колец, возникающих в результате дифракции?
10. Для чего используется метод электронографии?