

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Н.А. Задорожный, С.Л. Тимченко,
Н.И. Юрасов

ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ
НА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКЕ
МЕТАЛЛОВ

*Методические указания к лабораторной работе К-60
по курсу общей физики*

Под редакцией Б.Е. Винтайкина

М о с к в а
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 0 8

УДК 535.42(076.5)
ББК 22.343.4
3-156

Рецензент *В.И. Третьяков*

Задорожный Н.А., Тимченко С.Л., Юрасов Н.И.
3-156 Изучение дифракции электронов на кристаллической решетке металлов: Метод. указания к лабораторной работе по курсу общей физики / Под ред. Б.Е. Винтайкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 14 с.: ил.

В работе рассмотрен один из видов взаимодействия электронов с кристаллической решеткой металлов – волновое взаимодействие. Приведены условия, при которых наблюдается дифракция электронной волны на системе из двух атомных плоскостей. Получены уравнения, описывающие дифракцию электронной волны на пространственно-периодической структуре.

Описана экспериментальная установка для наблюдения дифракционной картины по методу Дебая – Шерера. Приведены расчетные формулы, позволяющие по дифракционной картине определить расстояние между атомными плоскостями.

Для студентов 2-го курса всех специальностей.

УДК 535.42(076.5)
ББК 22.343.4

Цель лабораторной работы – ознакомление с явлением дифракции микрочастиц и его наблюдение на примере дифракции электронов на кристаллической решетке поликристаллического металла и определение межплоскостного расстояния в поликристалле.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В ходе изучения природы света выяснилось, что в оптических явлениях имеет место корпускулярно-волновой дуализм: опытным путем было установлено, что в одних явлениях (интерференции, дифракции, поляризации) свет проявляет волновые свойства, т. е. ведет себя, как волна, а в других явлениях (фотоэффект, эффект Комптона) – корпускулярные свойства [1, 2]. Луи де Бройль предположил, что данная двойственность свойств может быть присуща не только свету, но и частицам с конечной массой покоя. Согласно гипотезе де Бройля, любая частица материального мира обладает волновыми свойствами, которые проявляют себя при ее движении. Движение частицы массой m_0 в свободном пространстве со скоростью v сопоставляется с распространением плоской монохроматической волны, длина которой (длина волны де Бройля) определяется формулой

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p}, \quad (1)$$

где $\hbar = h / 2\pi$; h – постоянная Планка; $p = m_0\beta c / (1 - \beta^2)^{1/2}$ – релятивистский импульс частицы; m_0 – масса покоя частицы; $\beta = v / c$; v – скорость частицы; c – скорость света.

В описываемом в данной работе эксперименте электрон приобретает всю кинетическую энергию E в результате прохождения разности потенциалов u . Тогда $E = eu = U$; e – модуль заряда элек-

трона. Импульс электрона, необходимый для практического определения длины волны частицы в потенциальном поле U , можно найти из закона сохранения энергии, справедливого при данном механизме воздействия,

$$m_0 c^2 + E = c((m_0 c)^2 + p^2)^{1/2}. \quad (2)$$

В результате преобразования формула (1) для длины волны де Бройля получит вид

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\left[2m_0 U \left(1 + \frac{U}{2m_0 c^2}\right)\right]^{1/2}}. \quad (3)$$

Чтобы дифракция электронной волны на пространственно периодической структуре была достаточно ярко выражена, необходимо выполнить условие равенства длины волны электрона и характерного линейного размера данной кристаллической структуры по порядку величины:

$$\lambda \sim a, \quad (4)$$

где a — один из периодов кристаллической структуры. Наряду с этим для расчета дифракции необходимо иметь значения показателя преломления для электронной волны или изменения кинетической энергии частицы при движении внутри данной кристаллической структуры [3].

Если частица взаимодействует только с точечными узлами кристаллической решетки, то показатель преломления можно принять равным единице (рис. 1). Этому условию соответствуют равные нулю работа выхода A электрона из металла и внутренний потенциал металла U_i , определяющий глубину потенциальной ямы (рис. 2). Поэтому длина волны де Бройля для электронов, проникших в металл, определяется формулой

$$\lambda_A = \frac{2\pi\hbar}{\left[2m_0(U + U_i) \left(1 + \frac{U + U_i}{2m_0 c^2}\right)\right]^{1/2}}, \quad (5)$$

т. е. всегда выполняется неравенство

$$\lambda_A < \lambda \quad (6)$$

и показатель преломления металла для электронной волны больше единицы.

Таким образом, задача о дифракции электронной волны на системе из двух атомных плоскостей сводится к задаче об интерференции света в пленке с толщиной, равной расстоянию между двумя атомными плоскостями, и показателем преломления

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_A}. \quad (7)$$

Рис. 1. Дифракция частиц на периодической структуре, состоящей из точечных центров при $n = 1$: θ – угол между осью электронного пучка и атомной плоскостью

Рис. 2. Потенциальная диаграмма для металла: ось Ox направлена в глубь кристалла по нормали к его поверхности; точка с координатой $x = 0$ расположена на поверхности кристалла

Поэтому для оптической разности хода Δ в отраженном свете имеем формулу

$$\Delta = 2a \left(\left(\frac{\lambda}{\lambda_A} \right)^2 - \cos^2 \theta \right)^{1/2} + \frac{\lambda}{2}. \quad (8)$$

Используя условие максимума отражения ($\Delta = k\lambda$), получаем

$$a \left(\left(\frac{\lambda}{\lambda_A} \right)^2 - \cos^2 \theta \right)^{1/2} = (2k-1) \frac{\lambda}{4}, \quad (9)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$. Отсюда следует формула для межплоскостного расстояния

$$a = \frac{(2k-1)\lambda}{4 \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_A} \right)^2 - \cos^2 \theta \right]^{1/2}}. \quad (10)$$

Для поликристаллической пленки с толщиной не меньше межплоскостного расстояния a , расположенной на расстоянии L от экрана, имеем формулу для радиуса кольца, образующегося на экране (метод Дебая – Шерера):

$$r_k = L \operatorname{tg}(2\theta). \quad (11)$$

В эксперименте обычно выполняется условие $(r_k / L) \ll 1$. Поэтому формула (10) приводится к виду

$$a = \frac{(2k-1)\lambda}{4 \left[\frac{U_i}{U} + \frac{U_i}{2m_0 c^2} + \frac{1}{4} \left(\frac{r_k}{L} \right)^2 \right]^{1/2}}, \quad (12)$$

где индекс k соответствует возможному номеру N кольца радиуса r_k .

Объединяя формулы (3) и (12) , получаем расчетную формулу для определения межплоскостного расстояния

$$a = \frac{(2k - 1)\lambda_0[1 - (1/4)(eu / m_0c^2)]}{4[U_i / U + U_i / 2m_0c^2 + (1/4)(r_k / L)^2]^{1/2}}, \quad (13)$$

где $\lambda_0 = 2\pi\hbar / (2m_0eu)^{1/2}$, т. е. длина волны де Бройля нерелятивистского электрона, прошедшего разность потенциалов u .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Ознакомиться со схемой экспериментальной установки (рис. 3).

Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

К – катод; М – модулятор; А1, А2 – аноды (электронная пушка, формирующая электронный пучок и ускоряющая электроны); П – мишень (пленка из исследуемого металла); Э – фотопластинка-экран, на котором образуется дифракционная картина в виде системы полуколец с радиусом r_k

2. Используя прилагаемое измерительное устройство или миллиметровую линейку, измерить на копии картины (рис. 4) радиусы пяти полуколец, начиная от внутреннего, не пропуская ни одного. Радиусом считать расстояние от центра кольца до середины тонкой кольцевой полоски. За центр кольца принять острие темного зуба в

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Теоретическая часть	3
2. Экспериментальная часть.....	7
3. Контрольные вопросы	12
4. Список рекомендуемой литературы.....	12