



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

# Лабораторный практикум «Изучение дифракции элект- тронов на поликристалличе- ских структурах»

по дисциплине

**«Физика»**

Авторы  
Кунаков В.С.,  
Пруцакова Н.В.,  
Ершов И.В.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы студентами всех форм обучения в лабораторном практикуме по физике. Указания содержат краткую теорию по волновым свойствам микрочастиц и дифракции электронов, а также порядок выполнения лабораторной работы.

## Авторы

В.С. Кунаков, Н.В. Пруцакова, И.В. Ершов.



## Оглавление

<b>Лабораторная работа № 021 «Изучение дифракции электронов на поликристаллических структурах» .....</b>	<b>4</b>
Краткая теория.....	4
Описание экспериментальной установки и теория метода измерений.....	7
Порядок выполнения работы.....	9
<b>Рекомендуемая литература .....</b>	<b>12</b>

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 021 «ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ»

**Цель работы:** экспериментальное подтверждение наличия волновых свойств у электрона; определение длины волны электрона; определение межплоскостных расстояний в поликристаллическом графите.

**Оборудование:** Электронно-дифракционный аппарат с креплением, источник питания высокого напряжения, универсальный источник питания, штангенциркуль, соединительные провода.

### Краткая теория

Согласно гипотезе де Бройля (1924 г.) электроны, как и любые другие микрочастицы материи, наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.

Значит, с каждым движущимся электроном связан волновой процесс, длина волны которого определяется соотношением де Бройля:

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

где  $\lambda$  – длина волны электрона по гипотезе де Бройля,  $p$  – импульс электрона,  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. Волны де Бройля не являются ни электромагнитными, ни механическими, ни какими-либо другими волнами, известными в классической физике, они имеют специфическую квантовую природу.

Пройдя в электрическом поле ускоряющую разность потенциалов  $U$ , электрон приобретает кинетическую энергию, равную работе сил поля  $eU$ :

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = eU.$$

Отсюда импульс электрона

$$p = \sqrt{2m eU}, \quad (2)$$

где  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона,  $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона.

Тогда длину волны де Бройля электрона можно вычислить по формуле

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

Если ускоряющая разность потенциалов  $U$  имеет порядок нескольких десятков вольт, то длина волны де Бройля электрона составляет несколько ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ). Период кристаллической решетки твердых тел имеет тот же порядок величины, следовательно, возможно наблюдение дифракции электронов на кристаллах.

Таким образом, дифракционной решеткой для электронов, так же, как и для рентгеновских лучей, может служить кристалл. Но электроны сильнее взаимодействуют с веществом, чем рентгеновские лучи, что позволяет наблюдать электронную дифракцию на флюоресцирующем экране (экспозиции составляют несколько секунд).

В данной работе изучается дифракция электронов на поликристаллическом графите. Пусть пучок электронов с длиной волны де Бройля  $\lambda$  падает под углом скольжения  $\theta$  (рис. 1) на серию параллельных атомных плоскостей с межплоскостным расстоянием  $d$ . Отраженные от атомных плоскостей волны интерферируют между собой, подобно вторичным волнам, посылаемым различными точками отражательной дифракционной решетки.

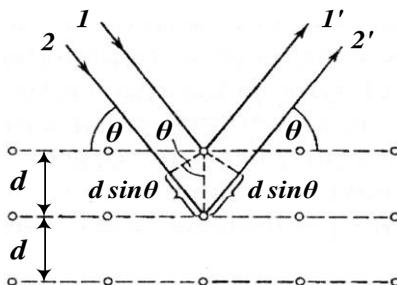


Рис. 1 - Схема брэгговского отражения электронного пучка от атомных плоскостей

Максимумы интенсивности (дифракционные максимумы) наблюдаются в тех направлениях, в которых все отраженные атомными плоскостями волны будут находиться в одинаковой

фазе.

Эти направления удовлетворяют формуле Вульфа-Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (4)$$

где  $d$  – межплоскостное расстояние в поликристалле графита,

$\theta$  – угол скольжения (угол между падающим пучком электронов и кристаллографической плоскостью),  $n = 1, 2, \dots$  – порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  – длина волны де Бройля электрона.

В поликристаллическом графите связи между отдельными слоями разрушены, поэтому ориентация кристалликов носит случайный характер. При фиксированной длине волны  $\lambda$  среди множества беспорядочно ориентированных кристалликов найдутся такие, при отражении от которых выполняется условие Вульфа-Брэгга (4). Статистически совокупность таких кристалликов обладает осевой симметрией вокруг направления падающего луча АВО (рис. 2). Поэтому точки С на флюоресцирующем экране, куда попадают отраженные электронные лучи, располагаются вдоль колец с центром в точке О. В результате дифракционная картина от поликристалла имеет вид концентрических колец с радиусами  $r$ . Каждое из колец соответствует некоторой серии параллельных атомных плоскостей с одинаковым межплоскостным расстоянием  $d$ .

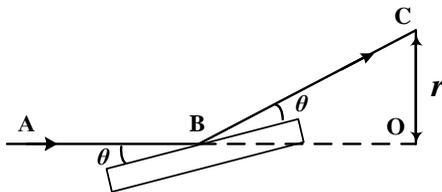


Рис. 2 - Схема дифракционной картины для поликристаллического графита

На рис. 3 показаны атомные плоскости графита с межплоскостными расстояниями  $d_1 = 213$  пм и  $d_2 = 123$  пм, соответствующие первым двум дифракционным кольцам. То есть дифракционная картина уже для первого порядка ( $n = 1$ ) состоит из двух дифракционных колец.

Интенсивность колец, соответствующих другим межплоскостным расстояниям графита, значительно ниже. Кольца более высоких порядков ( $n = 2, 3, \dots$ ) также имеют гораздо меньшую интенсивность.

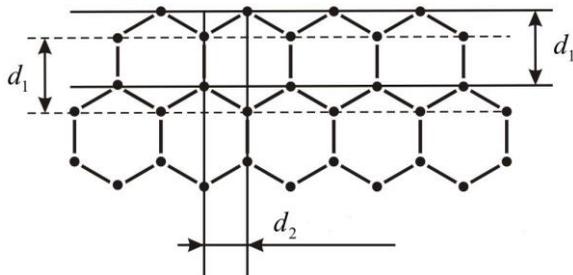


Рис. 3 - Атомные плоскости графита, соответствующие первым двум дифракционным кольцам

### Описание экспериментальной установки и теория метода измерений

Общий вид экспериментальной установки для изучения дифракции электронов представлен на рис. 4. Она состоит из высоковольтного источника напряжения 1, универсального источника питания 2 и электронно-дифракционного аппарата 3.

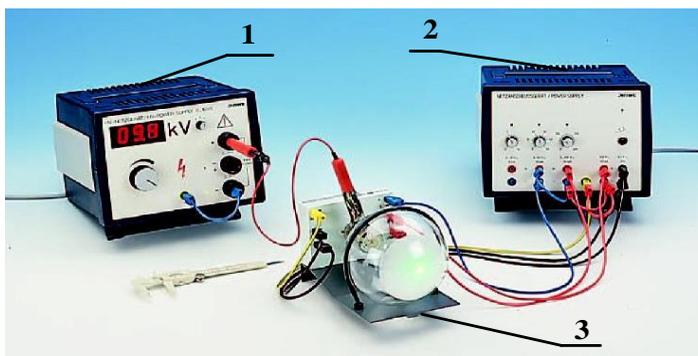


Рис. 4 - Экспериментальная установка

В качестве источника электронов в данной работе используется электронная пушка (рис. 5). Электронная пушка состоит из катода, нагреваемого нитью накаливания, системы фокусирующих электродов G1, G2, G4 и анода G3, питаемого регулируемым постоянным напряжением  $U = 3 \div 10$  кВ. Электроны, испущенные катодом в результате термоэлектронной эмиссии,

ускоряются разностью потенциалов  $U$ , которая приложена между катодом и анодом. Электронная пушка расположена в цилиндрической части вакуумной колбы, расширенная часть которой имеет форму сферы. Внутренняя часть сферической поверхности колбы покрыта люминофором, который начинает светиться при попадании на него ускоренных анодным напряжением электронов.

Ускоренные электрическим полем электроны дифрагируют на тонком поликристаллическом слое графита, состоящем из множества беспорядочно ориентированных кристалликов, и пучок отраженных от кристалликов электронов распространяется в виде конусов (рис. 5). В результате на люминофорном слое формируется кольцеобразная дифракционная картина; так как скорости термоэлектронов различны, эти кольца имеют конечную толщину.

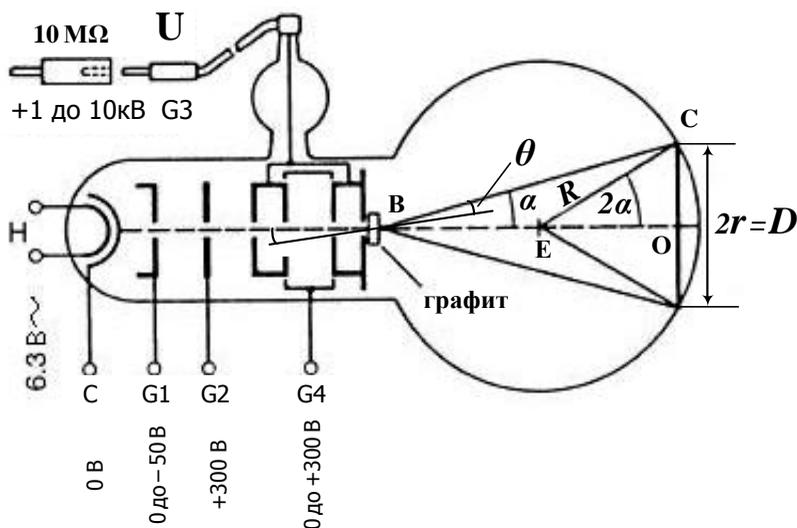


Рис. 5 - Схема электронно-дифракционного аппарата

Для поиска межплоскостного расстояния  $d$  графита нужно найти угол скольжения  $\theta$  (см. формулу Вульфа-Брэгга (4)); его можно рассчитать, зная радиус  $r$  дифракционного кольца. Из прямоугольного треугольника EOC (рис. 5) получим:

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

где  $R$  - радиус стеклянного баллона.

Поскольку углы  $\theta$  и  $\alpha$  малы, а угол скольжения  $\theta$  в два раза меньше угла отклонения  $\alpha$  электронов от первоначального направления распространения (см. рис. 5), имеем:

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha \approx 2 \sin \alpha \approx 4 \sin \theta.$$

Значит,

$$\sin \theta = \frac{\sin 2\alpha}{4} = \frac{r}{4R}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в условие Вульфа-Брэгга (4) и выразив радиус  $r$  кольца через его диаметр  $D$ , получим формулу для межплоскостного расстояния  $d$ :

$$d = \frac{4R}{D} n \lambda, \quad (7)$$

где  $R = 65$  мм – радиус стеклянного баллона,  $D$  – диаметр дифракционного кольца,  $n = 1$  – порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  – длина волны де Бройля электрона.

### Порядок выполнения работы

1. Установите на высоковольтном источнике 1 напряжение на аноде G3 от 3 до 7 кВ.

**Внимание! Не превышать верхнюю границу напряжения 7 кВ!!!**

2. На источнике питания 2 (рис. 4) установите на электроде G1 напряжение от 35 до 45 В, а на электроде G4 напряжение около 200 В. На экране электронно-лучевой трубки появятся два четких светлых кольца.

3. Измерьте штангенциркулем внутренние и внешние диаметры светлых 1-го и 2-го дифракционных колец.

4. Повторите пункты 1-3 еще для двух значений ускоряющего напряжения.

5. По формуле (3) рассчитайте длину волны де Бройля электрона.

6. Определите средние значения диаметров колец по формулам:

$$\langle D_1 \rangle = \frac{D_1^{\text{внутр}} + D_1^{\text{внеш}}}{2} \quad \text{и} \quad \langle D_2 \rangle = \frac{D_2^{\text{внутр}} + D_2^{\text{внеш}}}{2}.$$

7. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№	$U$	$\lambda$	$D_1^{\text{внутр}}$	$D_1^{\text{внеш}}$	$\langle D_1 \rangle$	$D_2^{\text{внутр}}$	$D_2^{\text{внеш}}$	$\langle D_2 \rangle$
-	кВ	пм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
1								
2								
3								

8. Определите межплоскостные расстояния  $d_1$  и  $d_2$  графита по формуле (7), используя вместо  $D$  средние значения  $\langle D_1 \rangle$  и  $\langle D_2 \rangle$ .

9. Рассчитайте средние значения  $\langle d_1 \rangle$  и  $\langle d_2 \rangle$ , а также их абсолютные и относительные погрешности по формулам:

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^3 d_i}{3}; \quad \Delta d_i = |\langle d \rangle - d_i|;$$

$$\langle \Delta d \rangle = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta d_i}{3}; \quad \delta d = \frac{\langle \Delta d \rangle}{\langle d \rangle}.$$

10. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

№	$d_1$	$\Delta d_1$	$\delta d_1$	$d_2$	$\Delta d_2$	$\delta d_2$
-	пм	пм	%	пм	пм	%
1			X			X
2						
3						
Среднее значение						

11. Сравните рассчитанные межплоскостные расстояния графита  $d_1$  и  $d_2$  с их теоретическими значениями ( $d_1^{\text{теор}} = 213$  пм и  $d_2^{\text{теор}} = 123$  пм). Рассчитайте относительные погрешности по формулам:

$$\delta d_1 = \frac{|d_1 - d_1^{\text{теор}}|}{d_1^{\text{теор}}}, \quad \delta d_2 = \frac{|d_2 - d_2^{\text{теор}}|}{d_2^{\text{теор}}}.$$

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте гипотезу де-Бройля. Запишите формулу для длины волны де-Бройля.
2. Какова природа волн де-Бройля?
3. Получите формулу для длины волны де-Бройля электрона, ускоренного разностью потенциалов  $U$ .
4. Запишите условие Вульфа — Брэггов для дифракционных максимумов.
5. Почему дифракционная картина в данной работе имеет вид концентрических колец?



## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. - М.: Высшая школа, 2010.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики / Д.В. Сивухин. - М: Физматлит, 2006. - т.4.