

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

**Кафедра общей и технической физики**

# **ФИЗИКА**

## **ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ**

*Методические указания к лабораторным работам*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2016**

УДК 539.2/145.+536.2.02

ФИЗИКА. Дифракция электронов. Методические указания к лабораторным работам /сост. Т.В. Стоянова, Ю.И. Кузьмин. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2016. 20 с.

Методические указания к лабораторной работе «Дифракция электронов» являются частью цикла методических указаний к лабораторным работам по дисциплине «Физика».

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Федеральных Государственных образовательных стандартов (ФГОС 3).

Предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки Горного университета.

Научный редактор *доц. Ю.И. Кузьмин*

© Национальный минерально-сырьевой университет  
«Горный», 2016 г.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В методических указаниях к лабораторной работе изложены теоретические основы работы солнечных элементов, для более глубокого ознакомления с физическими основами изучаемых явлений рекомендуется литература [1] – [4]. Описание работы знакомит с содержанием и методикой её выполнения. Примерная схема записи результатов измерений и их обработки (формы таблиц, отчёта, некоторые параметры измеряемого образца) приведены на рабочих местах. Вопросы к зачёту в конце описания позволяют студенту сосредоточиться на главном. Требования к оформлению отчёта изложены ниже.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Целью лабораторных работ является приобретение студентами практических навыков в проведении физического эксперимента, что включает в себя ознакомления с методиками измерения физических величин, обучение работе с измерительными приборами, методам и способам их правильного применения. Студенту предстоит совершенствовать свои навыки использования компьютера для написания отчетов и оформления графиков.

Прежде чем приступить к изучению лабораторной работы, рекомендуется ознакомиться с общей теоретической частью методического указания.

При подготовке к экспериментальной части лабораторной работы студенту необходимо оформить заготовку, которая должна содержать:

1. Цель работы;
2. Схему экспериментальной установки с указанием и расшифровкой её основных элементов;
3. Основные рабочие формулы, с расшифровкой величин, входящих в формулу и их размерности;
4. Таблицу для записи результатов измерений.

Титульный лист заготовки оформляется в соответствии с правилами оформления титульных листов лабораторных работ, принятыми в Горном университете.

Заполнение таблицы с результатами измерений следует проводить аккуратно, в строгом соответствии с показаниями приборов. Результаты измерений необходимо записывать непосредственно такими, какими они сняты с приборов, без какой-либо предварительной обработки. В случае если измерение выглядит неправдоподобно, необходимо перепроверить схему подключения прибора и аккуратно повторить измерение.

Никаких, даже самых простых арифметических расчетов, нельзя делать «в уме» для уменьшения вероятности ошибок. Промежуточные вычисления, если они есть, необходимо приводить в заготовке в письменном виде, от руки.

На основе данных, полученных в результате проведения лабораторной работы, оформляется отчет. Требования к отчету изложены на страницах 19 – 20 методических указаний.

Контрольные вопросы приведены на странице 19.

## **Работа ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ**

*Цель работы: Исследование волновых свойств электронов.*

### **1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

#### **1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Полезную информацию о структуре некоторых кристаллических твердых тел можно получить путем использования дифракционных методов, когда длина волны сравнима с размерами атомов. В 1912 г. Лауэ высказал предположение, что кристаллы можно рассматривать как трехмерную дифракционную решетку для рентгеновских лучей, длина которых сравнима с межатомными расстояниями, и что на основании дифракционной картины можно судить о правильном расположении атомов в кристалле. Метод дифракции рентгеновских лучей и по сей день остается основным источником

информации о структуре кристаллов, хотя в настоящее время для этих же целей используется дифракция электронов и нейтронов.

В 1913 г. У.Л. Брэгг предложил простую формулировку и получил простое математическое выражение необходимого условия дифракции волн на серии параллельных (атомных) плоскостей. Это выражение нельзя считать строгим, поскольку Брэгг рассматривал отражение от каждой атомной плоскости в отдельности, используя законы геометрической оптики без учёта эффектов физической (Дифракции Фраунгофера), ведущих к дифракционному усилению отражённой волны. Тем не менее, формула (11), полученная Брэггом, совпадает с результатами более точных расчетов Лауэ и Эвальда.

Следует обратить внимание на различие между дифракцией света на плоской дифракционной решётке и дифракцией электронов на кристалле. В первом случае угол падения не равен углу, под которым распространяется дифрагированное излучение. Существует взаимосвязь между этими двумя углами, длиной волны падающего света  $\lambda$  и расстоянием между соседними штрихами плоской дифракционной решётки. Согласно условию дифракции Брэгга, угол падения равен углу отражения (т.е. отражение является зеркальным). Из этого условия следует также, что максимальное отражение наступает при выполнении определенных соотношений между углом падения, длиной волны и расстоянием между двумя параллельными плоскостями. При этом закон Брэгга совершенно не учитывает расположение атомов в отдельной отражающей плоскости. Следует отметить, что условие Брэгга является необходимым, но недостаточным условием эффективного зеркального отражения от кристалла. Качество дифракционной картины, получающегося при отражении от определенных плоскостей, зависит как от *атомного фактора рассеяния* (или форм-фактора) для атомов, из которых состоят эти плоскости, так и от того, разрешено ли отражение с точки зрения *структурного фактора*. Однако, рассмотрение этих условий выходит за пределы курса общей физики.

## 1.2 ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ. ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ

При исследовании теплового излучения абсолютно чёрного тела и явления фотоэффекта было установлено, что испускание и поглощение излучения происходит отдельными порциями (квантами), причём энергия кванта излучения равна  $E = h\nu$  или в другой записи:

$$E = \hbar\omega, \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  — угловая частота соответствующего электромагнитного излучения, а  $\hbar = h/2\pi$  — модифицированная постоянная Планка ( $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с).

Квант электромагнитного излучения, или *фотон* как частица (корпускула) особого рода, не имеющая массы покоя, обладает энергией (1) и импульсом:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} \quad (2)$$

Кроме того, исходя из общего соотношения между массой и энергией

$$E = mc^2,$$

фотону можно также приписать некоторую величину, по размерности совпадающую с массой (не следует, смешивать это понятие с понятием массы в классической механике):

$$m_\phi = \frac{E}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2}, \quad (3)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Итак, было установлено, что свет (излучение) обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

Впервые гипотезу о волновых свойствах электрона высказал в 1925 г. французский физик Луи де Бройль<sup>1</sup>. Основная мысль де Бройля сводилась к тому, что можно применить квантовую теорию света для описания волновых свойств, движущихся элементарных частиц. При этом он предположил, что движущийся свободный электрон, имеющий импульс  $\vec{p} = m\vec{v}$  и кинетическую энергию  $E$ , описывается такой же функцией, что и плоская волна:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}t - \frac{(\vec{p}, \vec{r})}{\hbar}\right)}, \quad (4)$$

где скалярное произведение  $(\vec{p}, \vec{r})$  равно:

$$(\vec{p}, \vec{r}) = p_x x + p_y y + p_z z, \quad (5)$$

а  $\Psi_0$  — постоянная амплитуда.

По аналогии с квантовой теорией света де Бройль предположил, что соотношения (1) и (2), определяющие энергию и импульс фотона, справедливы и для волны, сопоставляемой свободному электрону, т.е. частота  $\omega$  такой волны и волновое число  $k$  определяются формулами:

$$\omega = \frac{E}{\hbar}; \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{p}{\hbar}. \quad (7)$$

Отсюда с учетом (6) и (7) выражение для обычной плоской электромагнитной волны:

$$\Psi = \Psi_0 e^{-i(\omega t - (\vec{k}, \vec{r}))},$$

принимает вид (4), т.е. получаем плоскую волну, названную позже *волной де Бройля*.

---

<sup>1</sup>Louis de Broglie (1892-1987) - выдающийся французский физик, лауреат Нобелевской премии (1929 г.).

В более простом случае движения свободного электрона вдоль оси  $OX$  соответствующая (4) волновая функция будет иметь вид:

$$\psi(x,t) = \psi_0 e^{-i\left(\frac{E}{\hbar}t - \frac{p_x}{\hbar}x\right)}. \quad (8)$$

В 1927 г. гипотеза де Бройля была подтверждена опытами по дифракции электронов, а еще позже на опыте были установлены волновые свойства и других элементарных частиц. Поэтому можно сказать, что электрону, движущемуся со скоростью  $\vec{v}$ , при условии, что  $v \ll c$ , будет соответствовать длина волны:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad (9)$$

называемая *длиной волны де Бройля*. Распространение волн де Бройля не связано с распространением в пространстве электромагнитного поля. Волны де Бройля имеют специфическую квантовую природу, не имеющую аналогов в классической физике.

Движущаяся частица обладает кинетической энергией:

$$E = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как модуль импульса равен  $p = mv$ , то можно записать выражение кинетической энергии через модуль импульса:

$$E = \frac{m^2 v^2}{2m} = \frac{p^2}{2m},$$

а модуль импульса выразить через кинетическую энергию:

$$p = \sqrt{2mE}.$$

Тогда соотношение (9) можно представить в виде:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}.$$



Для электрона, ускоренного электрическим полем с разностью потенциалов  $U$  (или  $\Delta\varphi$ ), кинетическая энергия может быть выражена через разность потенциалов и заряд:

$$E = \frac{m\nu^2}{2} = \bar{e}U ,$$

где  $\bar{e}$  — заряд электрона.

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\bar{e}U}} \approx \frac{1,225}{\sqrt{U}} \text{ (нм)} . \quad (10)$$

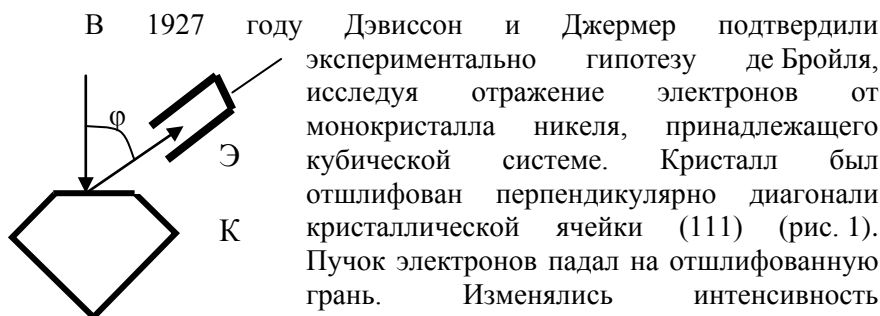


Рис. 1.

электронного пучка и угол  $\varphi$ . На пути отражённого электронного пучка был расположен цилиндрический электрод (Э). Интенсивность отражённого пучка оценивалась по силе тока, текущего через гальванометр. Рассеяние оказалось особенно интенсивным при определённом угле  $\varphi$ , который соответствовал отражению от атомных плоскостей. Сила тока оказалась значительной при напряжении 54 В. Длина волны Брэгга была вычислена по формуле

$$2d \sin \varphi = k\lambda , \quad (11)$$

где  $d$  — расстояние между атомными плоскостями и получилась равной  $1,65 \cdot 10^{-10}$  м. Вычисления по формуле (9) дали длину волны  $1,67 \cdot 10^{-10}$  м. Это послужило экспериментальным доказательством гипотезы де Бройля.

Аналогично тому, как согласуются между собой квантовая и волновая теории света, согласуются корпускулярные и волновые свойства элементарных частиц, в частности электронов. Пусть число электронов (или других частиц), попавших в данный элемент объема  $dV$ , пропорционально квадрату амплитуды волны де Бройля и величине элемента объема, т. е. число электронов приблизительно равно  $\psi_0^2 dV$ . Тогда вероятность  $dW$  того, что частица находится в данном элементе объема  $dV$ , пропорциональна квадрату амплитуды волны де Бройля, или квадрату модуля этой волны, т.е.:

$$dW = |\psi|^2 dV = \psi\psi^* dV, \quad (12)$$

где  $\psi^*$  — функция, комплексно сопряженная с самой волновой функцией. Из этого равенства следует, что квадрат модуля волны де Бройля (волновой функции) равен плотности вероятности нахождения свободной частицы в данной точке пространства. Такое толкование волновой функции справедливо не только для свободного электрона, но и для связанного электрона. Волновая функция удовлетворяет условию нормировки вероятностей:

$$\int_V |\psi|^2 dV = 1,$$

это означает, что пребывание частицы где-либо в пространстве, есть достоверное событие и вероятность этого события равна 1.

Следовательно, физический смысл волновой функции состоит в том, что квадрат её модуля есть плотность вероятности обнаружить частицу (электрон) в данной точке пространства, причем сама волновая функция является комплексной величиной.

По поводу волновых свойств электрона необходимо заметить также, что с точки зрения квантовой теории движение электронов можно рассматривать как электронные волны, определяемые волновыми функциями  $\Psi$ . Хотя сама волновая функция не имеет особого физического смысла, однако для свободного электрона существует определенная и весьма наглядная связь движения волны с движением самого электрона.

В самом деле, если рассматривать не строго монохроматическую волну с определёнными величинами  $\omega$  и  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ , а почти монохроматическую волну или группу волн (пакет), то:

$$\psi(x, t) = \int_{k_0}^{k_0 + \Delta k} \psi_0(k) e^{i(\omega t - kx)} dk,$$

где  $k_0$  — есть волновое число, соответствующее середине группы. Известно, что групповая скорость  $v_{gp}$  или скорость группы волн  $v$  определяется формулой:

$$v_{gp} = u = \frac{d\omega}{dk}.$$

С другой стороны, для свободного электрона из (6) и (7) имеем:

$$\omega = \frac{E}{\hbar} = \frac{p^2}{2m\hbar} = \frac{\hbar k^2}{2m}.$$

Тогда, на основании последнего выражения, скорость группы волн, или скорость пакета, будет равна:

$$u = \frac{d}{dk} \left[ \frac{\hbar k^2}{2m} \right] = \frac{\hbar k}{m} = v,$$

где  $v$  — есть модуль *мгновенной скорости* свободного электрона.

Связь между корпускулярными и волновыми свойствами частиц, обладающих массой покоя  $m$ , отражена в таблице 1.

Таким образом, для простейшего случая свободного электрона можно заключить, что групповая скорость волн де Бройля равна скорости движения электрона (частицы).

Таблица 1

Корпускулярные	Волновые свойства частиц
----------------	--------------------------

свойства частиц	
Модуль скорости, $v$	Длина волны де Бройля: $\lambda = h/(mv) = h/p = 2\pi\hbar/p$
Модуль импульса, $p$	Частота волны де Бройля: $\nu = E/h = E/(2\pi\hbar)$
Энергия свободной частицы $E = p^2/(2m)$	Фазовая скорость волн де Бройля: $v_{\text{фаз}} = \omega/k = E/p = v/2$ Групповая скорость волн де Бройля: $u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dE}{dp} = \frac{d}{dp} \left( \frac{p^2}{2m} \right) = \frac{p}{m} = v$

В этом смысле можно сказать, что волновая функция для свободного электрона или волна де Бройля имеет наглядное физическое истолкование. Поэтому с известным приближением движение свободного электрона можно рассматривать как движение группы (пакета) волн де Бройля. В отличие от электромагнитных волн для волн де Бройля существует дисперсия даже для частицы в вакууме.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. В работе используется электронно-дифракционная трубка с креплением 1, представляющая собой электронно-лучевую вакуумную трубку с мишенью в виде поликристаллической плёнки графита и стеклянной колбы, на внутреннюю поверхность которой нанесён слой люминофора для визуального наблюдения дифракционной картины.

Анодное напряжение подаётся  $U_A$  через резистор 4 номиналом 10 МОм от источника высокого напряжения 2 напряжением 0 - 10 кВ.

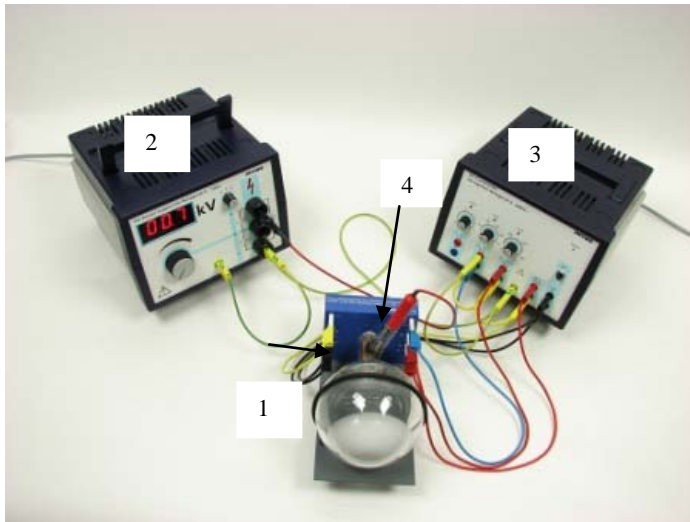


Рис. 2. Экспериментальная установка дифракции электронов, где 1 — электронно-дифракционная трубка с креплением; 2 — источник питания высоковольтный, 0 - 10 кВ; 3 — источник постоянного напряжения и тока; 4 — резистор 10 МОм

На пластмассовом креплении расположены контакты для подключения переменного напряжения 6,3 В, а также постоянных напряжений 0 - 50 В, 0 - 300 В, 0 - 300 В от блока питания 3. Штангенциркуль, изготовленный из диэлектрического материала, предназначен для измерения радиусов дифракционных колец.

Электрическая схема установки представлена на рис. 3.

Источник переменного напряжения  $U_{\sim}$  осуществляет нагрев катода электронно-дифракционной трубки.

Источник высоковольтного напряжения 2 обеспечивает необходимую длину волны  $\lambda$  электронного пучка.

Источник постоянного напряжения 0 - 600 В обеспечивает фокусировку и яркость дифракционной картины.

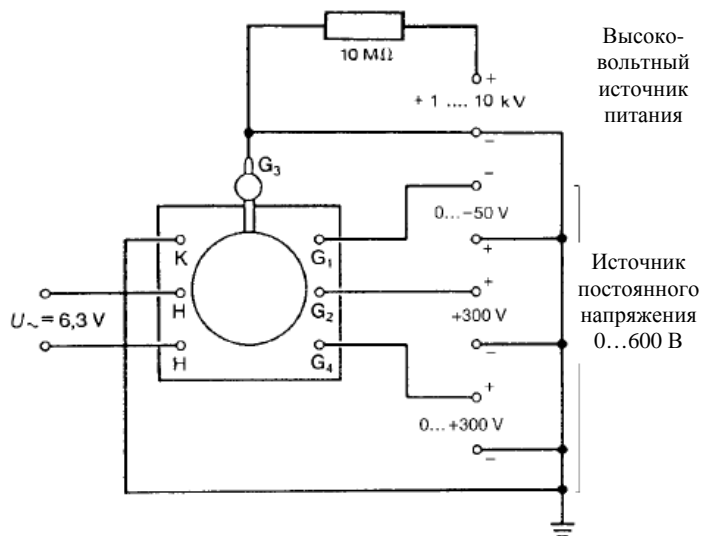


Рис. 3. Электрическая схема установки

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед включением оборудования лабораторной установки необходимо убедиться в отсутствии посторонних предметов в рабочей зоне и предупредить товарищей о начале лабораторной работы; до начала работы приборы должны быть выключены.

В работе используется источник высоковольтного напряжения 0 - 10 кВ блок 2 (рис. 2). Перед началом работы убедитесь, что ручка регулятора высокого напряжения выведена влево до упора.

В случае обнаружения неисправностей, связанных с токопроводящими проводниками, изоляцией, греющимися токоведущими частями, необходимо немедленно прекратить работу, выключить приборы и обратиться к преподавателю или дежурному лаборанту.

### 3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРА ДВУХ ПЕРВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ КОЛЕЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА АНОДЕ

Проверьте установку приборов, и подключение гнезд электронно-лучевой дифракционной трубки к источнику питания как показано на рис. 2. Убедитесь, что переключатель на блоке 2 установлен в положение III.

Включите высоковольтный источник питания 2 и источник постоянного напряжения и тока 3 выключателями, расположенными на задних панелях приборов.

Установите поворотом ручки высоковольтного источника питания 2 высокое напряжение на аноде G3 в пределах 2 кВ (рис. 3).

Поворотами ручек 2 и 3 на источнике постоянного напряжения и тока 3 установите напряжение G1 и напряжения на сетке G2 такие, чтобы появились чёткие дифракционные кольца на колбе электронно-дифракционной трубки 1.

Яркое пятно только в центре экрана может привести к повреждению флуоресцентного слоя трубки. Чтобы избежать этого после каждого измерения уменьшайте как можно скорее яркость дифракционной картинке средней ручкой, расположенной на источнике постоянного напряжения и тока 3.

Для определения диаметра дифракционного кольца, измерьте внутренний и внешний край кольца штангенциркулем (в затемненной комнате). Найдите середину ширины кольца: отнимите от внешнего диаметра кольца  $D_{\text{вн}}$  внутренний  $D_{\text{внут}}$ :

$$\Delta D = D_{\text{вн}} - D_{\text{внут}}$$

разницу разделите пополам. Для нахождения радиуса кольца  $r$  прибавьте к диаметру внутреннего края кольца  $D_{\text{внут}}$  половину ширины кольца  $\Delta D / 2$  и разделите пополам.

$$r = (\Delta D / 2 + D_{\text{внут}}) / 2.$$

Измерения диаметра первого  $D_1$  и второго кольца  $D_2$  повторите три раза для каждого напряжения на аноде G3. Напряжение на аноде  $U_A$  меняйте с шагом 0,5 кВ от 2 до 4,5 кВ.

Результаты измерений диаметров колец  $D_1$ ,  $D_2$  и расчётов их радиусов  $r_1$ ,  $r_2$  занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Номер опыта	Физическая величина								
	$U_A$ , кВ	$D_1$ , мм			$D_2$ , мм			$r_1$ , мм	$r_2$ , мм
1.	2,0	$D_{1внут}$	$D_{1вн}$	$\Delta D_1$	$D_{2внут}$	$D_{2вн}$	$\Delta D_2$		
Средний									
2.	2,5								
Средний									
...									
$N$									

#### 4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Длина волны электрона определяется его импульсом  $p$ . Согласно соотношению де Бройля (10)

$$\lambda \approx \frac{1,225}{\sqrt{U_A}} \text{ (нм)}, \quad (13)$$

где  $U_A$  — напряжение на аноде электронно-лучевой трубки. При напряжениях  $U_A$  менее 10 кВ релятивистская масса электрона может быть заменена его массой покоя с погрешностью всего 0,5%.

В нашем случае, ускоренный электронный пучок направляется на поликристаллическую плёнку графита, нанесённую на медную решётку, и отражается в соответствии с условием Брэгга (11). Для дифракционных колец  $r_1$  и  $r_2$  —  $n = 1$ , поэтому для нашего случая условие Брэгга:

$$2 \cdot d \cdot \sin \varphi = \lambda, \quad (14)$$



где  $d$  является расстоянием между атомными плоскостями углерода (рис.5,6),  $\varphi$  — угол Брэгга (угол между пучком электронов и плоскостью кристаллической решётки).

Угол Брэгга  $\varphi$  может быть рассчитан по радиусу интерференционного кольца, но следует помнить, что угол отклонения (рис. 4) в два раза больше:  $\alpha = 2\varphi$

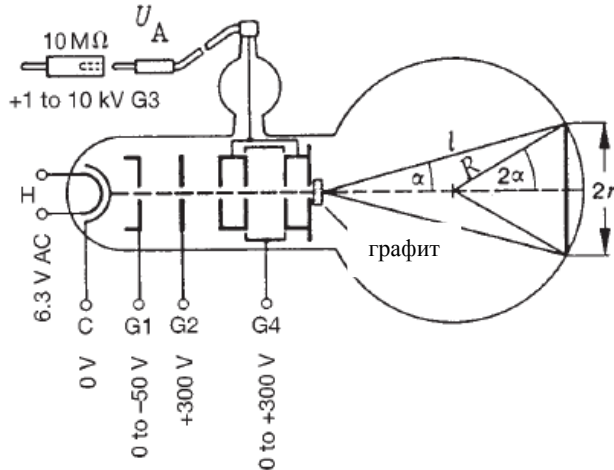


Рис. 4. Электронно-дифракционная трубка с источником питания

Из геометрии дифрагированного электронного пучка рис. 4 мы видим, что

$$\sin 2\alpha = \frac{r}{R},$$

где  $R = 65$  мм, радиус стеклянной колбы. Для малых углов

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha,$$

так что при малых углах  $\varphi$  получаем:

$$\sin \alpha = \sin 2\varphi = 2\sin \varphi = r/2R.$$

Подставив полученное значение синуса угла в (14), получим расчётную формулу для радиуса дифракционного кольца

$$r = \frac{2 \cdot R \cdot \lambda}{d} \quad (15)$$

Кристаллическая решётка графита представлена на рис. 5

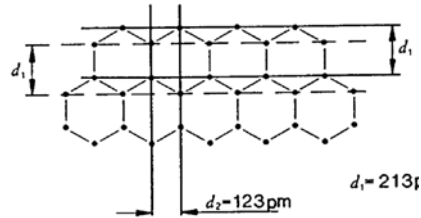
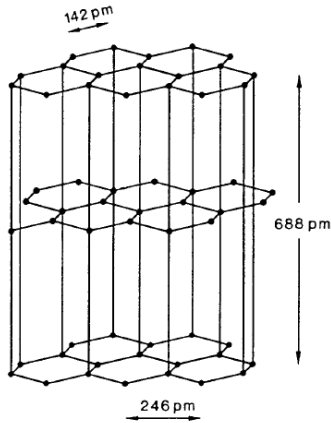


Рис. 5. Кристаллическая решётка графита.

Рис. 6. Плоскости кристаллической решётки графита с межатомными расстояниями  $d_1$  и  $d_2$

На рис. 5 отчётливо видны периодические структуры графита с двумя межатомными расстояниями:  $d_1 = 213$  пм и  $d_2 = 123$  пм. Два внутренних интерференционных кольца получаются путём отражения от плоскостей решётки  $d_1$  и  $d_2$  (рис. 6), при  $n = 1$ .

#### 4.1 РАСЧЕТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЭЛЕКТРОНОВ

Длина волны рассчитывается из анодного напряжения в соответствии с (13), результаты расчётов занесите в таблицу 3.

Таблица 3

U <sub>Δ</sub> , кВ	2,0	2,5	3,0	3,5	4,5	5,0
λ, пм						

#### 4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖПЛОСКОСТНЫХ РАСТОЯНИЙ ГРАФИТА ИЗ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАДИУСОМ ДИФРАКЦИОННОГО КОЛЬЦА И ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

Постройте график зависимости радиусов дифракционных колец  $r$  (мм) из таблицы 2 от длины волны электронов  $\lambda$  (пм) из таблицы 3. Проведите через точки графиков  $r(\lambda)$  прямые линии. Определите из графиков значения  $\lambda/r$ , по которым вычислите межплоскостные расстояния графита  $d_1$  и  $d_2$  из формулы

$$d = 2 \cdot R \cdot \frac{\lambda}{r}. \quad (15)$$

Из (15) и данных табл. 2 для радиусов дифракционных колец  $r_1$  и  $r_2$  определите погрешности измерений межплоскостных расстояний графита  $\Delta d_1$  и  $\Delta d_2$ . Запишите результаты измерений межплоскостных расстояний графита с учетом их погрешностей.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ПРОВЕРКИ ВЛАДЕНИЯ МАТЕРИАЛОМ

1. Расскажите о корпускулярно-волновом дуализме в микромире.
2. В чём заключается гипотеза де Бройля?
3. Как определяется длина волны де Бройля?
4. Какова связь между вероятностью  $dW$  нахождения частицы в элементе объема  $dV$  и амплитудой волны де Бройля?
5. Чему равен квадрат модуля волны де Бройля (волновой функции)?
6. Чему равна групповая скорость волн де Бройля для свободного электрона?
7. Условие нормировки волновой функции.

8. Получите расчётную формулу для радиуса дифракционного кольца.

### ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ

По лабораторной работе оформляется отчёт, который должен содержать:

- 1) номер и название работы;
- 2) формулировку цели работы;
- 3) схему установки;
- 4) физическое обоснование цели работы и метода измерения;
- 5) рабочие формулы с расшифровкой всех буквенных обозначений;
- 6) приборные погрешности;
- 7) результаты прямых измерений и вычислений;
- 8) вычисленные погрешности;
- 9) построенные графики зависимостей  $r(\lambda)$ ;
- 10) анализ результатов и выводы;
- 11) подпись студента и дату выполнения данной лабораторной работы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Детлаф А.А.*, Курс физики. /Детлаф А.А, Яворский Б.М. М.: Высшая школа, 2009.
2. Парфенова И.И. Квантовая механика, физика твёрдого тела и элементы атомной физики. / Парфенова И.И., Егоров С.В., Мустафаев А.С. и др. Сборник задач для студентов технических специальностей, СПб.: СПГИ (ТУ), 2010. 112 с.
3. *Савельев И.В.* Курс физики. Т.3, М.: Лань, 2008.
4. *Трофимова Т.И.* Курс физики. / М.: Высшая школа, 2001 и др. г. изд.

## СОДЕРЖАНИЕ:

Введение.....	3
Рекомендации к выполнению лабораторных работ.....	3
1. Основные теоретические положения.....	5
2. Экспериментальная установка.....	14
3. Порядок выполнения работы.....	15
4. Обработка экспериментальных данных.....	16
Вопросы для самоконтроля и проверки владения материалом....	19
Требования к отчёту .....	20
Библиографический список .....	20