



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Виртуальный практикум

Лабораторная работа № 2-В
«Дифракция электронов на щели»
по дисциплине

«Физика»

Авторы
Жданова Т. П.,
Кудря А. П.,
Лемешко Г. Ф.,
Холодова О. М.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Настоящая лабораторная работа посвящена изучению дифракции электронов на узкой щели. Рассмотрена дифракция электронного пучка малой интенсивности и дифракция электронного пучка большой интенсивности.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента, особенно при дистанционном обучении.

Авторы

к.ф.-м.н., Жданова Т.П.	доцент	кафедры	«Физика»
ст. Кудря А.П.	преподаватель	кафедры	«Физика»
к.ф.-м.н., Лемешко Г.Ф.	профессор	кафедры	«Физика»
ст. Холодова О.М.	преподаватель	кафедры	«Физика»

Оглавление

Краткая теория	4
Выполнение работы	8
Задание 1. Дифракция электронного пучка малой интенсивности.	8
Задание 2 Дифракция электронного пучка большой интенсивности.	8
Контрольные вопросы	9
Рекомендуемая литература	9

Цель работы: моделирование на ЭВМ мысленного эксперимента по дифракции электронов на одномерной щели.

Оборудование: ЭВМ с введенной в нее программой по моделированию дифракции электронов на щели.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Дифракция – это процесс огибания волной препятствий, соизмеримых с длиной волны. Явление дифракции характерно для волновых процессов.

В оптических явлениях наблюдается корпускулярно-волновой дуализм, т.е. свет имеет двойственную природу, сочетая в себе как волновые свойства, так и свойства, присущие частицам.

Французский физик Луи де Бройль в 1924 году выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Де Бройль утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые элементарные частицы наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами.

По де Бройлю с каждым микрообъектом связываются характеристики: корпускулярные – энергия E и импульс p ; волновые – частота ν и длина волны λ . Однако, электроны и большинство других элементарных частиц имеют массу покоя, а фотоны «в покое» не существуют.

Любой микрочастице, обладающей импульсом $p = m\nu$, сопоставляют волну, длина которой вычисляется по формуле де Бройля. Длина волны де Бройля:

$$\lambda = h/p = h/m\nu, \quad (1)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, $p = m\nu$ – импульс частицы.

Гипотеза де Бройля была подтверждена экспериментально.

В 1927 г. американские физики К. Девиссон и Л. Джермер обнаружили, что пучок электронов, рассеивающийся от естественной дифракционной решетки (кристалле никеля) дает отчетливую дифракционную картину, аналогичную той, которая имеет место от рентгеновских лучей. Дифракционные максимумы соответствовали формуле Вульфа – Брэгга, а длина волны оказалась равной длине волны, вычисленной по де Бройлю.

Советский ученый П. Тартаковский наблюдал дифракционную картину при прохождении пучка быстрых электронов через металлическую фольгу.

О. Штерн и его сотрудники показали, что дифракционные явления обнаруживаются также у атомных, молекулярных и нейтронных пучков.

Таким образом было доказано, что микрочастицы обладают волновыми свойствами.

Австрийский физик Эрвин Шредингер, исследуя проблемы корпускулярно-волнового дуализма, в 1926 году сформулировал фундаментальное уравнение, которое называется основным уравнением квантовой механики. Незвестной величиной, входящей в уравнение Шредингера, является некая функция координат и времени – так называемая Ψ -функция (пси-функция).

По замыслу Шредингера волновая функция должна описывать местоположение частицы в пространстве и во времени, поскольку частица вероятнее всего находится в той области, где интенсивность волн велика. Физический смысл пси-функции определил Макс Борн: квадрат модуля Ψ -функции равен вероятности нахождения частицы в данной точке пространства в данный момент времени.

В общем случае Ψ -функция является функцией координат и времени $\Psi(x, y, z, t)$, а общее уравнение Шредингера, объединяющее воедино теорию де Бройля и волновую функцию, имеет следующий вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (2)$$

где Δ – оператор Лапласа $\left(\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right)$,

$U(x, y, z, t)$ – потенциальная функция частицы в силовом поле, в котором она движется, m – масса частицы, i – мнимая единица, $\hbar = h / 2\pi$ – постоянная Планка.

Во многих случаях, например, свободно движущийся электрон, потенциальная энергия частицы с течением времени не изменяется, т.е. не зависит от времени явно. В этом случае пси-функция зависит только от координат, а уравнение (2) вырождается в *стационарное* уравнение Шредингера:

$$\Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0, \quad (3)$$

где E – полная энергия частицы.

Проведем мысленный эксперимент по дифракции электронов на узкой щели. Схема эксперимента представлена на рисунке 1,а.

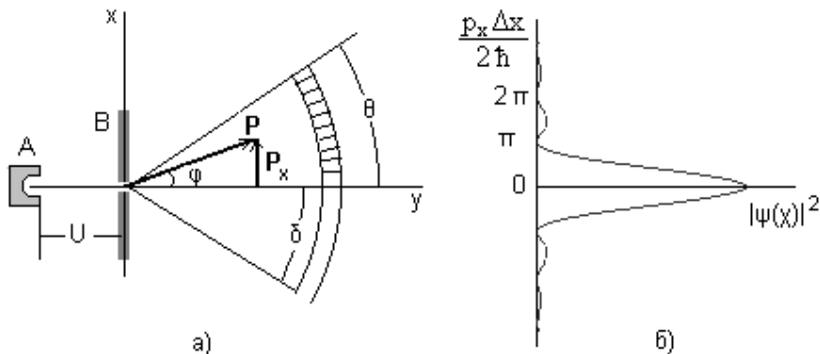


Рис.1

Электроны из эмиттера A , ускоренные разностью потенциалов U , приобретают у щели в направлении координаты OY импульс:

$$p = \sqrt{2emU} , \quad (4)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ - заряд электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ - масса электрона.

Пройдя щель, шириной Δx электроны создают дифракционное поле, угол раствора которого зависит от длины волны де Бройля и ширины щели.

Распределение электронов в дифракционном поле описывается плотностью вероятности $|\Psi(x)|^2$, получаемой из формулы (3):

$$|\Psi(x)|^2 = \left(\frac{\Delta x}{2\pi\hbar} \right) \frac{\sin^2 [p_x \Delta x / (2\hbar)]}{[p_x \Delta x / (2\hbar)]^2} , \quad (5)$$

где $p_x = p \sin \varphi$ - проекция импульса электрона на ось OX (рис.1,а).

График зависимости плотности вероятности $|\Psi(x)|^2$ от угла дифракции $p_x \Delta x / (2\hbar)$ приведен на рисунке 1,б.

Минимум k - го порядка такого распределения совпадает с таким же минимумом фраунгоферовой дифракции на щели шириной Δx , который определяется из соотношения:

$$\Delta x \sin \varphi = k\lambda , \quad (6)$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$ - порядок минимума.

Для регистрации электронов в дифракционном поле установлены плотно друг к другу Z счетчиков, образующих сегмент с углом раствора

⊖ (рис.1,а). Такое расположение счетчиков позволяет улавливать электроны, попавшие в одну из симметрично расположенных половинок дифракционного поля.

Вероятность попадания электрона с импульсом p_k в k – й счетчик зависит от положения счетчика в распределении, указанном на рисунке 1б. Так, например, вероятность попадания электронов в область максимума 0 – го порядка во много раз выше вероятности попадания в счетчики, расположенные в области максимумов 1, 2-го и т.д. порядков. Вероятность попадания электронов в счетчики, расположенные в области дифракционных минимумов стремится к нулю.

Величину p_x ЭВМ генерирует случайным образом так, что направления дифрагированных электронов колеблются в пределах дифракционного поля.

В процессе работы программы, ЭВМ производит подсчет «срабатываемых» счетчиков и в заключение выводит на экран монитора информацию о содержании счетчиков и гистограмму дифракционной картины (рис.2). Число частиц, участвующих в эксперименте, задается произвольно с пульта управления.

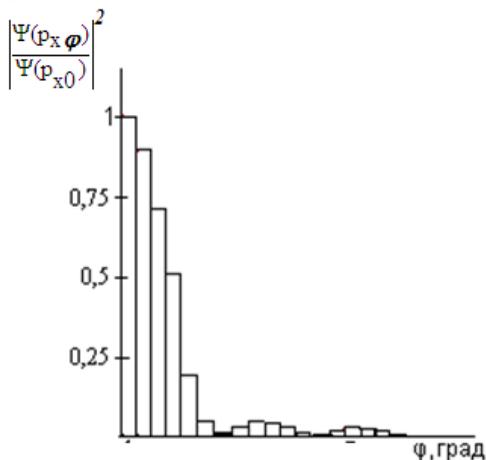


Рис.2

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Дифракция электронного пучка малой интенсивности.

1. Запустить программу с помощью файла rhiz.exe.
2. Выбрать в меню пункт «Ввод данных». В открывшемся окне ввести требуемые данные:
 - а) количество электронов (из интервала $10 \leq N \leq 50$);
 - б) количество счетчиков Z (из интервала $10 \leq Z \leq 30$);
 - в) угол раствора всех счетчиков (из интервала $20 \leq \varphi \leq 50$).
- Нажать «ОК».
3. Нажать кнопку «Модель» и наблюдать эксперимент.
4. Нажать кнопку «Расчет» и записать показания счетчиков в таблицу 1.
5. Перейти на пункт «Гистограмма» и посмотреть распределение электронов по счетчикам.
6. Для удаления окна с гистограммой нажать на слово «гистограмма».
7. Повторить пункты 4 – 5 ещё четыре раза.
8. Проведя анализ полученных результатов и сравнивая гистограммы, убедиться в том, что от опыта к опыту результаты не повторяются.

Таблица 1

Результат № опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										

Задание 2 Дифракция электронного пучка большой интенсивности.

1. Выбрать в меню пункт «Ввод». Не меняя количество счетчиков и их расположение в дифракционном поле, ввести в ЭВМ количество электронов порядка $N \approx 10^6 - 10^8$. Результат дифракции оценить по гистограмме.
2. Повторить пункт 1 несколько раз и убедиться в стабильности дифракционной картины.
3. По гистограмме определить угловое расстояние между

ФИЗИКА

счетчиками, то есть углы φ , соответствующие минимумам 1-го, 2-го и 3-го порядков. Занести в таблицу 2.

Таблица 2

$\Delta x = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ - ширина щели					
k	φ , град	$\sin \varphi$	λ , м	$\Delta \lambda$, м	$\delta \lambda$, %
1					
2					
3					
СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ					
$p =$			$U =$		

4. По формуле (6) вычислить три значения длины волны де Бройля для трёх значений φ . Найти ее среднее значение $\langle \lambda \rangle$, а также абсолютные погрешности каждого измерения $\Delta \lambda$, средние значения абсолютной $\langle \Delta \lambda \rangle$ и относительной погрешностей

$$\delta = \frac{\langle \Delta \lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle} 100\% .$$

5. По формуле де Бройля (1) для среднего значения длины волны определить импульс p одного электрона, а по формуле (4) ускоряющую разность потенциалов U , прошедшую электронами. Занести в таблицу 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется дифракцией света?
2. В чём заключается корпускулярно-волновой дуализм?
3. В чем состоит смысл гипотезы де Бройля?
4. Какие трудности возникали при развитии теории де Бройля?
5. Запишите уравнение Шредингера для стационарных состояний.
6. Каков смысл Ψ -функции ?
7. В чем состоит идея мысленного эксперимента по дифракции электронов на щели и как его реализуют на ЭВМ?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. М.: Наука.2010.
2. Трофимова Т. И. Курс физики. М.: Высшая школа. 2016.