

## Лабораторная работа по общей физике

### 5.1.1 Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта и определение постоянной Дирака.

Выполнили студенты группы Б06-103:

Фитэль Алена

Флоренская Лидия

# 1 Введение

**Цель работы:** Исследовать зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, определить по полученным данным величину постоянной Дирака.

**В работе используются:** электрическая лампа накаливания, призмный монохроматор УМ-2, фотоэлемент Ф-25, неоновая лампа, усилитель постоянного тока, цифровой вольтметр В7-78, мультиметр GDM-8145.

## 2 Теоретический материал [1]

Испускание электронов фотокатодом, облучаемым светом, называется внешним фотоэффектом. Такое взаимодействие можно представить как столкновение фотонов, несущих энергию  $\hbar\omega$  и импульс  $\hbar\omega/c$ , и электронов фотокатода. Энергетический баланс фотоэффекта описывается уравнением

$$\hbar\omega = E_{max} + W \quad (1)$$

где  $E_{max}$  - максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода,  $W$  - работа выхода электрона из катода.

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов (реально их энергетический спектр непрерывен - он простирается от 0 до  $E_{max}$ ) вблизи фотокатода располагают анод, на который подается задерживающий ( $V < 0$ ) или ускоряющий ( $V > 0$ ) потенциал.

При достаточно больших ускоряющих напряжениях фототок достигает насыщения (рис.(1)) : все испущенные электроны попадают на анод, а при задерживающих потенциалах электроны с малой кинетической энергией заворачиваются полем и не достигают анода. При некотором значении  $V = -V_0$  - потенциале записания - фототок достигает нуля.

Для потенциала записания верна связь с максимальной кинетической энергией электронов

$$E_{max} = e \cdot V_0 \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) получим **уравнение Эйнштейна для фотоэффекта** :

$$e \cdot V_0 = \hbar\omega - W \quad (3)$$

Чтобы определить величину запирающего напряжения, нужно правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость рис. (1) к нулю. Для поиска функциональной зависимости  $I(V)$  по расчету для простейшей геометрии - плоского катода, освещаемого светом и параллельного ему анода приходим к зависимости

$$\sqrt{I} \propto (V_0 - V) \quad (4)$$

С целью экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна (3) в работе определяются потенциалы записания  $V_0$  для различных частот света  $\omega$ , лежащих в видимой области спектра. Затем строится зависимость  $V_0(\omega)$ , которая, согласно (3), имеет вид

$$V_0 = \frac{\hbar\omega - W}{e} \quad (5)$$

Поэтому по наклону прямой на графике  $V_0(\omega)$  (рис. (2)) можно определить постоянную Дирака:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \quad (6)$$

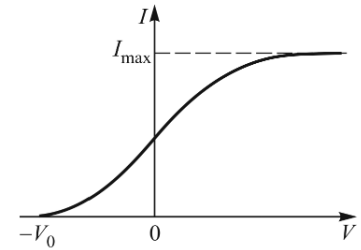


Рисунок 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

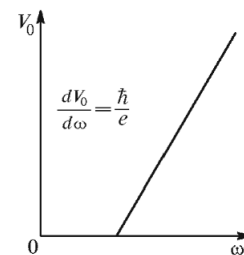


Рисунок 2: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

Как показывает формула (6), угол наклона прямой  $V_0(\omega)$  не зависит от рода вещества, из которого сделан катод. Но от рода зависит величина фотопотока и работа выхода  $W$  и форма кривой  $I(V)$ . Все это определяет выбор пригодных для опыта катодов.

### 3 Экспериментальная установка

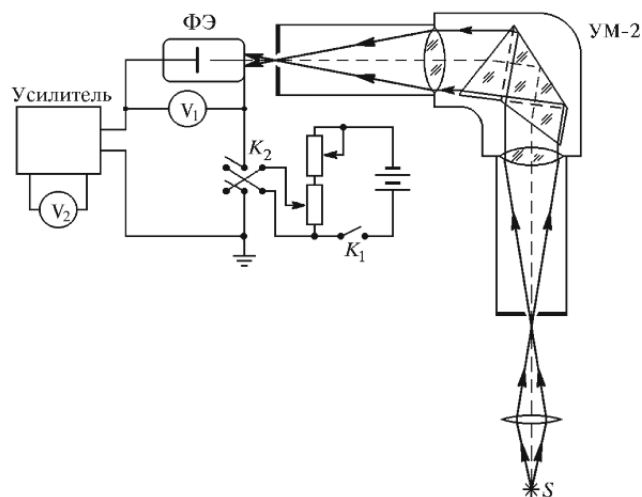


Рисунок 3: Принципиальная схема экспериментальной установки

Схема установки показана на рис. (3). Свет от обычной лампы накаливания с помощью конденсора фокусируется на входную щель призменного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента ФЭ.

Фотоэлемент представляет собой откачанный до высокого вакуума стеклянный балон, с расположенными внутри фотокатодом и анодом, где фотокатод - тонкая пленка металла, легированная элементами  $Na$ ,  $K$ ,  $Cs$ , расположенная на массивной металлической пластине, а анод выполнен в виде пояска тонкой пленки, осажденной на внутренней части боковой поверхности сверху балона. Наибольшая чувствительность ФЭ лежит в области от 400 до 500 нм, а полная область чувствительности - от 300 до 850 нм.

Абсолютные значения фототока нам не нужны, поэтому он измеряется в относительных единицах цифровым вольтметром  $V_2$ , подключенным к выходу усилителя постоянного тока. Эти показания пропорциональны величине измеряемого тока. Тормозящий потенциал регулируется при помощи двух потенциометров "Грубо" и "Плавно". Измерение тормозящего потенциала осуществляется с помощью вольтметра  $V_1$ .

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Градуировка монохроматора

1. Используя зрительную трубу монохроматора, проградуируем барабан монохроматора по спектру неоновой лампы и построим соответствующую градуировочную кривую (рис. (4)).

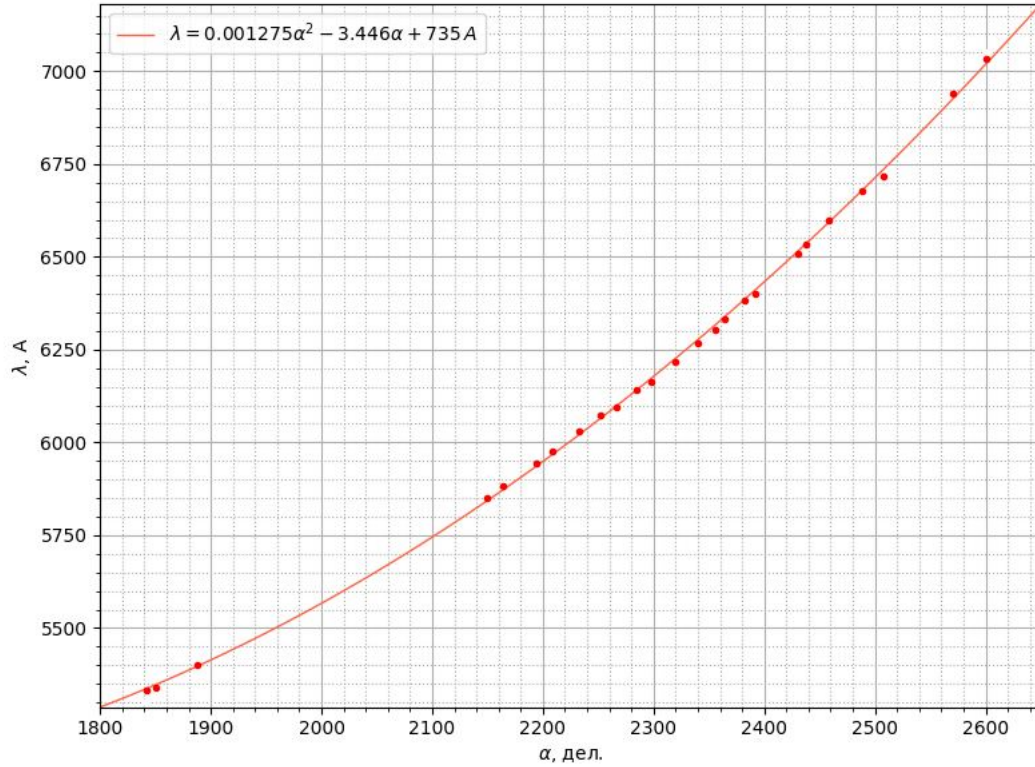


Рисунок 4: Градуировочная кривая монохроматора

2. Проведем аппроксимацию градуировочной кривой полиномом второй степени по МНК:

$$\lambda = 0.00128\alpha^2 - 3.446\alpha + 7358 \text{ А}$$

$$a = (12.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-4} \text{ \AA}; \quad b = -3.45 \pm 0.17 \text{ \AA}; \quad c = (73.6 \pm 1.9) \cdot 10^2 \text{ \AA}$$

3. Определим погрешность вычисления длин волн и циклических частот ( $\omega = 2\pi c/\lambda$ ):

$$\delta\lambda = \sqrt{(f'_\alpha \cdot \delta\alpha)^2 + (f'_a \cdot \delta a)^2 + (f'_b \cdot \delta b)^2 + (f'_c \cdot \delta c)^2} \approx \sqrt{(\alpha^2 \cdot \delta a)^2 + (\alpha \cdot \delta b)^2 + \delta c^2}$$

$$\delta\omega = |\omega'_\lambda| \delta\lambda = \left| \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \right| \delta\lambda.$$

### 4.2 Исследование зависимости фототока от величины запирающего потенциала

1. Заменяем неоновую лампу на электрическую.

2. Снимем зависимости фототока от напряжения для выбранных длин волн, меняя  $V$  в диапазоне от величины  $V_0$ , где фототок около нуля, до  $0$ . Построим серию графиков  $\sqrt{I} = f(V)$  (рис. (5)), определяя для каждой длины волны величину запирающего потенциала как  $b/a$ , где  $ax + b$  - прямая, аппроксимирующая полученную кривую (Таблица (1)).

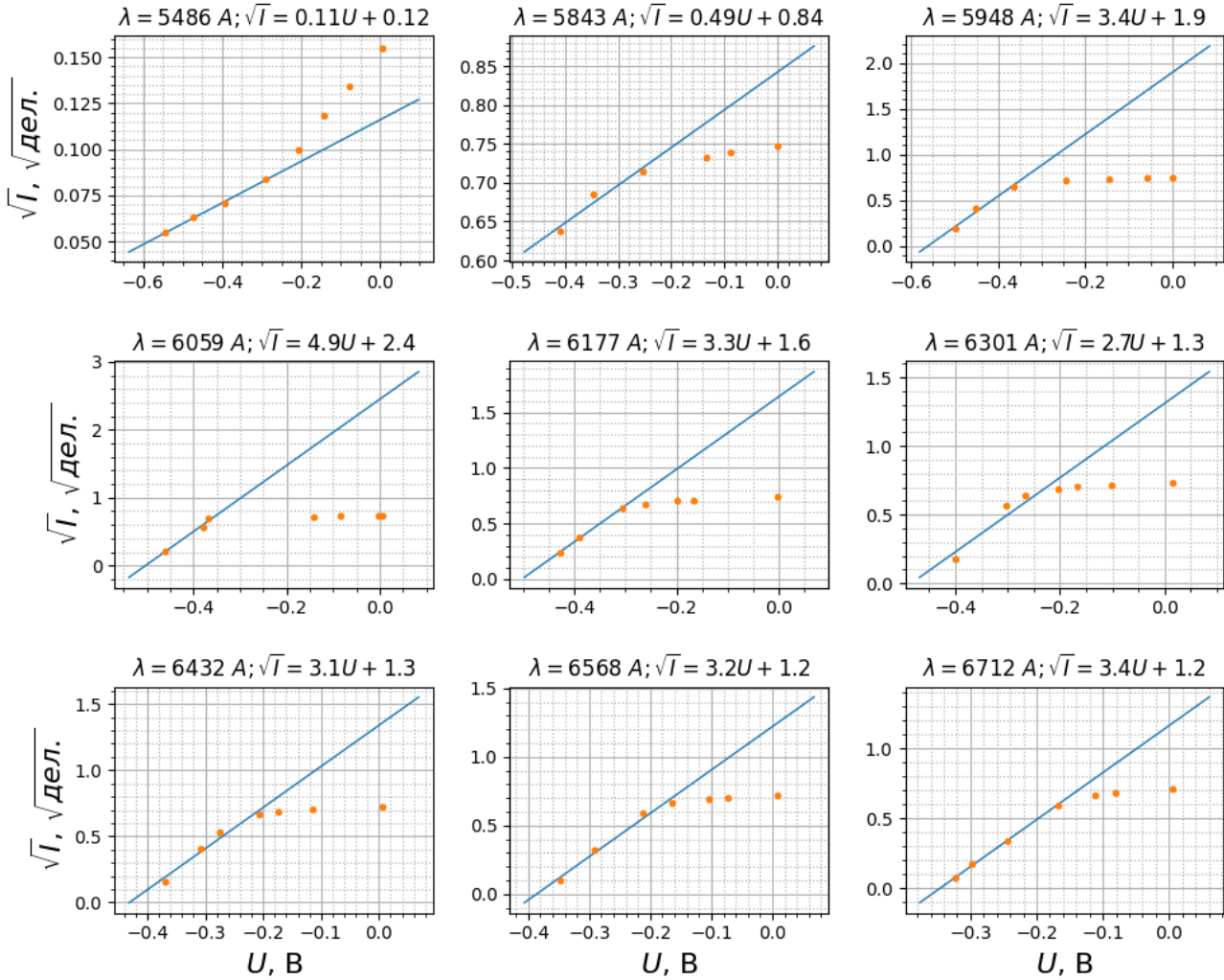


Рисунок 5: Серия графиков  $\sqrt{I} = f(V)$

Таблица 1: Коэффициенты аппроксимации кривых и величины запирающего напряжения для каждой длины волны

$\alpha, ^\circ$	$\lambda, \text{\AA}$	$a, \frac{\sqrt{A}}{B}$	$b, \sqrt{A}$	$V_0, B$	$\omega, 10^{15} \text{ c}^{-1}$
1950	$5480 \pm 410$	$0,106 \pm 0,007$	$0,113 \pm 0,003$	$1,06 \pm 0,08$	$3,4 \pm 0,3$
2150	$5840 \pm 450$	$0,33 \pm 0,09$	$0,79 \pm 0,03$	$1,7 \pm 0,3$	$3,2 \pm 0,3$
2200	$5950 \pm 460$	$3,4 \pm 0,6$	$1,9 \pm 0,3$	$0,56 \pm 0,12$	$3,2 \pm 0,3$
2250	$6060 \pm 470$	$4,8 \pm 0,8$	$2,5 \pm 0,3$	$0,50 \pm 0,11$	$3,1 \pm 0,2$
2300	$6180 \pm 480$	$3,27 \pm 0,16$	$1,64 \pm 0,06$	$0,50 \pm 0,03$	$3,1 \pm 0,2$
2350	$6300 \pm 490$	$3,6 \pm 0,4$	$1,63 \pm 0,14$	$0,45 \pm 0,07$	$3,0 \pm 0,2$
2400	$6430 \pm 500$	$3,1 \pm 0,4$	$1,34 \pm 0,13$	$0,43 \pm 0,07$	$2,9 \pm 0,2$
2450	$6570 \pm 520$	$3,2 \pm 0,3$	$1,22 \pm 0,09$	$0,39 \pm 0,05$	$2,9 \pm 0,2$
2500	$6710 \pm 530$	$3,34 \pm 0,05$	$1,16 \pm 0,01$	$0,348 \pm 0,007$	$2,8 \pm 0,2$

### 4.3 Определение постоянной Дирака, оценка красной границы и работы выхода материала катода

1. Построим график зависимости  $V_0(\omega)$  с помощью взвешенного МНК. Две последние точки не будем учитывать в силу их заметного отклонения от остальных значений и линейной зависимости :

$$a = 0,55 \pm 0,05 \cdot 10^{-15} \text{ с} \cdot \text{В}; \quad b = -1,18 \pm 0,16 \text{ В}.$$

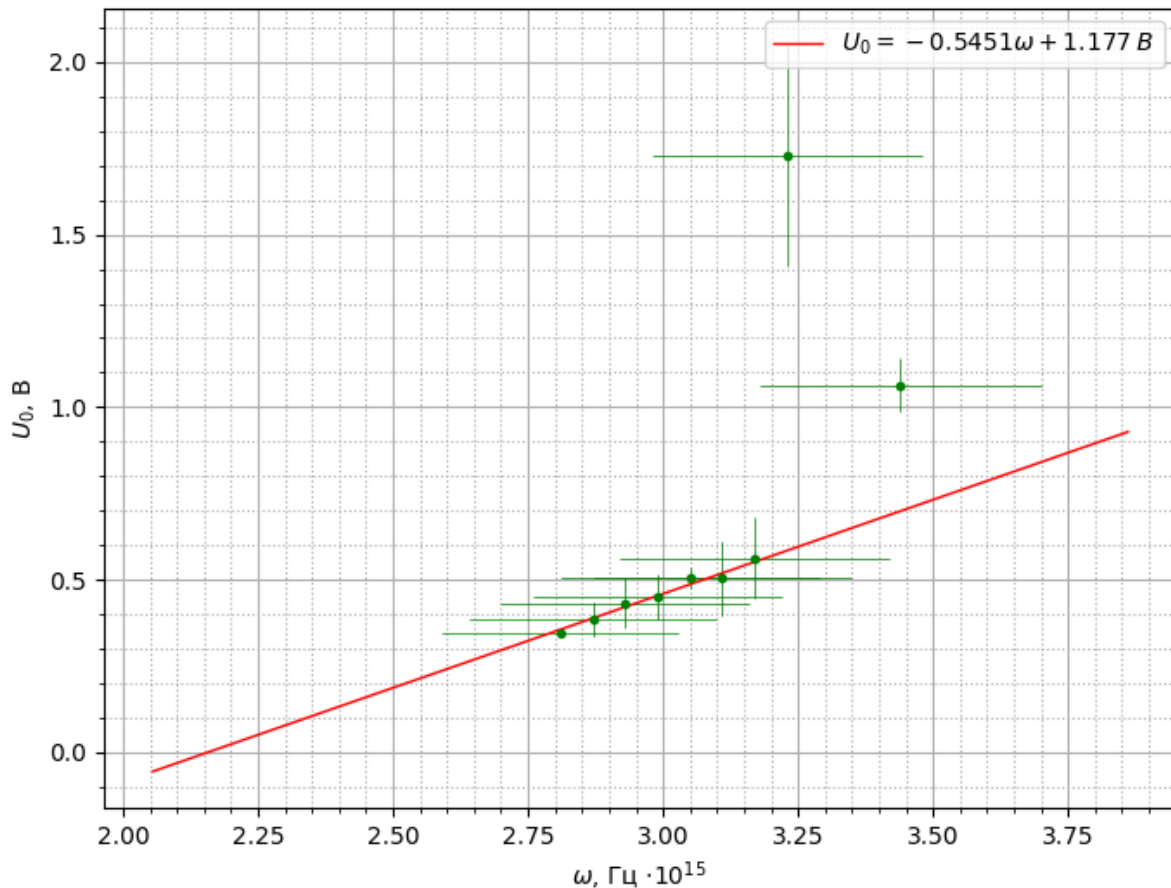


Рисунок 6: График зависимости  $V_0(\omega)$

2. Определим по полученным данным значение постоянной Дирака, используя формулу (6):

$$\hbar = a \cdot e = 0.55 \cdot 10^{-15} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} = 0,87 \pm 0.08 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Табличное значение постоянной Дирака:

$$\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

3. Найдём красную границу фотоэффекта. Для этого определим частоту, при которой потенциал запирания обращается в ноль.

$$\omega = \frac{-b}{a} = (2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Соответствующая длина волны:

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{2\pi c}{\omega} = 860 \pm 120 \text{ нм}. \quad (7)$$

4. Найдем работу выхода материала катода:

$$W = \hbar \cdot \omega = (2,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,45 \pm 0,18 \text{ эВ}.$$

## 5 Обсуждение результатов и выводы

- Была исследована зависимость фототока от величины задерживающего напряжения: экспериментально проверено, что квадратный корень из фототока линейно зависит от задерживающего напряжения.
- В ходе работы были определены следующие величины:

1. Постоянная Дирака:

$$\hbar_{\text{эксп}} = 0,87 \pm 0,08 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\hbar_{\text{теор}} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

2. Красная граница фотоэффекта:

$$\lambda_{\text{к}} = 860 \pm 120 \text{ нм}$$

3. Работа выхода материала катода:

$$W = 1,45 \pm 0,18 \text{ эВ}$$

## 5 Список используемой литературы

- [1] ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ. Квантовая физика: Учеб. пособие для вузов / Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М.; Под редакцией Ципенюка Ю.М. - М. : Физматкнига, 2012 - 464 с. -
- [2] 1.1. Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта. Дополнительное описание . Исправлено 1-VII-2011