

Лабораторная работа 5.1.1

Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

1 Цель работы:

Исследовать зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, что позволяет вычислить величину постоянной Планка.

2 Теоретическая справка

Фотоэффект — явление испускания электронов фотокатодом, облучаемым светом. Энергетический баланс этого взаимодействия для вылетающих электронов описывается уравнением

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

Здесь E_{\max} — максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода, W — работа выхода электрона из катода. Энергетический спектр вылетевших из фотокатода электронов непрерывен — он простирается от нуля до E_{\max} .

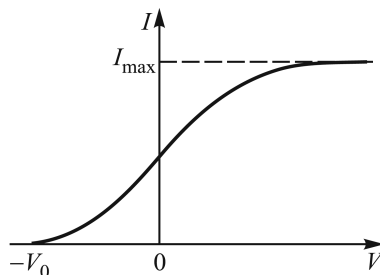


Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде фотоэлемента

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов вблизи фотокатода обычно располагается второй электрод (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.

При задерживающих потенциалах на анод попадают лишь электроны, обладающие достаточно большой кинетической энергией, в то время как медленно движущиеся электроны заворачиваются полем и возвращаются на катод. При некотором значении $V = -V_0$ (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода. Максимальная кинетическая энергия E_{max} электронов связана с запирающим потенциалом V_0 очевидным соотношением $E_{max} = eV_0$. Тогда (1) примет вид, называемый уравнением Эйнштейна:

$$eV_0 = \hbar\omega - W \quad (2)$$

Чтобы определить величину запирающего напряжения, нам надо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю, т. е. определить, какова функциональная зависимость $I(V)$. Расчет для простейшей геометрии — плоский катод, освещаемый светом, и параллельный ему анод — приводит к зависимости

$$\sqrt{I} \propto V_0 - V$$

т. е. корень квадратный из фототока линейно зависит от запирающего напряжения. Эта зависимость хорошо описывает экспериментальные данные.

В работе изучается зависимость фототока из фотоэлемента от величины задерживающего потенциала V для различных частот света ω , лежащих в видимой области спектра. С целью экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна определяются потенциалы запираения V_0 при разных частотах света и строится зависимость $V_0(\omega)$, которая, как это следует из (2), должна иметь вид

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

Потенциал запираения V_0 для любого катода линейно зависит от частоты света ω . По наклону прямой на графике $V_0(\omega)$ (рис. 2) можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \quad (3)$$

Как показывает формула (3), угол наклона прямой $V_0(\omega)$ не зависит от рода вещества, из которого изготовлен фотокатод. От рода вещества, однако, зависит величина

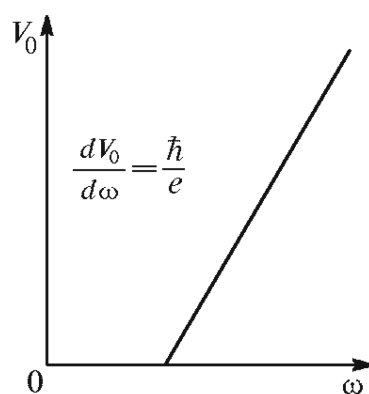


Рис. 2: Зависимость запирающего потенциала от частоты света

фототока, работа выхода W и форма кривой $I(V)$ (рис. 1). Все это определяет выбор пригодных для опыта катодов.

3 Экспериментальная установка

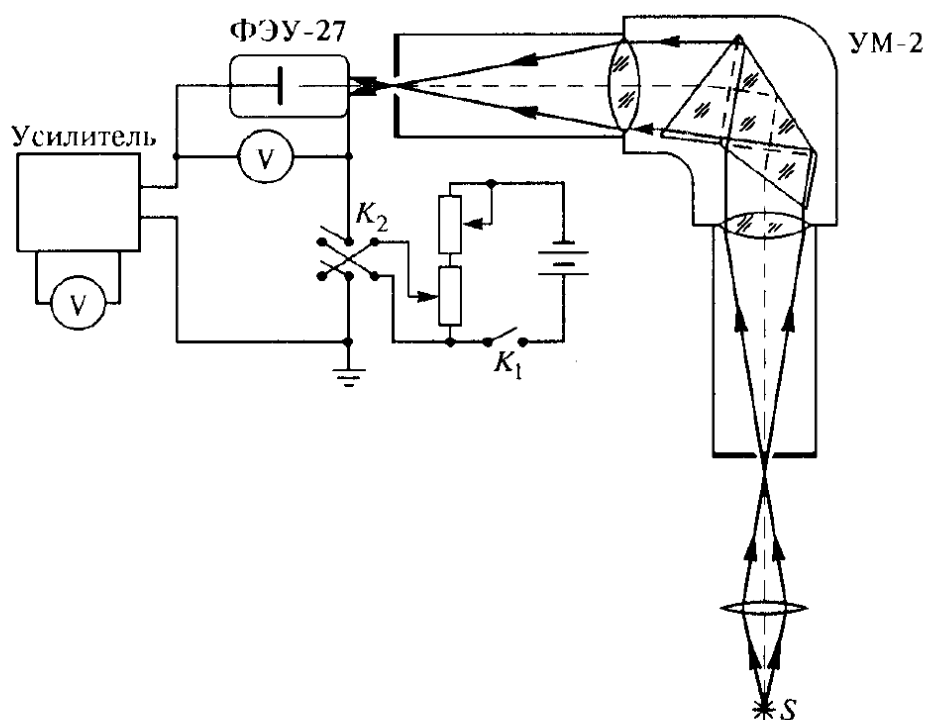


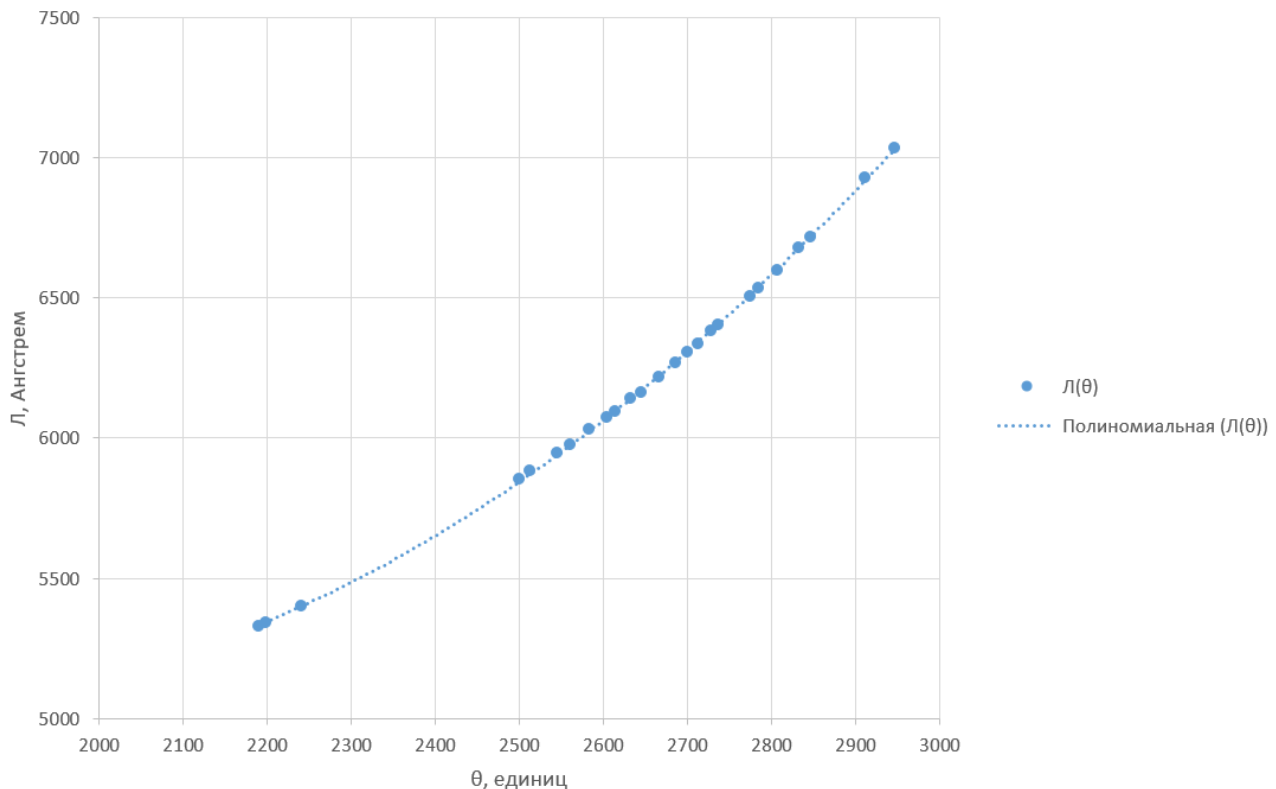
Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной установки

Схема установки приведена на рис. 5. Свет от источника S (электрическая лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призматического монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента Ф-25.

4 Измерения, Обработка

1) Произведем градуировку монохроматора. Снимем зависимость длины волны света от угла θ барабана монохроматора. Построим график. Погрешность шкалы много меньше случайной погрешности выставления линии спектра неона, поэтому примем её за размер точек.

Также аппроксимируем зависимость $\lambda(\theta)$ полиномом второго порядка ($ax^2 + bx + c$).



$$y = 0.0013x^2 - 4.62x + 9050$$

Абсолютную погрешность по обеим осям примем равной 10 нм и единицам.

2) Опираясь на градуировку монохроматора, выполним измерения величины фототока от напряжения для разных длин волн. Значения находятся в таблице, здесь же приведем графики, линеаризованные корнем из тока по отношению к напряжению ($\sqrt{I}(U)$).

Погрешности нанесены на график исходя из колебаний показаний фототока (порядка 10% на всем диапазоне), а также для напряжения исходя из неустойчивости работы мультиметра.

Найдем угловые коэффициенты прямых для каждой установки по МНК.

$$a = \frac{\langle x_i y_i \rangle - \langle x \rangle \langle y_i \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2}$$

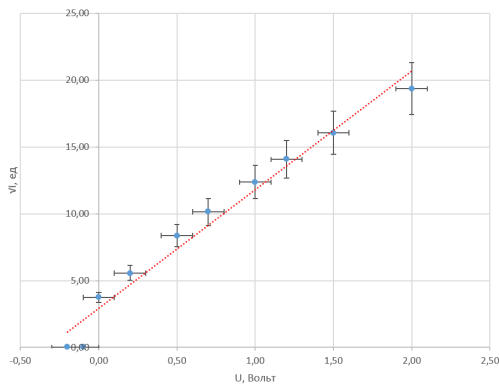


Рис. 3: $\theta = 2874^\circ$

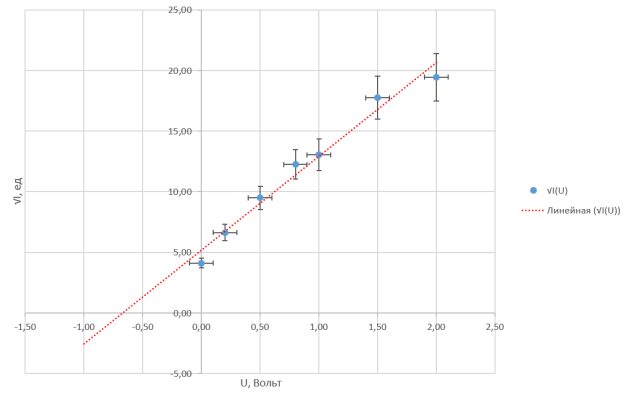


Рис. 4: $\theta = 2800^\circ$

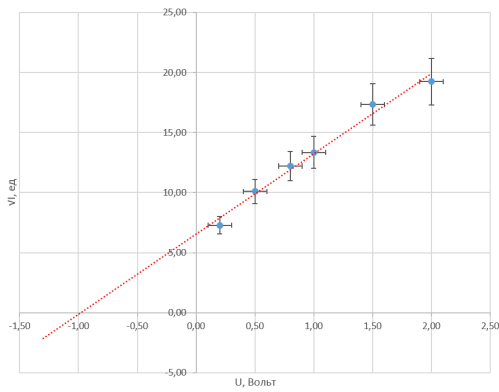


Рис. 5: $\theta = 2700^\circ$

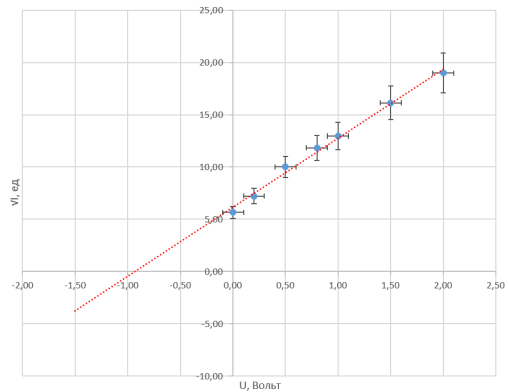


Рис. 6: $\theta = 2500^\circ$

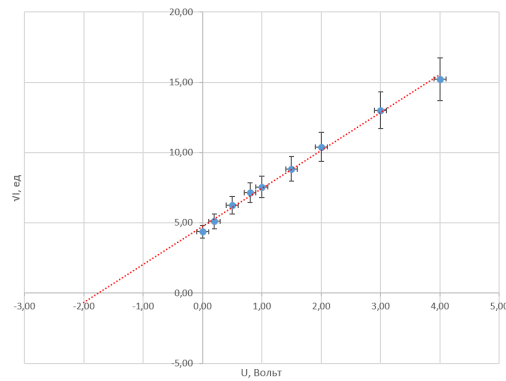


Рис. 7: $\theta = 1800^\circ$

$$b = \langle v_i \rangle - a \langle N_i \rangle$$

Также рассчитаем их погрешности

$$S_a^2 = \frac{\langle x_i^2 \rangle}{\langle x_i^2 \rangle - \langle x_i \rangle^2} \cdot \frac{\langle b_i - b \rangle^2}{n - 2}$$

Получим следующие значения линеаризаций

$$1800)y = (4.75 \pm 0.13) + (2.70 \pm 0.07) \cdot x$$

$$2874)y = (4.3 \pm 0.3) + (7.9 \pm 0.2) \cdot x$$

$$2800)y = (5.2 \pm 0.6) + (7.7 \pm 0.6) \cdot x$$

$$2700)y = (6.6 \pm 0.5) + (6.7 \pm 0.4) \cdot x$$

$$2500)y = (6.2 \pm 0.4) + (6.6 \pm 0.3) \cdot x$$

Из полученных аппроксимаций легко получить значение в нуле

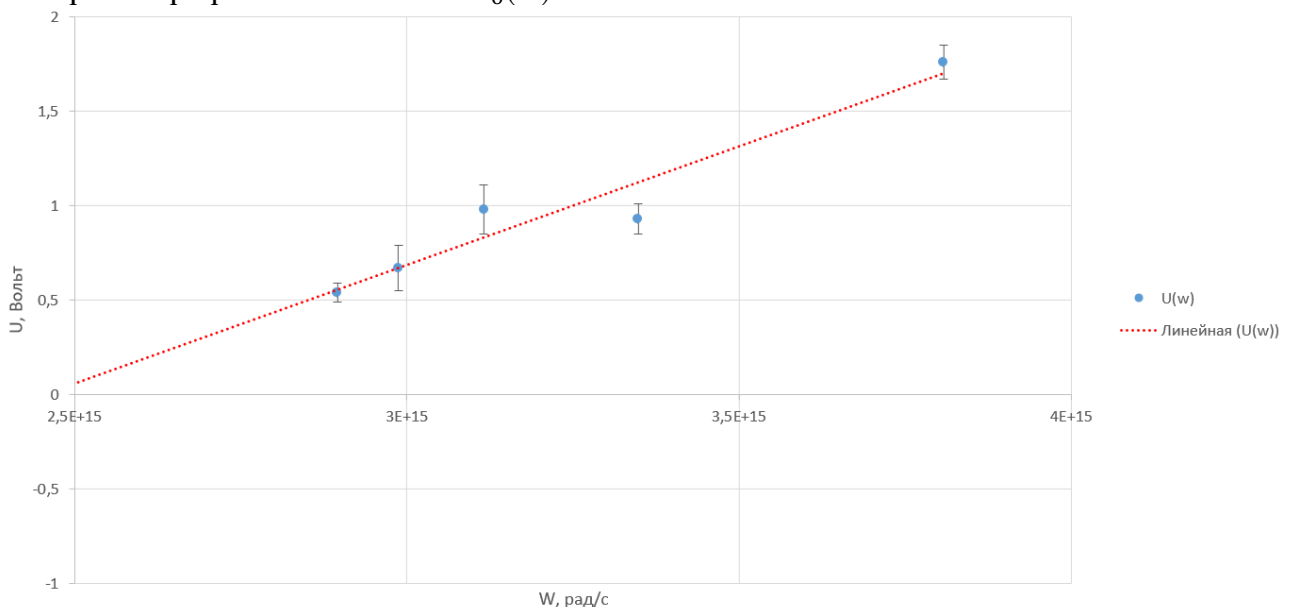
$$V_0 = -\frac{b}{a}; \varepsilon_V = \varepsilon_a \cdot \varepsilon_b$$

Используя полученную связь угла и длины волны, подведем предварительный результат таблицей.

	$\lambda, \text{Å}$	V_0
1	6510	(-0.54 ± 0.05)
1	6310	(-0.67 ± 0.12)
1	6050	(-0.98 ± 0.13)
1	5630	(-0.93 ± 0.08)
1	4950	(-1.76 ± 0.09)

Отметим также, что ток фотокатода был максимален при длине волны света 6510 нм.

Построим график зависимости $V_0(\omega)$



Уравнение линеаризации:

$$V_0 = (-1.5 \pm 0.7) + (0.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-15} \omega$$

Из которого получается постоянная Планка

$$\hbar = \frac{dV_0}{d\omega} \cdot e \approx (1 \pm 0.3) \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}$$

Красная граница спектра и работа выхода:

$$\omega_k = (2.5 \pm 1.4) \cdot 10^{15} \text{с}^{-1}$$

$$W = \hbar\omega_k = 1.6 \pm 0.9 \text{эВ}$$

5 Вывод

Теория Эйнштейна фотоэффекта подтвердилась, получилось достаточно точно откалибровать прибор, чтобы корректно измерить все теоретические зависимости, которые надлежащим образом были аппроксимированы, что позволило получить точное значение(в рамках погрешности) постоянной Дирака, а также разумное значение работы выхода металла.

6 Ресурсы

Расчет по МНК: метод-наименьших-квадратов.рф