

Лабораторная работа №1.1

«Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта»

Драчев Ярослав
акультет общей и прикладной физики МФТИ

10 ноября 2020 г.

1 Введение

В данной лабораторной работе будет происследована зависимость фототока от величины задерживающего потенциала и частоты падающего излучения, что позволит вычислить величину постоянной Планка.

2 Теоретическое введение

Фотоэффект – испускание электронов фотокатодом, облучаемым светом — хорошо объясняется фотонной теорией света: фотон с энергией $\hbar\omega$ выбивает электрон из поверхности металла и сообщает электрону кинетическую энергию.

Энергетический баланс этого взаимодействия описывается уравнением:

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

где W — работа выхода электрона из катода, E_{\max} — максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода. Реально энергетический спектр вылетевших из фотокатода электронов непрерывный — он простирается от нуля до E_{\max} .

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов вблизи фотокатода обычно располагается второй электрод (анод), на который подаётся 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: $E_{\max} = eV_0$. Поставляя

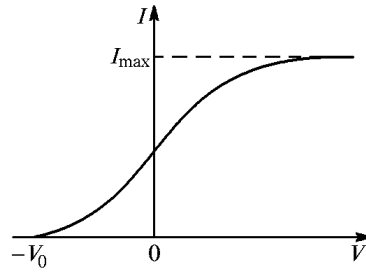


Рис. 1: Зависимость фототока от напряжения на аноде

это соотношение в равенство (1), мы получаем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

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

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

$$\sqrt{I} \propto (V_0 - V). \quad (3)$$

то есть, корень квадратный из фототока линейно зависит от запирающего напряжения.

Для экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна по графикам $\sqrt{I} = f(V)$ определяются потенциалы записания V_0 при разных частотах и строится зависимость $V_0(\omega)$, которая, как следует из (2), должна иметь вид

$$V_0(\omega) = \frac{\hbar\omega - W}{e}. \quad (4)$$

Потенциал записания V_0 для всякого данного катода линейно зависит от частоты света ω . По наклону прямой на графике $V_0(\omega)$ (рис. 2) можно опре-

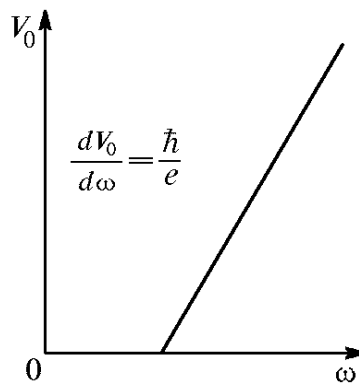


Рис. 2: Зависимость потенциала записания от частоты

делить постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e}. \quad (5)$$

Как показывает формула (5), угол наклона прямой $V_0(\omega)$ не зависит от рода вещества, из которого изготовлен фотокатод. От рода вещества, однако, зависит величина фототока, работа выхода W и форма кривой $I(V)$ (рис. 1). Всё это определяет выбор пригодных для опыта катодов.

В особенности важно, чтобы кривая $I(V)$ достаточно круто подходила к нулю.

3 Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 3. Свет от источника S (электриче-

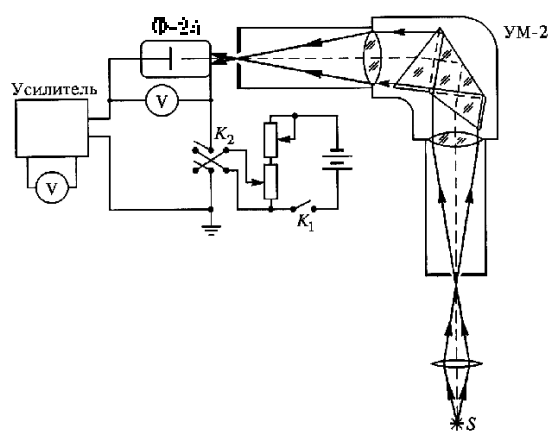


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

ская лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призменного монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента Ф-25. В качестве катода в данном фотоэлементе используется $\text{Na}_2\text{KSb}(\text{Cs})$ покрытие. На рис. 4 показаны относительная спектральная чувствительность фотокатода (6а)

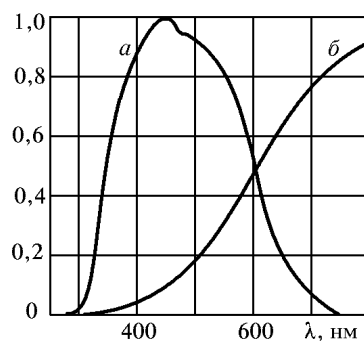


Рис. 4: Чувствительность фотокатода (а) и характеристика излучения лампы накаливания (б)

и спектральная характеристика излучения лампы накаливания (6б).

Призменный монохроматр-спектрометр УМ-2 (универсальный монохроматор) предназначен для спектральных исследований в диапазоне от 0,38 до 1,00 мкм. Основные элементы монохроматора представлены на рис. 5.

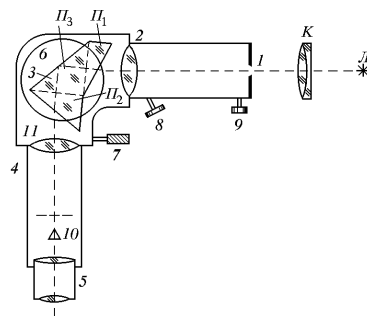


Рис. 5: Схема монохроматора

1. Входная щель 1б снабжённая микрометрическим винтом 9, который позволяет открывать щель на нужную ширину (в диапазоне 0,01–4 мм).
2. Коллиматорный объектив 2, снабжённый микрометрическим винтом 8. Винт позволяет смещать объектив относительно щели при фокусировке спектральных линий различных цветов.
3. Сложная спектральная призма 3, установленная на поворотном столике 6. Призма 3 состоит из трёх склеенных призм Π_1 , Π_2 и Π_3 . Первые две призмы с преломляющими углами 30° изготовлены из тяжёлого флинта, обладающего большой дисперсией. Промежуточная призма Π_3 сделана из крона. Лучи отражаются от её гипотенузой грани и поворачиваются на 90° . Благодаря такому устройству дисперсия призм Π_1 и Π_2 складываются.
4. Поворотный столик 6, вращающийся вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта с отсчётным барабаном. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. Вдоль дорожки скользит указатель барабана. При вращении барабана призма поворачивается, и в центре поля зрения появляются различные участки спектра.
5. Зрительная труба, состоящая из объектива 4 и блока окуляра 5. Объектив даёт изображение входной щели 1 различных цветов в своей фокальной плоскости. В этой же плоскости расположено острие указателя 10. Изображение щели рассматривается через окуляр 5.

Тумблеры, расположенные на основании спектрометра, позволяют включать лампочки осветителей шкал и указателя спектральных линий. Яркость освещения указателя регулируется реостатом.

В случае необходимости, освободив винт 12, блок окуляра можно заменить входной щелью фотоэлемента, пропускающей всего одну из линий спектра на фотоэлемент.

6. Массивный корпус 11, предохраняющий прибор от повреждений и загрязнений.
7. Оптическая скамья, на которой могут перемещаться рейтеры с источником света Л и конденсатором К, служащим для концентрации света на входной щели. Входная щель спектрометра, конденсор и источник должны быть на одной высоте. Проходящий через входную щель световой пучок хорошо заполняет конденсор и призму, если выполнено соотношение $D_k/b = D_2/f_2 = 1/6$, где D_k — диаметр конденсора, b — расстояние от конденсора до входной щели, D_2 и f_2 — диаметр и фокусное расстояние коллиматорного объектива 2.
Изображение удобно наблюдать на белом колпачке с крестиком (таким колпачком прикрывают щель при юстировке системы).
8. Пульт управления (на рис. 3 не показан), служащий для питания лампы накаливания и осветительной системы спектрометра.

4 Ход работы

Используя окуляр, прооградуируем барабан монохроматора по спектру неоновой лампы (таблица 1) Пользуясь полученной градуировкой снимем

$\lambda, \text{\AA}$	$\alpha, ^\circ$
6507	2786
6402	2742
6334	2716
6267	2684
6163	2644
6096	2616
6030	2584
5976	2560
5882	2514
5401	2236

Таблица 1: Градуировка барабана монохроматора по спектру неоновой лампы

зависимость запирающего напряжения от частоты излучения падающего света (таблица 2). Построим график данной зависимости (рис. 6). По графику определим постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = (577 \pm 7) \cdot 10^{-18} \text{В} \cdot \text{с} = \frac{\hbar}{e}. \quad (6)$$

Откуда

$$\hbar = (0,921 \pm 0,011) \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}. \quad (7)$$

Табличное же значение постоянной Планка: $\hbar \approx 1,054 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}$.

По этому же графику можно найти красную границу спектра:

$$\omega_k = (2,25 \pm 0,04) \cdot 10^{15} \text{с}^{-1} \implies \lambda_k = \frac{2\pi c}{\omega_k} = (837 \pm 16) \cdot 10^1 \text{\AA}, \quad (8)$$

$\omega, 10^{15} \cdot \text{с}^{-1}$	$U_3, \text{В}$
2,897	0,37
2,976	0,42
3,058	0,47
3,126	0,51
3,154	0,52
3,205	0,55
3,490	0,71

Таблица 2: Зависимость запирающего напряжения от частоты излучения падающего света

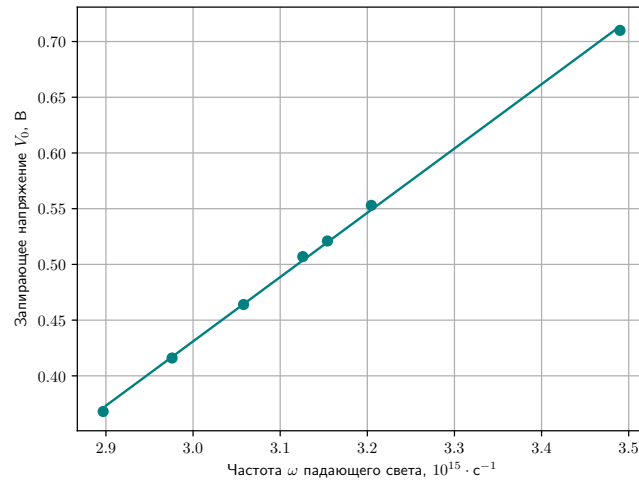


Рис. 6: Зависимость запирающего напряжения от частоты излучения падающего света

и работу выхода:

$$W = \hbar\omega_k = 1,30 \pm 0,03 \text{эВ}. \quad (9)$$

Для длины волны $\lambda = 6507 \text{ \AA}$ также измерим зависимость фототока от напряжения на аноде (таблица 3). По данной зависимости построим график $\sqrt{I} = f(V)$ (рис. 7). Если предположить что данная зависимость должна быть линейной, то значение запирающего напряжения будет отличаться от того, что мы наблюдаем на эксперименте и будет численно равно $0,396 \pm 0,015 \text{ В}$.

5 Выводы

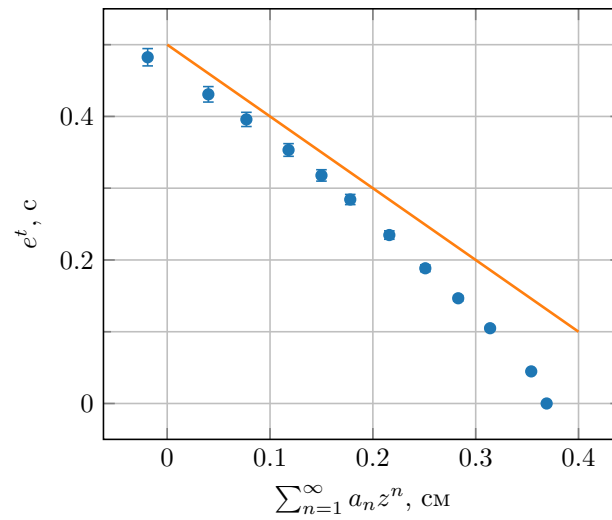
В ходе выполнения работы мы пронаблюдали явление фотоэффекта и с помощью уравнения Эйнштейна измерили постоянную Планка, а также оценили красную границу спектра и работу выхода для нашей установки. Причина небольшого несовпадения полученного значения постоянной

$U_A, \text{ В}$	$U_\Phi, \text{ В}$
0,019	0,240
-0,040	0,193
-0,077	0,164
-0,118	0,132
-0,150	0,109
-0,178	0,0883
-0,216	0,0626
-0,251	0,0430
-0,283	0,0290
-0,314	0,0185
-0,354	0,0095
-0,369	0,0075

Таблица 3: Зависимость фототока от напряжения на аноде

Планка с её табличным значением кроется в неточности использованной в данной работе методики измерений. Возможно, мы бы наблюдали полное совпадение экспериментальных данных с табличными в пределах погрешности, если бы находили запирающее напряжение по ВАХ для каждой отдельной частоты, т. к. мы убедились, что данный факт действительно влияет на

Какой-то график



получаемые результаты.
 $15.0(3) \times 10^{-4}$

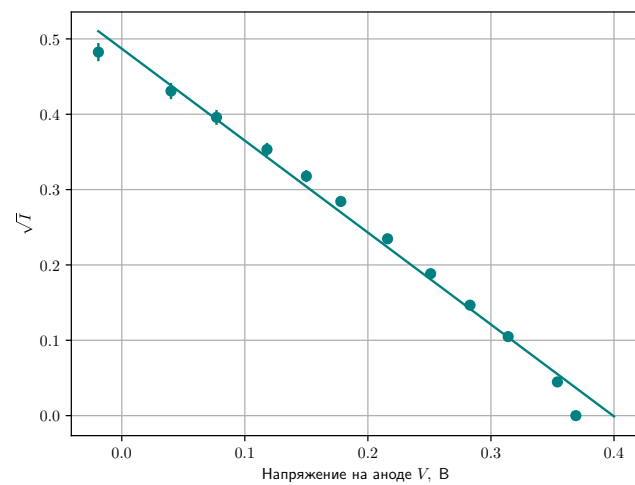


Рис. 7: Зависимость фототока от напряжения на аноде