

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Отделения
Экспериментальной физики ТПУ

_____ А. М. Лидер

« __ » _____ 2023 г.

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания к выполнению лабораторной работы О-15
по курсу «Общая физика» для студентов всех направлений и специальностей

Составители: Л.Н. Никитина

Издательство
Томского политехнического университета
2023

УДК 53.01

Изучение внешнего фотоэффекта: Методические указания к выполнению лабораторной работы О-15/ Л.Н. Никитина, – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 11 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром
Отделения Экспериментальной Физики.

« ____ » _____ 2023 г.

Председатель
учебно-методической комиссии

_____ А. М. Лидер

Рецензент
Кравченко Надежда Степановна

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: снятие вольт–амперной характеристики фотоэлемента, определение красной границы фотоэффекта, работы выхода электрона и постоянной Планка, проверка законов Столетова.

Оборудование: вакуумный фотоэлемент, галогеновая лампа, набор светофильтров, электронный блок приборов.

Введение

Внешним фотоэффектом называют процесс испускания электронов с поверхности металла под действием света. Фотоэффект был подробно изучен в период с 1888 по 1889 г. Столетовым, который установил, что испускаемые под действием света с поверхности вещества частицы имеют отрицательный знак. Им были установлены следующие законы:

1-й закон фотоэффекта: Сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового излучения

2-й закон фотоэффекта: Максимальная кинетическая энергия выбиваемых светом электронов возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3-й закон фотоэффекта: Для каждого вещества при определённом состоянии его поверхности существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая ей длина волны называется красной границей фотоэффекта.

Кроме этого было установлено, что фотоэффект является безынерционным явлением, т. е. не обнаруживается запаздывание в появлении вылетающих частиц в интервале 10^{-10} с после начала освещения.

Согласно квантовой теории всякое тело может поглощать и испускать энергию порциями, содержащими целое число элементарных порций – *квантов энергии*. Энергия фотона ε определяется по *формуле Планка*:

$$\varepsilon = h\nu$$

где $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – *постоянная Планка*.

Закон сохранения энергии при неупругом взаимодействии фотона со свободным электроном металла выражается *уравнением Эйнштейна*:

$$h\nu = A + \frac{mV_{\max}^2}{2} \quad (1)$$

Из уравнения Эйнштейна видно, что максимальная кинетическая энергия $\frac{mV_{\max}^2}{2}$ фотоэлектрона зависит не от интенсивности света, а от его частоты и работы выхода A (минимальной энергии, необходимой для освобождения электрона из металла). При уменьшении частоты света скорость выбитых электронов уменьшается и при некоторой частоте ν_0 становится равной нулю. Частоту ν_0 , ниже которой фотоэффект у данного металла не наблюдается, называют *красной границей фотоэффекта*:

$$h\nu_0 = A \quad (2)$$

Особенности фотоэлементов определяются их световой и вольт-амперной характеристиками.

Световой характеристикой называется зависимость между силой фототока и величиной падающего светового потока при условии, что напряжение между электродами фотоэлемента постоянно. Эта зависимость выражается формулой

$$I_{\Phi} = k\Phi \quad (3)$$

где I_{Φ} – сила фототока, Φ – световой поток в люменах, k – интегральная чувствительность фотоэлемента. В вакуумных фотоэлементах I_{Φ} прямо пропорциональна Φ , следовательно, для них $k = \text{const}$. В газонаполненных фотоэлементах интегральная чувствительность $k \neq \text{const}$ и превышает чувствительность вакуумных фотоэлементов. Дело в том, что в газонаполненных фотоэлементах фототок усиливается за счет возникновения несамостоятельного разряда в инертном газе.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоэлемента (рис.1) выражает зависимость фототока I_{Φ} от разности потенциалов U между электродами при условии, что световой поток постоянен.

С увеличением U фототок растет до определенного предельного значения I_H - тока насыщения, который пропорционален световому потоку Φ , падающему на катод:

$$I_H \sim \Phi$$

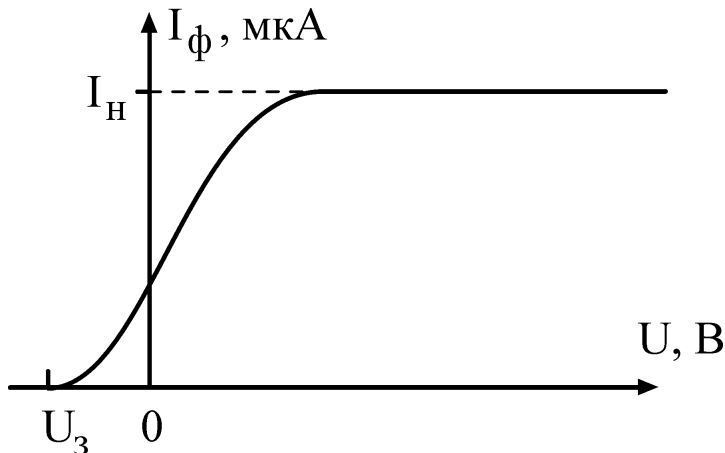


Рис. 1 Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Для того чтобы фототок стал равным нулю, необходимо приложить **задерживающее напряжение** U_3 . При $U=U_3$ ни один из электронов, даже обладающий при вылете из катода максимальной скоростью V_{\max} , не может преодолеть задерживающего поля и достигнуть анода. Следовательно,

$$eU_3 = \frac{mV_{\max}^2}{2} \quad (4)$$

Метод измерений

В соответствии с уравнениями (1) и (4) имеем:

$$U_3 = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{A}{e} \quad (5)$$

Это соотношение указывает на возможность экспериментального определения работы выхода A и постоянной Планка h по зависимости задерживающего потенциала U_3 от частоты ν падающего на фотоэлемент света. Этот способ определения A основан на экстраполяции графика до значения $\nu = 0$. Согласно уравнению (5) зависимость $U_3 = f(\nu)$ представляет собой прямую (рис.2) с угловым коэффициентом, равным $\frac{h}{e}$. На оси ординат прямая отсекает отрезок, равный $\frac{A}{e}$ от начала координат.

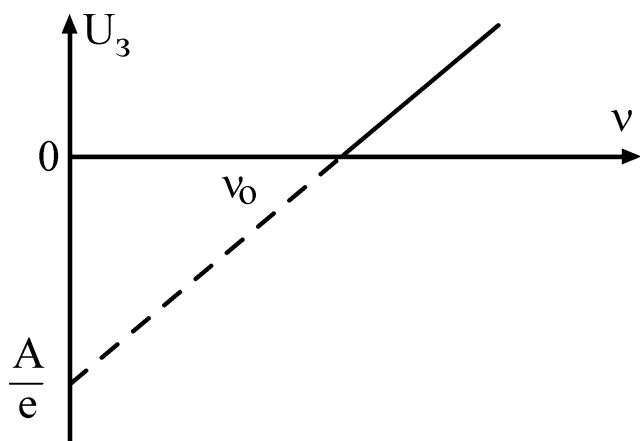


Рис. 2 Зависимость запирающего напряжения от частоты $U_3 = f(\nu)$

Для изучения законов Столетова нужно проанализировать зависимость фототока I_Φ и фототока насыщения I_H от светового потока Φ , падающего на фотокатод

При изменении накала лампы изменяется и спектральный состав света. Поэтому для изменения Φ в работе изменяют расстояние от лампы до фотоэлемента. Если лампу считать изотропным источником света с силой света I_0 , то на расстоянии r от нее освещенность можно определить как

$$E = \frac{I_0}{r^2} \quad (6)$$

Световой поток, падающий на фотокатод площадью S , расположенный на расстоянии r между фотоэлементом и лампой определяется как

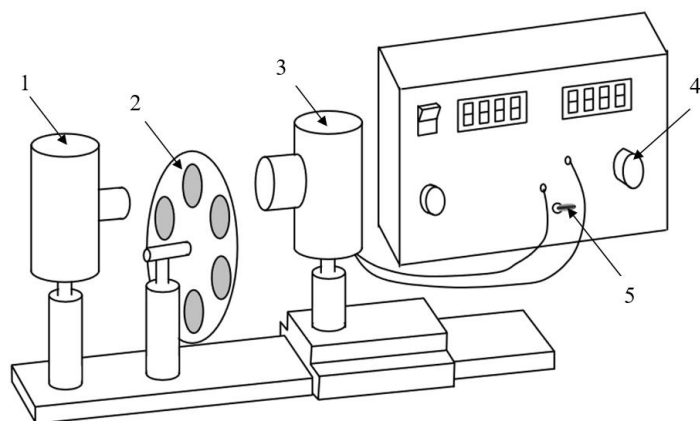
$$\Phi = E \cdot S = \frac{I_0 S}{r^2} \quad (7)$$

Согласно этому выражению закону Столетова соответствует прямая линия на графике зависимости $I_\Phi = f(1/r^2)$.

Описание установки

Фотоэффект изучают на установке (рис.3), состоящей из фотоэлемента СЦВ-3 и лампы накаливания, размещаемых на оптической скамье, а также цифровых микроамперметра и вольтметра. Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянный баллон, половина которого изнутри покрыта тонким слоем щелочного металла. Этот слой является катодом фотоэлемента. Анодом служит металлическое кольцо, расположенное в центре баллона. Источником света является галогеновая лампа накаливания, напряжение на которой можно регулировать ручкой, размещенной в левой части лицевой панели электронного блока.

Монохроматическое излучение получают с помощью светофильтров, закрепленных во вращающейся оправе (λ пропускания светофильтров указаны на установке). Фототок измеряют цифровым микроамперметром, напряжение на фотоэлементе - цифровым вольтметром. Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит специальный переключатель полярности, расположенный в нижней части панели электронного блока.



4- реостат;

5-переключатель полярности.

Для переключения режимов задерживающего и ускоряющего напряжений служит специальный переключатель полярности, расположенный в нижней части панели электронного блока.

1- лампа накаливания;

2- светофильтры в оправе;

3- фотоэлемент;

Рис. 3 Схема установки.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Построение вольт–амперной характеристики

1. На оптической скамье расположить источник света, набор светофильтров и фотоэлемент *как можно ближе друг к другу*.

2. Включить электронный блок приборов и установить режим ускоряющего напряжения. Выбрать заданный преподавателем светофильтр и подобрать такой накал лампы (световой поток), чтобы фототок при $U=0$ был $0.03 - 0.07$ мкА

3. Увеличивать напряжение на фотоэлементе, как показано в табл.1, измерять фототок до момента наступления тока насыщения.

Результаты записать в табл.1.

Таблица 1

Вольт–амперные характеристики

		$\lambda =$ нм								
U, В		0	1,0	2,0	3,0	5,0	8,0	12,0	16,0	19,0
I, мкА	0									

4. При том же светофильтре переключите режим работы на задерживающее напряжение, определите задерживающий потенциал (т.е. минимальное напряжение, при котором фототок становится равным 0) и результат запишите в первую графу табл.1.

5. Постройте график зависимости $I = f(U)$.

6. В выводе сделайте анализ полученной ВАХ фотоэлемента.

Задание 2. Определение работы выхода и постоянной Планка

1. На оптической скамье расположите источник света, набор светофильтров и фотоэлемент *как можно ближе друг к другу*. Установите в лампе накаливания максимальный ток.

2. В таблице 2 запишите длины волн λ , пропускаемых светофильтрами, в порядке их уменьшения. По формуле $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, рассчитайте частоту.

Таблица 2

Зависимость запирающего напряжения от частоты падающего света

Цвет светофильтра	Жел.	Зел.	Голуб	Син.	Фиол.
λ , нм	540	530	505	490	480
ν , $\cdot 10^{14}$ Гц					
U_3 , В					
\bar{U}_3 , В					

3. Включите тумблер в нижней части панели электронного блока в режим задерживающего напряжения.

4. Плавно вращая ручку реостата (правая часть панели), определите задерживающий потенциал ($I = 0$ мкА) для каждого из светофильтров (не менее трех раз) и среднее U_3 . Результаты запишите в таблицу 2.

5. Постройте график зависимости $U_3 = f(\nu)$. Экстраполируйте прямую до пересечения с осью ординат (см.рис.2).

6. По графику найдите граничную частоту ν_0 и задерживающее напряжение $U_3 = A/e$.

7. По формуле $A = U_3 \cdot e$ (эВ) = $U_3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ (Дж) вычислите работу выхода электрона A .

8. Вычислите постоянную Планка $h = A/\nu_0$.

9. Вычислите относительную погрешность

$$\delta_h = \frac{h - h_{ТАБЛ}}{h_{ТАБЛ}}$$

Табличное значение постоянной Планка $6,624 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

10. В выводе сделайте анализ полученной величины.

Задание 3. Изучение закона Столетова

Задание 3.1. Изучение зависимости фототока от расстояния источника света до фотоэлемента

1. Установите режим ускоряющего напряжения.

2. Разместите на оптической скамье лампу накаливания и фотоэлемент на расстоянии между центром колбы лампы и полосой на корпусе фотоэлемента ~ 300 мм. Светофильтр можно оставить.

3. Установите ускоряющее напряжение $\sim 3-7$ В.

4. Установите такой накал лампы, чтобы фототок не превышал 9 мкА. Измерьте фототок.

5. Отодвигая фотоэлемент от лампы каждый раз на ~ 25 мм (и сохраняя при этом ориентацию фотоэлемента на источник света), измеряйте фототок при различных расстояниях r от источника света до фотоэлемента. Результаты измерений записывайте в табл.3.

Таблица 3

Зависимость фототока от расстояния источника света до фотоэлемента

r, м					
1/r ² , м ⁻²					

I_{Φ} , мкА					
------------------	--	--	--	--	--

6. Постройте график зависимости $I_{\Phi} = f(1/r^2)$.
7. В выводе сделайте анализ полученной зависимости.

Задание 3.2.(дополнительное) Изучение влияния светофильтров на фототок насыщения

1. На оптической скамье расположить источник света, набор светофильтров и фотоэлемент *как можно ближе друг к другу*.
2. Включить электронный блок приборов и установить режим ускоряющего напряжения. Выбрать заданный преподавателем светофильтр и подобрать такой накал лампы (световой поток), чтобы фототок при $U=0$ был 0.03 – 0.07 мкА
3. Увеличивать напряжение на фотоэлементе до момента наступления тока насыщения.
4. Значение тока насыщения записать в табл.4
5. Определить ток насыщения для всех представленных светофильтров

Таблица 4

Зависимость тока насыщения от светофильтров

Цвет светофильтра	Жел.	Зел.	Голуб	Син.	Фиол.
λ , нм	540	530	505	490	480
$I_{нас}$, мкА					

6. Постройте график зависимости $I_{нас} = f(\lambda)$.
7. В выводе сделайте анализ полученной зависимости.

Вопросы и задания

1. Чему равна энергия фотона?
2. В чем заключается явление фотоэффекта?
3. Сформулируйте законы Столетова для фотоэффекта.
4. Сформулируйте и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

5. Что понимают под красной границей фотоэффекта?
6. Объясните термин "задерживающая разность потенциалов".
7. Как найти задерживающий потенциал?
8. Как зависит задерживающий потенциал от частоты падающего света?
9. От чего зависит скорость фотоэлектронов?
10. Чему равен угловой коэффициент зависимости $U_3 = f(\nu)$
11. Что называется спектральной и вольт–амперной характеристиками фотоэлемента?
12. Изобразите вольт–амперную характеристику фотоэлемента и объясните ее особенности.