

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: определить работу выхода вакуумного фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: блок облучения (лампа ДРС-50 и фотоэлемент), блок управления и индикации для измерения прямой и обратной ветви вольтамперной характеристики фотоэлемента, светофильтры.

Объект измерений: фотоэлемент.

Средства измерений: цифровой амперметр, цифровой вольтметр.

Введение

Воздействие света на вещество состоит в сообщении этому веществу энергии, приносимой световой волной. Одним из проявлений воздействия света на вещество является внешний фотоэффект – испускание электронов веществом под действием света.

Явление фотоэффекта было открыто Г. Герцем в 1887 г., а затем подробно изучено А.Г. Столетовым (1888 г.). Схема опыта А.Г. Столетова представлена на рис. 1.

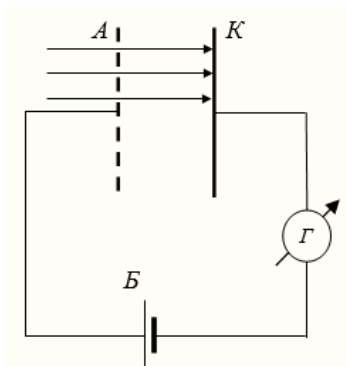


Рис. 1. Схема установки

Поток света падает на конденсатор, состоящий из двух пластин. Одна представляет собой металлическую сетку анод (А), через которую свет может свободно попадать на вторую пластину, являющуюся катодом (К). Б – батарея, с помощью которой создается поле между пластинами конденсатора. А.Г. Столетов установил, что при освещении светом от электрической дуги пластина К теряет свой заряд; при

этом гальванометр Γ показывает наличие в цепи электрического тока. Позднее было установлено, что пластина К испускает электроны. Используемая в опытах Столетова схема представляет собой простейший фотоэлемент с внешним фотоэффектом.

Пластина К носит название фотокатода, а пластина А – фотоанода. Испускаемые фотокатодом электроны называют фотоэлектронами, а возникающий электрический ток – фототоком.

На рис. 2 показана вольтамперная характеристика фотоэлемента, зависимость силы фототока I от разности потенциалов между фотокатодом и фотоанодом при постоянном световом потоке излучения ($\Phi = \text{const}$):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_A. \quad (1)$$

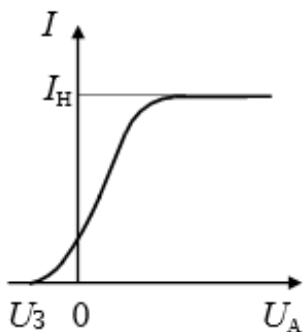


Рис. 2. Вольтамперная характеристика фотоэлемента

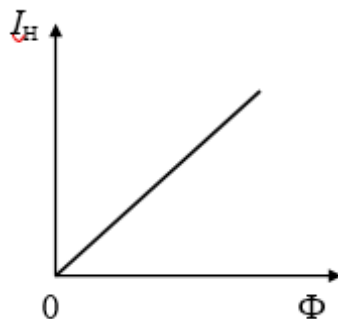


Рис. 3. Люкс-амперная характеристика фотоэлемента

Из рис. 2 следует, что с увеличением разности потенциалов U_A , называемой анодным напряжением, фототок растет, а затем достигает насыщения. Насыщение наступает при таком значении U_A , когда все электроны, испускаемые фотокатодом за единицу времени, достигают анода. Сила фототока насыщения:

$$I_H = e \frac{N}{\Delta t}, \quad (2)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, N – число электронов, попадающих на анод за время Δt .

Законы внешнего фотоэффекта

Приведем три основных закона фотоэффекта.

Первый закон. При постоянном спектральном составе потока излучения фототок насыщения пропорционален потоку излучения:

$$I_n = \gamma \cdot \Phi, \quad (3)$$

где γ – интегральная чувствительность фотокатода.

Зависимость (3) называется люкс-амперной характеристикой фотоэлемента, график ее представлен на рис. 3. Закон был впервые сформулирован А. Г. Столетовым. Следует отметить, что закон Столетова строго выполняется лишь для вакуумных фотоэлементов.

Закон Столетова можно объяснить, используя квантовую теорию света. Опираясь на гипотезу Планка, Эйнштейн предположил, что свет не только испускается, но и поглощается, в виде отдельных порций электромагнитного излучения, квантов энергии электромагнитного поля, получивших название фотонов.

Энергия фотона:

$$E = h \cdot \nu, \quad (4)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с – постоянная Планка, ν – частота излучения.

Второй закон. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты падающего монохроматического света.

Рассмотрим подробнее вольтамперную характеристику фотоэлемента. Из рис. 2 следует, что при $U_A = 0$ сила фототока $I \neq 0$. Это означает, что электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую скорость, а, следовательно, и кинетическую энергию, и могут достигнуть анода в отсутствие внешнего электрического поля. Чтобы прекратить фототок, т. е. сделать его равным нулю, необходимо приложить задерживающее напряжение U_3 , при котором даже самые быстрые фотоэлектроны не достигнут анода, т.к. будут задержаны электрическим полем, т. е.:

$$(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = e \cdot U_3, \quad (5)$$

где m – масса электрона, e – заряд электрона, U_3 – задерживающее напряжение.

Меняя частоту падающего монохроматического света, можно найти зависимость $(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = f(\nu)$, общий вид которой показан на рис. 4.

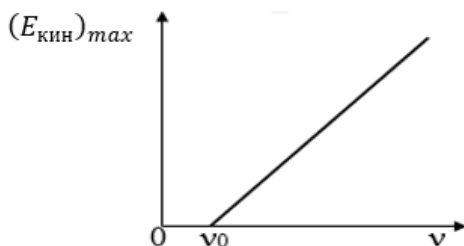


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии от частоты

Экспериментальные исследования показали, что эта зависимость является линейной:

$$(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = a \cdot \nu - b, \quad (6)$$

где a – константа, b – зависит от материала катода.

График зависимости (6) показан на рис. 4 и свидетельствует о том, что с увеличением частоты падающего монохроматического света максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов возрастает. Линейный характер зависимости был объяснен Эйнштейном на основе квантовых представлений о природе света.

При падении фотонов на поверхность металла происходит взаимодействие фотонов и атомов. Согласно однофотонной теории фотоэффекта, атом получает энергию только одного фотона. Эта энергия расходуется на работу выхода электрона из металла и сообщения ему кинетической энергии.

В соответствии с законом сохранения энергии максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона равна:

$$(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = h \cdot \nu - A, \quad (7)$$

где A – есть работа выхода электрона из металла, равная той наименьшей энергии, которую необходимо сообщить электрону (атому) для того, чтобы удалить его из твердого или жидкого вещества в вакуум в состояние с кинетической энергией равной нулю.

Выражение (7) носит название уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Сопоставление уравнений (6) и (7) позволяет сделать вывод, что $a = h$, $b = A$, что объясняет результаты эксперимента.

Третий закон. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т. е. минимальная частота света ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект. Величина ν_0 зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности.

При облучении вещества светом, длина волны которого $\lambda > \lambda_0$ (или частота $\nu < \nu_0$), фотоэффект не наблюдается. Из рис. 4 следует, что $(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = 0$ при $\nu = \nu_0$, следовательно, согласно (7) получаем:

$$h \cdot \nu_0 = A. \quad (8)$$

Выразим частоту:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (9)$$

Следует отметить, что при обычных интенсивностях света при взаимодействии света с веществом в элементарном акте поглощается один фотон. При больших интенсивностях, например в световых пучках, генерируемых лазерами, в элементарном акте взаимодействия могут поглощаться несколько фотонов. Такое поглощение называется многофотонным.

Формула Эйнштейна в этом случае записывается следующим образом:

$$N \cdot h \cdot \nu = \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} + A. \quad (10)$$

Соответственно красная граница смещается в сторону более длинных волн (λ_0 увеличивается в N раз), а формула (3), отражающая зависимость тока насыщения от потока излучения для многофотонных процессов приобретает вид:

$$I_{\text{н}} = \gamma \cdot \Phi^N, \quad (11)$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта с учетом (5) запишется следующим образом:

$$h\nu = A + eU_3, \quad (12)$$

где частоту выражают через длины волны:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (13)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Из уравнений (12) и (13) получают рабочую формулу для вычисления работы выхода:

$$A = \frac{hc}{\lambda} - eU_3, \quad (14)$$

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

Фотоэлементы. Устройство фотоэлементов

Фотоэлементами называются устройства, в которых световая энергия преобразуется в электрическую. На внешнем фотоэффекте основано устройство фотоэлементов, широко применяемых в разных областях техники. Фотоэлементы бывают вакуумные и газонаполненные.

Вакуумный фотоэлемент (рис. 5) представляет собой стеклянный или кварцевый баллон, на внутреннюю стенку которого нанесен слой K светочувствительного щелочного металла. Этот слой K имеет контакт с проводником, выведенным из баллона. В середине баллона расположен электрод, соединенный с положительным полюсом батареи B , слой K (фотокатод) с отрицательным полюсом.

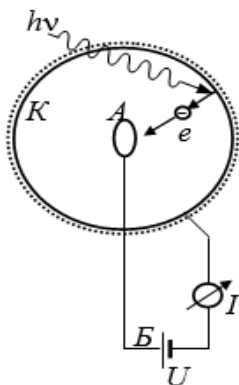


Рис. 5. Вакуумный фотоэлемент

Электрическое поле направляет к фотоаноду электроны, испускаемые фотокатодом при его освещении, создавая, тем самым ток в цепи. У вакуумных фотоэлементов, начиная с некоторого значения анодного напряжения, дальнейший рост тока прекращается, наступает состояние насыщения.

Описание установки и методика проведения измерений

Лабораторная установка. Схема лабораторной установки показана на рис.6. Блок облучения (1), содержащий лампу ДРС-50, блок с фото-элементом (2) и блок управления и индикации (3), на передней панели которого размещены кнопка «прямой-обратный» для выбора режима измерения прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлемента, цифровой индикатор значений фототока (мкА) и напряжения (В) фотоэлемента. Интервал регулирования напряжений кнопками «+», «-», «сброс» от 0 до 10 В (в прямом режиме) и от 0 до 1 В – в обратном.

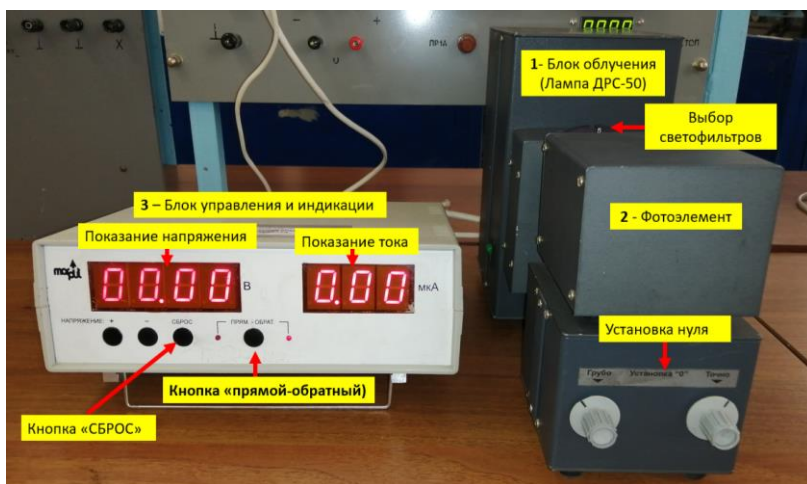


Рис. 6. Лабораторная установка

Порядок выполнения работы

1. Включить тумблеры «Сеть» на задней панели блока управления и индикации и блока облучения и дать прогреться лампе в течение 10 минут. При этом должны загореться индикаторы «000».

2. Установка нуля. Установить светофильтр № 5. При помощи ручек «Грубо», «Точно» добиться на цифровом табло блока управления и индикации показаний тока «0.00».

3. Нажать кнопку «Сброс».

4. Установить светофильтр № 1.

5. Режим измерения параметров фотоэлемента установить на снятие обратной ветви вольтамперной характеристики.

6. Увеличивая модуль отрицательного напряжения добиться нулевого показания тока. Записать значение напряжения, при котором ток стал равен нулю, в графу U_3 . Повторить эти измерения 8 раз. Значения задерживающих напряжений записать в табл 1.

Таблица 1

Определение задерживающего напряжения (λ_1)

Светофильтр № 1:					$(\lambda_l = 435 \text{ нм})$			
№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_i, \text{В}$								
$\langle U_1 \rangle, \text{В}$								

7. Найти среднее значение задерживающего напряжения $\langle U_1 \rangle$ для данного светофильтра.

8. По методу Стьюдента рассчитать абсолютную погрешность измерения ΔU_1 , приняв доверительную вероятность равной 0,95.

8.1. Среднее значение задерживающего напряжения (n – число опытов):

$$\langle U_1 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}.$$

8.2. Отклонение от среднего для каждого опыта:

$$\Delta U_i = |U_i - \langle U_1 \rangle|.$$

8.3. Среднеквадратичное отклонение:

$$S_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i^2}{n(n-1)}}$$

8.4. Случайная погрешность (доверительный интервал):

$$\Delta U_1 = S_U \cdot t_{p,n}$$

где $t_{p,n}$ – коэффициент Стьюдента.

9. По формуле (14) вычислить работу выхода:

$$\langle A_1 \rangle = \frac{hc}{\lambda_1} - e\langle U_1 \rangle,$$

10. Оценить ошибку расчета работы выхода по формуле:

$$\Delta A_1 = |e| \Delta U_1.$$

11. Записать окончательный результат в виде:

$$A_1 = \langle A_1 \rangle \pm \Delta A_1.$$

11. Установить светофильтр № 2.

12. Выполнить пункты 5 и 6 и занести результаты измерений в табл. 2.

Таблица 2

Определение задерживающего напряжения (λ_2)

Светофильтр № 1:					$(\lambda_2 = 407 \text{ нм})$			
№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_i, \text{В}$								
$\langle U_2 \rangle, \text{В}$								

13. Повторить измерения пункты 7 ÷ 11 для светофильтра № 2 и записать окончательный результат в следующем виде:

$$A_2 = \langle A_2 \rangle \pm \Delta A_2.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Что называется, «красной границей» фотоэффекта?
3. Сформулируйте законы фотоэффекта.
4. Выведите второй и третий законы фотоэффекта на основе уравнения Эйнштейна.
5. Объясните ход прямой и обратной ветвей графика зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом.

Рекомендуемая литература

1. Курс физики: Учеб. пособие для студ. вузов. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. 7-е изд., стер. – М.: Издат. центр «Академия», 2008. – 720 с.
2. Курс физики: Учеб. для вузов / Т.И. Трофимова. – 7-е изд., стер. – М.: Высшая шк., 2013. – 542 с.
3. Курс общей физики. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учеб. пособие для втузов. / И.В.Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель». – 2012. – 368 с.