

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕМЕНТА С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Цель работы: снятие вольт-амперной и люкс-амперной характеристик фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: фотоэлемент, микроамперметр, лампа накаливания, оптическая скамья с держателями для фотоэлемента и лампы, выпрямитель, потенциометр, вольтметр, соединительные провода, светофильтры, линейка.

Объект измерений: фотоэлемент.

Средства измерений: микроамперметр, лампа потенциометр, вольтметр, линейка.

Введение

Воздействие света на вещество состоит в сообщении 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 Герцем в 1887 г., а затем подробно изучено А. Г. Столетовым (1888 г.). Схема опыта А. Г. Столетова представлена на рис. 1. 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 Г показывает наличие 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.

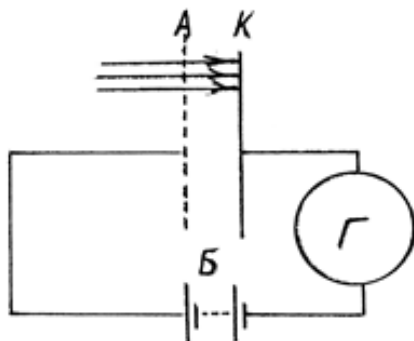


Рис. 1. Схема опыта А.Г. Столетова

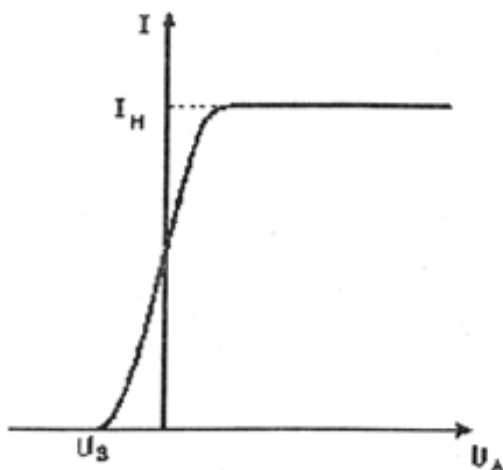


Рис. 2. Вольтамперная характеристика фотоэлемента

На рис. 2 показана вольтамперная характеристика фотоэлемента, т. е. зависимость силы фототока I от разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U_A$ между фотокатодом и фотоанодом при $\Phi = \text{const}$, где Φ – поток излучения.

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:

$$I_H = e \cdot n, \quad (1)$$

где e – величина заряда электрона, n – число электронов, попадающих на анод за единицу времени.

Законы внешнего фотоэффекта

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

$$I_H = \gamma \cdot \Phi, \quad (2)$$

где γ – интегральная чувствительность фотокатода.

Зависимость (2) 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.

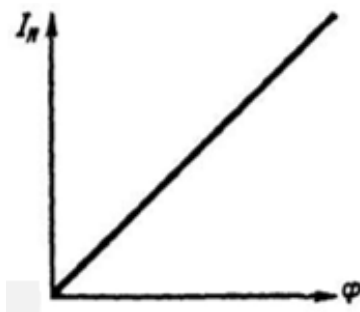


Рис. 3. Люкс-амперная характеристика фотоэлемента

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:

$$E = h \cdot \nu, \quad (3)$$

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.:

$$(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2} = e \cdot U_3, \quad (4)$$

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.

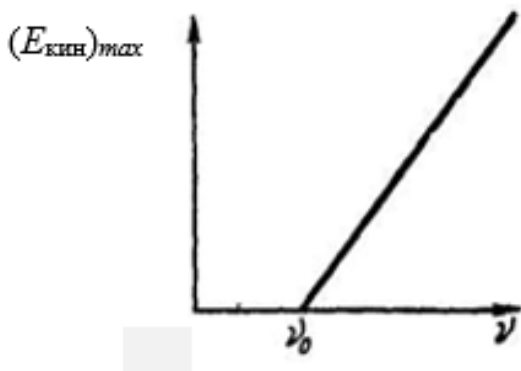


Рис. 4. Зависимость кинетической энергии от частоты

Экспериментальные исследования показали, что эта зависимость является линейной:

$$(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = a \cdot \nu - b, \quad (5)$$

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

График зависимости (5) 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:

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

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 (6) носит название уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Сопоставление уравнений (5) и (6) 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 (см. рис. 4). Из рис. 4 следует, что $(E_{\text{кин}})_{\text{max}} = 0$ при $\nu = \nu_0$, следовательно, согласно (6) имеем:

$$h \cdot \nu_0 = A. \quad (7)$$

Выразим частоту:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}. \quad (8)$$

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:

$$N \cdot h \cdot \nu = \frac{mv_{max}^2}{2} + A. \quad (9)$$

Соответственно красная граница смещается в сторону более длинных волн (λ_0 увеличивается в N раз), а формула (2), отражающая зависимость тока насыщения от потока излучения для многофотонных процессов приобретает вид:

$$I_H = \gamma \cdot \Phi^N. \quad (10)$$

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 К светочувствительного щелочного металла. Этот слой К имеет контакт с проводником, выведенным из баллона. В середине баллона расположено кольцо А, имеющее контакт с другим проводником, выведенным из баллона. Кольцо А соединяется с положительным полюсом батареи (фотоанод), слой К – с отрицательным полюсом батареи (фотокатод).

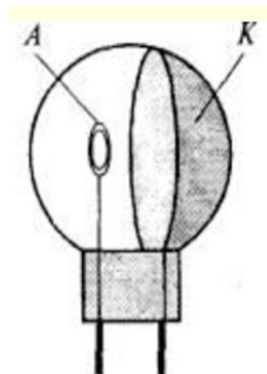


Рис. 5. Фотоэлемент

Электрическое поле направляет к фотоаноду фотоэлектроны, испускаемые фотокатодом при его освещении, создавая ток в цепи.

У вакуумных фотоэлементов, начиная с некоторого значения анодного напряжения, прекращается дальнейший рост тока, наступает состояние насыщения.

Газонаполненный фотоэлемент отличается от вакуумного тем, что он наполнен каким-либо инертным газом (He, Ne, Ar). Эти фотоэлементы обладают большей чувствительностью, чем вакуумные, и ток насыщения в них отсутствует.

Методика проведения измерений и описание установки

На рис. 6 приведена схема лабораторной установки.



Рис. 6 Общий вид экспериментальной установки

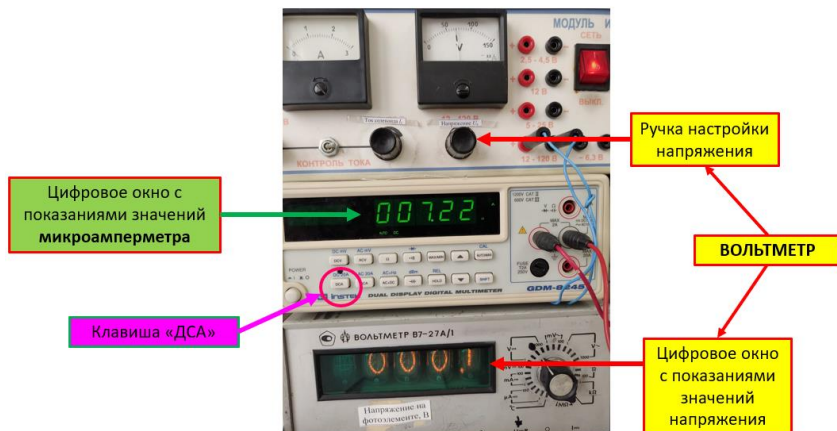


Рис. 7 Приборы для снятия показаний

На рис. 7 показаны приборы для снятия экспериментальных результатов. Перед проведение эксперимента необходимо нажать кнопку «ДСА», это режим постоянного тока. Управление показанием напряжений осуществляется ручкой настройки. Показания напряжения и тока приведены на цифровых табло.

Расстояние между лампой и фотоэлементом определяют по белым меткам, расположенным на основаниях этих устройств.

В работе исследуются следующие основные характеристики фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

1. Зависимость силы фототока от анодного напряжения при постоянной освещенности (вольтамперная характеристика фотоэлемента): $I=f(U)$ при $E=\text{const}$. Освещенность определяется по формуле:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (11)$$

где Φ – световой поток, S – площадь освещаемой поверхности.

2. Зависимость фототока от освещенности при постоянном анодном напряжении (люкс-амперная характеристика): $I_n \sim 1/r^2$ при $U_A = \text{const}$.

Величина фототока прямо пропорциональна освещенности; в свою очередь, освещенность обратно пропорциональна квадрату

расстояния r от источника света при нормальном падении светового пучка на фотокатод. Поэтому $I_n \sim 1/r^2$.

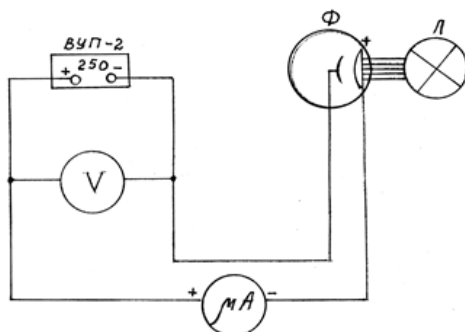


Рис. 7 Схема экспериментальной установки

Исследование производится при помощи установки, состоящей из оптической скамьи, на которой расположен исследуемый фотоэлемент и электрическая лампочка. На рис. 7 показана принципиальная схема установки. Здесь Φ — исследуемый вакуумный фотоэлемент; МОДУЛЬ ИП — выпрямитель универсальный полупроводниковый для питания анодной цепи; V — вольтметр для измерения величины анодного напряжения; μA — микроамперметр; L — осветительная лампа.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Снятие вольтамперной характеристики фотоэлемента.

1.1. Собрать схему (см. рис. 7).

Внимание! Без проверки собранной схемы преподавателем или лаборантом категорически воспрещается подсоединять ее к осветительной сети.

1.2. Установить осветительную лампу на расстоянии $r_l = 20$ см от фотоэлемента.

1.3. Не меняя положения осветительной лампы, изменять анодное напряжение от 20 до 50 В через каждые 10 В, а с 50 до

120 В – через 20 В и измерять фототок, соответствующий каждому значению анодного напряжения. Получаемые значения силы фототока I и соответствующих анодных напряжений U_A занести в табл. 1.

1.4. Опыт повторить при других положениях лампы ($r_2 = 30$ см, $r_3 = 40$ см).

Таблица 1

Вольтамперная характеристика фотоэлемента

$U, \text{В}$	$I, \text{мкА}$		
	$r_1 = 0,2 \text{ м}$	$r_2 = 0,3 \text{ м}$	$r_3 = 0,4 \text{ м}$
20			
30			
40			
50			
70			
90			
110			
125			

1.5. На координатной плоскости построить вольтамперные характеристики фотоэлементов: $I=f(U)$ при $E=\text{const}$. Для этого:

- выбрать масштаб осей;
- нанести контрольные точки;
- провести плавную линию между экспериментальными точками.

Так как на одной координатной плоскости необходимо привести три вольтамперных характеристики рекомендуется выбрать разный формат экспериментальных точек: точки, крестики, треугольники и т.п.

Задание 2. Снятие люкс-амперной характеристики фотоэлемента.

2.1. Установить осветительную лампу на расстоянии $r = 20$ см от фотоэлемента.

2.2. Установить анодное напряжение 100 В и, меняя расстояние от 20 до 50 см каждые 5 см, измерить фототок для каждого положения лампы.

2.3. Результаты наблюдений занести в табл. 2.

Таблица 2

Люкс-амперная характеристика фотоэлемента

$r, \text{ м}$	$\frac{1}{r^2}, \frac{1}{\text{м}^2}$	$I, \text{ мкА}$		
		$U_1 = 100 \text{ В}$	$U_2 = 110 \text{ В}$	$U_3 = 125 \text{ В}$
0,20	25,00			
0,25	16,00			
0,30	11,11			
0,35	8,16			
0,40	6,25			
0,45	4,94			
0,50	4,00			

2.4. Повторить опыт при других значениях анодного напряжения: 110, 125 В.

2.5. Построить люкс-амперные характеристики согласно данным табл. 2. $I_n \sim 1/r^2$ при $U_A = \text{const}$. Для этого:

- а) выбрать масштаб осей;
- б) нанести контрольные точки;
- в) провести плавную линию между экспериментальными точками.

Так как на одной координатной плоскости необходимо привести три люкс-амперных характеристики рекомендуется выбрать разный формат экспериментальных точек.

Контрольные вопросы

1. Как объяснить явление внешнего фотоэффекта?
2. Сформулируйте закон А. Г. Столетова?
3. Напишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

4. Что называется красной границей фотоэффекта и как она определяется?
5. Объясните вольтамперную характеристику фотоэлемента.
6. Объясните люкс-амперную характеристику фотоэлемента.
7. Опишите устройство фотоэлемента.
8. Что такое задерживающий потенциал?
9. Дайте определение светового потока, потока излучения, освещенности.

Рекомендуемая литература

1. Детлаф А.А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1979. - Т.3.
2. Савельев И. В. Курс физики. М.: Наука, 1989.—Т.3.