

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра физики № 1

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«Изучение основных законов внешнего фотоэффекта»
по курсу «Физика»

Минск 1982

Хранить _____ лет

В работе излагается основное закономерности внешнего фотоэффекта. Методом задумываемого потенциала определяется постоянная Планка. Работа предназначена для студентов дневной, вечерней и заочной форм обучения строительных специальностей.

Составили:

В.Ф.Ворожик, П.Т.Кужир, В.А.Самойлович

Рецензенты:

А.М.Дальский, Г.И.Рябов

© Вадорусский политехнический институт, 1982.

Цель работы: 1. Изучить законы внешнего фотоэффекта.

2. Исследовать вольт-амперную характеристику фотоэлемента.

3. Определить постоянную Планка.

Приборы и принадлежности: монохроматор, источник света, фотозащитный экран, вольтметр, амперметр, источник тока.

1. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ И ЕГО ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Поглощение оптического излучения в веществе (твердом, жидком и газообразном) часто сопровождается электрическими явлениями, получившими название фотоэлектрического эффекта.

1. Внешний фотоэффект - эмиссия электронов из вещества под действием света.

2. Внутренний фотоэффект - увеличение числа свободных электронов внутри вещества.

3. Фотогальванический эффект, при котором на границе раздела полупроводника и металла или на границе двух полупроводников под влиянием облучения возникает электродвижущая сила.

4. Фотоэффект в газообразной среде, представляющий собой фотоионизацию отдельных молекул или атомов.

Экспериментальные исследования внешнего фотоэффекта показали, что это явление зависит не только от химической природы вещества, но и от состояния его поверхности. Даже ничтожные загрязнения поверхности существенно влияют на эмиссию электронов. Однако для изучения фотоэффекта пользуются вакуумной трубкой, схема включения которой показана на рис. 1.

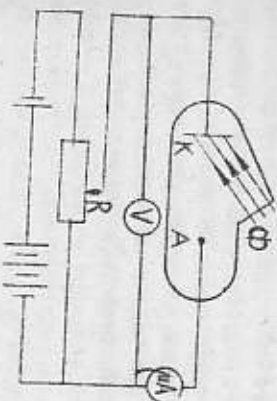


Рис. 1

Световой поток Φ , падающий на фотокатод K , ионизирует из исследуемого вещества, вызывая эмиссию электронов, и при положительном потенциале анода A относительно катода в вакуумной трубке создается поток свободных электронов (фото-ток). С помощью потенциометра

можно изменить абсолютное значение и знак напряжения U между катодом и анодом. Зависимость фототока I от напряжения U (вольт-амперная характеристистика) для разных световых потоков, падающих на катод, представлена на рис. 2.

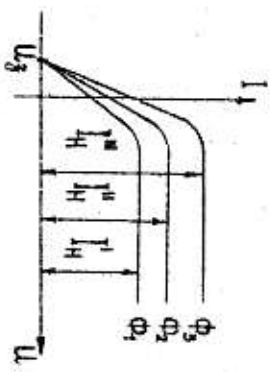


Рис. 2

При U , при которых все электроны, вылетающие под действием света на катод, достигают анода,

$$I_K = eI, \quad (1)$$

где I — число фотоэлектронов, вылетающих из катода за t с. С увеличением светового потока $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ фототок насыщения растет ($I_{K1} > I_{K2} > I_{K3}$).

При отсутствии напряжения между электродами фототок не равен нулю. Электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую начальную скорость v_0 , а значит, и кинетическую энергию W_k и могут достигать анода без воздействия внешнего поля, образуя начальный ток. Чтобы избежать или совсем прекратить этот ток, необходимо создать между катодом и анодом фотоэлектрический тормозящий поле ($U < 0$). С возрастанием этого поля фототок будет постепенно ослабевать, что свидетельствует о большом разнообразии скоростей фотоэлектронов. Если подобрать такую разность потенциалов U_0 , при которой фототок обратится в нуль, то можно утверждать, что все электроны, даже обладающие при вылете из катода наибольшим значением скорости v_{max} , задерживаются тормозящим полем. Следовательно,

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_0 \quad (2)$$

Внешний фотоэффект был впервые систематически экспериментально исследован в 1888—1890 гг. русским физиком А.Г. Столетовым. Он изучил путь установившихся следующие основные закономерности внешнего фотоэффекта:

1. При неизменном спектральном составе света фототок пропорционален световому потоку Φ , падающему на фотокатод (закон Столетова)

$$I_K = K\Phi, \quad (3)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. максимальная длина волны λ_0 (минимальная частота ν_0), при которой еще возможен внешний фотоэффект. Величина λ_0 (или ν_0) зависит от природы вещества и состояния его поверхности.

Была также установлена практическая безразличность внешнего фотоэффекта. Промежуток времени между началом освещения и началом фототока не превышает 10^{-9} с.

Вторую и третью закономерности фотоэффекта не удается объяснить на основе волновой теории света, согласно которой фотоэффект должен наблюдаться при любой частоте света. Энергия, полученная электроном при расщеплении его электромагнитной волны, зависит от амплитуды и времени действия вектора E напряженности электрического поля волны и связанной с ней интенсивности волны. Следовательно, при любой длине волны, если свет достаточной интенсивности, можно ожидать вывобождения электронов из вещества, и красной границы фотоэффекта не должно быть. Кроме того, с волновой точки зрения кинетическая энергия фотоэлектрона должна была бы зависеть от интенсивности света, так как с ее увеличением электроны передавались бы большей энергии.

Объяснение закономерностей фотоэффекта стало возможным на основе квантовой предположений о природе света. А.Эйнштейн в 1905 г., опираясь на гипотезу Планка о квантах, предложил новое объяснение фотоэлектрических явлений, получившее название квантовой теории фотоэффекта. Он предположил, что свет частоты ν не только излучается, но также распространяется в пространстве и по-

числяется веществом отодвинутыми порциями (квантами), каждый из которых имеет энергию

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

где h - постоянная Планка.

Кванты электромагнитного излучения были названы фотонами. Процент поглощения света пропорционален примерно как в простейшем, так и во времени. При падении фотонов на вещество предполагается, что в результате взаимодействия фотона с электроном фотон отдает электрону всю свою энергию $h\nu$. Элементарный акт внешнего фотоэффекта следует представлять состоящим из трех процессов: поглощения фотона электроном; движения электрона, обладающего избыточной энергией, к поверхности тела; вырывания электрона из поверхности. При вырывании электрона из вещества совершается работа выхода A . Энергия вылетающих фотоэлектронов различна. Наибольшей скоростью (v_{max}) и энергией при прочих одинаковых условиях будут обладать электроны, вырванные с самого верхнего энергетического уровня в металле.

Применяя к явлениям фотоэффекта закон сохранения энергии в квантовых процессах, Эйнштейн предложил следующую формулу:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (5)$$

где A - работа выхода электрона из металла.

Согласно Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном, причем часть энергии фотона тратится на совершение работы выхода электрона из металла, оставшаяся часть сообщает электрону кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$. Уравнение Эйнштейна (5) позволяет объяснить основные закономерности внешнего фотоэффекта.

Из уравнения (5) следует:

I. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего света

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - A. \quad (6)$$

2. Для возникновения фотоэффекта необходимо выполнение условия

$$h\nu \geq A. \quad (7)$$

Следовательно, красная граница фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A}. \quad (8)$$

Это означает, что ν_0 зависит от величины работы выхода электронов, т.е. от материала, из которого изготовлен катод, и состояния его поверхности.

Закон сохранения энергии в элементарном акте может быть применен экспериментально. Преобразуя (5) с учетом (2), получим:

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}. \quad (9)$$

График функции (9) изображен на рис. 3.



Точка пересечения прямой $U_3 = f(\nu)$ с осью абсцисс дает значение красной границы фотоэффекта ν_0 . Экстраполируя эту прямую до пересечения с осью ординат, получаем значение A/e . Из формулы (9) и рис. 3 следует

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu}, \quad (10)$$

Рис. 3

что позволяет по графику $U_3 = f(\nu)$ находить постоянную Планка h . Сопоставление значений постоянной h в опытах по фотоэффекту с результатами других методов определения постоянной привели к выводу Эйнштейна о квантовом характере взаимодействия света с веществом при фотоэффекте. Выше сущ. теории Эйнштейна и ее экспериментальное подтверждение излагались в рамках линейной оптики - при слабых световых полях. Подобный фотоэффект можно называть однофотонным.

Если в качестве источника света пользоваться мощными лазерными источниками, то возникает многофотонное поглощение, т.е. поглощение более одного фотона в каждом акте. Многофотонный фотоэффект приводит к исчезновению красной границы фотоэффекта, следовательно формулы (8), и ее смещение в длинноволновую часть спектра электромагнитных волн. Это вполне понятно, так как при многофотонном, например, N -фотонном фотоэффекте, в левой части выражения

(7) будет присутствовать энергия не одного, а n квантов. В частности, если энергии всех поглощенных квантов равны, то для n -фотонного фотоэффекта

$$h\nu > \frac{A}{n},$$

т.е. красная граница, выраженная в частотах, в этом случае станет в n раз меньше по сравнению с однофотонным фотоэффектом.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Фотоэлектрические явления нашли широкое применение в науке и технике для регистрации и измерения световых потоков, для непосредственного преобразования энергии света в энергию электрического тока.

К простейшим устройствам, действие которых основано на использовании внешнего фотоэффекта, относятся так называемые фотоэлементы.

Фотоэлемент (рис. 4) состоит из источника электронов — фотокатода K , на который падает свет, и анода A . Вон системы откачана в стеклянный баллон, из которого откачан воздух.

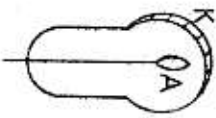


Рис. 4

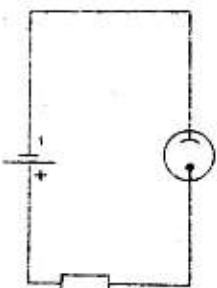


Рис. 5

Фотокатод, представляющий собой fotocувствительный слой, может быть непосредственно нанесен на часть внутренней поверхности баллона. На рис. 5 дана схема включения фотоэлемента.

Для вакуумных фотоэлементов рабочим режимом является режим насыщения, которому соответствует горизонтальная часть вольт-амперных характеристик (рис. 2). Основной параметр фотоэлемента это чувствительность, выражаемая отношением величины фототока к соответствующему световому потоку.

Фототок насыщения можно значительно увеличить путем введения баллона фотоэлемента газоразрядным инертным газом. Такие фотоэлементы называются газонаполненными. Большой чувствительностью газонаполненного фотоэлемента по сравнению с вакуумным обусловлена увеличением числа носителей заряда вследствие ударной ионизации молекул электродами.

Для увеличения фототока внутри фотоэлемента используются также различные вторичной эмиссии. На этом принципе основано действие фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Схема ФЭУ показана на рис. 6.

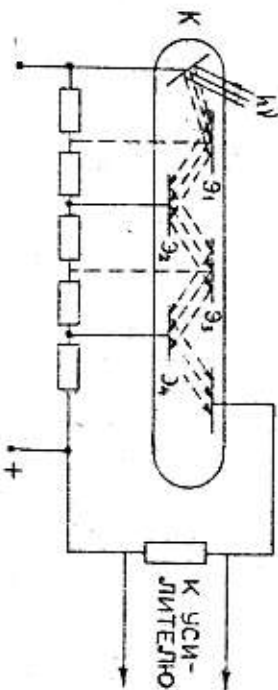


Рис. 6

Фотоэлектроны с катода K ускоряются в электрическом поле, попадают на первый электрод Z_1 , выбивают из него в n_1 раз большее число электронов. Эти электроны, ускоряясь, в свою очередь попадают на электрод Z_2 , выбивая из него еще большее число электронов, и т.д. В сообразных ФЭУ усиление тока может достигать до 10^6 раз при напряжении питания 1000-1500 В.

ФЭУ применяют главным образом для измерения малых лучистых потоков.

На внешнем фотоэффекте основана работа электронно-оптического преобразователя (ЭОП), предназначенного для преобразования изображения из одной области спектра в другую, а также для усиления яркости изображений. Схема простейшего ЭОП приведена на рис. 7. Световое изображение объекта I , спроектированное на полупрозрачный фотокатод K , преобразуется в электронное изображение 2. Ускоренные в электрическом поле электроды Z

электроны подают на лимбоспектрный экран L . Здесь электроны изобращаются преобразуются в световое 3 . ЗОП примененных в качестве приоров ночного видения, в медицине, для усиления яркости рентгеновского изображения и других областях.

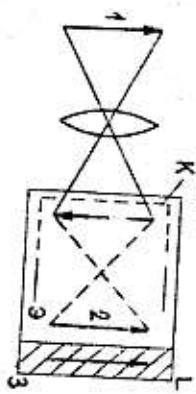


Рис. 7

3. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из монохроматора, источника тока, микроамперметра, вольтметра, пульта управления и осветителя.

Схема установки показана на рис. 8. Свет электрической лампы A через входную щель 1 попадает в монохроматор, где рассеивается в спектр и через выходную щель 2 монохроматический свет падает на фотозащелку 5.

Основная часть монохроматора - поворотная призма 3, поворот которой производится при помощи барабана 4. Поворотом призмы 3 не определенное число градусов осуществляется выделение соответствующего спектрального участка излучения, выходящего из щели 2. Так как в установке создается равномерный освещенность входной щели ($E = konst$) и высота щели h не изменяется, то $\Phi = E h \Delta X = konst \Delta X$. Поэтому, изменяя ширину ΔX входной щели монохроматора, можно менять величину падающего на фотозащелку (5) светового потока Φ .

Для управления режимом работы фотозащелки служит пульт управления. Установкой переключателя K_1 в положение A фотозащелка и микроамперметр подключаются к части электрической схемы, включенной для измерения его вольт-амперной характеристики. При включении ключа K_2 на анод фотозащелки подается положительный потенциал относительно катода. Величина напряжения между анодом и катодом измеряется потенциометром R_1 , а регистрируется вольтметром V_A . Фототок измеряется микроамперметром.

Установкой переключателя K_1 в положение B фотозащелка и микроамперметр включаются в электрическую схему, служащую для измерения зависимости задерживающего потенциала от частоты падающего света. При включении ключа K_2 на анод фотозащелки может быть подан отрицательный относительно катода потенциал. Величина этого потенциала измеряется потенциометром R_2 от нуля до величины, при котором ток в цепи фотозащелки не станет разным нулю, что фиксируется по показанию микроамперметра. Задерживающее напряжение измеряется вольтметром V_3 .

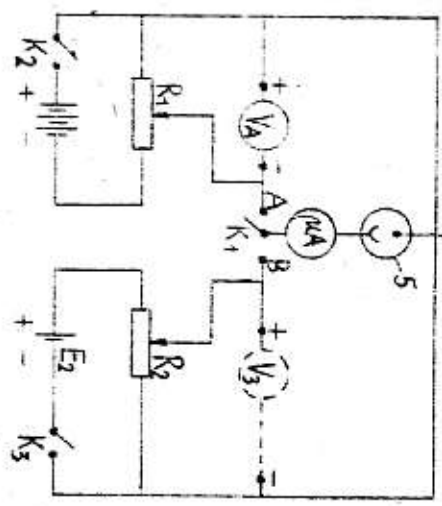
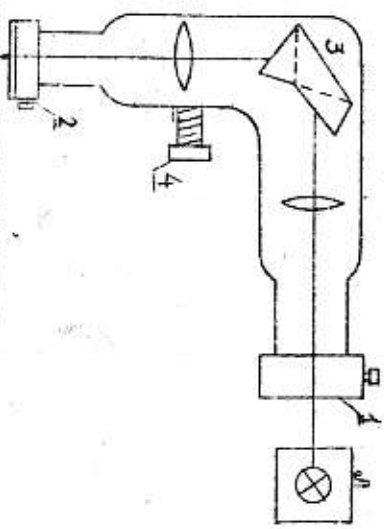


Рис. 8

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 4.1. Исследование вольт-амперной характеристики системы вакуумного фотоэлемента
 - 4.1.1. Экспериментально найти зависимость величины фототока I от внешнего напряжения U для нескольких значений внешнего тока Φ . $I = f(U)$
 - 4.1.2. Построить график $I = f(U)$ для нескольких значений Φ
 - 4.1.3. Из графиков $I = f(U)$ определить величину тока насыщения $I_{\text{н}}$.
 - 4.1.4. По формуле (1) рассчитать число фотоэлектронов, выходящих светом с фотокатода в единицу времени для нескольких значений Φ .
- 4.2. Исследование зависимости фототока насыщения от величины внешнего тока
 - 4.2.1. Измерять зависимость фототока насыщения $I_{\text{н}}$ от величины внешнего тока Φ . $I_{\text{н}} = f(\Phi)$.
 - 4.2.2. Построить график $I_{\text{н}} = f(\Phi)$.
- 4.3. Определение постоянной Планка
 - 4.3.1. Измерить зависимость задерживающей разности потенциалов U_z от частоты света ν , падающего на фотокатод вакуумного фотоэлемента.
 - 4.3.2. Построить график $U_z = f(\nu)$
 - 4.3.3. На построенного графика $U_z = f(\nu)$, используя формулу (9), определить постоянную Планка.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Перечислите известные Вам фотоэлектрические явления и кратко ко поясните каждое из них.
- 5.2. Сущность явления внешнего фотоэффекта.
- 5.3. Принципиальная схема установки для изучения внешнего фотоэффекта.

- 5.4. Проанализируйте зависимость фототока от разности потенциалов между электродами при внешнем фотоэффекте.
- 5.5. Задерживающая разность потенциалов. От чего она зависит?
- 5.6. Статистичность экспериментально установленные основные закономерности внешнего фотоэффекта.
- 5.7. Трудности, возникшие при обосновании основных закономерностей внешнего фотоэффекта на основе квантовой теории света.
- 5.8. Объясните внешний фотоэффект на основе квантовой теории света. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
- 5.9. Перечислите известные Вам устройства, основанные на внешнем фотоэффекте, и объясните принцип их работы.
- 5.10. Метод измерения постоянной Планка, основанный на внешнем фотоэффекте.
- 5.11. Понятие о многофотонном фотоэффекте.

Литература

1. Савельев И.В. Курс сощей физики. -М.: Наука, 1979, т.3, гл. 2.
2. Вурокский Б.М., Деглаф А.А. Курс физики.-М.: Высшая школа, 1971, т. 3, гл. II.
3. Ландсберг Г.С. Оптика.-М.: Наука, 1976, гл. 32.