



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Физика»

**ЯВЛЕНИЕ
ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА**

*Методические указания
к лабораторной работе по физике*

**Минск
БНТУ
2013**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Физика»

ЯВЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

*Методические указания
к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей*

Минск
БНТУ
2013

УДК 535.215.1(076.5)(075.8)
ББК 22.34я7
Я20

Составители:

П. Г. Кужир, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук

Рецензенты:

И. А. Хорунжий, И. Ф. Медведева

В методических указаниях описываются закономерности внешнего фотоэффекта, даны объяснения законов фотоэффекта на основе квантовых представлений о природе света и представлены сведения о принципах работы фотоэлементов.

Издание предназначено для студентов инженерно-технических специальностей всех форм обучения.

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

Цель работы: изучить основные закономерности внешнего фотоэффекта, экспериментально исследовать зависимости фототока от величины анодного напряжения, фототока насыщения от светового потока, задерживающего напряжения от частоты света, падающего на катод фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: монохроматор, источник тока, микроамперметр, вольтметр, пульт управления, осветительная лампа.

Экспериментальное исследование явления внешнего фотоэффекта

Внешним фотоэффектом называется явление испускания или явление эмиссии электронов с поверхности вещества под действием света.

Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Электроны, вылетающие с поверхности вещества при внешнем фотоэффекте, называются **фотоэлектронами**.

Электрический ток, возникающий в результате упорядоченного движения фотоэлектронов во внешнем электрическом поле, называется **фототоком**.

Первое явление внешнего фотоэффекта было открыто в 1887 г. Г. Герцем. В 1888–1889 гг. явление было изучено А.Г. Столетовым, а в дальнейшем и другими исследователями.

Схема установки для экспериментального исследования явления внешнего фотоэффекта в металлах представлена на рис. 1.

Электроды помещаются в запаянную вакуумную трубку. Свет попадает на поверхность катода K через кварцевое окно O . В результате выбивания светом электронов из катода вблизи поверхности катода образуется электронное облако.

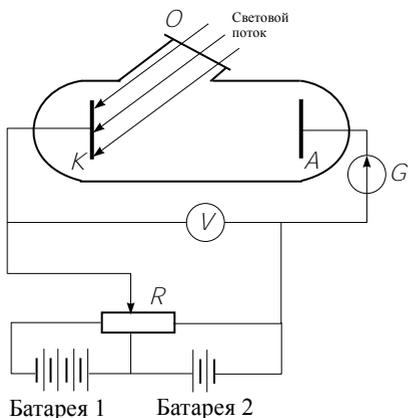


Рис. 1. Схема установки для изучения явления внешнего фотоэффекта

единицу времени.

Из рис. 2 видно, что при некотором напряжении между анодом и катодом фототок достигает насыщения, то есть все электроны, испущенные катодом, достигают анода.

Сила фототока насыщения $I_{\text{нас}}$ определяется количеством электронов, испускаемых катодом под действием света, в единицу времени. Тогда число фотоэлектронов n , покидающих катод за одну секунду, можно определить следующим образом:

$$n = \frac{I_{\text{нас}}}{e},$$

где e – абсолютная величина заряда электрона.

Фотоэлектроны, испускаемые катодом, имеют

4

Вольт-амперной характеристикой называется зависимость силы тока от величины приложенного напряжения.

Зависимость фототока I от напряжения U , приложенного между катодом K и анодом A , при освещении катода постоянным потоком Φ монохроматического света изображена на рис. 2.

Световой поток Φ – энергия света, падающая на поверхность вещества за

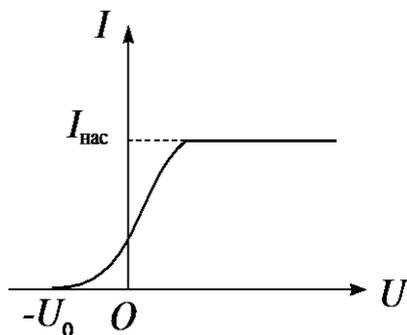


Рис. 2. Зависимость величины фототока I от приложенного анодного напряжения U

различные начальные скорости и соответственно различные кинетические энергии. При $U = 0$ некоторое количество фотоэлектронов, кинетической энергии которых достаточно, чтобы достичь анода, преодолевает поле, созданное облаком фотоэлектронов у поверхности катода, тем самым создается слабый фототок. При уменьшении напряжения от 0 до $-U_0$ фототок постепенно снижается и при $U = -U_0$ полностью прекращается. Величину напряжения U_0 называют задерживающим напряжением.

Задерживающим напряжением или задерживающей разностью потенциалов называется значение отрицательного напряжения U_0 , при котором величина силы фототока I равна нулю.

Работа сил тормозящего электрического поля уменьшает кинетическую энергию фотоэлектронов. Для того, чтобы полностью задержать все электроны, обладающие максимальной кинетической энергией, электростатическое поле должно совершить работу равную eU_0 . При этом выполняется соотношение

$$eU_0 = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (1)$$

где m – масса электрона;

v_{\max} – максимальная скорость фотоэлектронов.

Экспериментально установлены **три закона внешнего фотоэффекта:**

1. При неизменном спектральном составе света, падающего на катод, фототок насыщения пропорционален световому потоку: $I_{\text{нас}} \sim \Phi$.

2. Для данного вещества максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница внешнего фотоэффекта, то есть минимальная частота света $\nu_{кр}$ (максимальная длина волны $\lambda_{кр}$), при которой еще возможен фотоэффект.

Второй и третий законы внешнего фотоэффекта не могут быть объяснены с точки зрения классической электромагнитной теории света.

Действительно, согласно волновой теории электроны в металле, из которого сделан катод, под действием падающей электромагнитной волны должны совершать вынужденные колебания с амплитудой, пропорциональной амплитуде этой волны. При резонансе собственных колебаний электрона с колебаниями подающей волны амплитуда колебаний электрона резко возрастает. Это может привести к разрыву связи электрона с атомами металла и выходу его на поверхность металла с некоторой скоростью v . Следовательно, кинетическая энергия электрона находится в прямой зависимости от величины интенсивности падающей на поверхность металла волны. Но это противоречит эксперименту, поскольку от интенсивности падающей волны зависит только число выбиваемых фотоэлектронов (первый закон фотоэффекта), а кинетическая энергия электронов от интенсивности света не зависит (второй закон фотоэффекта).

Кроме того, волновая теория не смогла объяснить **безынерционность фотоэффекта**, установленную опытным путем. Безынерционность фотоэффекта заключается в том, что испускание фотоэлектронов начинается сразу же, как только на катод попадает свет с частотой $\nu \geq \nu_{кр}$. Согласно классической физике для передачи энергии электромагнитной волной электрону требуется значительное время.

Объяснение явления фотоэффекта на основе квантовой теории света. Уравнение Эйнштейна

Развивая идеи Планка о квантовании энергии, Эйнштейн предположил, что свет не только излучается в виде квантов, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом также в виде квантов энергии – фотонов. При внешнем фотоэффекте в металлах фотон передает свою энергию электронам проводимости металла.

Фотон – квант электромагнитного излучения. Фотон представляет собой частицу, обладающую энергией E , массой m_f и импульсом p_f :

$$E = h\nu = \frac{ch}{\lambda}, \quad m_f = \frac{h\nu}{c^2}, \quad p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

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

ν – частота света;

c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны.

Фотон движется со скоростью света, масса покоя фотона равна нулю.

Для того, чтобы выйти на поверхность металла, электрон должен получить от фотона энергию равную работе выхода $A_{\text{вых}}$.

Работа выхода электрона $A_{\text{вых}}$ – это работа, которую нужно совершить, чтобы вырвать электрон из вещества на поверхность. Величина работы выхода зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности. Работа выхода электронов из металлов составляет порядка нескольких электрон-вольт.

Если энергия фотона $h\nu$ больше работы выхода $A_{\text{вых}}$, то электрон вырывается из металла, а оставшаяся часть энергии

фотона идет на приращение кинетической энергии электрона. В соответствии с законом сохранения энергии имеем

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2)$$

где v_{max} – максимальная скорость электрона;

m – масса покоя электрона.

Уравнение (2) представляет собой **уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Даже при использовании света строго определенной частоты электронам, выходящим из металла, соответствуют разные кинетические энергии, значения которых изменяются от нуля до $E_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$. Это происходит из-за частичной

потери энергии при столкновениях в процессе движения электронов к поверхности металла. Часть электронов, потеряв энергию при столкновениях, так и не выходит из металла, поэтому число выходящих электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов.

Первый закон фотоэффекта может быть объяснен в рамках квантовой теории света. При малых интенсивностях света каждый электрон поглощает один фотон, поэтому число фотоэлектронов должно быть пропорционально числу падающих фотонов. Вместе с тем световой поток Φ определяется количеством фотонов, падающих на поверхность за единицу времени. Следовательно, фототок насыщения должен быть пропорционален световому потоку:
 $I_{\text{нас}} \sim \Phi$.

Второй закон фотоэффекта непосредственно следует из уравнения Эйнштейна:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m v_{\text{max}}^2}{2},$$

$$E_{\text{кин}} = h\nu - A_{\text{вых}}.$$

Из последнего уравнения видно, что кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.

Третий закон фотоэффекта объясняется следующим образом. Так как красная граница фотоэффекта – это минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ падающего света, при которой начинается фотоэффект, то $h\nu_{\text{кр}}$ – минимальная энергия фотона, передаваемая электрону и идущая на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$ электрона из вещества. Тогда

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \text{ или } \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}.$$

Если $h\nu < A_{\text{вых}}$, то электроны не могут покинуть металл.

Применение явления фотоэффекта

Явление фотоэффекта получило широкое практическое применение.

Фотоэлементами (рис. 3) называются приборы, в основе принципа действия которых лежит фотоэффект. Фотоэлементы, использующие внешний фотоэффект, лишь частично преобразуют энергию излучения в электрическую энергию. Так как эффективность преобразования небольшая, то в качестве источников электроэнергии фотоэлементы не используются, а применяются в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков.

На основе внешнего фотоэффекта работают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

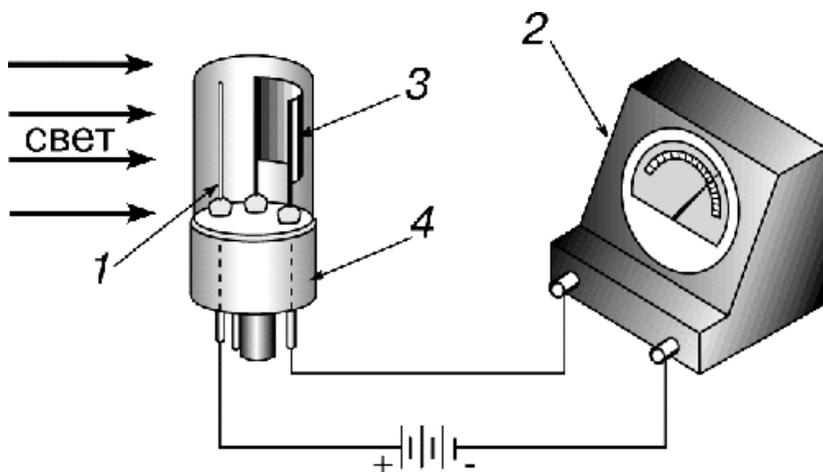


Рис. 3. Схема фотоэлемента:

1 – анод; 2 – микроамперметр; 3 – фотокатод; 4 – корпус фотоэлемента

Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянный сосуд, в котором создан глубокий вакуум. Часть внутренней поверхности баллона покрывают тонким слоем серебра (подложка), на который напыляют светочувствительный слой из металла или оксида бария, или соединения сурьмы с цезием и т.п. Этот электрод служит катодом. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра: для регистрации видимого света и инфракрасного излучения используется кислородно-цезиевый катод, для регистрации ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны, и для них наблюдается строгая пропорциональность величины фототока от интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов, таких как фотоэлектрический

экспонометр, люксметр (измеритель освещенности), а также в схемах световой сигнализации.

Для регистрации очень слабого излучения, вплоть до отдельных квантов используются фотоэлектронные умножители.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – вакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии. Состоит ФЭУ из фотокатода и нескольких (до 15–20) электродов (д и н о д о в) с высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (рис. 4).

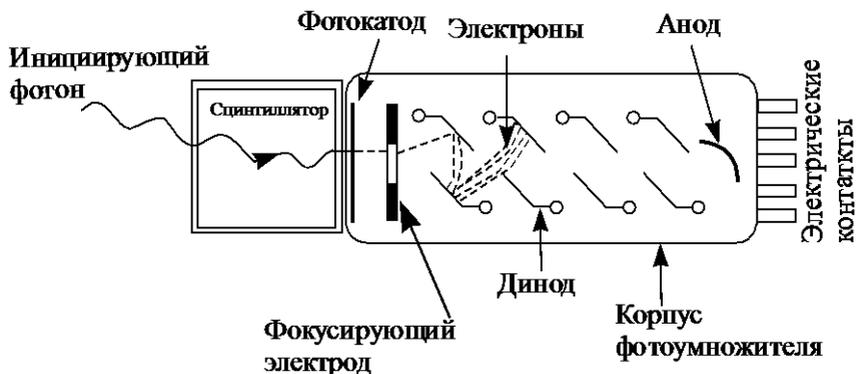


Рис. 4. Схема фотоэлектронного умножителя

Напряжение на каждом диноде относительно фотокатода на 50–100 В выше, чем у предыдущего. Свет, падающий на фотокатод, вырывает электроны, которые, попадая на диноды, «размножаются», за счёт вторичной электронной эмиссии. Коэффициент усиления электронного тока достигает 10⁹–10¹¹, так что даже отдельные фотоэлектроны создают на выходе ФЭУ импульсы тока большой амплитуды.

Фотоэлектронные умножители обладают малой инерционностью и могут работать на весьма высоких

частотах. Их применяют для регистрации световых импульсов, следующих через наносекундные промежутки времени. Кроме того, ФЭУ применяются во многих областях науки и техники – в астрономии, в ядерной физике, фототелеграфии и телевидении, для измерения малых световых потоков и для спектрального анализа. В полупроводниковой электронике пока не создано приборов, заменяющих ФЭУ.

Анализ энергий и углов вылета фотоэлектронов при внешнем фотоэффекте позволяет исследовать поверхности материалов, из которых происходит эмиссия электронов.

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 действия простейшего ЭОП заключается в следующем. Световое изображение объекта, проецированное на полупрозрачный фотокатод, преобразуется в электронное изображение. Ускоренные и сфокусированные электрическим полем электродов электроны попадают на люминесцентный экран. Здесь электронное изображение благодаря катодолюминесценции вновь преобразуется в световое.

В медицине ЭОП применяют для усиления яркости рентгеновского изображения, это позволяет значительно уменьшить дозу облучения человека. Если сигнал с ЭОП подать в виде развертки на телевизионную систему, то на экране телевизора можно получить «тепловое» изображение предметов. Части тела, имеющие разные температуры, различаются на экране либо цветом при цветном изображении, либо светом, если изображение черно-белое. Такая техническая система, называемая тепловизором, используется в термографии.

Экспериментальное определение величин постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта (2) с учетом выражения (1) запишем в виде

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_0. \quad (3)$$

Отсюда найдем задерживающее напряжение

$$U_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}. \quad (4)$$

График зависимости $U_0 = f(\nu)$, определяемой выражением (4), представляет собой прямую линию (рис. 5).

Точка пересечения прямой с осью абсцисс дает величину красной границы фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$. Экстраполируя прямую до пересечения с осью ординат,

получим значение отношения $\frac{A_{\text{вых}}}{e}$, откуда легко определить работу выхода электронов с поверхности катода $A_{\text{вых}}$.

Так как , что $A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{кр}}$, то уравнение (3) запишем в виде

$$h\nu = h\nu_{\text{кр}} + eU_0. \quad (5)$$

Уравнение (5) для частот света ν_1 и ν_2 будет иметь вид

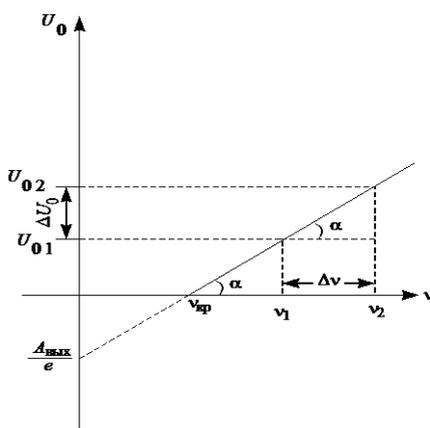


Рис. 5. График зависимости задерживающего напряжения U_0 от частоты падающего света ν

$$h\nu_1 = h\nu_{\text{кр}} + eU_{01}, \quad h\nu_2 = h\nu_{\text{кр}} + eU_{02}.$$

Вычтем первое уравнение из второго:

$$h\nu_2 - h\nu_1 = eU_{02} - eU_{01}.$$

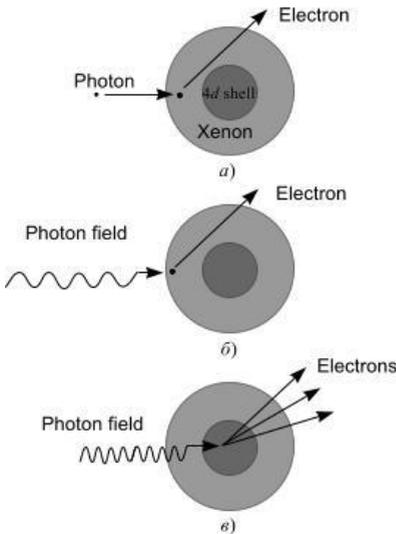
Так как $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$, $\Delta U_0 = U_{02} - U_{01}$, то

$$h\Delta\nu = e\Delta U_0.$$

Из последнего выражения получаем формулу для определения значения постоянной Планка $h = \frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} e$.

Из рис. 5 видно, что

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} = \text{tg } \alpha.$$



Совпадение значения постоянной Планка, полученного в экспериментах по фотоэффекту, с результатами других методов ее определения подтвердило правильность предположения Эйнштейна о квантовом характере взаимодействия света с веществом.

Современные исследования фотоэффекта

Ученые национального научно-исследовательского

Рис. 6. Фотоионизация ксенона:
 а – классический фотоэффект на внешних уровнях при низкой интенсивности фотонов;
 б – ионизация мощным длинноволновым излучением;
 в – ионизация коротковолновым рентгеновским излучением (изображение Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

института в области естественных и инженерных наук Германии показали, что описание взаимодействия сверхкоротковолнового излучения высокой интенсивности с веществом отличается от классического описания фотоэффекта. Результаты исследований опубликованы в Phys. Rev. Lett., V.102, P. 163002, 2009: Extreme Ultraviolet Laser Excites Atomic Giant Resonance.

Исследователи облучали различные виды газов с целью определения зависимости между мощностью лазера и эффектом ионизации. Данные исследования важны для развития технологий ультрафиолетовой литографии нового поколения, где лазерное излучение с длиной волны 13 нм рассматривается как наиболее перспективное.

В соответствии с законами внешнего фотоэффекта, фотон, обладающий достаточно высокой энергией, «выбивает» из атома один электрон с внешней орбиты (рис. 6, а). При очень высоких интенсивностях короткоимпульсного (фемтосекунды) длинноволнового излучения может наблюдаться многофотонная ионизация (рис. 6, б). Ученые Physikalisch-Technische Bundesanstalt показали (рис. 6, в), что при облучении атомов ксенона рентгеновским излучением с длиной волны 13 нм и мощностью в несколько петаватт (1 петаватт равен 10^{15} ватт) на квадратный сантиметр фотоны вызывают эмиссию большого количества внутренних электронов из атомов газа. Было также установлено, что эффект зависит от структуры электронных оболочек атомов облучаемого вещества, а не только от параметров пучка излучения. Поэтому в области коротковолнового рентгеновского излучения классическая модель фотоэффекта может оказаться не совсем верной.

Схема установки и методика выполнения лабораторной работы

Схема установки для изучения явления внешнего фотоэффекта показана на рис. 7. Свет от осветительной лампы 7. Свет от осветительной лампы через входную щель, ширина которой регулируется винтом 1, попадает в монохроматор. Монохроматор разлагает свет в спектр.

При попадании света на поворотную призму 3, поворот которой производится с помощью барабана 4, происходит выделение определенного спектрального участка излучения. Затем выделенный спектральный участок излучения через выходную щель, ширина которой регулируется винтом 2, попадает на фотоэлемент 5.

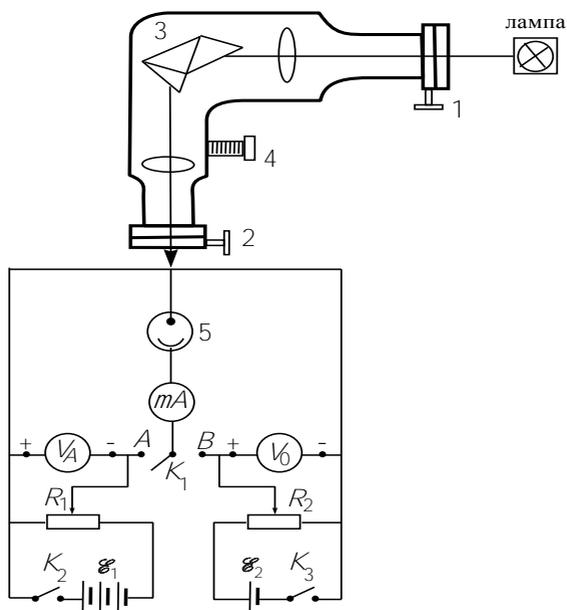


Рис. 7. Схема установки для изучения явления фотоэффекта

При проведении экспериментов высота входной щели и ее освещенность остаются постоянными. Поэтому величина светового потока, проходящего через входную щель, может

быть изменена при помощи уменьшения или увеличения ширины входной щели.

Для изучения зависимости фототока от величины анодного напряжения на пульте управления переключатель K_1 устанавливается в положение A (рис. 7). При включении ключа K_2 на анод фотоэлемента подается положительный потенциал относительно катода. Величина анодного напряжения регулируется при помощи потенциометра R_1 и регистрируется вольтметром V_A . Величина фототока измеряется микроамперметром μA .

Для определения величины задерживающего напряжения ключ K_1 переводят в положение B . При замыкании ключа K_3 на анод фотоэлемента 5 подается отрицательный относительно катода потенциал. При помощи потенциометра R_2 величина отрицательного напряжения между катодом и анодом увеличивается до тех пор, пока фототок в цепи фотоэлемента не станет равным нулю. При этом вольтметр V_0 зафиксирует величину задерживающего напряжения.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включите в сеть осветительную лампу, пульт управления, вольтметр и миллиамперметр.
2. Экспериментально найдите зависимость величины фототока I от величины анодного напряжения U для нескольких значений светового потока Φ . Величину светового потока Φ изменяйте путем изменения ширины входной щели при помощи винта 1 .
3. По экспериментальным данным постройте графики зависимости $I = f(U)$.
4. По построенным графикам определите величину тока насыщения I_n для каждого значения светового потока Φ .
5. По формуле $n = \frac{I_{\text{нас}}}{e}$ определите максимальное число фотоэлектронов, покидающих катод за единицу времени

для каждого значения светового потока Φ . Сделайте выводы.

6. Экспериментально определите зависимость фототока насыщения I_n от величины светового потока Φ . Постройте график зависимости $I_n = f(\Phi)$.
7. Для данной частоты световой волны определите задерживающее напряжение U_0 . По формуле $E_{\text{кин}} = eU_0$ рассчитайте максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.
8. При помощи барабана 4 измените частоту светового потока. Измерьте зависимость величины задерживающего напряжения U_0 от частоты света ν , падающего на катод фотоэлемента. Постройте график зависимости $U_0 = f(\nu)$.
9. Из построенного графика определите величины постоянной Планка, красной границы фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$, а также работу выхода $A_{\text{вых}}$ фотоэлектронов из материала катода.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение внешнего фотоэффекта.
2. Что такое задерживающая разность потенциалов и как она определяется?
3. Сформулируйте основные законы внешнего фотоэффекта.
4. Можно ли объяснить явление внешнего фотоэффекта с точки зрения классической электродинамики?
5. Объясните законы фотоэффекта с точки зрения квантовой теории.
6. Что собой представляет вольт-амперная характеристика фотоэлемента?
7. Дайте определение работы выхода электрона из металла. От чего зависит ее величина?

8. Фотон. Как определяются энергия, импульс и масса фотона?
9. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
10. Каким образом можно экспериментально определить величины постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода?
11. Как устроен фотоэлемент? Принцип его работы.
12. Где применяется внешний фотоэффект?

Литература

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М., 2003.
2. Матвеев, А.Н. Атомная физика / А.Н. Матвеев. – М., 1989.
3. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М., 1979.

Учебное издание

**ЯВЛЕНИЕ
ВНЕШНЕГО ФОТОЭФЕКТА**

*Методические указания
к лабораторной работе по физике
для студентов инженерно-технических специальностей*

Составители:

КУЖИР Павел Григорьевич
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна
САВЧУК Галина Казимировна

Технический редактор *Д. А. Исаев*
Компьютерная верстка *Д. А. Исаева*

Подписано в печать 12.04.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 100. Заказ 288.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.