

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»
(СПбГТИ(ТУ))

Кафедра общей физики

А.Г. Чибисов, О.П. Шустрова, В.В. Благовещенский

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Методические указания к лабораторной работе № 59

Санкт-Петербург
2013

Чибисов А.Г., Фотоэлектрический эффект: методические указания к лабораторной работе № 59 / А.Г. Чибисов, О.П. Шустрова, В.В. Благовещенский. — СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2013. — 17 с.

В методических указаниях представлена одна из лабораторных работ по разделу «Явления квантовой оптики».

В методических указаниях дано краткое изложение современных представлений о явлении фотоэлектрического эффекта. Данные методические указания могут быть использованы студентами при изучении корпускулярных свойств света. В лабораторной работе студентам предлагается по экспериментальным данным определить значения постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и потенциала выхода.

Методические указания соответствуют следующим компетенциям подготовки студентов всех направлений: ОК-1, ПК-1, ПК-3, ПК-4, ПК-8.

Методические указания предназначены для студентов второго курса всех факультетов в соответствии с рабочей программой по общей физике.

Рис. 6, табл.1, библиогр. 5 назв.

Рецензент:

Ю. В. Мурашкин, канд. хим. наук., доцент кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе СПбГТИ(ТУ)

Утверждено на заседании учебно-методического совета инженерно-технологического факультета. Протокол № ____ от _____ 2013 г.

Рекомендовано к изданию РИСо СПбГТИ(ТУ)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Фотоэлектрический эффект (Теоретическая часть)	5
2 Лабораторная работа № 59 «Фотоэлектрический эффект»	12
2.1 Цель работы	12
2.2 Описание установки	12
2.3 Порядок выполнения работы	13
2.4 Обработка результатов измерений	14
3 Контрольные вопросы	15
Литература	16

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа позволяет студентам экспериментально исследовать зависимость напряжения запирающего фотоэффекта от частоты падающего на фотоэлемент света. На основании полученной зависимости становится возможным определить важнейшие характеристики фотоэлектрического эффекта: красную границу и потенциал выхода электрона из данного металла, а также фундаментальную константу — постоянную Планка.

1. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

(Теоретическая часть)

Среди разнообразных явлений, в которых проявляется действие света на вещество, важное место занимает фотоэлектрический эффект.

Фотоэффектом называется возникновение или изменение силы тока в электрической цепи под действием света, падающего на один из элементов цепи (*фотоэлемент*).

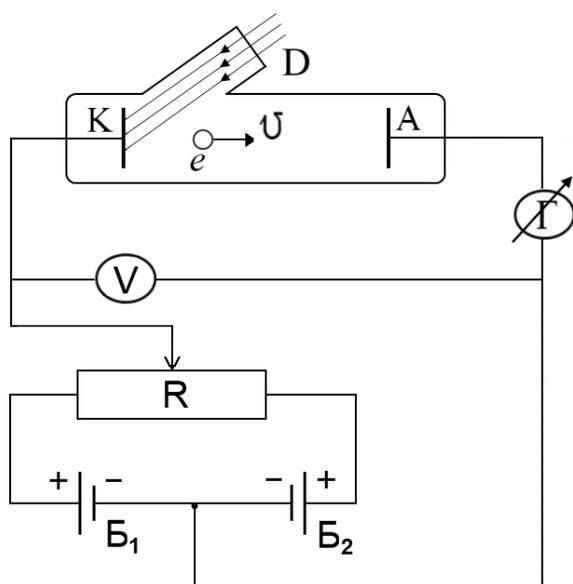
Различают два вида фотоэффекта:

– *внешний фотоэффект* — испускание электронов под действием света с поверхности металлов, находящихся в вакууме или газе;

– *внутренний фотоэффект* — появление под действием света добавочных электронов проводимости и дырок внутри полупроводника или диэлектрика, приводящее к уменьшению электрического сопротивления облучаемого светом тела или возникновение под действием света, падающего на границу раздела металл – полупроводник, электродвижущей силы, вызывающей появление или изменение силы тока в электрической цепи.

Внешний фотоэффект был обнаружен в 1877 году Герцем при освещении катода искрового разрядника ультрафиолетовым излучением. Электрический разряд происходил при меньшем напряжении, чем при отсутствии освещения. обстоятельно фотоэффект был изучен А. Г. Столетовым.

Электрическая схема установки представлена на рисунке 1.



На схеме:

D – кварцевое окошко;

K – катод;

A – анод;

Г – гальванометр;

V – вольтметр;

R – потенциометр;

B₁ и B₂ – электрические батареи

Рисунок 1. – Электрическая схема установки

Для изучения явления фотоэффекта обычно используется вакуумная трубка. Катод K , покрытый исследуемым металлом освещается излучением, проходящим через кварцевое окошко D . Напряжение U между анодом и катодом измеряется вольтметром V и регулируется потенциометром R . Батареи B_1 и B_2 включены «навстречу», что позволяет с помощью потенциометра R менять полярность напряжения между электродами. Сила фототока измеряется гальванометром Γ . *Вольт – амперная характеристика* (зависимость силы электрического тока от приложенного напряжения) фотоэффекта показана на рисунке 2.

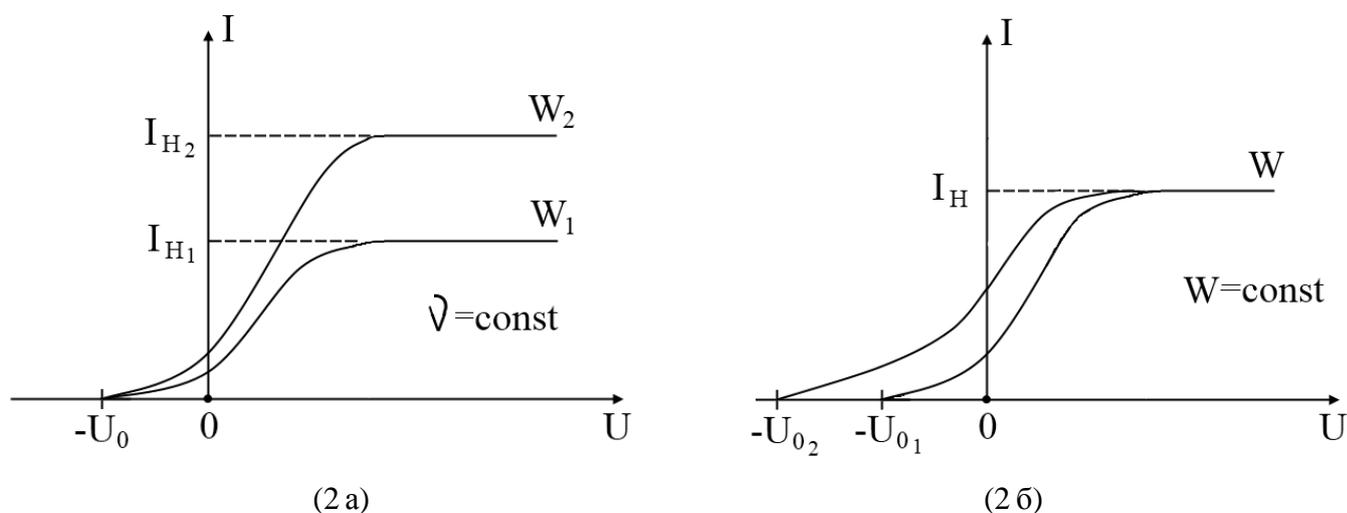


Рисунок 2. – Вольт-амперная характеристика фотоэффекта

На рисунке (2а) вольт – амперная характеристика соответствует различным энергетическим освещенностям W_1 и W_2 источника излучения, но одинаковой частоте излучения; а на рисунке (2б) вольт – амперная характеристика соответствует одинаковой энергетической освещенности источника излучения, но различным его частотам ν_1 и ν_2 .

Существование фототока в области отрицательных напряжений объясняется тем, что фотоэлектроны обладают такой большой кинетической энергией, которая позволяет преодолеть отрицательное напряжение U_0 . Оно называется *напряжением запираения*. Зная U_0 , можно определить кинетическую энергию электронов, вылетевших с поверхности катода по формуле:

$$\frac{mU_{\max}^2}{2} = e U_0 , \quad (1)$$

а, следовательно, можно найти и их скорость:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2e U_0}{m}}, \quad (2)$$

где m – масса электрона; e – заряд электрона.

Вольт – амперная характеристика показывает, что фототок возникает при отрицательном напряжении U_0 , затем возрастает с увеличением электрического напряжения между электродами и достигает максимального значения — фототока насыщения I_H , когда все электроны, вылетевшие из катода, достигают анода. При этом значение силы тока насыщения определяется соотношением

$$I_H = e n, \quad (3)$$

где n – число электронов, вылетевших из катода за 1 сек.

Опытным путем А. Г. Столетовым были установлены следующие законы фотоэффекта:

- 1) Максимальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света ν и не зависит от его интенсивности.
- 2) Для каждого металла существует минимальное значение частоты света, при которой наблюдается фотоэффект. Она называется *красной границей фотоэффекта* $\nu_{\text{кр}}$. Если частота излучения меньше, чем $\nu_{\text{кр}}$, то фотоэффект не наблюдается.
- 3) Число электронов n , вылетевших из катода за одну секунду, прямо – пропорционально интенсивности света, $I_H \sim W$.

При объяснении 1-ого и 2-го законов фотоэффекта, существовавшей в то время электро – магнитной теорией света, возникли серьезные трудности. Ведь согласно этой теории вырывание электронов из металла должно было являться результатом их «раскачивания» в электро – магнитном поле световой волны. Но в этом случае было непонятным, почему значение U_{\max} , а следовательно, и кинетической энергии электронов зависят от частоты света, а не от его интенсивности. Эти трудности в объяснении явления фотоэффекта вызывали сомнения в правильности волновой теории света.

Объяснить законы фотоэффекта удалось в 1905 году Эйнштейну с помощью идеи Планка о том, что свет испускается и поглощается квантами, т.е. очень маленькими порциями. При этом энергия каждой такой порции пропорциональна частоте света:

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

где h – постоянная Планка (коэффициент пропорциональности).

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Объяснить законы фотоэффекта оказалось возможным только с учетом квантовых свойств света. Каждый квант света, поглощаясь металлом, отдает свою энергию электрону, и, если эта энергия достаточна для преодоления связей, удерживающих электрон в решетке, то электрон может вылететь из металла. Избыток энергии остается у него в виде кинетической энергии. Каждый вылетевший электрон поглощает энергию кванта света, поэтому число таких электронов должно быть пропорционально числу квантов света, т.е. интенсивности излучения. В свою очередь кинетическая энергия каждого фотоэлектрона должна быть пропорциональна энергии поглощенного кванта света, т.е. прямо – пропорциональна частоте излучения.

Количественно явление фотоэффекта описывается уравнением Эйнштейна:

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

которое является обобщением закона сохранения энергии для этого явления: энергия кванта света расходуется на работу выхода электрона на поверхность металла (A) и на сообщение ему кинетической энергии. Это уравнение показывает, что значение U_{\max} является функцией частоты излучения и не зависит от его интенсивности. Кроме того фотоэффект возможен только в том случае, когда энергия кванта света больше или равна работе выхода, т.е., когда $h\nu \geq A$. Следовательно соответствующая красной границе фотоэффекта частота

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A}{h} . \quad (6)$$

Исходя из этого, уравнение Эйнштейна можно представить в виде:

т.к. $A = h \nu_{\text{кр}} ,$

$$\frac{mU_{\max}^2}{2} = e U_0 ,$$

то $h\nu = h\nu_{\text{кр}} + e U_0$ и, следовательно:

$$U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{h\nu_{\text{кр}}}{e} , \quad (7)$$

т.е. значение напряжения запирающего U_0 прямо – пропорционально частоте излучения. Т.к. работу выхода A можно представить в виде: $A = e\phi$, где ϕ называется потенциалом выхода, то последнее уравнение примет вид:

$$U_0 = \frac{h\nu}{e} - \phi . \quad (8)$$

Графиком зависимости U_0 от частоты излучения ν является прямая, представленная на рисунке 3.

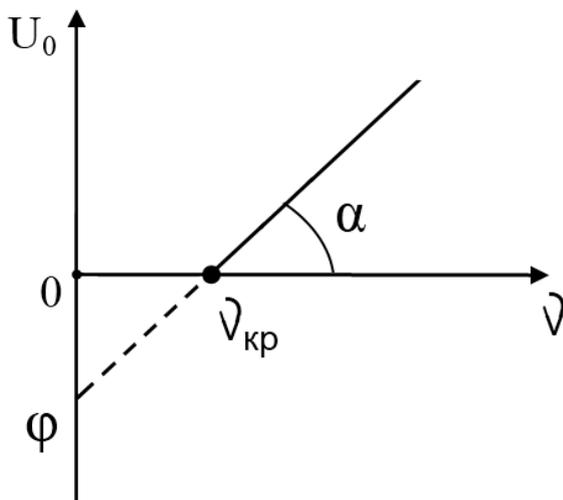


Рисунок 3. – Зависимость напряжения запирающего U_0 от частоты света ν

Тангенс угла наклона этой прямой к оси частот ν равен отношению:

$$\text{tg } \alpha = \frac{h}{e}$$

Определив его, можно найти значение постоянной Планка:

$$h = e \text{ tg } \alpha . \quad (9)$$

По этому графику можно экспериментально определить значения красной границы фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$ и потенциала выхода ϕ для различных металлов.

Фотоэффект показывает, что при испускании и поглощении свет ведет себя как поток частиц, т.е. квант света оказывается очень похож на то, что принято называть *частицей*. Поэтому свойства света, обнаруженные при испускании и поглощении, называются *корпускулярными*. Сама же такая частица света получила название *фотона*. Согласно теории относительности Эйнштейна энергия связана с массой соотношением:

$$W = mc^2 , \quad (10)$$

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

Т.к. энергия фотона $W = h\nu$, то приравняв эти величины, можно найти массу фотона m_ϕ :

$$m_\phi = \frac{h\nu}{c^2} , \quad (11)$$

т.е. она зависит от частоты излучения.

В отличие от масс макроскопических тел, фотон не обладает массой покоя, т.е. покоящегося фотона не существует. Он может существовать только, двигаясь со скоростью света.

Импульс фотона тоже оказывается прямо-пропорциональным частоте излучения:

$$P_\phi = mc = \frac{h\nu}{c} . \quad (12)$$

Если ввести волновое число, как

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} ,$$

где λ – длина волны, которая с периодом и частотой излучения связана соотношениями $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$, то импульс фотона можно будет определить по следующим формулам:

$$P_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{hk}{2\pi} = \hbar k , \quad (13)$$

где $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Таким образом фотон, подобно любой движущейся частице, обладает массой, энергией и импульсом. Все эти корпускулярные характеристики фотона связаны с его волновыми характеристиками — его частотой или длиной волны. Поэтому считается, что свет обладает двойственностью свойств: при распространении в среде он ведет себя, как волна, что подтверждается такими явлениями, как интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия, а при взаимодействии с веществом, как поток частиц, что подтверждает явление фотоэффекта, т.е. свету свойственен корпускулярно-волновой дуализм.

2. Лабораторная работа № 59 «Фотоэлектрический эффект»

2.1 Цель работы

Целью работы является исследование зависимости напряжения запирающего U_0 от частоты падающего на катод света ν .

На основании изучения данной зависимости следует определить красную границу фотоэффекта, потенциал выхода электрона из данного металла и вычислить постоянную Планка.

2.2 Описание установки

В данной лабораторной работе используется сурмяно – цезиевый фотоэлемент, схематически изображенный на рисунке 4.

Он представляет собой стеклянный баллон, на части внутренней поверхности которого нанесен тонкий слой металла, выполняющий роль катода K . Анодом служит металлический шарик A . Блок – схема установки показана на рисунке 5.

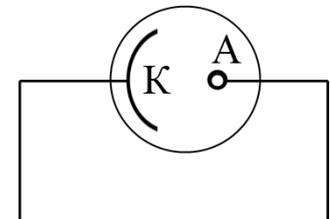


Рисунок 4. – Схема фотоэлемента

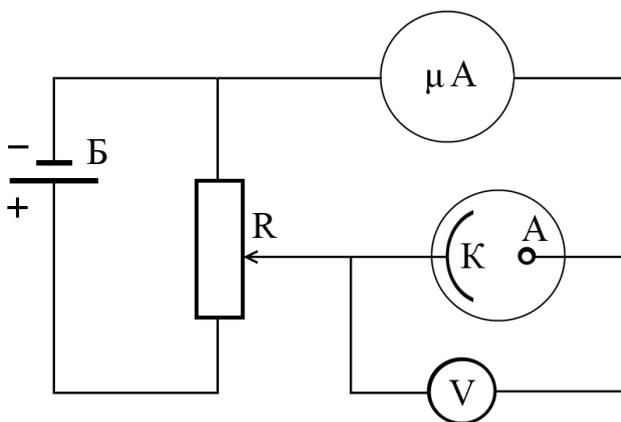


Рисунок 5. – Блок – схема установки

Фотоэлемент включается в цепь источника постоянного напряжения B . Напряжение между катодом K и анодом A измеряется при помощи потенциометра R и измеряется вольтметром V . Микроамперметр является индикаторным прибором, позволяющим установить напряжение запирающего U_0 , при котором ток в цепи фотоэлемента отсутствует.

В качестве источника монохроматических световых лучей используется монохроматор, оптическая схема которого показана на рисунке 6.

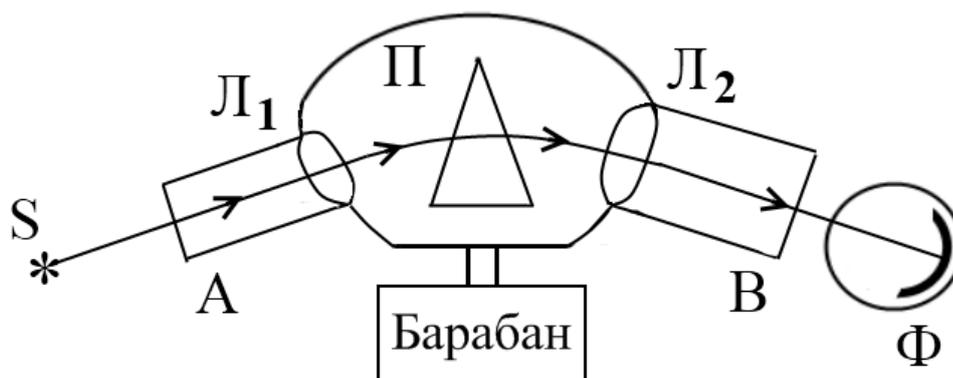


Рисунок 6. – Оптическая схема монохроматора

Свет от источника S (рисунок 6) направляется на входную щель монохроматора A , падает на линзу L_1 , проходит через призму Π , попадает на собирающую линзу L_2 , выходит из прибора через щель B и фиксируется фотоэлементом Φ . С призмой связан барабан с делениями. При помощи барабана можно поворачивать призму Π для того, чтобы из щели B выходили световые лучи, нужной длины волны λ (призма Π раскладывает падающее на неё излучение в спектр).

2.3 Порядок выполнения работы

1. Привести в рабочее положение монохроматор (рисунок 6). Для этого включить источник света S . Барабан монохроматора (рисунок 6) поставить в положение, при котором из монохроматора выходит свет с длиной волны λ примерно равной 400 нм. Длину волны светового излучения, выходящего из монохроматора, определяют по делениям шкалы на барабане и градуировочной кривой, находящейся на приборе.

2. Включить батарею B (рисунок 5), поставить потенциометр R в крайнее левое положение, выставить такое напряжение, при котором ток, текущий через фотоэлемент Φ (рисунок 6), становится равным 0. (Напряжение измеряется вольтметром V).

Точно так же определяют напряжение запирающего U_0 для других длин волн.

Результаты измерений заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

U_0	
λ	
ν	

При этом частота излучения ν определяется из соотношения $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

2.4 Обработка результатов измерений

По данным таблицы строят график зависимости $U_0(\nu)$. По графику (см. рисунок 3) определяют значение красной границы фотоэффекта $\nu_{кр}$, потенциала выхода ϕ и постоянной Планка h .

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие явления называются *фотоэлектрическими*?
2. Какой фотоэффект называется *внешним*?
3. Сформулируйте законы Столетова А.Г. для фотоэффекта.
4. Почему некоторые законы Столетова А.Г. противоречили классической волновой теории света?
5. Сформулируйте уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
6. Что такое *фотон*, чему равны его энергия, масса и импульс?
7. Что называется красной границей фотоэффекта?

ЛИТЕРАТУРА

1 Валишев, М.Г. Курс общей физики [Текст]: учебное пособие для вузов по техническим направлениям подготовки и специальностям / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. – 2-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. – 573 с.

2 Введение в физический практикум. Обработка результатов измерений [Текст]: учебное пособие для студентов заочной формы обучения / Б.Б. Болотов [и др.]; под ред. В.В. Кашмета. – СПб: Синтез, 2009. – 15 с.

3 Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]; в 3-х т.: Учебное пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев. – 10-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008.

Т.2 : Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 2008. – 496 с.

4 Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]; в 3-х т.: Учебное пособие для вузов по техническим и технологическим направлениям / И.В. Савельев. – 10-е изд., стер. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008.

Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 2008. – 317 с.

5 Старовиков, М.И. Введение в экспериментальную физику [Текст]: учебное пособие для вузов / М.И. Старовиков. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2008. – 235 с.

Кафедра общей физики
Методические указания к лабораторной работе № 59
Фотоэлектрический эффект

Александр Георгиевич Чибисов
Ольга Петровна Шустрова
Владимир Васильевич Благовещенский

Отпечатано с оригинал-макета. Формат 60x90 1/16
Печ. л. 1. Тираж _____ экз. Заказ № _____

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26
Типография издательства СПбГТИ(ТУ), тел. 494-93-65