

## Лабораторная работа № 5.07

### Определение постоянной Планка методом задерживающего потенциала

#### Содержание

Введение . . . . .	2
Экспериментальная установка . . . . .	10
Проведение измерений . . . . .	14
Обработка результатов . . . . .	15
Контрольные вопросы . . . . .	16
Список литературы . . . . .	17
Приложение . . . . .	18

## Цели работы

- Экспериментально проверить законы фотоэффекта.
- Определение постоянной Планка и работы выхода электрона из металла.

## Задачи

1. Определение запирающего напряжения
2. Изучение зависимости кинетической энергии электронов от частоты падающего излучения
3. Экспериментальное определение материала фотокатода и вычисление постоянной Планка.

## Введение

Явление вырывания электронов из вещества при освещении его светом получило название фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта). Различают внешний и внутренний фотоэффект. При внешнем фотоэффекте электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду, в частности в вакуум. При внутреннем фотоэффекте оптически возбуждённые электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрической нейтральности последнего. Электроны, вырванные под действием света, называют фотоэлектронами. Фотоэлектрическими свойствами обладают как металлы, так и диэлектрики, а также полупроводники и электролиты, причём необходимым, но не достаточным условием фотоэффекта является заметное поглощение используемого света в поверхностном слое освещаемого тела. Фотоэлектрический эффект с данного вещества сильно зависит от состояния его поверхности. Для получения однозначных результатов исследование необходимо проводить в хорошем вакууме, предварительно тщательно очистив рабочую поверхность. Взаимодействуя с

электроном вещества, фотон может обмениваться с ним энергией и импульсом. Такой процесс напоминает удар шаров и поэтому образно называется столкновением. Фотоэффект возникает при неупругом столкновении фотона с электроном. При таком столкновении фотон поглощается, а его энергия передаётся электрону. Таким образом, электрон приобретает кинетическую энергию не постепенно, а сразу - в результате единичного акта столкновения. Этим объясняется **безынерционность** фотоэффекта.

### Внешний фотоэффект в металлах. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

Энергия фотона затрачивается на отрыв электрона от атома внутри металла. Оторванный электрон может взаимодействовать с атомом, теряя при этом часть своей энергии. Максимальной энергией вылетевший электрон будет обладать тогда, когда внутри металла он был свободен, т.е. не связан с атомом, а при вылете наружу практически не расходовал энергию на взаимодействие с атомом. В этом случае кинетическая энергия электрона тратится только на преодоление задерживающих сил, действующих в поверхностном слое металла, т.е. на работу выхода. Предположим, что электрон получил кинетическую энергию при столкновении только с одним фотоном. Многофотонные процессы возможны, но при слабых интенсивностях света (линейная оптика) маловероятны. Тогда максимальная кинетическая энергия, которой будет обладать вылетевший электрон, определится формулой:

$$h\nu = A_{\text{в}} + E_{\text{к.макс}} = A_{\text{в}} + \frac{m_e V^2}{2}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{в}}$  – работа выхода электрона из металла,  $m_e$  - масса электрона,  $V$  - скорость электрона,  $h$  - постоянная Планка,  $\nu$  - частота световой

волны. Эта формула была получена Эйнштейном и носит его имя. Обратим внимание на интересное противоречие, которое возникает в рамках классической теории – рассмотрим процесс поглощения фотона свободным электроном с точки зрения закона сохранения энергии и импульса. Воспользуемся системой отсчёта, в которой электрон первоначально покоился. Пусть электрон поглотил фотон с импульсом  $\vec{p}_\text{ф}$  и энергией  $\vec{E}_\text{ф}$ . Обозначим импульс электрона после взаимодействия через  $\vec{p}_\text{э}$ , а его энергию через  $\vec{E}_\text{э}$ . Из закона сохранения импульса и энергии следует, что

$$\vec{p}_\text{э} = \vec{p}_\text{ф}, \quad (2)$$

$$\vec{E}_\text{ф} + m_e c^2 = \vec{E}_\text{э}. \quad (3)$$

Возведём в квадрат уравнение (2) и вычтем его из (3). При этом примем во внимание, что в классической релятивистской механике полная энергия и импульс частицы связаны соотношением:

$$\vec{E}_\text{э}^2 = c\sqrt{p_\text{э}^2 + m_e c^2} \quad (4)$$

Получим явно абсурдный результат:

$$2E_\text{ф}m_e c^2 = 0$$

Отсюда следует, что  $E_\text{ф} = 0$ , таким образом, поглощение фотона “свободным электроном” невозможно. Противоречие возникает из-за неудачной терминологии. “Свободный электрон” в металле в действительности не свободен. Он как бы заперт в ящике, вблизи стенок которого действует задерживающее поле. Фотон взаимодействует не только с электроном, но происходит взаимодействие обеих этих частиц с металлом в целом. При взаимодействии же трёх тел

законы сохранения энергии и импульса могут выполняться одновременно: импульс фотона воспринимается, как электроном, так и металлом, энергия же передаётся только электрону, так как масса металла может считаться бесконечно большой. Из формулы Эйнштейна вытекают два следствия, находящиеся в строгом соответствии с опытом.

**1. Максимальная кинетическая энергия вырванных электронов линейно зависит от частоты освещающего света и его интенсивности. Интенсивность оказывает влияние только на количество вырванных электронов, но совсем не влияет на их максимальную кинетическую энергию.** Любопытно, что если отложить по оси абсцисс частоту падающего света  $\nu$  а по оси ординат – максимальную кинетическую энергию электрона, то тангенс угла наклона прямой к оси частот будет равен постоянной Планка.

$$\frac{m_e V^2}{2} = h(\nu - \nu_0). \quad (5)$$

В 1916 г. Р. Милликен первым определил значение постоянной Планка таким способом.

**2. Существует низкочастотная граница фотоэффекта, т.е. такая частота  $\nu_0$ , ниже которой фотоэффект не наблюдается.** Она зависит от состава облучаемого тела и состояния его поверхности. Величина  $\nu_0$  называется **порогом фотоэффекта**. Для металлов порог фотоэффекта равен работе выхода:

$$h\nu_0 = A_{\text{в}}. \quad (6)$$

Работа выхода для щелочных металлов лежит в диапазоне 2-5 эВ. Заметим, что очень слабый фототок наблюдается при энергиях возбуждения меньших работы выхода. Это определяется тем, что рас-

пределение электронов в металле по энергиям определяется статистикой Ферми - Дирака, и при  $T \neq 0$  электроны могут иметь энергию большую, чем энергия Ферми. Поэтому для определения  $\nu_0$  необходимо аппроксимировать зависимость  $I(\nu)$  в области малых частот прямой и по её пересечению с осью частот  $\nu_0$  вычислять порог фотоэффекта  $h\nu_0$ . При рассмотрении фотоэффекта вводят понятие квантового выхода:

$$\eta = \frac{N_e}{N} \quad (7)$$

где  $N$  - число падающих на поверхность фотонов,  $N_e$  - число выбитых светом фотоэлектронов.  $\eta \ll 1$  что связано с тем, что только часть электронов, получивших энергию больше  $A_v$  имеют составляющую скорости, направленную к поверхности, кроме того, электроны испытывают столкновения и рассеиваются на пути к поверхности.

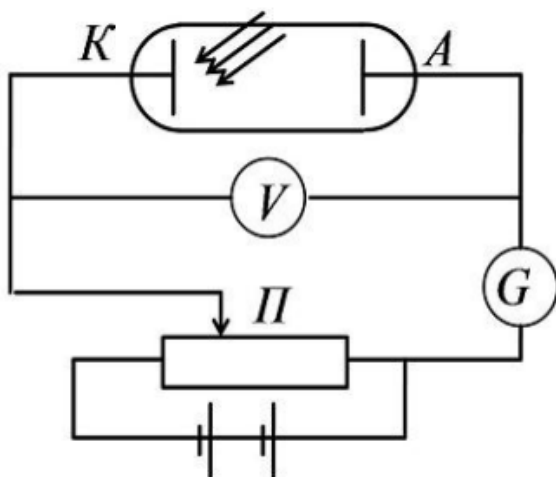


Рис. 1. Исследование внешнего фотоэффекта

На рис 1 показана классическая схема по исследованию фотоэффекта, предложенная Ф. Ленардом и Дж Томпсоном в 1898г. Именно они, измерив удельный заряд испускаемых светом частиц, установили, что это электроны. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, движутся под действием электрического поля к аноду А. В результате в цепи течёт фототок, измеряемый гальванометром Г. Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра П.

Полученная таким образом кривая зависимости фототока от напряжения приведена на рис 2

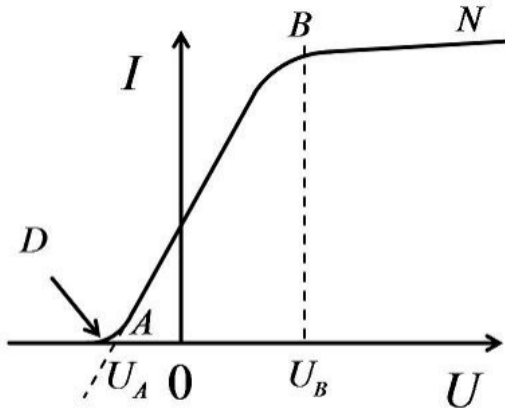


Рис. 2. Кривая зависимости фототока от напряжения

Она называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента. С ростом приложенного напряжения наступает момент, когда все электроны, выбитые светом в область пространства между катодом и

анодом, достигают анода, характеристика становится линейной, очень слабо увеличивающейся с ростом приложенного напряжения (участок BN). Ток в этой области называется **током насыщения**. Существование тока насыщения экспериментально было установлено А.Г. Столетовым. При показаниях вольтметра  $U < U_B$  электрическое поле между катодом и анодом недостаточно для того, чтобы при данной геометрии фотоэлемента собрать на аноде все выбитые электроны. Сила тока становится меньше  $I_{\text{нас}}$ . При определённых показаниях вольтметра  $U_A$  наступает состояние, когда даже самые энергичные из летевших к аноду электронов, не достигают его, а отбрасываются назад к катоду. Ток через фотоэлемент при этом практически становится равным нулю. Заметим, что очень слабый фототок наблюдается при задерживающих напряжениях больших  $U_A$  (участок D на рис.2). Это определяется тем, что распределение электронов в металле по энергиям определяется статистикой Ферми - Дирака, и при  $T \neq 0$  электроны могут иметь энергию большую, чем энергия Ферми.

### **Зависимость тока насыщения от интенсивности падающего света**

Число высвобождаемых в результате фотоэффекта электронов должно быть пропорционально числу падающих на поверхность квантов света. Поскольку световой поток определяется количеством квантов света, падающих на поверхность в единицу времени, ток насыщения должен быть пропорционален световому потоку. А.Г. Столетовым было доказано на опыте, что **ток насыщения прямо пропорционален интенсивности падающего света, если только частота его остаётся постоянной**. Точнее, ток насыщения пропорционален интенсивности поглощаемого света, однако последняя для фотокатодов пропорциональна интенсивности пада-



ющего света

$$I_{\text{нас}} = C\Phi, \quad (8)$$

$C$  – чувствительность фотоэлемента мкА/лм. Для белого света называют интегральной чувствительностью. Чувствительность является одной из важнейших характеристик фотоэлементов. Зависимость (8) справедлива в случае, если фотон получает энергию лишь от одного фотона. Такие процессы называются однофотонными. С изобретением лазеров были получены недостижимые прежде мощности световых пучков. Это дало возможность осуществить многофотонные процессы. При малых интенсивностях падающего света многофотонные процессы практически не наблюдаются, поэтому фототок насыщения линейно растёт с ростом интенсивности излучения.

## Внешний фотоэффект в полупроводниках

Так как металлы имеют небольшой квантовый выход, они фактически не используются в качестве фотокатодов в фотоэлементах. Эффективные фотоэмиттеры в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра созданы на основе полупроводниковых материалов. Для полупроводников уравнение Эйнштейна примет вид

$$h\nu = E_i + E_{\text{к.макс}}, \quad (9)$$

$E_i$  - порог фотоэффекта. В самом простейшем случае

$$E_i = E_0 - E_{\text{Vмакс}},$$

где  $E_0$  – уровень вакуума;  $E_{\text{Vмакс}}$  – уровень максимума валентной зоны. Однако, для повышения чувствительности фотоэлементов и увеличения квантового выхода используют фотокатоды сложно-

го состава, применяются различные обработки поверхности фотокатода,  $E_i$  определяется для каждого типа фотокатодов по-разному. Наибольшей чувствительностью в видимой и ближней ИК - областях спектра обладают фотокатоды с отрицательным электронным средством. Они представляют собой сильнолегированные полупроводники р-типа, работа выхода в которых снижена так, что уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости в объёме полупроводника. Такие фотокатоды изготавливаются на основе полупроводниковых соединений GaP, GaAs, InP и их твёрдых растворов, а также на основе Si. В процессе изготовления фотокатода поверхность полупроводника очищается прогревом в сверхвысоком вакууме, после чего работа выхода снижается адсорбцией цезия и кислорода. Наиболее высокую чувствительность имеют фотокатоды с отрицательным электронным средством, изготовленные на основе совершенных полупроводниковых эпитаксиальных плёнок, обладающих большими диффузионными длинами.

При использовании полупроводниковых фотоэмиттеров порог фотоэффекта  $W = 1 \div 2$  эВ .

### Экспериментальная установка

В модифицированном варианте классической установки свет известной частоты проходит через кольцевой анод и падает на катод, где вызывает испускание электронов благодаря фотоэлектрическому эффекту. Энергию этих электронов можно определить, подавая задерживающее напряжение, которое уменьшает поток электронов к аноду до тех пор, пока поток электронов не прекращается. соответствует нулевому току, не зависит от интенсивности света. Поэтому энергия электронов также не зависит от интенсивности света. Получив запирающее напряжения для света различных частот, можно рассчитать постоянную Планка.

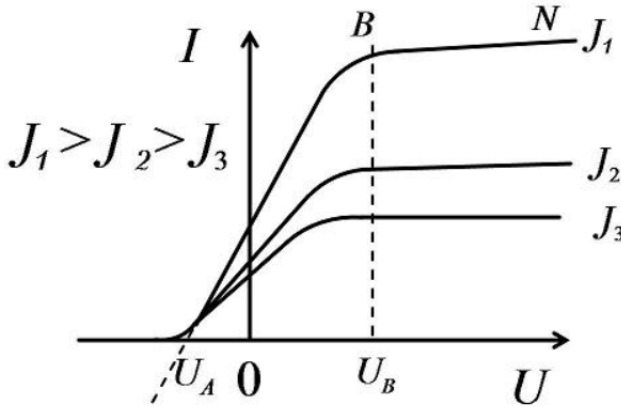


Рис. 3. Зависимость ВАХ фотоэлемента от интенсивности падающего света

Как указано выше, Эйнштейн (развив квантовую теорию Планка) предположил, что свет излучается, распространяется и поглощается веществом в виде квантов (фотонов), энергия которых равна

$$E_{\text{ф}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (10)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме ( $c = 2,99 \cdot 10^8$ ) м/с;  $\lambda$  - длина волны излучения. При взаимодействии фотона с энергией  $E_{\text{ф}}$  со свободным электроном часть энергии теряется на вырывание электрона из металла, которая имеет смысл работы выхода электрона из металла  $A_{\text{вых}}$ . (здесь следует учитывать и энергию потерь на столкновение с другими электронами и атомами вещества), а оставшаяся часть энергии переходит в кинетическую энергию  $T = \frac{m_e V^2}{2}$  выскобленного электрона, указанную ранее. Таким образом:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + T, \quad (11)$$

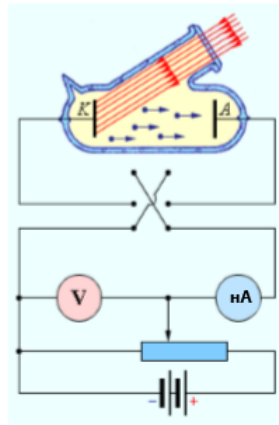


Рис. 4. Схема рабочей установки

Если между катодом и анодом в нашей схеме подать задерживающее напряжение (см. рис.4), энергия электрона подлетающего к аноду уменьшится. При достаточно большом задерживающем напряжении  $U_0$  эта энергия станет равной нулю, и фототок прекратится  $I = 0$  А. Условие прекращения тока имеет вид

$$T = eU_0, \quad (12)$$

где  $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$  Кл. – заряд электрона. Подстановка (12) в (11) приводит к следующему выражению для задерживающего напряжения

$$U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A_{\text{вых.}}}{e} \quad (13)$$

Эта линейная зависимость  $U_0$  от  $\nu$  и будет использована для экспериментального определения постоянной Планка  $h$  и работы выхода  $A_{\text{вых.}}$ .

Для изучения законов фотоэффекта используется установка,



Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки

схема которой аналогична схеме, показанной на рис. 4. Установка (см. рис.5) состоит из вакуумного фотоэлемента на основе цезиевого катода и измерительных приборов: вольтметра 3 и наноамперметра 2. В качестве источников излучения используются пять светодиодов с различными длинами волн: 472 нм, 505 нм, 525 нм, 588 нм, 611 нм. Светодиоды подключаются к приемной камере 4, с помощью разъема 5. Блок подключается к сети через адаптер и разъем 6. Светодиод запитывается через разъем 7. Регулировка интенсивности регулируется ручкой регулятора 10.

## Проведение измерений

1. Установите яркость света на 75%
2. Меняя поочередно светодиоды на вход фотоэлемента, снимите зависимость запирающего напряжения  $U_0$  от длины волны излучения  $\lambda$ . Установите ручку тонкой регулировки противо-ЭДС в центральное положение и выждав несколько минут, установите ток фотоэлемента примерно на ноль при помощи ручки **грубой** регулировки (верхняя ручка).
3. Найдите оптимальное значение точки нуля при помощи ручки **тонкой** регулировки.
4. Снимите показания противо-ЭДС, установленной таким образом, и занесите его в качестве критического напряжения  $U_0$ .
5. Повторите п.1-4 для остальных светодиодов.
6. Переведите значения длин волн, указанные на светодиодах, используя формулу  $\nu = c/\lambda$ . При этом полученные значения частоты записать в терагерцах ( $1\text{ТГц} = 10^{12}\text{ Гц}$ ).
7. Занесите полученные результаты измерений в таблицу 1.

## Обработка результатов

1. Используя полученные данные, постройте на миллиметровой бумаге график зависимости энергии электронов  $T$  от частоты падающего излучения.
2. Методом наименьших квадратов аппроксимируйте полученную линейную зависимость.
3. Определите угол наклона и частоту красной границы фотоэффекта для материала фотокатода и их погрешности.
4. Пользуясь справочниками физических величин, определить название металла, из которого сделан фотокатод в данной экспериментальной установке.
5. Рассчитайте погрешности в измерениях постоянной Планка и работы выхода по формулам

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \nu}{\nu}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2}. \quad (15)$$

Считать, что относительная погрешность измерения напряжения составляет 0,5%, погрешность в измерении длины волны 0,5 нм, погрешность в измерении частоты  $\approx 3$  ТГц. Расчеты производить для  $\lambda = 500$  нм.

## Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление фотоэффекта?
2. Какие формулы используют для расчета энергии, импульса и массы фотона?
3. Объясните физический смысл уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.
4. Каковы основные законы фотоэффекта?
5. Что в экспериментах по фотоэффекту противоречит предсказаниям классической физики?
6. Почему энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности?
7. Чем отличается внешний фотоэффект от внутреннего фотоэффекта?
8. Перечислите основные следствия, вытекающие из формулы Эйнштейна.
9. Что называют током насыщения?
10. Что называют порогом фотоэффекта?



## Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие. В 3-х томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Учебное пособие. Гриф МОРФ.– СПб.:Лань, 2016. –308с.
2. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики: учебное пособие для вузов – 8-е изд., стер. –М. : Издательский центр "Академия 2009. –720с.
3. Иродов И.Е.Квантовая физика.Основные законы:Учеб.пособие для вузов.–М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2014. – 272с.
4. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2001. гл.26, §202-204.
5. КурепинВ.В., Баранов И.В. Обработка экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным работам. – СПб, 2012.-57 с

## Приложение

Таблица 1

$\lambda$ , нм	$U_0$ , В	$\nu$ , ТГц	$T = eU_0$ , Дж
472			
505			
525			
588			
611			