

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

А.В. Семиколенов, И.Н. Фетисов

# **Фотоэффект и определение постоянной Планка**

*(на установке с интерференционными фильтрами)*

*Методические указания к выполнению  
лабораторной работы К-68  
по курсу общей физики*

Москва

МГТУ им. Н.Э. Баумана

2014

## ВВЕДЕНИЕ

Генрих Герц, изучая искровой разряд между двумя металлическими шарами, обнаружил, что разряд происходит при меньшем напряжении, если отрицательно заряженный шар освещать ультрафиолетовым (УФ) излучением. Из этого наблюдения Г. Герц в 1887 г. сделал правильный вывод: металл при освещении испускает электроны. Это явление называют *внешним фотоэффектом* (*фотоэффектом*, *фотоэлектронной эмиссией*).

Фотоэффектом в широком смысле называют различные процессы с *поглощением* фотона квантовой системой.

Кроме внешнего фотоэффекта существует *внутренний фотоэффект* в полупроводниках. Например, в случае беспримесного полупроводника энергия поглощенного фотона затрачивается на образование пары электрон – дырка, в результате чего возрастают концентрация носителей тока и электропроводность полупроводника.

К фотоэффекту относят также процесс ионизации атома при поглощении фотона (фотоионизация). Например, атом водорода могут ионизовать фотоны УФ-излучения с энергией больше 13,6 эВ. Фотоны очень большой энергии (рентгеновского и гамма-излучения) вырывают электроны из внутренних оболочек тяжелых атомов. Это основной процесс поглощения рентгеновских лучей в свинце.

Фотоэффект сыграл огромную роль в становлении квантовой физики и нашел широкое практическое применение.

*Цель работы* – ознакомиться с законами фотоэффекта и квантовой природой света; исследовать зависимость энергии фотоэлектронов от частоты света, получить численное значение постоянной Планка.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Законы фотоэффекта

Фотоэффект изучали Столетов, Ленард и др. Для этого они использовали фотоэлемент и простую электрическую схему (рис. 1). Фотоэлемент содержит два металлических электрода внутри стеклянного баллона, из которого откачан воздух.

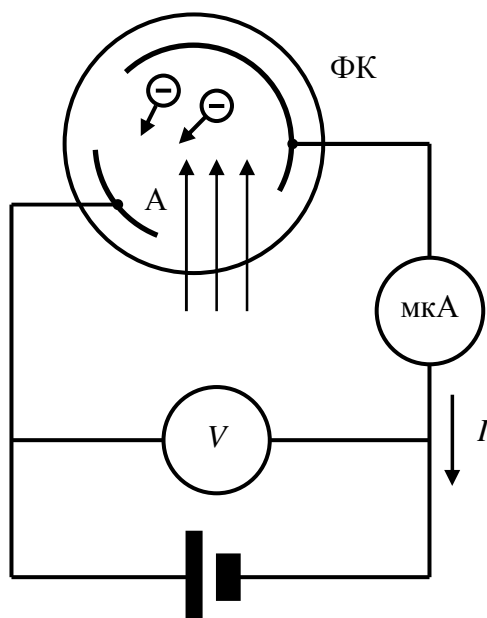


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема для исследования вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлемента

Фотокатод (ФК) при освещении испускает электроны, анод (А) служит коллектором испущенных электронов. Между электродами создают электрическое поле, подключив к ним источник напряжения. Напряжение измеряют вольтметром  $V$ , а протекающий по цепи фототок  $I$  – мик-

роамперметром мкА. Информацию о фотоэффекте получают из *вольт-амперной характеристики* (ВАХ) фотоэлемента – зависимости тока  $I$  от напряжения  $U$  между электродами (рис. 2).

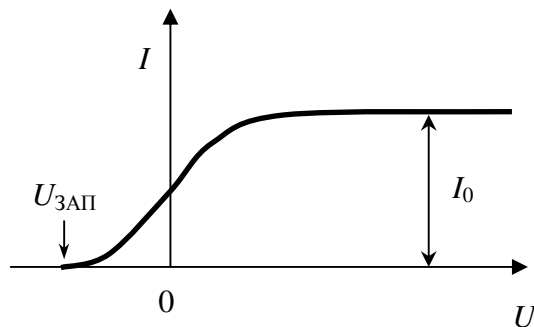


Рис. 2. ВАХ фотоэлемента

Правая часть графика на рис. 2 (при  $U > 0$ ) получена при положительной (*прямой*) полярности напряжения на аноде. При этом в электрическом поле на электроны действует сила, направленная в сторону анода. Если напряжение достаточно велико (десятки вольт), то практически все электроны попадают на анод; при этом ток достигает максимальной величины  $I_0$ , называемой *током насыщения*. При малых напряжениях ток меньше тока насыщения, так как часть электронов возвращается на катод в результате отталкивающего действия отрицательного заряда облака электронов в пространстве между электродами.

Ток насыщения  $I_0$ , А, и количество испущенных за 1 секунду электронов  $n$ ,  $c^{-1}$ , связаны соотношением:

$$I_0 = e n, \quad (1)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль заряда электрона.

Энергию света характеризуют следующими величинами:

$W$  – энергия излучения, Дж;

$\Phi = dW/dt$  – поток излучения (мощность), Вт, где  $dW$  – энергия излучения за время  $dt$ ;

$S = dW/(dt dA)$  – плотность потока, Вт/м<sup>2</sup>, где  $dA$  – площадь площадки, перпендикулярной направлению распространения света, через которую проходит энергия  $dW$  за время  $dt$ .

Поток и плотность потока называют *интенсивностью* излучения.

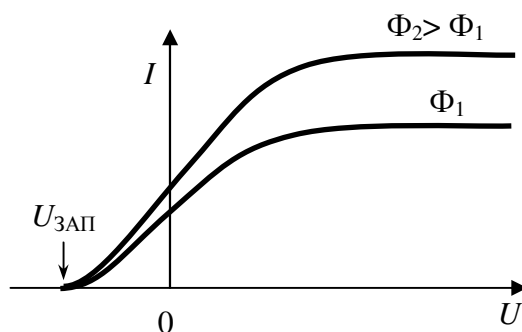


Рис. 3. ВАХ для различной интенсивности света ( $\Phi_2 > \Phi_1$ )

Измеряя ток насыщения при различном потоке, но неизменном спектральном составе излучения (рис. 3), был установлен *первый закон фотоэффекта*, который формулируется следующим образом:

*Количество испускаемых за единицу времени электронов пропорционально потоку излучения, падающего на фотокатод.*

Очень важные закономерности были получены из левой части графиков, изображенных на рис. 2 и 3, при отрицательной (*обратной*) полярности анода. В этом случае на электроны действует сила в направлении фотокатода, которая замедляет электроны и может вернуть их обратно на катод. Поскольку начальные скорости электронов различны по величине и направлению, то с ростом напряжения ток постепенно уменьшается. При некотором напряже-

нии, называемом *напряжением запирания*  $U_{\text{зап}}$ , ток обращается в нуль (см. рис. 2 и 3). В этом случае наиболее быстрые электроны останавливаются перед самым анодом, пройдя разность потенциалов  $U_{\text{зап}}$ , и возвращаются обратно. Следовательно, максимальная кинетическая энергия испущенных электронов  $T_{\text{max}}$  равна модулю работы сил поля:

$$T_{\text{max}} = \frac{m u_{\text{max}}^2}{2} = e U_{\text{зап}}. \quad (2)$$

Такой метод измерения энергии заряженных микрочастиц называется *методом запирающего (задерживающего) напряжения*.

Опыты показали, что при одинаковой частоте запирающее напряжение не зависит от интенсивности излучения (см. рис. 3), но зависит от значения самой частоты (рис. 4).

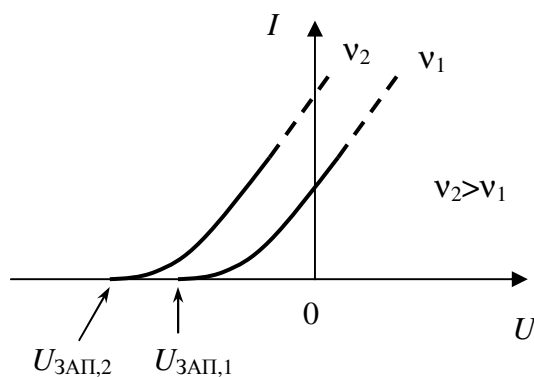


Рис. 4. ВАХ для различной частоты света ( $v_2 > v_1$ )

Зависимость максимальной энергии  $T_{\text{max}}$  от частоты  $\nu$  показана на рис. 5 для двух различных материалов фотокатода (1 и 2), отличающихся работой выхода  $A$  электрона из металла (зачерненные кружки – меньшая работа выхода). Особого внимания требует линейность зависимости  $T_{\text{max}}(\nu)$ . Из этого следует *второй закон фотоэффекта*:

*Максимальная кинетическая энергия электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.*

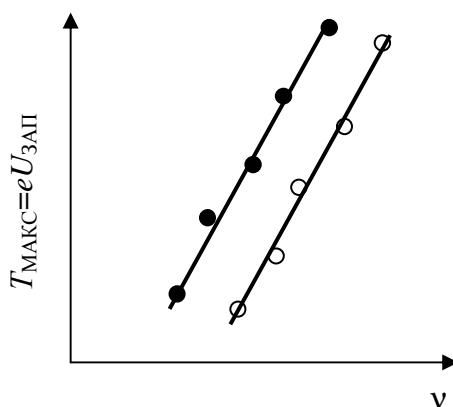


Рис. 5. Зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты для двух различных материалов, различающихся работой выхода (светлые кружки - работа выхода больше)

Кроме того, на основании зависимости  $T_{\text{max}}(\nu)$  (см. рис. 5) установлен также *третий закон фотоэффекта*, который гласит:

*Для каждого материала фотокатода существует минимальная частота  $\nu_0$  или максимальная длина волны  $\lambda_0 = c/\nu_0$  (так называемая красная граница фотоэффекта), за которой фотоэлектронная эмиссия отсутствует.*

Для фотокатодов из чистых металлов наибольшее значение  $\lambda_0 = 690$  нм имеет цезий. Таким образом, для него фотоэлектронная эмиссия происходит на волнах короче 690 нм, т.е.

почти во всей видимой области спектра (400...760 нм), а также в ультрафиолетовой области (т.е. короче 400 нм), в то время как для большинства металлов красная граница лежит в УФ-области спектра, и фотоэффект наблюдается только для УФ-излучения.

## 2. Работа выхода электронов из металла

Фотоэлектронная эмиссия происходит из различных твердых и жидких веществ. Мы будем рассматривать фотоэффект из металлов. В металле много почти свободных электронов, называемых *электронами проводимости* (рис. 6). Они находятся в состоянии быстрого хаотического движения, но практически не покидают металл, если он не освещен и не нагрет до высокой температуры. Причиной тому служат силы, действующие на электроны на поверхности металла.

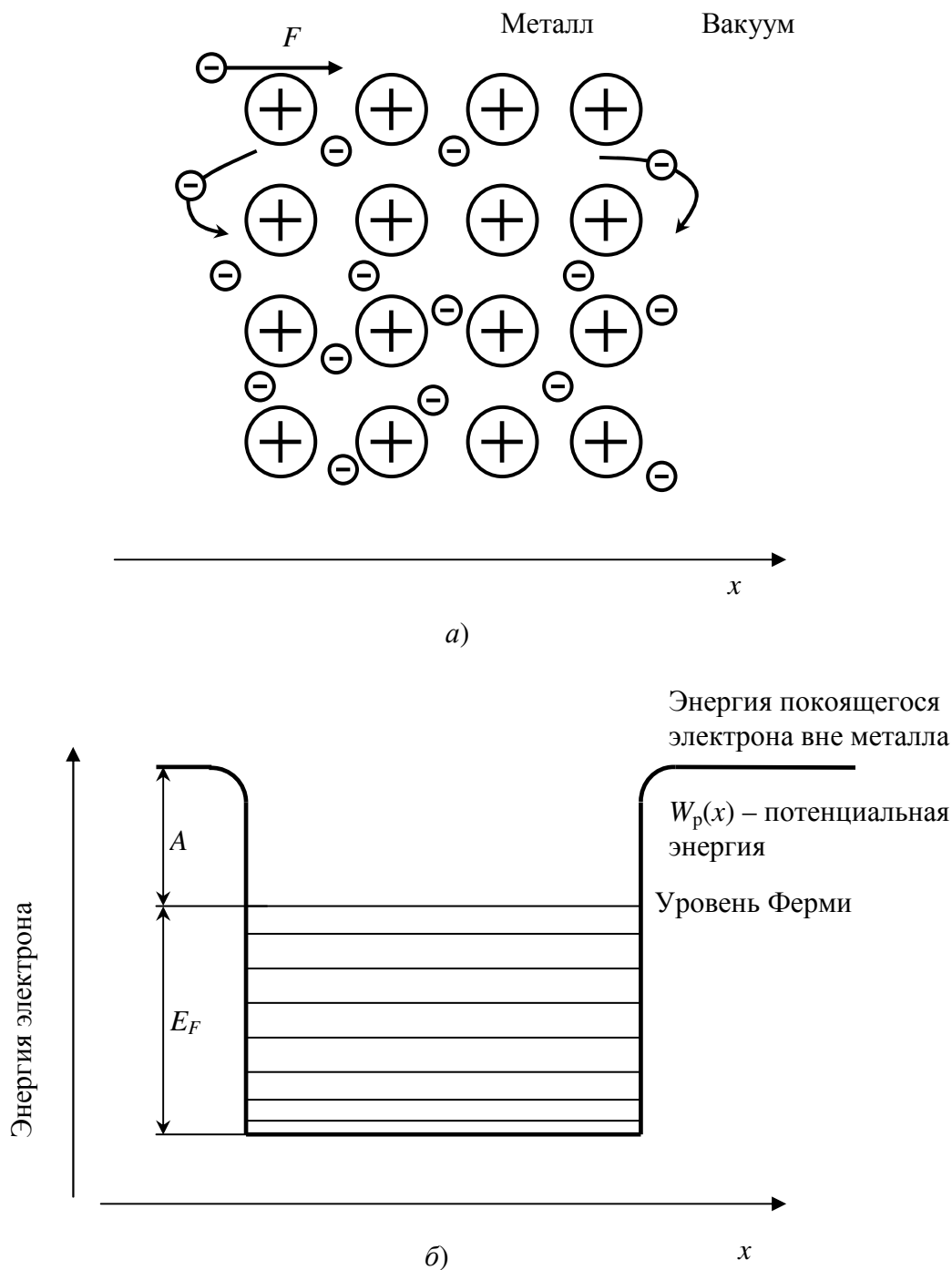


Рис. 6. Электроны проводимости в металле: а – электроны в кристаллической решетке из ионов; б – потенциальная яма для электронов

Кристаллическая решетка металлов состоит из положительно заряженных атомных остовов (ионов), между которыми хаотически движутся электроны проводимости. В типичной си-

туации на каждый атом металла приходится один электрон проводимости. На рис. 6, а. это показано схематически. Электроны вылетают недалеко за пределы кристаллической решетки и возвращаются обратно. Поэтому объем, занимаемый электронным газом, несколько превышает объем решетки. В результате на поверхности тела образуется двойной электрический слой, состоящий из избыточного положительного заряда решетки и отрицательного заряда электронов за пределами решетки. На поверхности металла на электроны действует возвращающая сила  $F$  (рис. 6, а).

Вместо силы  $F$  удобнее рассматривать потенциальную энергию электрона внутри и вне металла. Зависимость потенциальной энергии  $W_p(x)$  от координаты  $x$  изображена на рис. 6, б. Внутри металла потенциальная энергия меньше, чем снаружи, т. е. электроны находятся в *потенциальной яме*.

Хаотическое движение электронов проводимости резко отличается от движения молекул газа, в частности, оно не прекращается даже при очень глубоком охлаждении. Электроны проводимости могут принимать только определенные значения энергии. Горизонтальными линиями на рис. 6, б схематически показаны энергетические уровни, занятые электронами при  $T = 0$  К. Все уровни вплоть до наивысшего, называемого уровнем Ферми с энергией Ферми  $E_F$ , заняты электронами, а более высокие уровни – пусты. При комнатной температуре картина практически такая же.

Как видно из рис. 6, б, для выхода электрона из металла (потенциальной ямы) ему необходимо сообщить дополнительную энергию. Она будет минимальна, если ее сообщить электрону, который имеет энергию Ферми и движется наружу в направлении нормали к поверхности. Эта дополнительная минимальная энергия называется *работой выхода*  $A$  электрона из металла (см. рис. 6, б). Ее обычно указывают в электрон-вольтах. Электрон-вольт – энергия, приобретаемая электроном в электрическом поле при разности потенциалов 1 В:  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Для разных чистых металлов работа выхода изменяется в интервале от 1,8 эВ (цезий) до 5,3 эВ (платина).

### 3. Теория фотоэффекта

Классическая теория электромагнитных волн Максвелла столкнулась с непреодолимыми трудностями при объяснении фотоэффекта. Согласно классической теории, интенсивность волны  $\Phi$  ( $\text{Вт/м}^2$ ) пропорциональна квадрату амплитуды напряженности  $E_m$  электрического поля волны (Н/Кл):

$$\Phi \sim E_m^2.$$

С классической точки зрения, в переменном электрическом поле волны на электроны проводимости металла действует переменная сила. Следовательно, при достаточно большой интенсивности света сила велика и должен произойти фотоэффект. Однако это противоречит опыту.

Согласно опыту, фотоэлектронная эмиссия отсутствует даже при большой интенсивности, если частота света меньше некоторого значения (красной границы  $\nu_0$ ). А если частота больше красной границы, то электроны испускаются и при слабом свете. Кроме того, скорость испущенных электронов возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности. Таким образом, классическая теория не может объяснить второй и третий законы фотоэффекта.

Законы фотоэффекта были объяснены *фотонной (квантовой) теорией света*, которая утверждает следующее.

1. Свет и другие электромагнитные волны (радиоволны, УФ-излучение, рентгеновские лучи т.д.) состоят из «порций» электромагнитных волн, называемых *квантами* или *фотонами*.

2. Для монохроматического света с частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda = c/\nu$  фотон обладает энергией

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (3)$$

и импульсом

$$p = h\nu/c = h/\lambda,$$

где  $h$  – универсальная физическая константа, называемая *постоянной Планка* ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ ).

3. В процессе испускания или поглощения света фотоны рождаются или поглощаются как нечто неделимое.

4. В любой инерциальной системе отсчета фотон движется в вакууме со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

5. Фотоны перемещаются в пространстве и испытывают интерференцию и дифракцию, как волны с длиной волны  $\lambda$ .

Квантовую гипотезу выдвинул Макс Планк (1900 г.) в связи с теорией теплового излучения. Только с помощью квантов ему удалось объяснить спектр теплового излучения абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза получила дальнейшее развитие и подтверждение в работе Эйнштейна (1905 г.) по объяснению фотоэффекта.

Согласно Эйнштейну, испускание электрона из металла есть результат трех последовательных процессов:

а) поглощения одного фотона электроном проводимости, в результате чего энергия фотона  $h\nu$  передается одному электрону;

б) движения этого электрона к поверхности, при котором часть его энергии может рассеяться за счет взаимодействия с другими электронами или дефектами и колебаниями кристаллической решетки;

в) вылета электрона из металла, при котором электрон должен затратить энергию на выход из потенциальной ямы.

Наибольшую кинетическую энергию  $T_{\max} = \frac{m u_{\max}^2}{2}$  вне металла будет иметь электрон, испущенный с уровня Ферми и не потерявший энергии в столкновениях перед вылетом (рис. 7, а):

$$\frac{m u_{\max}^2}{2} = h\nu - A. \quad (4)$$

Соотношение (4), выражающее закон сохранения энергии, называют *формулой Эйнштейна для фотоэффекта*.

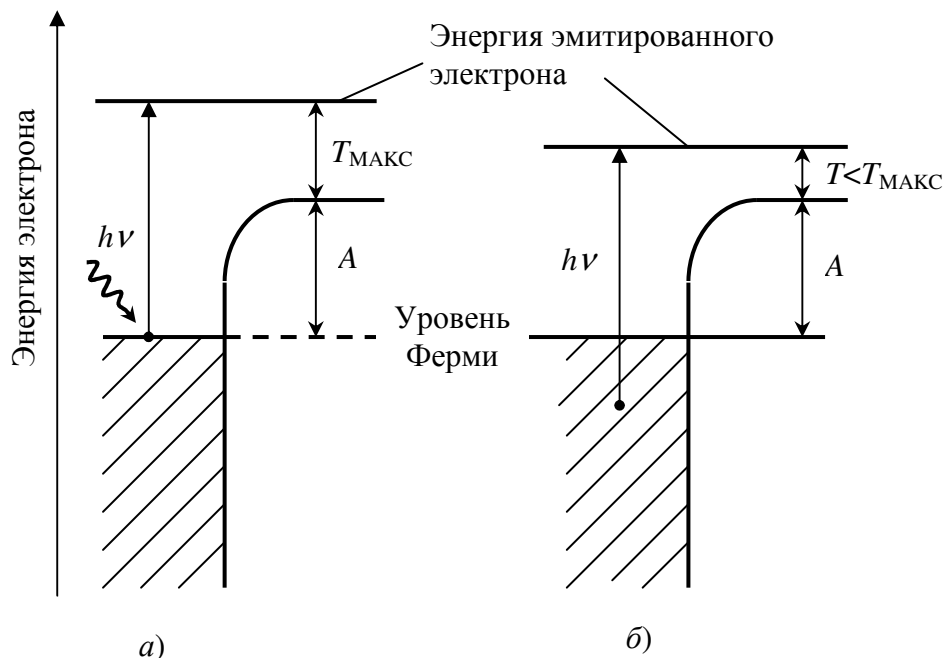


Рис. 7. Фотоэлектронная эмиссия с уровня Ферми (а) и с более низкого уровня (б)

Если электрон испущен с более низкого энергетического уровня, чем уровень Ферми (рис. 7, б), или потерял часть энергии в столкновениях, то его кинетическая энергия будет меньше максимальной ( $T < T_{\max}$ ). Поэтому при освещении даже монохроматическим светом электроны имеют различную энергию, верхняя граница которой определяется формулой (4).

Таким образом, в квантовой теории света все законы внешнего фотоэффекта получают полное и ясное объяснение.

1. Максимальная кинетическая энергия испущенных электронов не зависит от интенсивности излучения, но связана с частотой света линейным законом, причем с увеличением частоты света энергия возрастает (см. формулу (4)).

2. Если энергия фотона меньше работы выхода, то электрон не может выйти из потенциальной ямы. Красная граница фотоэффекта соответствует случаю, когда энергия фотона равна работе выхода:

$$h\nu_0 = hc / \lambda_0 = A.$$

При  $\nu < \nu_0$ , когда энергия фотона меньше работы выхода, фотоэмиссия невозможна.

3. С увеличением интенсивности излучения растет число падающих фотонов и, следовательно, число испущенных электронов.

Вакуумные фотоэлементы нашли широкое практическое применение для измерения интенсивности света. *Спектральной чувствительностью*  $S(\lambda)$  фотоэлемента называют отношение тока насыщения  $I_0$  к вызывающему его лучистому потоку  $\Phi$  монохроматического света с длиной волны  $\lambda$ :

$$S(\lambda) = I_0 / \Phi, \text{ мкА/Вт.}$$

Если измерить ток насыщения  $I_0$  для монохроматического излучения с известной длиной волны, то поток излучения можно найти по формуле:

$$\Phi = I_0 / S(\lambda).$$

Для изготовления фотокатодов обычно используют подходящий полупроводник вместо металла. При этом удается повысить чувствительность  $S(\lambda)$  фотоэлемента, а также сместить красную границу в область больших длин волн. Серийные вакуумные фотоэлементы чувствительны в диапазоне 115 – 1100 нм.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Методика измерения постоянной Планка

Фотоны с энергией  $h\nu$  при освещении фотокатода с работой выхода  $A$  выбивают электроны с максимальной кинетической энергией  $\frac{m u_{\max}^2}{2}$ . Эти величины связаны формулой Эйнштейна для внешнего фотоэффекта (см. формулу (4)):

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

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов  $\frac{m u_{\max}^2}{2}$  определяют *методом запирающего (задерживающего)* напряжения. Для этого фотоэлемент включают в электрическую схему, в которой измеряют ток фотоэлемента при *обратной* полярности напряжения между фотокатодом и анодом. При обратной полярности испущенные фотокатодом электроны движутся в тормозящем электрическом поле фотоэлемента. При увеличении обратного напряжения ток фотоэлемента уменьшается, и при некотором напряжении  $U_{\text{зап}}$  (*запирающее напряжение*) ток обращается в нуль (см. рис. 2). Максимальная кинетическая энергия электронов равна (см. формулу (2)):

$$\frac{m u_{\max}^2}{2} = e U_{\text{зап}}, \quad (6)$$

где  $e$  – заряд электрона ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Объединяя формулы (5) и (6), получим:

$$h\nu = A + e U_{\text{зап}}. \quad (7)$$



В лабораторной работе измеряют запирающее напряжение  $U_{\text{зап}}$  при освещении фотоэлемента монохроматическим светом различной частоты  $\nu$ . По результатам измерений строят графическую зависимость  $U_{\text{зап}}$  от  $\nu$  (рис. 8).

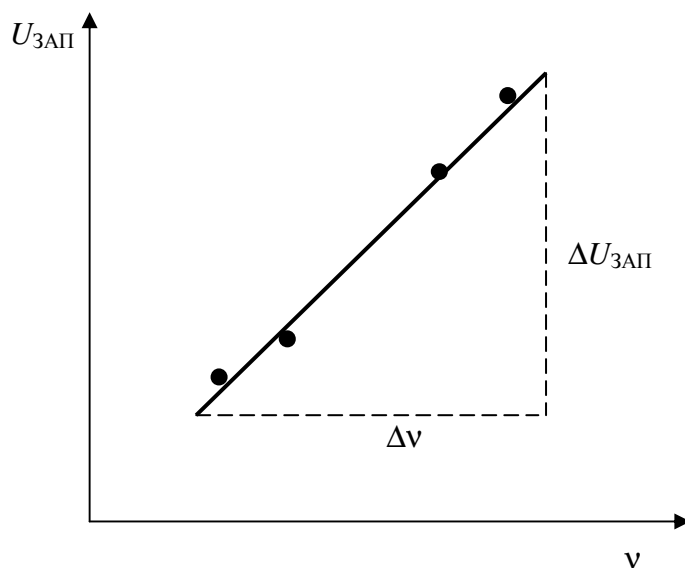


Рис. 8. Графическое определение постоянной Планка

Используя полученный график, определяют постоянную Планка. Для этого преобразуем формулу (7), взяв приращения (дифференциалы)  $\Delta U_{\text{зап}}$  запирающего напряжения и  $\Delta \nu$  частоты:

$$h \Delta \nu = e \Delta U_{\text{зап}}.$$

Отсюда следует формула для определения постоянной Планка:

$$h = e \Delta U_{\text{зап}} / \Delta \nu. \quad (8)$$

Дифференциалы  $\Delta \nu$  и  $\Delta U_{\text{зап}}$  определяют из графика (см. рис. 8).

## 2. Описание экспериментальной установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 9. Источником света служит лампа накаливания Л со сплошным спектром излучения. Лампа питается от источника ИСТ-1 переменного напряжения 12 В.

С помощью узкополосных интерференционных светофильтров СФ выделяется монохроматическое излучение с различной длиной волны. Интерференционный светофильтр представляет собой стеклянную пластинку, на которую нанесены методом вакуумного напыления тонкие (порядка длины волны света) слои диэлектрика с чередующимися значениями (высокий – низкий) показателя преломления. Толщина слоев строго определенная, а общее число слоев может достигать нескольких десятков. Свет отражается от границ раздела слоев, при этом возникает многолучевая интерференция света. В результате получают, что через светофильтр проходит свет в узкой полосе длин волн, а все остальное излучение отражается обратно.

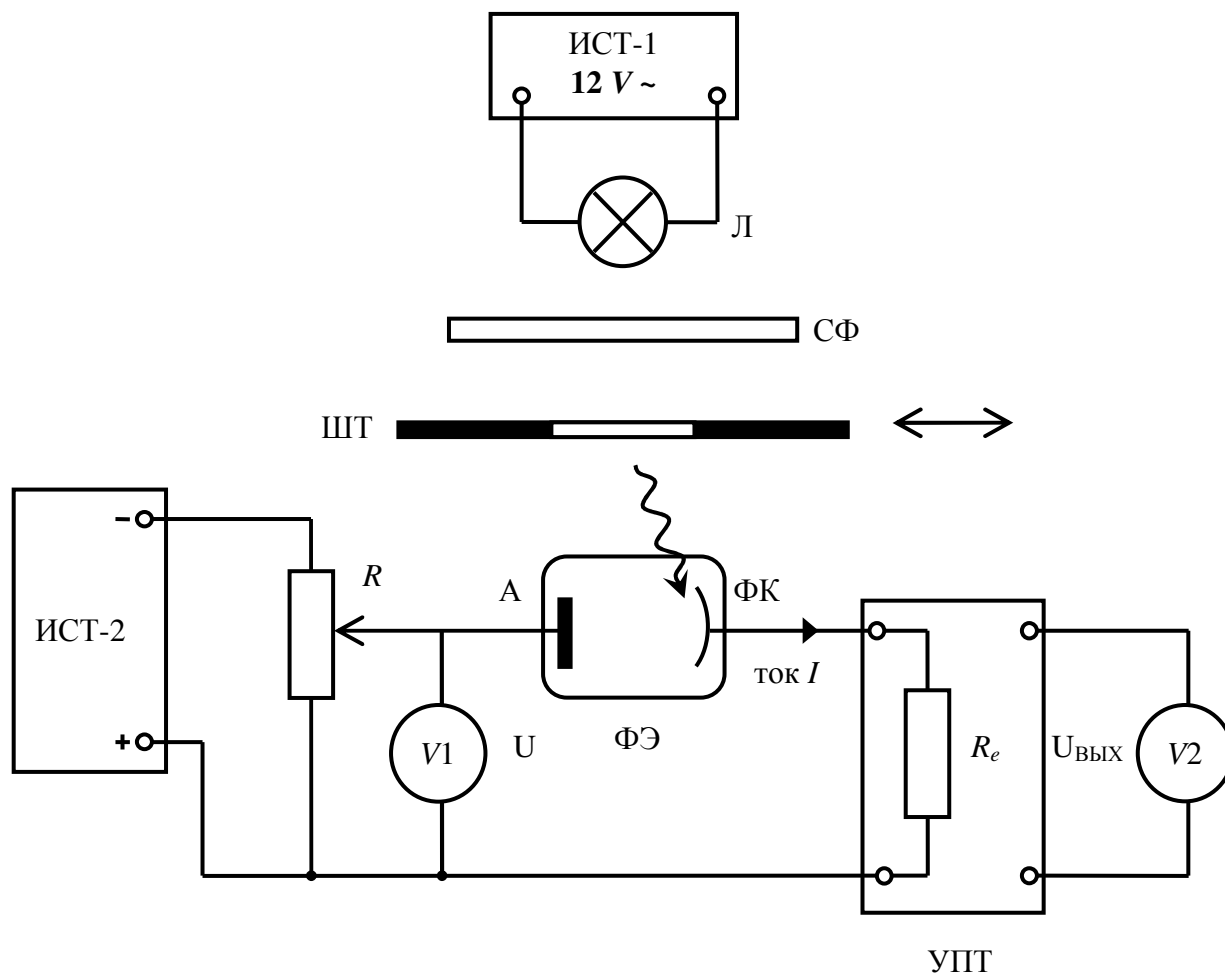


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

На электроды фотоэлемента (ФЭ) подается напряжение от источника питания ИСТ-2 так, чтобы минус источника был подключен к аноду. При этом электрическое поле в фотоэлементе будет тормозящим для электронов, вылетевших из фотокатода (ФК). Напряжение источника можно регулировать от 0 до 12 В. Дополнительная, более тонкая регулировка напряжения на фотоэлементе осуществляется с помощью реостата  $R$ . Напряжение  $U$  между электродами фотоэлемента, анодом (А) и фотокатодом (ФК), измеряют вольтметром  $V1$ .

Для регистрации очень слабого тока  $I$  фотоэлемента его необходимо усилить. Для этого служит усилитель постоянного тока (УПТ), коэффициент усиления  $K$  которого можно изменять. К входным гнездам «In» усилителя подключен (внутри усилителя) входной резистор  $R_e$ , через который протекает ток  $I$  фотоэлемента. Входное сопротивление  $R_e$  можно изменять. К выходным гнездам «Out» усилителя подключен вольтметр  $V2$  для измерения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . По результатам измерения напряжения  $U_{\text{вых}}$  находят силу тока  $I$  фотоэлемента по формуле:

$$I = \frac{U_{\text{вых}}}{KR_e}. \quad (9)$$

Для изменения интенсивности света перед фотоэлементом ФЭ установлена шторка (ШТ), имеющая круглое отверстие и щель. Шторку можно перемещать.

В состав установки входят (рис. 10): лампа и фотоэлемент, заключенные в светонепроницаемые корпуса; блок питания лампы и фотоэлемента; усилитель тока фотоэлемента; реостат; два универсальных цифровых измерительных прибора (мультиметры); набор интерференционных светофильтров на пять различных длин волн и соединительные проводники с вилками.



Рис. 10. Фотография лабораторной установки

Монтажная электрическая схема установки показана на рис. 11.

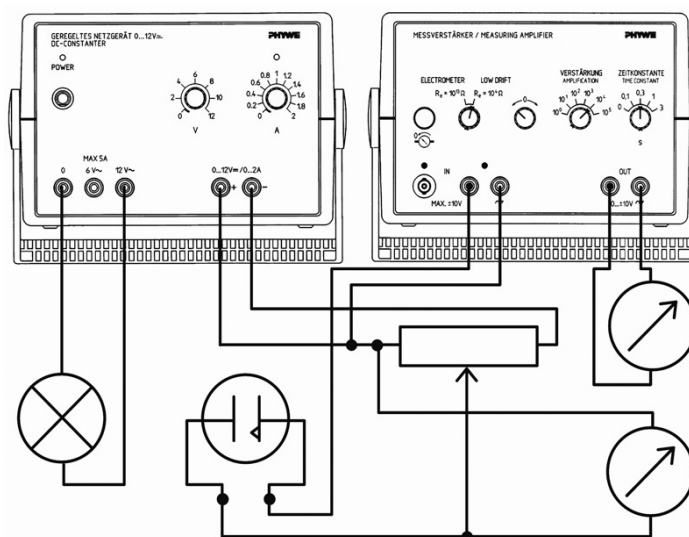


Рис. 11. Монтажная электрическая схема

### 3. Выполнение лабораторной работы

#### Задание 1. Ознакомление с лабораторной установкой

Усилитель тока имеет входные «In» и выходные «Out» гнезда. В усилителе можно изменять входное сопротивление  $R_e$  ( $10^{13} \Omega$  или  $10^4 \Omega$ ) и коэффициент усиления  $K$  (Amplification) от  $10^0$  до  $10^5$ .

С помощью переключателя «Time constant» можно варьировать время усреднения результатов измерения силы тока в пределах от 0 до 3 с. Если установлено, например, время 0,3 с, то в усилителе происходит в течение 0,3 с усреднение тока фотоэлемента, в результате уменьшаются переменные электрические помехи и повышается точность измерения силы постоянного тока.

В усилителе имеется регулировка, называемая «установка нуля». Если при отсутствии тока на входе усилителя на его выходе имеется напряжение, то его надо устранить. Для этого проводником с вилками замыкают входные гнезда «In» усилителя и вращением ручки « $\leftarrow 0 \rightarrow$ » усилителя добиваются нулевого напряжения на выходе усилителя. После описанной процедуры убирают проводник, которым замыкали входные гнезда.

Напряжение  $U_{\text{вых}}$  на выходных клеммах усилителя не может превышать 10 В независимо от величины входного тока. Если выходное напряжение достигло 10 В, то усилитель может быть «перегружен», а результат измерения тока искажен. В этом случае необходимо уменьшить коэффициент усиления.

В блоке питания имеются выходные гнезда на переменные (AC) напряжения 6 В и 12 В и на постоянное (DC) напряжение, регулируемое от 0 до 12 В. Постоянное напряжение изменяют ручкой «V». Ручкой «A» устанавливают предельный ток источника постоянного напряжения (до 2 А).

Мультиметры типа 3335 DMM используются для измерения постоянных напряжений между электродами фотоэлемента и на выходе усилителя. Напряжение подают на клеммы «com» и «V-Ω».

*Порядок выполнения задания.*

1. Зарисовать в рабочей тетради принципиальную схему установки (см. рис. 9).
2. Установить в блоке питания ручку «A» в положение 1 А (один ампер), а ручку «V» – на 2 В (предельное напряжение в лабораторной работе).
3. Мультиметры установить в режим измерения постоянного напряжения «V=» с пределом измерений 2 В. Включить питание мультиметров.
4. С помощью переключателей установить рабочий режим усилителя тока: входное сопротивление  $R_e = 10^4 \Omega$ , усиление («Amplification»)  $K = 10^3$ , время усреднения тока («Time constant») 0,3 с.
5. Включить сетевое питание усилителя и источников тока. Для этого вставить сетевые вилки в розетки и включить питание тумблером, расположенным на задней стенке приборов. При этом в блоке питания должен загореться индикатор «Power».
6. Отрегулировать нуль усилителя. Для этого замкнуть проводником с вилками входные гнезда «In» усилителя; при этом не следует отключать другие проводники от входных гнезд. Вращением ручки «←0→» усилителя добиться нулевого напряжения на выходе усилителя. После описанной процедуры убрать проводник, которым замыкали входные гнезда усилителя.

## **Задание 2. Измерить запирающее напряжение для различных частот и интенсивности света**

Измерения выполняют, изменяя частоту света с помощью узкополосных светофильтров, пропускающих излучение с различной длиной волны. Длина волны указана на оправе светофильтра.

Интенсивность света изменяют перемещением шторки на входном окне блока фотоэлемента. Назовем интенсивность *нормальной*, когда свет проходит через круглое отверстие полностью. Если шторку сдвинуть на половину диаметра отверстия, то интенсивность света уменьшится примерно вдвое (*уменьшенная интенсивность*).

*Порядок выполнения задания.*

1. Подготовить табл. 1 для записи результатов измерений.

*Таблица 1*

### **Результаты измерения запирающего напряжения**

λ, нм	ν, 10 <sup>14</sup> Гц	Запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$ , В		
		При нормальной интенсивности	При уменьшенной интенсивности	Среднее для двух интенсивностей
366	8,2			

405	7,41			
436	6,88			
546	5,50			
578	5,20			

2. **ВНИМАНИЕ!** Очень бережно обращаться с интерференционными светофильтрами, не дотрагиваться до их поверхности, не протирать, не ронять.
3. Присоединить к блоку с лампой один из светофильтров. Шторку на блоке фотоэлемента установить так, чтобы свет проходил через круглое отверстие полностью. Плотно соединить блок фотоэлемента с блоком лампы. Исключить засветку фотоэлемента посторонними источниками света.
4. Перемещением движка реостата установить максимальное напряжение  $U$  на фотоэлементе (примерно 2 В). При этом выходное напряжение усилителя  $U_{\text{вых}}$  должно быть отрицательным. Отрицательному выходному напряжению соответствует отрицательный ток фотоэлемента.
5. Отрицательный ток объясняется небольшим побочным эффектом – эмиссией фотоэлектронов с поверхности анода. При напряжении  $\geq 2$  В обратной полярности электроны, испущенные с фотокатода, уже не достигают анода. Однако имеется небольшая эмиссия электронов с поверхности анода, который также освещается. Для электронов, испущенных анодом, напряжение является прямым (а не обратным), поэтому они достигают фотокатода, создавая наблюдаемый отрицательный ток.
6. Медленно уменьшая реостатом напряжение на фотоэлементе, следить за напряжением  $U_{\text{вых}}$  на выходе усилителя. При этом отрицательное выходное напряжение усилителя должно уменьшаться по величине, и пройдя через нулевое значение, изменить полярность на положительную, а затем возрастет при дальнейшем уменьшении напряжения между катодом и анодом.
7. Анализ показывает, что напряжение  $U$  на фотоэлементе, при котором ток фотоэлемента равен нулю (выходное напряжение усилителя  $U_{\text{вых}} = 0$ ), можно принять за запирающее напряжение  $U_{\text{зап}}$ .
8. Медленным перемещением движка реостата определить, как можно точнее, запирающее напряжение  $U_{\text{зап}}$ . Результат измерения  $U_{\text{зап}}$  записать в табл. 1 в столбец для нормальной интенсивности.
9. Уменьшить интенсивность света примерно в два раза, сдвинув шторку на половину диаметра круглого отверстия. Повторить измерения п. 8. Результат измерения записать в табл. 1 в столбец для уменьшенной интенсивности.
10. Повторить измерения пунктов 8, 9 для светофильтров с другими длинами волн. Результаты измерений записать в табл. 1.
11. Выключить питание установки.

#### 4. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерения (см. табл. 1) запирающего напряжения  $U_{\text{зап}}$  при различной интенсивности света, но одинаковой частоте, сделать вывод, зависит ли максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов от интенсивности света?
2. По результатам измерения запирающего напряжения  $U_{\text{зап}}$  при различной интенсивности света вычислить среднее значение запирающего напряжения для каждой частоты. Результат вычисления записать в табл. 1.
3. По результатам измерений (см. табл. 1) построить графическую зависимость запирающего напряжения  $U_{\text{зап}}$  (среднего значения) от частоты  $\nu$  излучения. Для этого нанести на график экспериментальные точки (хорошо заметными значками) и провести через них наилучшую прямую (см. рис. 8).
4. Сделать вывод, подтверждает ли полученный график второй закон фотоэффекта?

5. Используя построенный график, определить постоянную Планка  $h$  по методике, описанной выше (см. формулу (8)). Полученное значение  $h$  представить в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты измерения постоянной Планка и энергии фотона

Постоянная Планка	$h =$
Относительная погрешность измерения	$\xi = \%$
Энергия фотона видимого света ( $\lambda = 546$ нм)	$E =$ Дж = эВ

6. Из сравнения полученного в лабораторной работе значения  $h$  с табличным значением  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Дж·с вычислить относительную погрешность измерения  $\xi$  в %.
7. Вычислить энергию фотона зеленого света ( $\lambda = 546$  нм) в Дж и эВ. Результаты вычислений представить в табл. 2.

### Контрольные вопросы

1. Почему необходимо затратить энергию для вырывания электрона из металла? Что такое работа выхода электрона?
2. Что такое ток насыщения и как он связан с числом испущенных электронов, а также с потоком излучения?
3. В чем заключается метод запирающего напряжения для измерения кинетической энергии заряженных частиц?
4. Как формулируются законы фотоэффекта и основные положения фотонной теории света?
5. В чем суть формулы Эйнштейна для фотоэффекта?
6. В чем состоят противоречия между классической теорией света и законами фотоэффекта?
7. В чем заключается методика измерения постоянной Планка в данной работе?

### Список литературы

1. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 496 с.
2. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. Основные законы. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 272 с.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики: В 3 т. – М.: Наука. 1987. – Т. 3. – 320 с.