

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

И.Н.ФЕТИСОВ, П.В. ГРАМЕНИЦКИЙ

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Методические указания к лабораторной работе К-21
по курсу общей физики

Под редакцией И.Н. Фетисова
Москва, 2005

Генрих Герц в 1887 г. открыл, что при освещении тела испускают электроны. Это явление называют внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией, фотоэффектом). 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. Экспериментальные исследования фотоэффекта

Фотоэффект изучали Столетов, Ленард и др. с помощью фотоэлемента (ФЭ) и простой электрической схемы (рис. 1). Фотоэлемент содержит два металлических электрода внутри стеклянного баллона, из которого откачан воздух. Один электрод – *фотокатод* ФК при освещении испускает электроны, которые собираются на *анод* А. Между электродами создают электрическое поле, подключив к ним источник напряжения. Напряжение измеряют вольтметром V, а протекающий по цепи фототок – микроамперметром мкА. Информацию о фотоэффекте получают из *вольт-амперной характеристики* (ВАХ) фотоэлемента – зависимости фототока I от напряжения U между электродами (рис. 2).

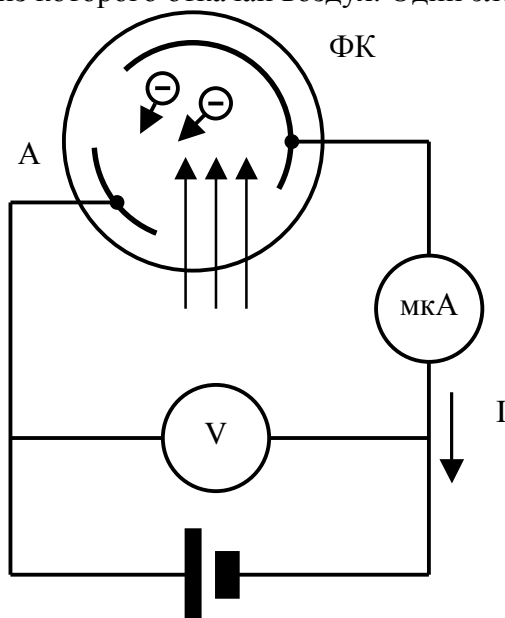


Рис. 1

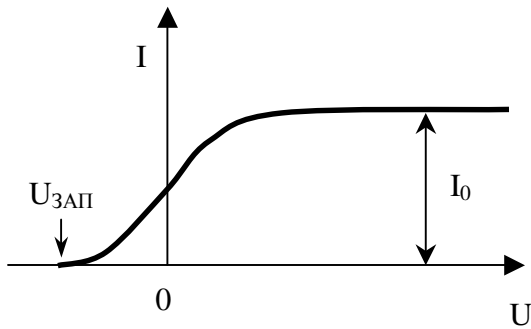


Рис. 2

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

Ток насыщения и количество испущенных электронов за 1 секунду n связаны соотношением:

$$I_0 = e n,$$

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

Энергию света характеризуют такими величинами, как:

- энергия излучения W , Дж;
- поток излучения (мощность) $\Phi = dW/dt$, Вт, где dW – энергия излучения за время dt ;
- плотность потока $S = dW/(dt dA)$, Вт/м², где dA – площадь площадки, перпендикулярной направлению распространения света, через которую проходит энергия dW за время dt .

Поток и плотность *потока* называют *интенсивностью* излучения.

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

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

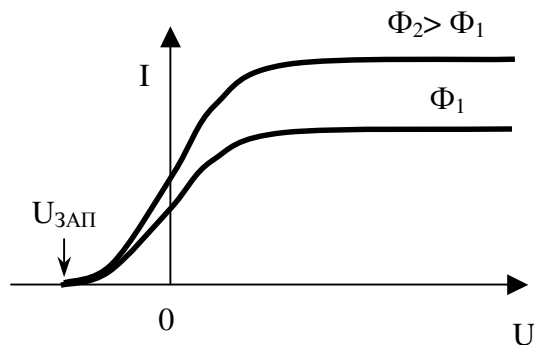


Рис. 3

Рассмотрим левую часть графиков на рис. 2, 3, полученную при отрицательной (*обратной*) полярности анода. При этом на электроны действует сила в направлении фотокатода, которая замедляет электроны и возвращает их обратно на катод. Поскольку начальные скорости электронов различны по величине и направлению, то с ростом напряжения ток постепенно уменьшается. При некотором напряжении, называемом *напряжением запирающего* $U_{ЗАП}$, ток обращается в нуль (рис. 2, 3). В этом случае наиболее быстрые электроны остановились перед самым анодом, пройдя разность потенциалов $U_{ЗАП}$, и возвратились обратно. Следовательно, максимальная кинетическая энергия эмитированных электронов равна модулю работы сил поля

$$T_{MAX} = \frac{mv_{MAX}^2}{2} = eU \quad (1)$$

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

Опыты с монохроматическим светом показали, что запирающее напряжение линейно возрастает с частотой (рис. 4, 5) и не зависит от интенсивности излучения (рис. 3). Отсюда следовал *второй закон фотоэффекта*:

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

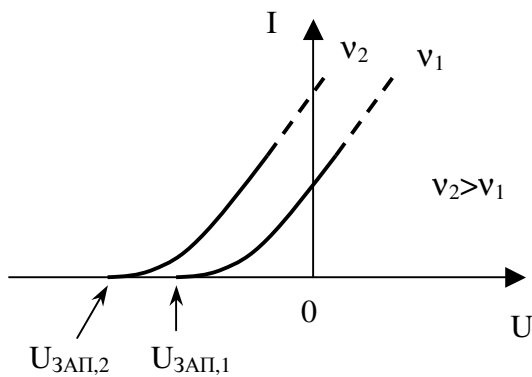


Рис. 4

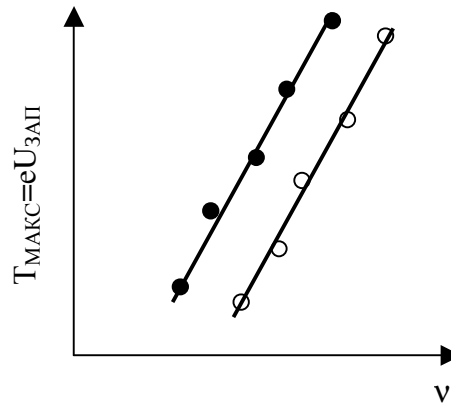


Рис. 5

Зависимость максимальной энергии от частоты показана на рис. 5 для двух различных материалов фотокатода. Отметим, что прямые на рис. 5 параллельны.

Кроме того, был установлен также *третий закон фотоэффекта*:

для каждого материала фотокатода существует минимальная частота ν_0 или максимальная длина волны $\lambda_0 = c/\nu_0$ (так называемая красная граница фотоэффекта), за которой фотоэлектронная эмиссия отсутствует.

Для чистых металлов наибольшее значение λ_0 имеет цезий ($\lambda_0 = 690$ нм). Для него фотоэлектронная эмиссия происходит на $\lambda < 690$ нм, т.е. почти во всей видимой области спектра (400 - 760 нм), а также в ультрафиолетовой (УФ) области. 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*. 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.

Металлический кристалл (рис. 6, а) состоит из положительно заряженных атомных остовов (показаны большими кружками) и электронов проводимости (показаны маленькими кружками). Электроны вылетают недалеко за пределы кристаллической решетки и возвращаются обратно. Поэтому объем, занимаемый электронным газом, несколько превышает объем кристаллической решетки. В результате на поверхности тела образуется *двойной электрический слой*, состоящий из избыточного положительного заряда решетки и отрицательного заряда электронов снаружи решетки. В этом слое на электроны действует возвращающая сила F (рис. 6, а).

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

Хаотическое движение электронов проводимости резко отличается от хаотического движения молекул газа, в частности, оно не прекращается при температуре $T = 0$ К. Энергетический спектр электронов имеет наиболее простую зависимость при $T = 0$ К, а при комнатной температуре он практически такой же. При $T = 0$ К кинетическая энергия электронов проводимости различная – от нуля до максимальной энергии, называемой *энергией Ферми* E_F . На рис. 6, б энергия различных электронов показана горизонтальными линиями, ее верхнее значение – *уровень (энергия) Ферми*.

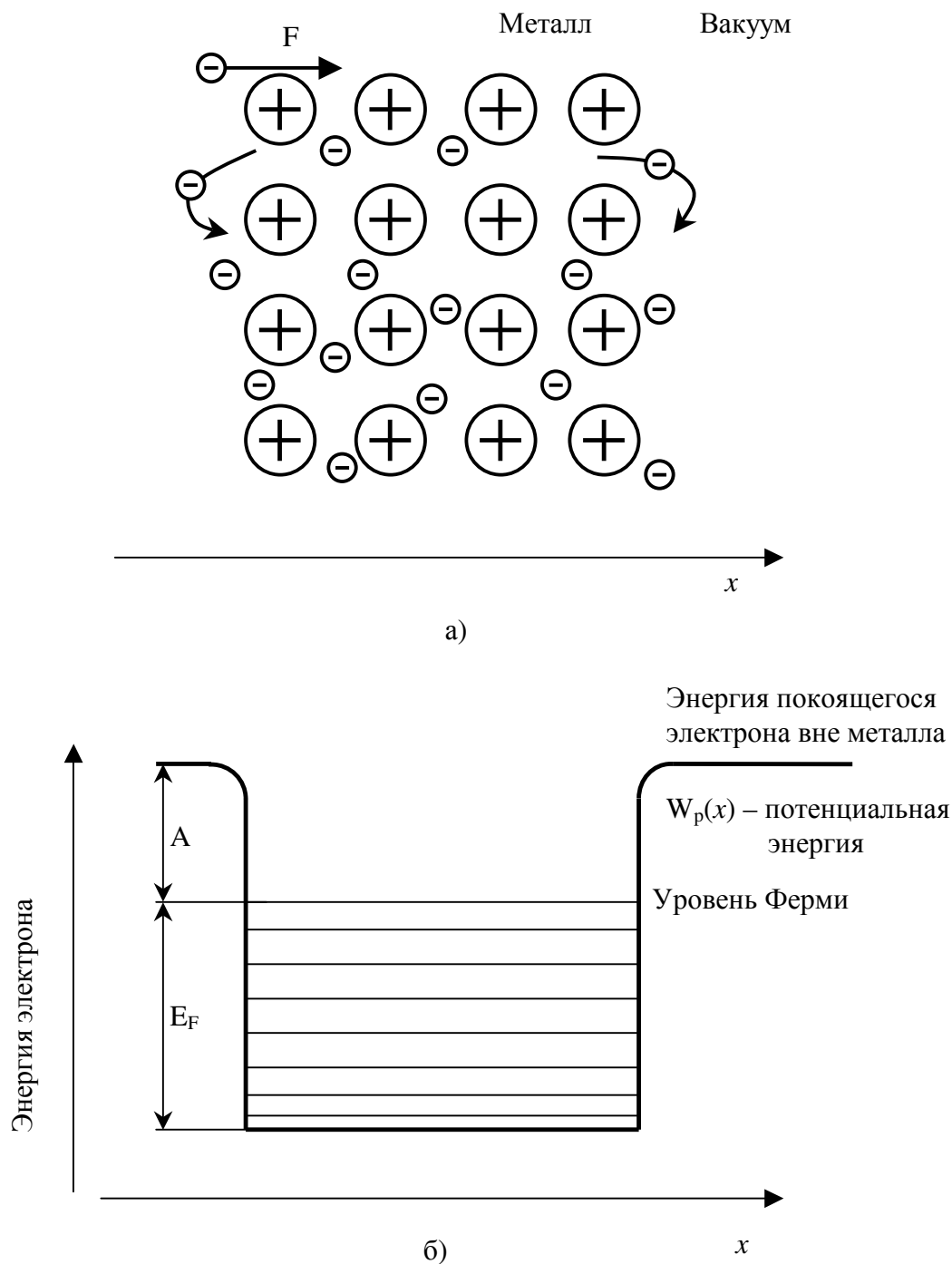


Рис. 6

Как видно из рис. 6, б, для выхода электрона из металла (потенциальной ямы) ему необходимо сообщить дополнительную энергию. Она будет минимальна, если сообщается электрону, который имеет энергию Ферми и движется наружу в направлении нормали к поверхности. Эта дополнительная минимальная энергия называется *работой выхода* A электрона из металла (рис. 6, б). Работу выхода обычно указывают в электрон-вольтах: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Для разных чистых металлов она 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, интенсив-

ность волны (Вт/м^2) пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля волны E_m (В/м): $\Phi \sim E_m^2$. В переменном электрическом поле волны на электроны действует переменная сила. Согласно классической теории, при большой интенсивности света на электроны действует большая сила, которая должна вырвать электроны из металла и сообщить им большую энергию. В действительности, если частота меньше красной границы, фотоэффекта нет даже при большой интенсивности. А если частота больше красной границы, то электроны испускаются и при слабом свете. Классическая теория противоречит второму и третьему законам фотоэффекта.

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

1. Свет и другие электромагнитные волны (УФ-излучение, рентгеновские лучи т.д.) состоят из «порций» электромагнитных волн, называемых *квантами* или *фотонами*.
2. Для монохроматического света с частотой ν и длиной волны $\lambda = c/\nu$ фотон обладает энергией

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

и импульсом

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

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

3. Во время испускания или поглощения света фотоны рождаются или поглощаются как нечто неделимое.
4. В любой инерциальной системе отсчета фотон движется со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.
5. Фотоны перемещаются в пространстве и испытывают интерференцию и дифракцию как волны с длиной волны λ .

Квантовую гипотезу выдвинул М. 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 есть результат трех последовательных процессов:

- а) поглощения 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 $T_{\text{MAX}} = \frac{mv_{\text{MAX}}^2}{2}$ вне металла будет иметь электрон, эмитированный с уровня Ферми и ничего не потерявший в столкновениях (рис. 7, а):

$$\frac{mv_{\text{MAX}}^2}{2} = h\nu - A \quad (3)$$

Соотношение (3), выражающее закон сохранения энергии, называют *формулой Эйнштейна для фотоэффекта*.

Если электрон эмитирован с более низкого уровня, чем уровень Ферми (рис. 7, б), или потерял часть энергии в столкновениях, то его кинетическая энергия $T < T_{\text{MAX}}$. Поэтому при освещении даже монохроматическим светом электроны имеют различную энергию с верхней границей, определяемой формулой (3).

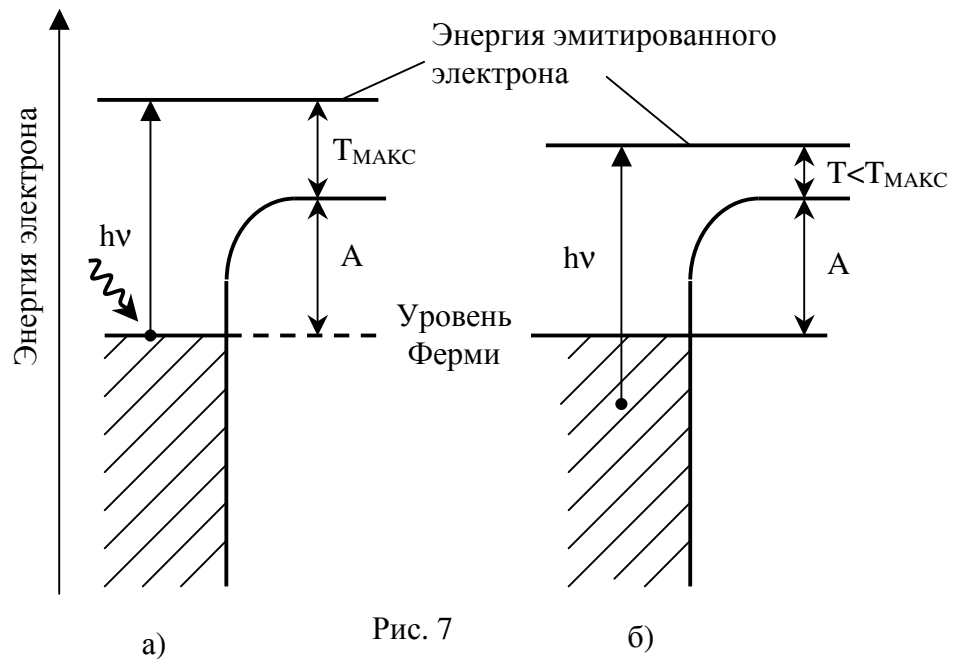


Рис. 7

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

Максимальная кинетическая энергия испущенных электронов линейно растет с частотой света [формула (3)] и не зависит от интенсивности излучения.

Красная граница фотоэффекта соответствует случаю, когда энергия фотона равна работе выхода:

$$h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = A$$

При $\nu < \nu_0$, когда энергия фотона меньше работы выхода, фотоэмиссия невозможна. С увеличением интенсивности излучения растет число падающих фотонов и, следовательно, число испущенных электронов.

Фотоэффектом в широком смысле называют различные процессы с *поглощением* фотона электроном. Кроме внешнего фотоэффекта существует *внутренний фотоэффект*. Например, в беспримесных полупроводниках энергия фотона затрачивается на образование пары электрон – дырка, в результате чего возрастают концентрация носителей тока и электропроводность. К фотоэффекту относят процесс ионизации атома при поглощении фотона (фотоионизация). 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.

Подставив (1) в формулу (3), получим

$$U_{з\Delta\Gamma} = \frac{h\nu}{e} - \frac{A}{e} \quad (4)$$

В данной работе изучают зависимость запирающего напряжения от частоты, проверяют формулу (4) (есть ли линейная зависимость между $U_{з\Delta\Gamma}$ и ν) и определяют значение постоянной Планка.

4. Характеристики фотоэлементов

Спектральной чувствительностью называют отношение тока насыщения к вызывающему его лучистому потоку монохроматического света с длиной волны λ

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

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

$$\Phi = I_0 / S(\lambda). \quad (5)$$

У промышленных вакуумных фотоэлементов диапазон спектральной чувствительности находится в области спектра 115 – 1100 нм (в зависимости от работы выхода фотокатода и коэффициента спектрального пропускания материала входного окна). Вместо металла фотокатод чаще изготавливают из полупроводников, для которых чувствительность выше, а красная граница смещается в область больших длин волн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Описание установки

Структурная схема установки показана на рис. 8. Источником света служит газоразрядная ртутная лампа Л с линейчатым спектром излучения. С помощью узкополосных (интерференционных) светофильтров СФ выделяют монохроматическое излучение с различной длиной волны. Излучение можно ослаблять с помощью специального устройства ОСЛ.

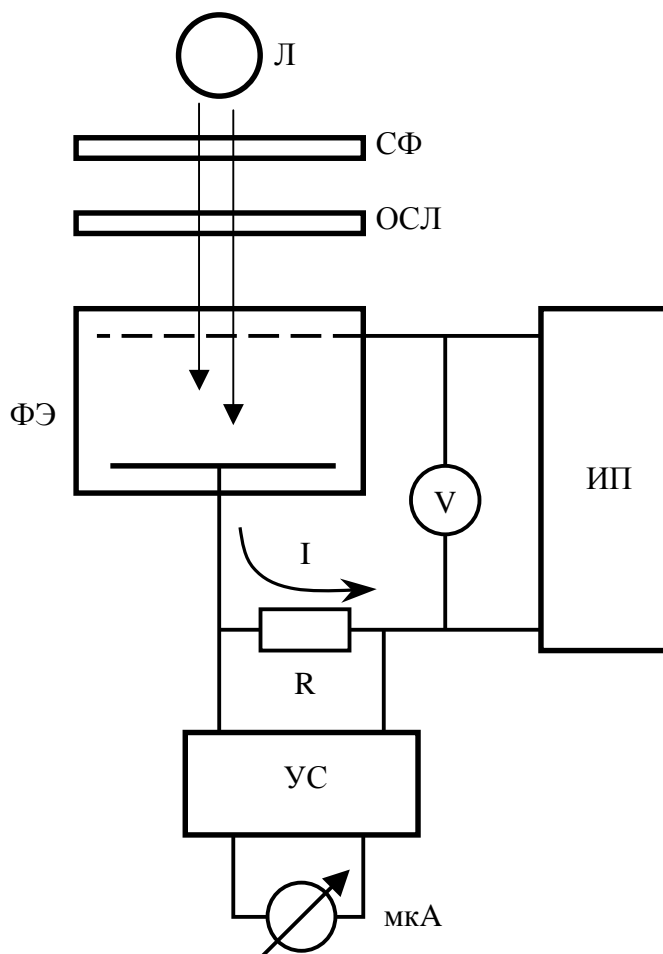


Рис. 8

На электроды фотоэлемента ФЭ подается напряжение от источника питания ИП. Величину и полярность напряжения можно изменять. Ток фотоэлемента I протекает через резистор сопротивлением R , на котором падает небольшое напряжение, пропорциональное силе тока: $\Delta U = I \cdot R$. Напряжение ΔU поступает на вход усилителя постоянного тока УС, к выходу которого подключен цифровой регистрирующий прибор мкА. Прибор показывает ток фотоэлемента в мкА. Усилитель имеет регулировку «установка нуля», с помощью которой устанавливается нулевое показание регистрирующего прибора мкА в отсутствие излучения. Напряжение U источника питания измеряют цифровым вольтметром V . Напряжение на ФЭ меньше на малую величину ΔU , которой можно пренебречь.

Установка состоит из блока фотоэлемента и измерительного устройства, соединенных кабелем.

В блоке фотоэлемента (изображен сверху на рис. 9) имеются: ртутная лампа 1; диск 2

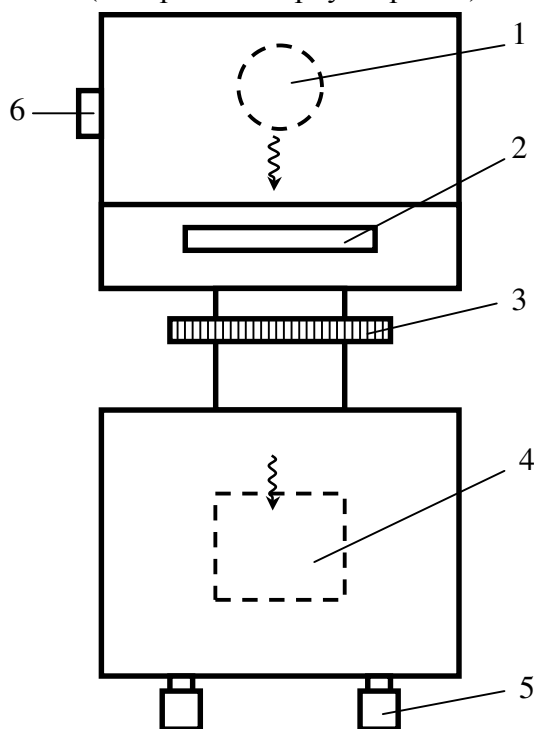


Рис. 9

со светофильтрами; устройство для изменения потока излучения при повороте кольца 3; фотоэлемент 4; две ручки 5 для установки нуля усилителя фототока; сетевой выключатель 6.

Ослабление излучения производится с помощью двух поляроидов (поляризаторов), один из которых неподвижен, а второй можно повернуть на угол до 90° . Свет проходит через оба поляроида. Согласно закону Малюса, интенсивность прошедшего света зависит от угла поворота. Поляризующая способность поляроидов для фиолетового света хуже, чем для желтого и зеленого. В результате получаем, что максимальное ослабление потока зависит от длины волны: оно равно 10 – 30 для желтого и зеленого излучений и только 2 – 3 - для фиолетового света.

Диск для смены светофильтров имеет шесть пронумерованных положений, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Положение диска	Проходящее излучение с длиной волны в нм
1	407, темное фиолетовое
2	435, фиолетовое
3	546, зеленое
4	578, желтое
5	Излучение перекрыто
0	Нет светофильтров, проходит все излучение

На передней панели измерительного устройства размещены следующие органы управления и индикации:

Цифровые индикаторы «В» и «мкА» предназначены для индикации напряжения на фотоэлементе U в вольтах и фототока I в мкА.

Кнопки «+», «-» и СБРОС – предназначены для регулировки напряжения на фотоэлементе и его сброса в ноль; для увеличения напряжения необходимо нажать и удерживать кнопку «+», а для уменьшения – кнопку «-».

Кнопка ПРЯМАЯ – ОБРАТНАЯ с соответствующими индикаторами предназначена для включения прямого или обратного напряжения на фотоэлементе.

На задней панели измерительного устройства расположены выключатель СЕТЬ, клемма заземления и разъем для подключения блока фотоэлемента.

2. Выполнение работы

Задание 1. Ознакомиться с установкой и подготовить ее к работе

Ознакомиться с установкой (см. раздел 1).

Зарисовать схему на рис. 8.

Проверить заземление блока фотоэлемента и измерительного устройства (клемма заземления находится на задней стенке). При отсутствии заземления работу не выполнять и обратиться к лаборанту.

Перед включением установки в сеть выключатели СЕТЬ обоих блоков должны находиться в положении «Выкл».

Подключить сетевые шнуры к сети. Включить измерительное устройство выключателем СЕТЬ на его задней панели. (**Внимание! Не включать сеть блока фотоэлемента.**) При этом должны загореться цифровые индикаторы. На индикаторе «В» должны загореться нули (допускается индикация до значения 2 младшего разряда). После 2-минутного прогрева ручками УСТАНОВКА НУЛЯ установить нулевое значение на индикаторе «мкА».

Включить выключатель СЕТЬ блока фотоэлемента, при этом должен загореться индикатор включения сети.

Дать лампе прогреться в течение 15 мин.

Подготовить табл. 2 – 5.

Задание 2. Измерить ВАХ при прямой полярности и определить поток излучения

С помощью кнопки ПРЯМАЯ – ОБРАТНАЯ установить прямую полярность.

Установить длину волны 407 нм, для этого диск со светофильтрами повернуть в положение 1.

Установить максимальный поток излучения, для этого кольцо 3 (см. рис. 9) повернуть против часовой стрелки до упора.

Изменяя напряжение с помощью кнопок «+» и «-» и считывая показания фототока с индикатора «мкА», получить данные для построения вольт-амперной характеристики. Напряжение изменять от нуля до 5 В с шагом примерно 1 В, а дальше - с шагом примерно 5 В до максимального напряжения (около 40 В). Результаты измерений записать в табл. 2.

Таблица 2. ВАХ при прямой полярности, $\lambda = 407$ нм.

Максимальный поток		Минимальный поток	
U , В	I , мкА	U , В	I , мкА

Примечание: в таблице должно быть 15 – 20 строк

Уменьшить поток излучения примерно в 2 – 3 раза, повернув кольцо 3 поляроида по часовой стрелке до упора. Повторить измерения п. 4.

Задание 3. Измерить ВАХ на $\lambda = 407$ нм при обратной полярности и определить запирающее напряжение.

С помощью кнопки ПРЯМАЯ – ОБРАТНАЯ установить обратную полярность.

Установить максимальный поток излучения, для этого кольцо 3 (см. рис. 9) повернуть против часовой стрелки до упора.

Установить нулевое напряжение на фотоэлементе, для этого нажать кнопку СБРОС. Перекрыть излучение, повернув диск смены фильтров в положение 5. Ручками УСТАНОВКА НУЛЯ установить нулевое значение на индикаторе «мкА» (строго 0,00 мкА).

Таблица 3. ВАХ при обратной полярности, длина волны 407 нм.

U , В	I , мкА	U , В	I , мкА

Примечание: в таблице должно быть 7 - 10 строк

Установить длину волны 407 нм, повернув диск в положение 1.

Измерить ВАХ, изменяя напряжение от нуля до запирающего напряжения. Результаты записать в табл. 3. Шаг измерения рекомендуем выбирать следующим образом. Плавное увеличение напряжения, следить за изменением тока. Как только ток уменьшится примерно в два раза по сравнению с предыдущим отсчетом, произвести очередное измерение напряжения и тока. Так поступать, пока ток не уменьшится до 0,07...0,05 мкА. Далее каждый следующий отсчет выполнять с шагом 0,01 мкА до нулевого тока. Наименьшее напряжение, при котором ток стал равным 0,00 мкА, есть напряжение запирающего $U_{ЗАП}$. Величину запирающего напряжения записать в табл. 4.

Установить минимальный поток, повернув кольцо 3 (рис. 9) по часовой стрелке, и измерить запирающее напряжение. Результат записать в табл. 4.

8. Сделать вывод, зависит ли запирающее напряжение от интенсивности излучения?

Задание 4. Определить запирающее напряжение на других длинах волн

Установить нулевое напряжение кнопкой СБРОС.

Перекрыть излучение, повернув диск со светофильтрами в положение 5, и установить строго ноль на индикаторе тока.

Установить светофильтр на длину волны 435 нм (положение 2).

Установить максимальный поток излучения (кольцо повернуть против часовой стрелки).

Увеличивая напряжение, следить за уменьшением тока. При приближении тока к нулю необходимо увеличивать напряжение малыми ступенями, чтобы точно заметить, когда ток стал равен 0,00 мкА. Найденное напряжение запирающего записать в табл. 4.

Повторить измерения п. 5 для длин волн 546 нм (положение 3) и 578 нм (положение 4).

Выключить установку: сначала выключателями СЕТЬ обоих блоков, а затем отключить сетевые шнуры.

Таблица 4. Результаты измерения запирающего напряжения

λ , нм	407	435	546	578
Частота ν , Гц				
$U_{ЗАП}$ для максимального потока				
$U_{ЗАП}$ для минимального потока				

3. Обработка результатов измерений

По результатам измерений задания 2 построить на одном графике зависимости тока I от прямого напряжения U для двух потоков излучения.

Определить по графику значения тока насыщения I_0 и записать их в табл. 5.

По результатам измерения тока насыщения вычислить по формуле (5) поток излучения, падающий на фотокатод, и записать результаты в табл. 5. Спектральная чувствительность фотоэлемента на $\lambda = 407$ нм равна $S(\lambda) = 450$ мкА / Вт.

Вычислить по формуле $n = I_0/e$ количество электронов, испускаемых за единицу времени с фотокатода. Модуль заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Результат записать в табл. 5.

Таблица 5. Результаты измерения тока насыщения и потока излучения.

Максимальный поток	Минимальный поток
$I_0 =$	$I_0 =$
$\Phi =$	$\Phi =$
$n =$	$n =$

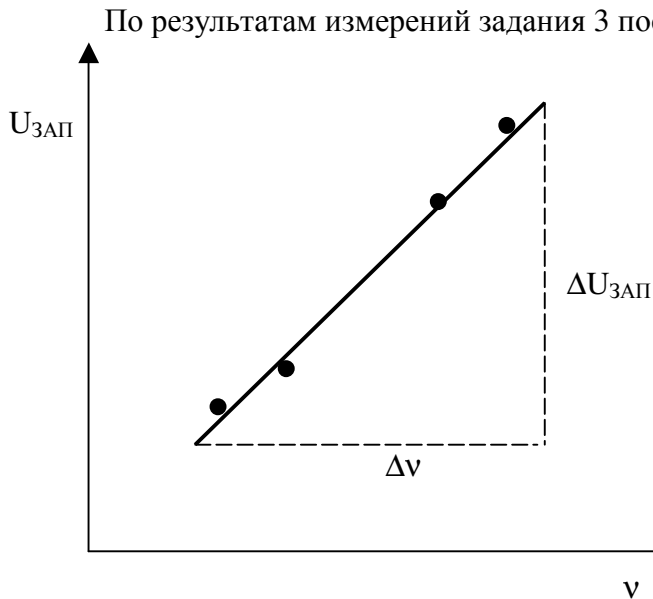


Рис. 10

пряжения.

По данным табл. 4 построить зависимость модуля запирающего напряжения от частоты $U_{ЗАП}(\nu)$. Для этого нанести на график экспериментальные точки и провести через них наилучшую «на глаз» прямую (см. рис. 10). Для $\lambda = 407$ нм вычислить и использовать для графика среднее значение запирающего напряжения из двух измерений (при максимальном и минимальном потоке).

Сделать вывод, подтверждают ли результаты данной работы второй закон фотоэффекта?

Для определения постоянной Планка h использовать формулу (4) и график $U_{ЗАП}(\nu)$. Из формулы (4) получим выражение для приращений напряжения и частоты

$$\Delta U_{ЗАП} = (h/e) \Delta \nu.$$

Отсюда следует формула для расчета постоянной Планка

$$h = e \Delta U_{ЗАП} / \Delta \nu. \quad (6)$$

На графике $U_{ЗАП}(\nu)$ построить треугольник, как поясняет рис. 10, и определить из него значения приращений $\Delta U_{ЗАП}$ и $\Delta \nu$. Вычислить по формуле (6) постоянную Планка.

Сравнить полученный результат с табличным значением $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Из сравнения с табличным значением вычислить относительную погрешность измерения в %.

8. Вычислить по формуле (2) энергию фотона зеленого света в Дж и эВ. Результаты представить в таблице 6.

Таблица 6. Результаты измерений.

Постоянная Планка	$h = \dots\dots\dots$
Относительная погрешность	$\varepsilon = \dots\dots\%$
Энергия фотона, $\lambda = 546$ нм	$E = \dots\dots\dots$ Дж = $\dots\dots\dots$ эВ

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?
3. Объяснить метод запирающего напряжения.
4. Сформулировать законы фотоэффекта и основные положения фотонной теории света.

5. Пояснить формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
6. В чем состоят противоречия между классической теорией света и законами фотоэффекта?
7. Объяснить методику измерения постоянной Планка.

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.