

Московский Государственный Технический Университет им.Н.Э.Баумана

И.Н.ФЕТИСОВ, П.В.ГРАМЕНИЦКИЙ

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Методические указания к лабораторной работе К-4
по курсу общей физики

Под редакцией Л.К.Мартинсона

Москва, 1989

Приводится описание методики и лабораторной установки для изучения внешнего фотоэффекта и определения постоянно Планка. Для студентов 4-го семестра всех специальностей МГТУ.

Цель работы - изучение фотоэффекта и квантовой природы света, определение постоянной Планка.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Под действием света или ультрафиолетового излучения тела испускают электроны. Это явление называется фотоэлектронной эмиссией, или внешним фотоэффектом (Герц, 1887).

Экспериментально установлены следующие законы фотоэффекта (Столетов, Ленард и др.):

- 1) количество испускаемых за единицу времени электронов пропорционально интенсивности (мощности) излучения;
- 2) для каждого вещества существует минимальная частота ν_0 или максимальная длина волны $\lambda_0=c/\nu_0$ (так называемая красная граница фотоэффекта), за которой фотоэлектронная эмиссия отсутствует;
- 3) максимальная кинетическая энергия испущенных электронов линейно возрастает с увеличением частоты излучения и не зависит от его интенсивности.

Опыты по фотоэффекту очень важны в современной физике, так как доказывают квантовую природу света. Фотоэмиссия нашла широкое практическое применение.

Работа выхода электрона

Прежде чем объяснять фотоэффект, рассмотрим понятие работы выхода электрона из твердого тела. Электроны удерживаются в твердых телах электрическими силами, и для удаления электрона из тела в вакуум или воздух, необходимо затратить некоторую работу (работу выхода). Рассмотрим работу выхода в фотоэмиссию с поверхности металла. Полученные выводы в основном будут верны и для полупроводников, из которых обычно изготавливают фотоэмиттеры фотоэлементов.

Металлический кристалл (рис.1 а) состоит из положительно заряженных атомных остовов (показаны кружками) и электронов проводимости (показаны точками), которые хаотически движутся, вылетая недалеко за пределы кристаллической решетки и возвращаясь 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_x (рис.1 б).

Вместо силы удобнее рассматривать потенциальную энергию $U(x)$ электрона внутри и вне металла (рис.1в). Внутри металла потенциальная энергия меньше, чем снаружи, т.е. электроны находятся внутри потенциальной ямы.

Электроны проводимости хаотически движутся при любой, температуре, включая температуру

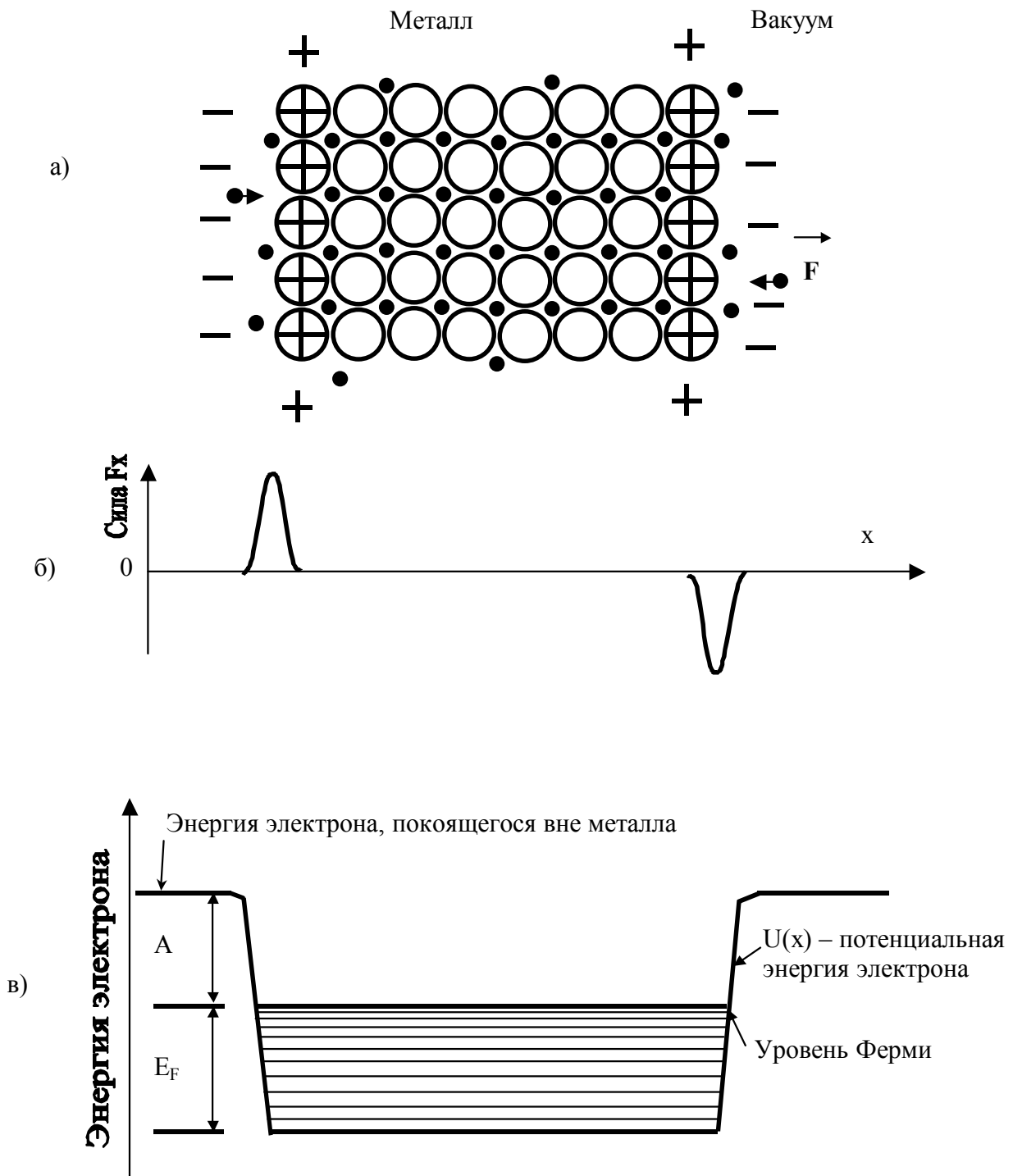


Рис. 1

абсолютного нуля ($T=0$). При $T=0$ энергетический спектр электронов описывается наиболее простой зависимостью, для которой характерна резкая верхняя граница, называемая энергией Ферми E_F (порядка нескольких электронвольт). При комнатной температуре энергетический спектр электронов мало отличается от спектра при $T=0$, и этим различием можно пренебречь при рассмотрении фотоэффекта.

Для того чтобы электрон покинул металл, ему необходимо сообщить дополнительную энергию. Она будет минимальна, если сообщается электрону, который имеет энергию Ферми и движется в направлении нормали к поверхности. Эта дополнительная минимальная энергия называется работой выхода A электрона из металла (рис. 1в). Она различна для разных металлов и составляет несколько электронвольт.

Фотоэффект

Законы фотоэффекта объясняются фотонной (квантовой) теорией света, которая утверждает следующее:

1. Свет, рентгеновские лучи, гамма-излучение и т.д. состоят из "порций" электромагнитных волн, называемых фотонами (квантами электромагнитного поля).
2. Во время испускания или поглощения света фотоны рождаются или поглощаются как нечто неделимое.
3. В любой инерциальной системе отсчета фотон движется со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.
4. Каждый фотон обладает:
энергией $\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$;
массой $m_\phi = \varepsilon/c^2$;
импульсом $p = m_\phi c = \varepsilon/c = h/\lambda$,
где ν и $\lambda = c/\nu$ - частота и длина волны излучения;
 h - универсальная постоянная, называемая постоянной Планка ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).
5. Фотоны перемещаются в пространстве и испытывают интерференцию и дифракцию как волны с длиной волны λ .

Применим теперь фотонную теорию света к фотоэлектронной эмиссии. Испускание электрона есть результат трех последовательных процессов:

- а) поглощения фотона, в результате чего энергия фотона передается одному электрону;
- б) движения этого электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеяться за счет столкновений;
- в) выхода электрона в вакуум через поверхность раздела, при котором электрон должен затратить энергию на выход из потенциальной ямы.

Наибольшую кинетическую энергию вне металла $T_{\text{макс}} = mv_{\text{макс}}^2/2$ будет иметь электрон, эмитированный с уровня Ферми (рис.2а):

$$T_{\text{макс}} = h\nu - A \quad (1)$$

Соотношение (1), выражающее закон сохранения энергии, называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта (выведено в 1905г.).

Если электрон эмитирован с более низкого уровня, чем уровень Ферми (рис.2б), или потерял часть энергии при столкновениях с атомами кристалла, то его кинетическая энергия будет

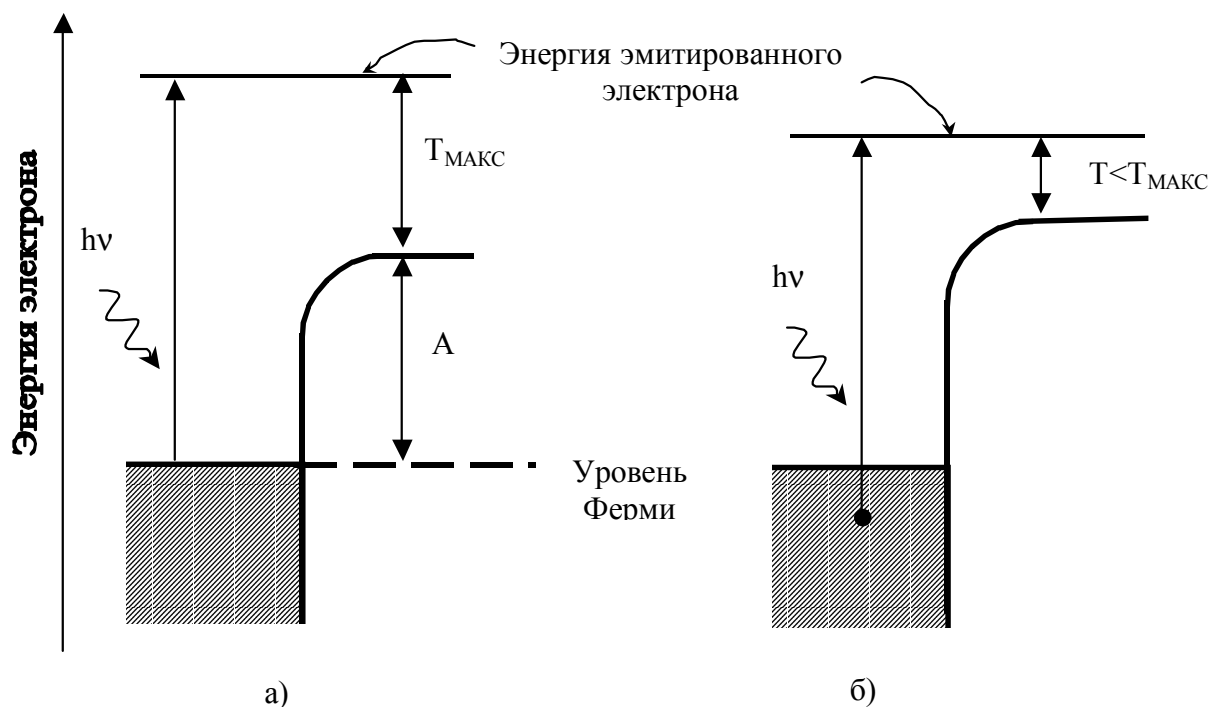


Рис. 2

меньше максимальной: $T < T_{\text{макс}}$.

Таким образом, максимальная энергия испущенных электронов линейно растет с частотой света (формула (1)) не зависит от интенсивности света (числа фотонов за единицу времени).

Красная (низкочастотная) граница фотоэффекта соответствует случаю, когда энергия фотона равна работе выхода: $h\nu_0 = A$. При $\lambda < \lambda_0$, когда энергия фотона меньше работы выхода ($h\nu < A$), фотоэмиссия невозможна.

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

Отметим, что классическая (неквантовая) теория света не может объяснять следующие закономерности фотоэффекта: а) существование красной границы; б) независимость энергии эмитированного электрона от напряженности электромагнитного поля (интенсивности света) и др.

Вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Вакуумный фотоэлемент - наиболее простой прибор для регистрации света, принцип действия которого основан на фотоэлектронной эмиссии. Он состоит из двух проводящих электродов, расположенных внутри стеклянного баллона, из которого откачан воздух. Один

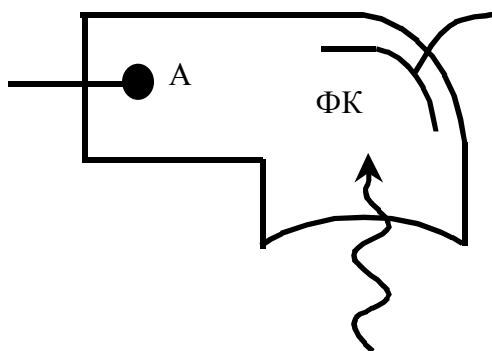


Рис. 3

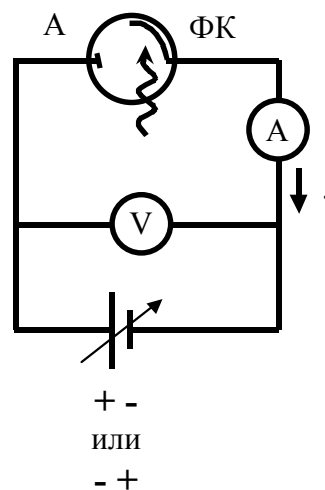


Рис. 4

электрод - фотокатод ФК при освещении испускает в вакуум электроны, которые можно собрать на аноде А (рис.3).

Включим фотоэлемент в цепь (рис.4), содержащую регулируемый источник напряжения, вольтметр V и чувствительный амперметр А, измерим зависимость тока I от напряжения U между анодом и фотокатодом, т.е. вольт-амперную характеристику (ВАХ) фотоэлемента. Изучая ВАХ для света различной частоты и интенсивности, можно выяснить закономерности фотоэффекта.

Рассмотрим ВАХ на рис.5. Правая часть графика при $U > 0$ получена, когда "плюс" источника подключен к аноду (прямая полярность). При этом электрическое поле помогает эмитированным электронам собраться на аноде. Если напряжение достаточно велико (десятки-сотни вольт), то практически все электроны достигают анода и создают в цепи ток I_0 (ток насыщения), который не растет при дальнейшем увеличении U . При небольшом напряжении часть электронов, например испущенных в направлении, сильно отличающемся от направления к аноду, не достигает анода и не дает вклада в ток фотоэлемента.

Ток J_0 , пропорциональный числу испущенных за единицу времени электронов, позволяет измерить энергетические характеристики излучения. Если на фотокатод падает за единицу времени n_ϕ фотонов с энергией $h\nu$ каждый, то переносимая ими мощность излучения, (поток излучения) $\Phi = n_\phi h\nu$. Поток из n_ϕ фотонов выбивает n_e электронов: $n_e = Y n_\phi$. Коэффициент пропорциональности Y называется квантовым выходом фотокатода. Значение Y зависит от частоты

излучения и материала фотокатода; оно может достигать максимального значения $\sim 0,2$. Следовательно, поток излучения

$$\Phi = h\nu n_e / Y = h\nu J_0 / (eY). \quad (2)$$

Здесь использовано соотношение $J_0 = en_e$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона.

Таким образом, измерив J_0 для монохроматического света с частотой ν , можно рассчитать по формуле (2) мощность падающего на фотокатод излучения (значения Y приводятся в справочниках для фотоэлементов, а также даны в паспорте лабораторной установки).

Вольт-амперные характеристики, полученные при различной мощности излучения (рис.6) показывают, что ток возрастает с увеличением интенсивности света.

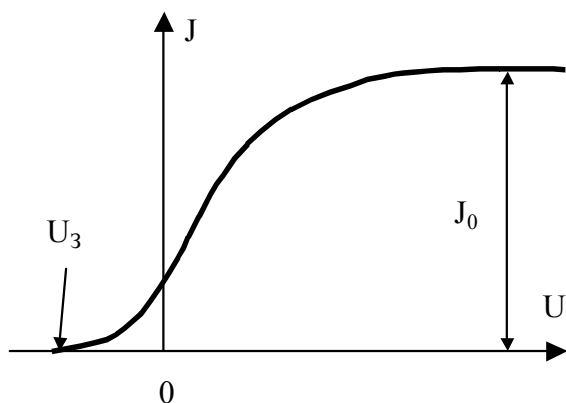


Рис. 5

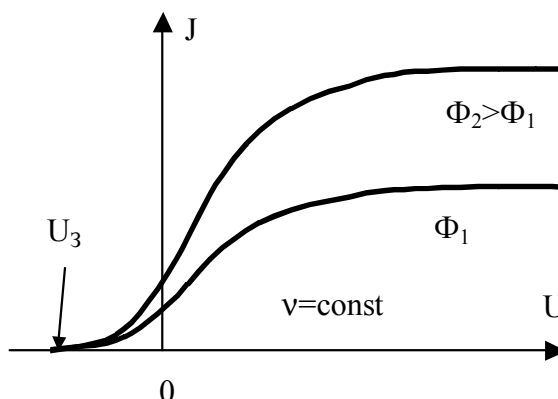


Рис. 6

Измерение энергии электродов и проверка уравнения Эйнштейна.

Вернемся к рис.5 и рассмотрим ВАХ при обратной полярности, когда "минус" источника подключен к аноду ($U < 0$). При этом эмитированные электроны тормозятся электрическим полем. Если начальная кинетическая энергия фотоэлектрона T меньше, чем работа сил поля eU на участке фотокатод-анод, то электрон возвращается обратно, не достигнув анода. При вылете из катода электроны имеют различную энергию, от нуля до $T_{\text{макс}}$. Поэтому по мере увеличения напряжения ток плавно уменьшается, достигая нуля при напряжении U_3 , называемом напряжением запирающего. При $U = U_3$ все фотоэлектроны возвращаются обратно, причем самые быстрые из них, с энергией $T_{\text{макс}}$, поворачивают обратно вблизи анода. Для них выполняется соотношение

$$T_{\text{макс}} = |eU_3| \quad (3)$$

Такой способ измерения энергии заряженных частиц называется методом запирающего (задерживающего) напряжения.

Подставив (3) в (1), получим

$$U_3 = h\nu / e - A / e. \quad (4)$$

(здесь и далее берем модуль U_3 и e).

Формулу (4) можно проверить, измеряя U_3 для монохроматического света различной частоты. Опыт показывает, что запирающее напряжение растет с увеличением частоты (рис.7) и не зависит от интенсивности света при неизменной частоте (см. рис.6). Для проверки выражения (4) можно использовать также немонахроматическое излучение с частотой $\nu \leq \nu^{\text{макс}}$, что упрощает установку. В этом случае уравнение (1) следует записать в виде

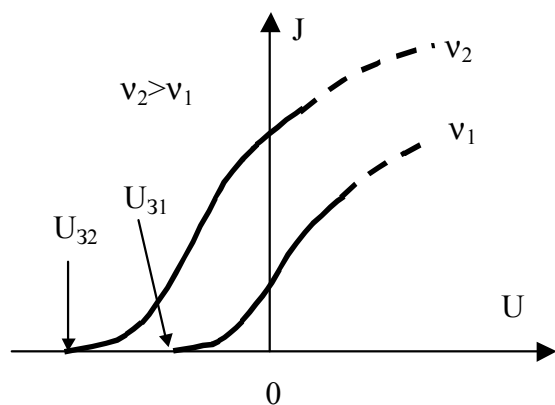


Рис. 7

$$T_{\text{макс}} = h\nu^{\text{макс}} - A, \quad (5)$$

так как наиболее быстрые электроны с энергией $T_{\text{макс}}$ будут выбиваться фотонами с максимальной энергией $h\nu^{\text{макс}}$, где $\nu^{\text{макс}}$ - максимальная частота падающего излучения. Тогда соотношение (4) будет иметь вид

$$U_3 = h\nu^{\text{макс}}/e - A/e \quad (6)$$

В данной работе для света с различным значением $\nu^{\text{макс}}$ определяется U_3 и строится графическая зависимость U_3 от $\nu^{\text{макс}}$ (рис.8). Если экспериментальные точки ложатся на прямую, то опыт согласуется с формулой (6) и подтверждает, что энергия фотона пропорциональна частоте света ($\epsilon = h\nu$).

Из наклона прямой на рис.8 можно найти отношение постоянной Планка к заряду электрона:

$$h/e = \delta U_3 / \delta \nu^{\text{макс}}, \quad (7)$$

где δU_3 (в вольтах) и $\delta \nu^{\text{макс}}$ (в герцах) - длины катетов треугольника на рис.8. Считая заряд электрона известным, из (7) можно определить постоянную Планка.

Как видно из формулы (6), график на рис.8 позволяет определить красную границу ν_0 - по пересечению прямой с осью абсцисс (при $U_3 = 0$) и работу выхода - по пересечению прямой с осью ординат (при $\nu^{\text{макс}} = 0$). Прямая отсекает на оси ординат отрезок в вольтах, численно равный работе выхода в электронвольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Заметим, что описанная выше методика измерения A и ν_0 верна только в том случае, когда работа выхода материала фотокатода и анода одинаковая. Тогда между электродами фото-

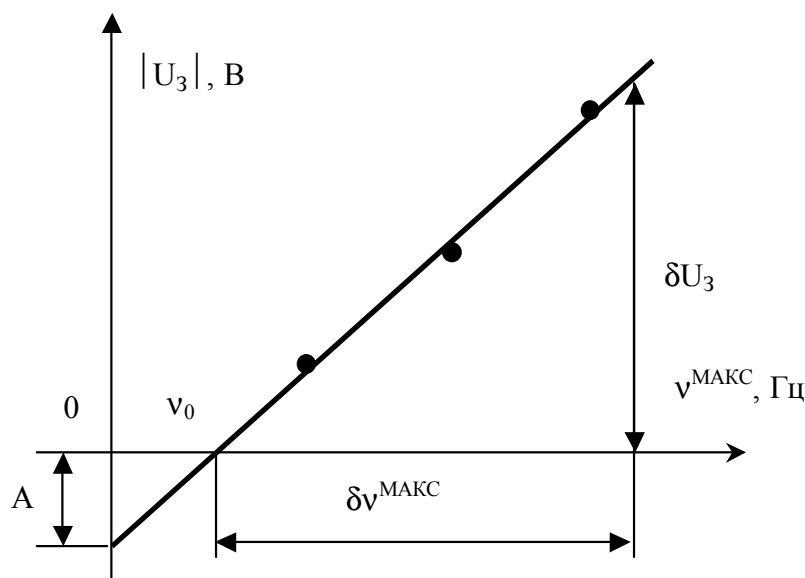


Рис. 8

элемента отсутствует контактная разность потенциалов, которую мы не учитывала при рассмотрении метода запирающего напряжения. Используемый наш фотоэлемент удовлетворяет этому условию, поскольку в нем фотозмиттер наносился распылением материала на стеклянный баллон, в результате чего распыляемый материал осаждался и на аноде.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Содержание работы

Изучаются ВАХ фотоэлемента для света различного спектрального состава, отличающегося значением $\nu^{\text{макс}}$ (верхней границы спектра), и различной интенсивности при одинаковом спектре. Из этих характеристик видно, что запирающее напряжение (или связанная с ним максимальная энергия эмитированных электронов) не зависит от интенсивности и линейно растет с увеличением частоты излучения $\nu^{\text{макс}}$.

Из полученных данных определяют численные значения постоянной Планка, работа выхода, красной границы, энергии фотонов и мощности излучения.

Описание установки.

В работе используется фотоэлемент с многощелочный фотоэмиттером $(\text{Na}_2\text{K})\text{Sb-Cs}$ или сурьмяно-цезиевым фотоэмиттером Cs_3Sb . Окошко фотоэлемента изготовлено из кварцевого или увиолевого стекла, пропускающего не только видимое, но и ультрафиолетовое излучение.

Электрическая схема установки показана на рис.9. Она содержит лампу, фотоэлемент,

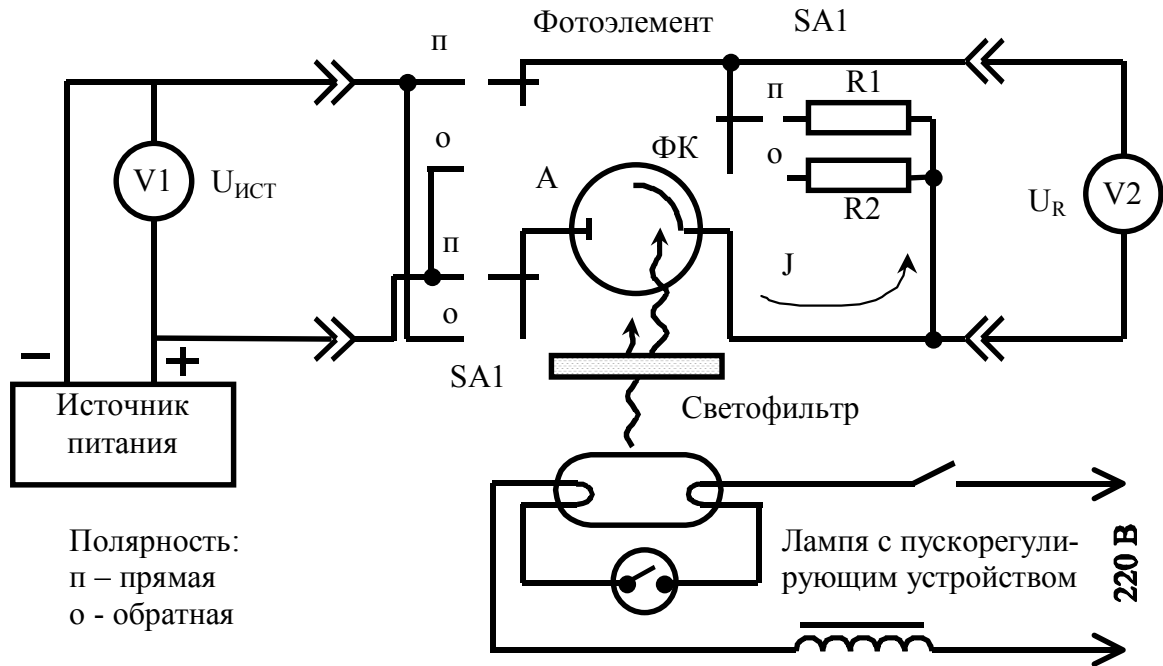


Рис. 9

регулируемый источник питания фотоэлемента, измерительные приборы. Вольтметр V1 измеряет напряженно $U_{\text{ИСТ}}$ источника питания.

Для тщательного изучения ВАХ необходимо ток измерять в очень широких пределах, примерно от 10^{-10} до 10^{-5} А. В одном варианте установки для этого используется чувствительный амперметр. В другом варианте, показанном на рис.9, ток определяют путем измерения небольшого напряжения U_R на сопротивлении $R1$ или $R2$, включенном в цепь фотоэлемента:

$$I = U_R / R, \text{ где } R = R1 \text{ или } R = R2.$$

Переключатель SA 1, изменяющий полярность напряжения на фотоэлементе, одновременно включает в измерительную цепь либо небольшое сопротивление $R1$ при прямой полярности, либо большое сопротивление $R2$ при обратной полярности (значения сопротивлений приведены на установке). Напряжение U_R измеряется чувствительным цифровым вольтметром U_R с большим сопротивлением по сравнению с $R2$.

Напряжение на фотоэлементе равно разности напряжений источника и U_R : $U = U_{\text{ИСТ}} - U_R$. Поскольку U_R мало ($\leq 0,1$ В), им можно пренебречь, т.е. можно считать $U \approx U_{\text{ИСТ}}$.

Источником видимого и ультрафиолетового (УФ) излучений служат газоразрядная ртутная лампа низкого давления. Она излучает на небольшом числе дискретных частот, т.е. имеет линейчатый спектр (рис.10а). Длина вертикальной черты пропорциональна мощности излучения на данной частоте.

Спектр излучения, падающего на фотоэлемент, можно изменить с помощью поглощающих светофильтров. Излучение, прошедшее через желтый светофильтр, содержит только две близкие линии (рис.10в); из них зеленая линия с $\lambda = 546$ нм имеет более высокую частоту. Это первая "рабочая" частота $\nu_1^{\text{макс}} = 5,5 \cdot 10^{14}$ Гц.

Синий светофильтр, пропускающий среднюю часть спектра (рис. 10б), формирует вторую рабочую частоту $\nu_2^{\text{макс}} = 9,6 \cdot 10^{14}$ Гц (ультрафиолетовое излучение с $\lambda = 313$ нм). Наконец, наиболее высокую частоту $\nu_3^{\text{макс}} = 11,8 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 254$ нм) получим, не применяя никаких свето-

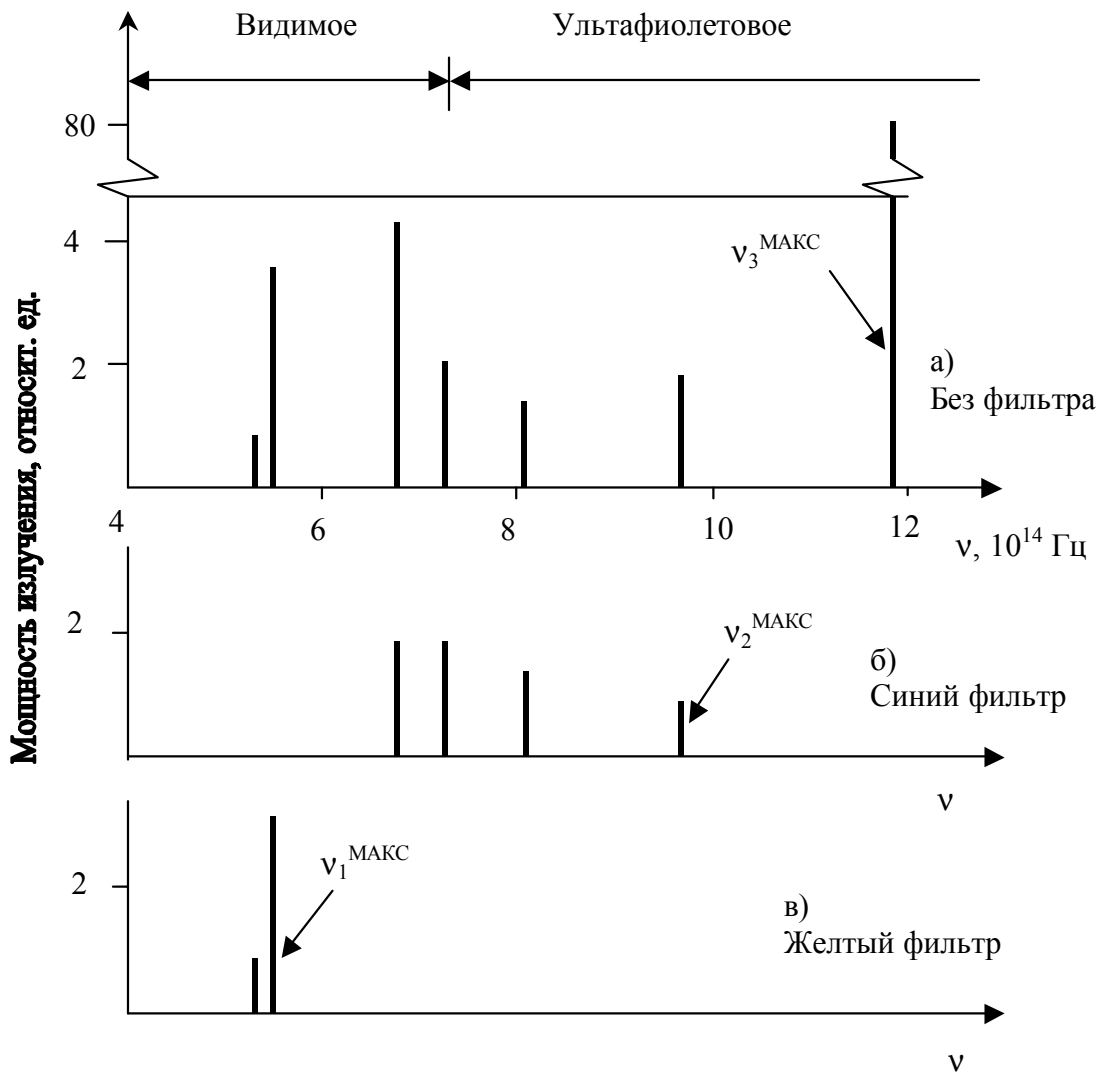


Рис. 10

фильтров (рис 10а).

Светофильтры установлены на пластине, которую можно перемещать перед окном фотоэлемента. Для каждой частоты подобрана диафрагма, чтобы ток насыщения был одного порядка.

При смене светофильтра другой такой же фильтр перекрывает окошко на панели блока фотоэлемента. При желтом фильтре наблюдается зеленое свечение. При двух других положениях рукоятки "Смена фильтров" рабочими являются невидимые ультрафиолетовые линии, а наблюдаемое глазом свечение обусловлено более низкочастотным излучением.

Рукоятка "Смена фильтров" имеет три рабочих положения - два крайних и среднее, в которых интенсивность излучения условно назовём нормальной. Если рукоятку немного сдвинуть (примерно на 1 см), то интенсивность падающего на фотоэлемент света уменьшается в несколько раз без изменения спектра.

Фотоэлемент, лампа, светофильтры и переключатель полярности расположены в блоке фотоэлемента.

Особенность вольт-амперной характеристики.

На рис.11 показан фрагмент вольт-амперной характеристики при обратной полярности, полученной в данной работе. В отличие от упрощенных характеристик на рис.5....7, реальная ВАХ имеет следующую особенность. При увеличении напряжения ток уменьшается, а достигнув нуля, изменяет направление, и вскоре устанавливается небольшое, почти постоянное значе-

ние обратного тока.

Этот обратный ток объясняется эмиссией электронов с анода под действием рассеянного в фотоэлементе света. Таким образом, в одном фотоэлементе как бы присутствуют два включенных антипараллельно фотоэлемента - основной и побочный; последний со значительно более слабым током. Поэтому результирующая ВАХ, показанная схематично на рис. 12а, представляет собой алгебраическую сумму вольт-амперных характеристик основного (рис. 12б) и побочного (рис. 12в) фотоэлементов. Отсюда следует, что запирающее напряжение U_3 следует определять не в точке $I=0$, а там, где кривая переходит в участок со слабым наклоном (см. рис. 11 и 12). Как видно из рис. 11, для нахождения U_3 необходимо тщательно измерить и построить график ВАХ в области обратного тока.

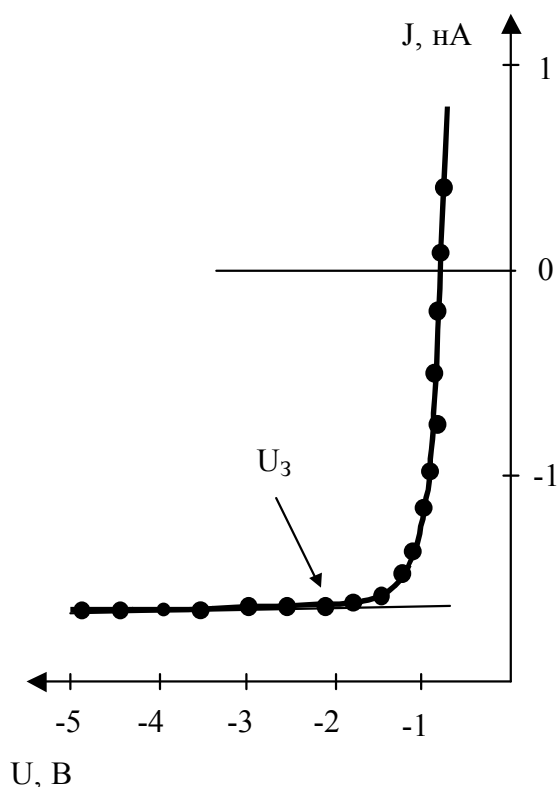


Рис. 11

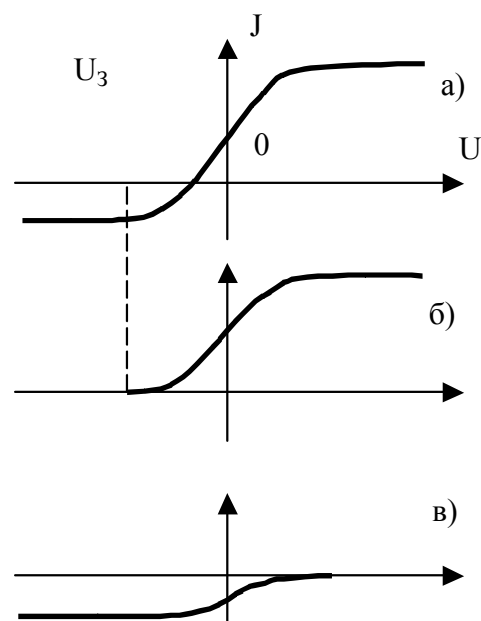


Рис. 12

Выполнение эксперимента

1. Ознакомиться с установкой и инструкцией по использованию приборов, приложенной к установке.
2. Проверять правильность электрических соединений, пользуясь обозначениями на концах проводников и на панели приборов.
3. По правилам техники безопасности и для устранения электрических помех установка должна быть заземлена.
4. Включить лампу, сеть измерительного прибора и источника питания. Пока лампа разгорается (около 5 мин), ознакомьтесь с установкой в работе.
5. В этом пункте даны указания для последующих измерений. Зависимость тока фотоэлемента I от напряжения U изучается для трех значений частот при "нормальной" интенсивности света и двух частот ($\nu_1^{\text{макс}}$ и $\nu_3^{\text{макс}}$) при меньшей интенсивности. Во всех случаях напряжение ПРЯМОЙ полярности следует изменять от нуля, до 30 В (до 50 В, если позволяет источник питания) с шагом примерно 5 В.

При обратной полярности рекомендуем следующую схему измерений, позволяющих определить значения запирающего напряжения:

для жёлтого светофильтра напряжение изменять от 0,1 до 1 В с шагом 0,1В; от 1 до 5В с шагом 1В;

для синего светофильтра: от 0,5 до 2,1 В с шагом 0,2 В; от 2,5 до 5 В с шагом 0,5 В;

без светофильтра: от 1 до 3,4 В с шагом 0,3 В, от 4 до 5 В с шагом 0,5 В.

При обратной полярности напряжения необходимо записать в табл.1 также знак тока ("плюс" или "минус").

6. Рукояткой "Смена (фильтров)" установить желтый фильтр и произвести указанные в п.5 измерения. Результаты записать в первый и в второй столбцы табл.1.

Таблица 1.

Нормальная интенсивность						Уменьшенная интенсивность			
Желтый фильтр, $\nu_1^{\text{макс}}=5,5 \cdot 10^{14}$ Гц		Синий фильтр, $\nu_2^{\text{макс}}=9,6 \cdot 10^{14}$ Гц		Без фильтра, $\nu_3^{\text{макс}}=11,8 \cdot 10^{14}$ Гц		Желтый фильтр		Без фильтра	
U	I	U	I	U	I	U	I	U	I
U ₃₁ =		U ₃₂ =		U ₃₃ =		U ₃₁ =		U ₃₃ =	

7. Повторить измерения с синим светофильтром и без светофильтра.

8. Снять ВАХ для жёлтого светофильтра при меньшей интенсивности света. Уменьшение интенсивности провести следующим образом. Сначала установить рукоятку "Смена фильтров" в крайнее левое положение. Заметить по прибору ток насыщения фотоэлемента, т.е. ток при максимальном прямом напряжении. Затем небольшим перемещением рукоятки (~ 1 см) уменьшить ток в 2...3 раза. В этом положении рукоятки снять вольт-амперную характеристику.

9. Прodelать аналогичные измерения для частоты $\nu_3^{\text{макс}}$ (без фильтра).

10. Выключить установку.

Обработка и анализ результатов измерений

Задание 1. Построить ВАХ и определить запирающее напряжение U_3 .

1. Поскольку в пределах ВАХ ток изменяется на несколько порядков, то характеристику следует разделить на две части – для прямой и обратной полярностей. Каждую часть построить на отдельном графике (можно совместить кривые для трех частот и двух интенсивностей). Для повышения точности измерения U_3 график для $U < 0$ должен быть построен тщательно, в крупном масштабе, как показано на рис.11. Точки с большими значениями положительного, тока наносить на этот график не следует, так как для определения запирающего напряжения они несущественны, а их нанесение приводит к уменьшению масштаба и увеличению погрешности определения U_3 .

2. По графику определить значения запирающего напряжения, пользуясь указаниями раздела "Особенность вольт-амперной характеристики" и рис.11. Результаты записать в табл. 1.

3. Проанализировать зависит ли запирающее напряжение от интенсивности света при одинаковой частоте.

Задание 2. 1. Построить графическую зависимость U_3 от $\nu^{\text{макс}}$; провести через точки прямую линию. Если точки не лежат на одной прямой, то прямую необходимо провести таким образом, чтобы отклонение точек от нее было наименьшим.

2. Определить постоянную Планка по наклону прямой (см. рис.8) и формуле (7).

3. Определить красную границу фотоэффекта и работу выхода (см. рис.8).

4. Определить энергию фотонов в видимой и УФ-областях спектра, используя полученное значение постоянной Планка.

5. Вычислить по формуле (2) поток излучения, прошедшего через жёлтый фильтр, которое мало отличается от монохроматического с частотой $5,5 \cdot 10^{14}$ Гц. Значение тока насыщения взять из вольт-амперной характеристики. Квантовый выход фотокатода приведен на установке.

6. Результаты измерений представить в табл.2.

Результаты измерений

 $h =$ $A =$ $\nu_0 =$ $\lambda_0 = c/\nu_0 = \dots$

Энергия фотонов:

видимого света ($5,5 \cdot 10^{14}$ Гц) $\epsilon_1 = \dots$ Дж = \dots эВУФ-излучения ($11,8 \cdot 10^{14}$ Гц) $\epsilon_3 = \dots$ Дж = \dots эВПоток излучения $\Phi = \dots$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
2. Какой физический смысл имеет работа выхода электрона из металла?
3. Сформулировать основные положения фотонной теории света.
4. Объяснить метод запирающего напряжения.
5. Как объяснить:
 - а) линейную зависимость запирающего напряжения от частоты?
 - б) независимость запирающего напряжения от интенсивности света?
6. Показать, что классическая электромагнитная теория света не может объяснить законы фотоэффекта.
7. Объяснить методику измерения h , A , ν_0 , Φ .

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т.- М.: Наука, 1987, - Т. 3. - 320 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б, М. Курс физики; В 3 т. - М.: Высшая школа, 1979. -Т. 3. - 511 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика; В 2 ч. Ч, 1; Атомная физика. - М: Наука, 1986, - 416 с.