

## Работа 9. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

- Цель работы:*
1. Изучение основных закономерностей фотоэффекта.
  2. Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна.
  3. Установление красной границы фотоэффекта.
  4. Определение работы выхода и постоянной Планка.

### 1. Основные закономерности фотоэффекта

Воздействие света на вещество сводится к передаче этому веществу энергии, приносимой световой волной, в результате чего могут возникать различные фотоэлектрические явления. К таким явлениям относят возникновение различных фотоэдс (фотогальванический эффект), изменение электропроводности под действием излучения (фотопроводимость), изменение диэлектрической проницаемости (фотодиэлектрический эффект), фотоэлектронную эмиссию. Фотоэлектрические явления возникают в результате оптических переходов в телах и вызванного этими переходами изменения пространственного распределения электронов.

*Внешним фотоэлектрическим эффектом* (фотоэффектом, фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения в вакуум или другую среду. Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках) и в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация). Практическое значение имеет фотоэлектрическая эмиссия из твердых тел в вакуум.

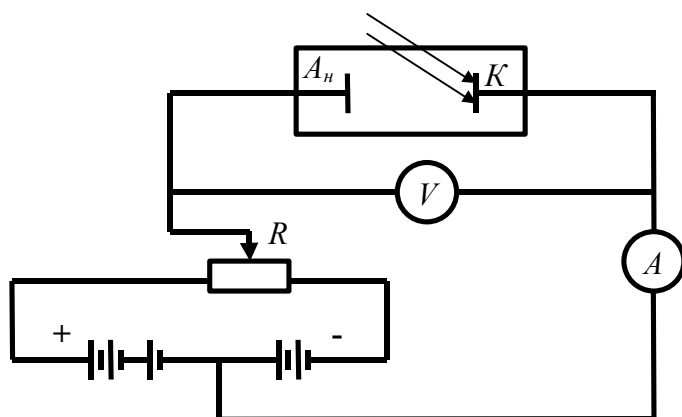
*Внутренний фотоэффект* – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника, диэлектрика, молекул газа из заполненных электронами состояний в свободные без эмиссии наружу. В результате внутреннего фотоэффекта концентрация свободных носителей заряда внутри тела увеличивается, что приводит к возникновению фотопроводимости (повышению электропроводности) или возникновению электродвижущей силы.

На явлении фотоэффекта основано действие различных фотоэлектронных приборов (фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей, электронно-оптических преобразователей и др.), получивших разнообразные применения во многих областях науки и техники.

Внешний фотоэффект исследуют на установке, представленной на рис. 1.

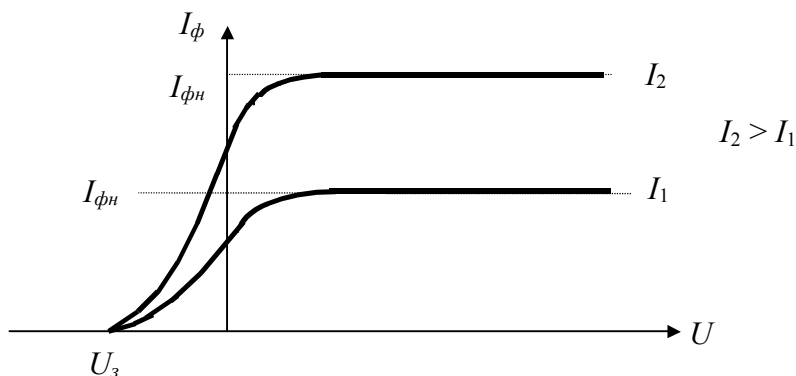
Два электрода (анод и катод) помещены в вакуумированный баллон. От внешнего источника света освещают катод, изготовленный из

исследуемого материала. Между анодом и катодом прикладывают разность потенциалов (плюс на аноде).



Р и с. 1.

Электроны, эмитируемые в вакуум с поверхности катода вследствие фотоэффекта, перемещаются в вакууме под действием электрического поля к аноду. Ток в цепи измеряют амперметром. Зависимость фототока  $I_{\phi}$  от напряжения между электродами  $U$  (вольт - амперная характеристика), соответствующая различным значениям интенсивности  $I$  падающего света, приведена на рис. 2.



Р и с. 2.

Характеристика снимается при неизменной частоте света  $\nu$ . Видно, что с увеличением  $U$  фототок возрастает и при некотором напряжении достигает насыщения. Пологий ход кривых указывает на то, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Максимальное значение тока  $I_{\phi n}$  (фототок насыщения) определяется таким значением  $U$ , при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода:

$$I_{\text{фн}} = en, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n$  – число электронов, испускаемых катодом в единицу времени.

Из ВАХ следует, что при  $U=0$  фототок не исчезает. Следовательно, электроны, выбитые светом из катода, обладают некоторой начальной скоростью  $V$ , а значит, и отличной от нуля кинетической энергией. Часть электронов достигает анода и без приложения внешнего электрического поля. Для того чтобы фототок принял нулевое значение, между анодом и катодом необходимо приложить задерживающее напряжение  $U_3$  (отрицательное). При таком напряжении даже электронам, обладающим при вылете из катода наибольшим значением скорости  $V_m$ , не удастся достигнуть анода. Следовательно, можем записать, что:

$$\frac{mV_m^2}{2} = eU_3, \quad (2)$$

где  $m$  – масса электрона,  $V_m$  – максимальная скорость электрона.

В результате опытных исследований установлены *три основные закона внешнего фотоэффекта*.

1. Сила фотоэлектрического тока насыщения прямо пропорциональна интенсивности светового потока, вызывающего фотоэффект, при условии неизменности спектрального состава этого потока (*закон Столетова*).

2. Существует такая длина волны  $\lambda_0$  в спектре света, начиная с которой (для  $\lambda < \lambda_0$ ) в данном веществе может иметь место внешний фотоэффект (*красная граница фотоэффекта*).

3. Энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света, а максимальная величина этой энергии ( $\frac{mV_m^2}{2}$ ) линейно связана с частотой падающего света:

$$\frac{mV_m^2}{2} = a + b\nu, \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные для данного вещества.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не представляет трудности: падающая электромагнитная волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле. При резонансе, когда собственный период колебаний электрона равен периоду падающей световой волны, амплитуда колебаний электрона становится

настолько большой, что он может вырваться за пределы поверхности металла. Если эта картина верна, то кинетическая энергия, с которой электрон покидает металл, должна зависеть от интенсивности световой волны. На опыте обнаружено, что энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности света. Повышение интенсивности увеличивает только концентрацию фотоэлектронов в вакууме (пропорционально интенсивности). Скорость электронов зависит только от частоты падающего света, с увеличением частоты линейно возрастала и энергия фотоэлектрона. Законы фотоэффекта представляются непонятными с точки зрения волновой теории света.

Эйнштейн указал на то, что все эти трудности исчезают, если рассматривать свет как поток фотонов.

## 2. Феноменологическая теория внешнего фотоэффекта

А. Эйнштейн (1906) показал, что закономерности фотоэффекта можно объяснить, предполагая, что свет в веществе поглощается квантами ( $h\nu$ ), причем электрон целиком поглощает один квант. Фотоэффект может быть представлен как результат трех последовательных процессов: поглощение фотона и появление электрона с высокой (по сравнению со средней) энергией; движение этого электрона к поверхности, при котором часть его энергии может рассеяться за счет взаимодействия с другими электронами или дефектами и колебаниями кристаллической решетки (фононами); выход электрона в вакуум или другую среду через потенциальный барьер на границе раздела.

Энергетический баланс при поглощении фотона должен содержать, следовательно, следующие члены  $E_1$  – энергию отрыва электрона от атома (энергию ионизации). Часть энергии кванта света затрачивается на то, чтобы электрон мог покинуть тело. Эта энергия равна работе выхода ( $A$ ). Если электрон освобождается светом не у границы раздела твердое тело–вакуум, то некоторая часть энергии  $E_2$  кванта может быть потеряна вследствие случайных столкновений электронов между собой, с атомами вещества, несовершенствами кристаллической решетки. После эмиссии из твердого тела электрон обладает кинетической энергией  $E_k = mV^2/2$ , на которую также приходится часть энергии поглощенного кванта света. По закону сохранения энергии

$$h\nu = A + E_1 + \frac{mV^2}{2} + E_2. \quad (4)$$

Это выражение называется *уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта*. Если рассматривать электроны, освобожденные светом

из поверхностных слоев, то можно предположить, что  $E_2 = 0$  и скорость таких электронов будет максимальной.

В металлах фотоэффект в видимой и УФ-областях спектра связан с поглощением фотонов в основном электронами проводимости, для которых можно положить  $E_1 = 0$ , тогда уравнение Эйнштейна запишется так:

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

Согласно гипотезе Эйнштейна, каждый квант поглощается только одним электроном, следовательно, число эмитированных с поверхности в вакуум электронов должно быть пропорционально числу падающих фотонов, т. е. интенсивности света (*I закон фотоэффекта*).

Из выражения (5) следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона должна линейно возрастать с увеличением частоты падающего света и она не зависит от числа фотонов (т. е. интенсивности), так как  $A$  от интенсивности света не зависит (*III закон фотоэффекта*).

С уменьшением частоты света кинетическая энергия фотоэлектронов уменьшается, и если предположить, что для данного вещества  $A = \text{const}$ , то при некоторой частоте  $\nu = \nu_0$  такой, что  $h\nu_0 = A$ , кинетическая энергия фотоэлектронов станет равной нулю и фотоэффект прекратится (*II закон фотоэффекта*). Значение  $\nu_0 = A/h$  определяет красную границу фотоэффекта.

Длинноволновая (красная) граница фотоэлектронной эмиссии из металлов определяется величиной их работы выхода ( $\lambda_0 = hc/A$ ). Для чистых поверхностей большинства металлов  $A > 3$  эВ и лишь для щелочных и некоторых щелочноземельных металлов  $A = 2-3$  эВ. Поэтому фотоэлектронная эмиссия из последних может наблюдаться в видимой и УФ-областях спектра, в то время как для всех остальных металлов фотоэлектронная эмиссия наблюдается только в УФ-области. Нанесение монокристаллических пленок щелочных и щелочноземельных металлов на другие металлы снижает работу выхода и тем самым сдвигает границу фотоэлектронной эмиссии в длинноволновую область.

Для металлов уравнение Эйнштейна можно проверить экспериментально. Согласно выражению (5) между частотой падающего света и максимальной энергией эмитированных в вакуум фотоэлектронов должна существовать линейная связь. Следовательно, возбуждая фотоэлектроны различными длинами волн света и измеряя максимальную энергию освобожденных фотоэлектронов, можно проверить законы фотоэффекта и определить постоянную Планка. Для измерения энергии

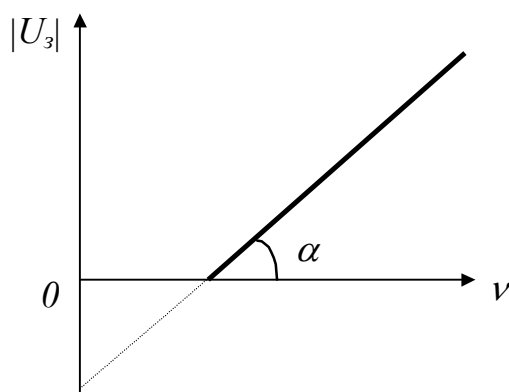
фотоэлектронов используют метод “Задерживающего потенциала”. Как уже отмечалось, при ускоряющем потенциале между катодом и анодом, равном нулю, фототок не равен нулю, а только при приложении обратного потенциала ток убывает, спадая до нуля при задерживающем потенциале  $U_3$ . Величина  $U_3$  – именно тот потенциал, при котором максимальная кинетическая энергия электрона равна работе, которую электрон должен совершить для преодоления тормозящего поля:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = eU_3.$$

Формулу (5) можно переписать в виде

$$h\nu = eU_3 + A, \quad (6)$$

откуда вытекает, что существует линейная зависимость задерживающего потенциала от частоты (рис. 3).



Р и с. 3.

На эксперименте наблюдается плавное уменьшение фототока от величины обратного напряжения, так как электроны эмитируются катодом не с одной определенной скоростью, а имеется непрерывный набор скоростей (распределение электронов по энергиям).

Кроме того, между анодом и катодом фотоэлемента существует контактная разность потенциалов, которая приводит к смещению данного распределения. Это может привести к некоторой ошибке в определении постоянной Планка методом задерживающего потенциала.

Из формулы (5) следует, что граничная частота ( $\nu_0$ ) определяется работой выхода, которая в сильной мере зависит от состояния поверхно-

сти фотокатода. Опыты с чистыми поверхностями в вакууме показали, что величина фототока зависит от температуры и от ускоряющего электрического поля у поверхности фотокатода. Эта зависимость очень существенна при частотах, близких к граничной частоте. Например, внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода и вследствие этого смещает порог фотоэлектронной эмиссии на величину  $\Delta(h\nu_0) = e\sqrt{eE}$ , где  $E$  – напряженность поля у поверхности металла,  $e$  – заряд электрона.

Элементарная теория Эйнштейна не может объяснить (даже качественно) спектральные характеристики фототока, закон распределения фотоэлектронов по энергиям, температурную зависимость фототока и многое другое. Решение общей задачи об электронном токе в вакууме (при  $T \neq 0$ ), вызванном взаимодействием системы электронов с электромагнитным полем световой волны, в настоящее время практически невозможно. В современной квантовомеханической теории кристаллических тел в рамках модели свободных электронов было получено уравнение для фототока

$$J_\phi = \alpha A_0 \int_{-\infty}^x \ln(1 + e^{x'}) dx', \quad (7)$$

где  $A_0 = \frac{4\pi m e k^2}{8\pi^3 h^3}$  – универсальная постоянная;

$$x = \frac{h(\nu - \nu_0)}{kT}; \quad x' = \frac{(\varepsilon_F - \varepsilon_\perp)}{kT},$$

где  $\varepsilon_\perp = \frac{mV_\perp^2}{2}$  – нормальная составляющая энергии;

$\varepsilon_F$  – энергия Ферми;

$\alpha$  – постоянный коэффициент.

Анализ решения этого уравнения показал, что законы фотоэффекта, следующие из уравнения Эйнштейна, строго выполняются лишь при  $T = 0 \text{ K}$ . При  $T > 0 \text{ K}$  наблюдается фотоэлектронная эмиссия и при  $\lambda > \lambda_0$ , но с малым квантовым выходом. В частности, при энергии фотонов вблизи порога ( $h\nu < 1.5h\nu_0$ ) спектральная характеристика и температурная зависимость фотоэлектронной эмиссии из металлов хорошо описываются формулами Фаулера, согласно которым

$$J \approx \alpha A_0 T^2 \exp \frac{h(h - h_0)}{kT}, \quad \nu \ll \nu_0, \quad (8)$$

$$J \approx \frac{\alpha A_0}{2} \left[ \frac{h(\nu - \nu_0)^2}{k^2} + \dots \right], \quad \nu \gg \nu_0. \quad (9)$$

Эти формулы являются частным решением уравнения (7).

Законы фотоэффекта нарушаются также при высоких интенсивностях падающего излучения ( $I > 1 \text{ Вт/см}^2$ ), когда становятся заметными многофотонные процессы.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для изучения фотоэффекта приведена на рис. 5.

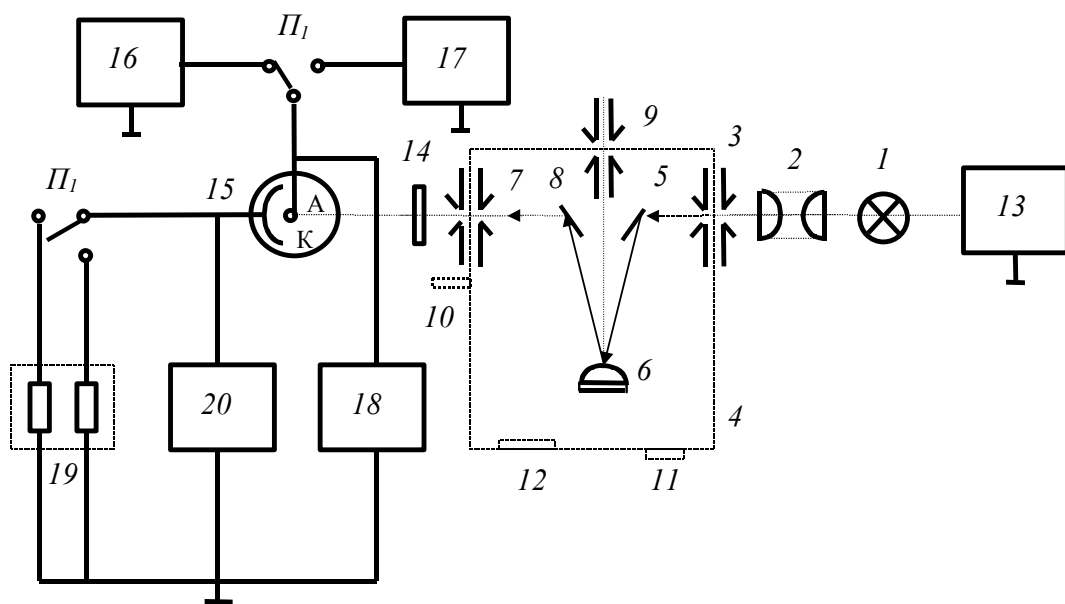


Рис. 5

Излучение от лампы 1 через конденсор 2 попадает на входную щель 3 монохроматора 4. Посредством зеркала 5 излучение заполняет вогнутую дифракционную решетку 6, которая выполняет одновременно роль фокусирующего и диспергирующего элемента. Используется решетка с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами, что дает возможность значительно скомпенсировать расфокусировку и другие погрешности.

Излучение лампы разлагается в спектр решеткой, и в зависимости от ее положения тот или иной спектральный интервал направляется на выходную щель 7 (при введенном плоском зеркале 8) или на выходную щель 9 (при выведенном зеркале 8).



Переключение зеркала 8 осуществляется перемещением от себя (к себе) рукоятки 10, расположенной на боковой стенке корпуса монохроматора со стороны выходной щели 7. Щели применяются сменные с постоянной шириной. Для получения большей спектральной чистоты выделенного участка излучения при работе в области спектра (290÷710) нм входная и выходная щели устанавливаются в положение 1. Номинальные размеры щели и обозначение положения щели нанесены на ее поверхностях.

Сканирование спектра осуществляется поворотом решетки. Закон движения решетки обеспечивается синусным механизмом. Системой зубчатых передач синусный механизм связан с решеткой рукояткой 11, расположенной на торцевой стенке монохроматора и цифровым механическим счетчиком 12, вмонтированным в корпус монохроматора, с помощью которого осуществляется непосредственный отсчет длин волн с точностью  $\pm 0,2$  нм.

В качестве источника излучения применена галогенная лампа накаливания, питаемая от внешнего источника 13, тумблером которого предусмотрено два режима работы – *пониженный (недокал)* и *полный накал*.

Излучение источника, прошедшее через монохроматор и разложенное в спектр, попадает через нейтральный фильтр 14 на катод  $K$  фотоэлемента 15. Заметим, что при выполнении точных экспериментов по исследованию законов фотоэффекта и определению постоянной Планка обычно применяют фотоэлемент, имеющий вид сферического конденсатора с фотокатодом на внутренней сфере. В лабораторной работе исследуется серийный фотоэлемент СЦВ-4, у которого фотокатодом служит внешняя обкладка в форме полусферы. По этой причине интерпретация результатов измерения носит несколько приближенный характер.

Для измерения фототока собрана электрическая схема. Анод  $A$  фотоэлемента через переключатель  $\Pi_1$  соединяется с двумя источниками питания 16 и 17, обеспечивающих измерение вольт-амперной характеристики как в области ускоряющих (0÷85) В, так и задерживающих (0÷5) В напряжений. Потенциометры, позволяющие плавно регулировать эти напряжения, смонтированы в блоке 16, и ручки от них выведены на переднюю панель блока. Потенциал анода относительно заземленной шины измеряется цифровым вольтметром 18.

Для определения фототока последовательно с фотоэлементом включается нагрузочное сопротивление 19, падение напряжения на котором  $U_{\text{вых}}$  измеряется цифровым вольтметром 20 с высоким входным сопротивлением.

При снятии вольт-амперной характеристики величина фототока изменяется в очень больших пределах (от  $10^{-6}$  А при прямом токе до  $10^{-10}$  А при обратном), поэтому применяются различные нагрузочные сопротивления, которые одновременно с выбором режима работы подключаются переключателем  $П_1$ .

Введем основные характеристики fotocувствительного элемента вакуумных фотоэлектронных приборов – фотокатода. Такими характеристиками являются: спектральная чувствительность, квантовый выход фотоэлектронной эмиссии, интегральная чувствительность и плотность темнового тока. Эти характеристики очень важны при практическом использовании фотоэлектронных приборов.

Спектральная чувствительность  $S_\lambda$  – отношение фотоэлектронного тока в режиме насыщения  $I_{\phi n}$  (в мА) к мощности  $F_\lambda$  падающего на фотокатод монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$  (в Вт). Со стороны длинных волн зависимость  $S_\lambda(\lambda)$  ограничивается порогом, или длинноволновой границей, фотоэлектронной эмиссии  $\lambda_0$ . На практике  $\lambda_0$  определяется как длина волны, при которой  $S_{\lambda_0} = 0,01 S_\lambda^{max}$ .

Квантовый выход  $Y_\lambda$  – отношение числа эмитированных фотоэлектронов к числу падающих на фотокатод фотонов монохроматического излучения:  $Y_\lambda = 1,24 [\text{Вт} \cdot \text{нм} / \text{мА}] S_\lambda / \lambda$  ( $\lambda$  в нм). Квантовый выход часто выражается в процентах. Квантовый выход фотоэлектронной эмиссии из металлов в видимой и ближней УФ-областях меньше  $10^{-3}$  электрон / фотон. Это связано прежде всего с малой глубиной выхода фотоэлектронов, которая значительно меньше глубины поглощения света в металле. Большинство фотоэлектронов рассеивает свою энергию до подхода к поверхности и теряет возможность выйти в вакуум. Кроме того, коэффициент отражения в видимой и ближней УФ-областях велик и лишь малая часть излучения поглощается в металле. Случайные загрязнения могут снизить  $A$  и сдвинуть порог фотоэлектронной эмиссии в сторону более длинных волн.

Интегральная чувствительность фотокатода  $S$  – отношение фототока в режиме насыщения (в мкА) к величине падающего светового потока (в лм) от стандартного источника излучения (лампа накаливания с вольфрамовой нитью при  $T = 2850\text{K}$ )  $S_\lambda$  и  $S$  связаны соотношением

$$S = 10^3 \cdot \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_2} S_\lambda F_\lambda d\lambda}{F_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda K_\lambda d\lambda},$$

где  $F_\lambda$  – мощность излучения на данной длине волны,

$K_\lambda$  – относительная спектральная чувствительность “нормального” человеческого глаза (кривая видности),

$\lambda_0$  – порог чувствительности фотокатода,

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – границы видимого спектра,

$F_0 = 683$  лм/Вт – световой поток в лм, соответствующий потоку в 1 Вт монохроматического излучения с  $\lambda = 554$  нм.

Темновой ток фотокатода – ток через фотоэлемент в отсутствие облучения – определяется термоэлектронной эмиссией. Она зависит от состояния поверхности фотокатода (работы выхода фотокатода) и его температуры. Темновой ток является основным источником электрического шума в фотоэлектронных приборах. Среднеквадратичный шум в отсутствие излучения равен

$$\bar{i}_{ш}^2 = 2ej_m q \Delta f,$$

где  $e$  – заряд электрона,

$j_m$  – плотность темнового тока,

$q$  – площадь фотокатода,

$\Delta f$  – ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Фотокатод также характеризуется стабильностью его чувствительности во времени и термостойкостью, т. е. диапазоном рабочих температур, в границах которого чувствительность фотокатода сохраняется в заданных пределах.

В качестве фотокатода в фотоэлектронных приборах обычно используют фоточувствительные материалы, обладающие высоким квантовым выходом ( $Y \geq 0,1$  электрон/фотон) – так называемые эффективные фотокатоды. Подавляющее большинство эффективных фотокатодов представляют собой полупроводники. Чистые металлы в видимой и ближней УФ-областях спектра имеют малый квантовый выход ( $\leq 10^{-3}$  электрон/фотон) и практически не используются в качестве фотокатода. Высоким квантовым выходом обладают полупроводниковые материалы с дырочной проводимостью ( $p$ -типа). В таких полупроводниках глубина выхода фотоэлектронов достигает нескольких десятков нм. В результате значительная часть фотоэлектронов имеет возможность выйти в вакуум. Кроме того, в поверхностной области таких фотокатодов существует электрическое поле, ускоряющее фотоэлектроны к поверхности. Именно эти два обстоятельства обуславливают высокий квантовый выход фотоэмиссии таких полупроводников фотокатода.

Среди эффективных фотокатодов наибольшее распространение получили фотокатоды на основе антимонидов щелочных металлов: сурьмяно-цезиевый, двухщелочные и многощелочный.

Сурьмяно-цезиевый ( $Cs_3Sb$ ) фотокатод – полупроводник р-типа с шириной запрещенной зоны  $\varepsilon_g \approx 1,6$  эВ,  $\lambda_0 \approx 0,6$  мкм. Он изготавливается путем воздействия паров  $Cs$  в вакууме на испаренный на подложку (обычно стекло) слой  $Sb$  при температуре  $T = 140 - 180$  °С. В области  $h\nu \geq 3$  эВ квантовый выход фотоэмиссии достигает 0,1–0,2 электрон/фотон. Обработка  $Cs_3Sb$  небольшим количеством кислорода (сенсублизация) сдвигает порог фотоэмиссии в длинноволновую область спектра и увеличивает квантовый выход, особенно вблизи порога.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Прежде всего необходимо ознакомиться с приборами и принципом действия измерительной установки. Включить измерительные приборы и источник излучения, переключив предварительно тумблер на блоке питания лампы в положение “недокал”. После 15-минутного прогрева можно приступать к измерениям.

#### Упражнение 1. Снятие вольт-амперной характеристики фотоэлемента в области ускоряющего потенциала

Установить нужный режим работы фотоэлемента переключателем рода работ  $\Pi_1$ , расположенным на передней панели блока 1б, который имеет два положения: “Ускоряющий потенциал” и “Задерживающий потенциал”. Получить на выходе из монохроматора излучение с длиной волны  $\lambda = 480$  нм.

1. Ручку “Регулировка потенциала” переводят влево так, чтобы потенциал анода  $U$ , измеряемый вольтметром В7-38, был равен нулю. Изменяя величину потенциала, снимают зависимость  $U_{вых} = f(U)$ . Для перехода от величины  $U_{вых}$  к току  $I_\phi$  фотоэлемента следует учесть, что нагрузочное сопротивление  $R_n$  в этом случае равно 5 МОм. Падение напряжения на  $R_n$  измеряется вольтметром В7-23. Потенциал изменять в диапазоне (0÷10) В с шагом 1 В и от 10 до 50 В с шагом 5 В. Полученные результаты представляют в виде графика  $I_\phi = f(U)$ .

2. Не изменяя спектрального состава излучения ( $\lambda = 480$  нм), падающего на фотокатод, с помощью нейтральных фильтров ( $HC$ ) изменяют интенсивность светового пучка. Закон изменения интенсивности с

учетом потерь на отражение выглядит следующим образом (закон Бугера-Ламберта):

$$I = I_0(1-R)^2 \exp(-\alpha_\lambda L), \quad (10)$$

где  $I_0$  и  $I$  – интенсивности света, соответственно, на входе и выходе из фильтра,

$R$  – энергетический коэффициент отражения от поверхности фильтра,  
 $\alpha_\lambda$  – селективный показатель поглощения, который для нейтральных фильтров слабо зависит от длины волны  $\lambda$ ,  
 $L$  – толщина фильтра.

Фильтр устанавливается за выходной щелью монохроматора в специальный держатель. Фильтры следует брать только за боковые (торцевые) стороны, не допуская загрязнений его полированной поверхности. При необходимости пыль с поверхности удаляют чистой мягкой кисточкой и, если поверхность осталась недостаточно чистой, протирают мягкой салфеткой, слегка смоченной этиловым спиртом, не допуская затекания спирта на его боковые стороны.

Для трех нейтральных фильтров: *НС-1* ( $\alpha_\lambda = 0,08 \text{ мм}^{-1}$ ,  $L = 2,55 \text{ мм}$ );  
*НС-2* ( $\alpha_\lambda = 0,23 \text{ мм}^{-1}$ ,  $L = 1,95 \text{ мм}$ );  
*НС-7* ( $\alpha_\lambda = 0,12 \text{ мм}^{-1}$ ,  $L = 1,5 \text{ мм}$ )

повторяют измерения, описанные в пункте 1. Из графиков определяют фототоки насыщения и находят их отношения  $I_{\phi 1} : I_{\phi 2} : I_{\phi 7}$ . С другой стороны, по формуле (10) можно рассчитать, во сколько раз изменилась интенсивность света, падающая на катод при замене одного фильтра другим. Это позволяет проверить выполнимость закона Столетова.

## Упражнение 2. Измерение задерживающих потенциалов

Перейти в режим “*Задерживающий потенциал*” и снять зависимость фототока  $I_\phi$  от величины потенциала на аноде. Напряжение изменять с помощью соответствующего потенциометра “*Регулировка потенциала*” через 0,02 В. Зависимости исследовать для излучения с различной длиной волны от 520 нм до 380 нм через 20 нм.

Строят графики для каждой спектральной линии, откладывая по оси абсцисс влево от начала координат потенциал в вольтах, а по оси ординат – отношение выходного сигнала, измеренного на нагрузочном сопротивлении, к сигналу при нулевом потенциале.

С помощью этих графиков для каждой длины волны определить задерживающие потенциалы, которым соответствуют точки пересечения

кривых с осью абсцисс. Используя полученные значения задерживающих потенциалов  $U_3$ , построить график зависимости  $U_3$  от частоты  $\nu$  света, откладывая  $\nu$  по оси абсцисс, а  $U_3$  – по оси ординат.

Частота связана с длиной волны спектральной линии соотношением:

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

где  $c$  – скорость света.

С помощью полученной зависимости можно рассчитать постоянную Планка и работу выхода электронов по формулам:

$$h = e(U'_3 - U''_3) / (\nu' - \nu''), \quad (11)$$

$$A_0 = e(U'_3 \nu' - U''_3 \nu'') / (\nu' - \nu''), \quad (12)$$

где  $U'_3$  и  $U''_3$  – задерживающие потенциалы для частот  $\nu'$  и  $\nu''$ .

Точка пересечения полученной зависимости  $U_3 = f(\nu)$  с осью абсцисс дает численное значение граничной частоты  $\nu_0$ .

На практике вместо частоты часто указывается длина волны монохроматического света, поэтому расчетные формулы можно представить в следующем виде:

$$h = e\lambda'\lambda''(U'_3 - U''_3) / c(\lambda' - \lambda''), \quad (13)$$

$$A_0 = hc / \lambda_0. \quad (14)$$

### ЗАДАНИЕ

1. В режиме ускоряющего потенциала для излучения света с длиной волны  $\lambda = 480$  нм исследовать зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  ( $U_{\text{вых}} = I_{\phi} R_n$ ) измеряемого вольтметром В7-23, при изменении потенциала анода  $U$ , измеряемого вольтметром В7-38, в пределах от (0÷10) В с шагом 1 В и от (10÷50) В с шагом 5 В.

Рассчитать и построить зависимость фототока от потенциала анода  $I_{\phi} = f(U)$ , так называемую вольт–амперную характеристику фотоэлемента, в прямом направлении  $R_n = 5$  МОм.

Определить фототок насыщения.

2. Используя нейтральные фильтры *НС-1*, *НС-2*, *НС-7*, получить выше описанным способом вольт–амперные характеристики фотоэлемента для света неизменного спектрального состава, но различной интенсивности.

Проверить выполнимость закона Столетова.

3. В режиме задерживающего потенциала исследовать зависимость выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от потенциала анода  $U$  с шагом 0,02 В до полного запираения фотоэлемента для различных спектральных линий от 520 нм до 380 нм с шагом 20 нм.

4. Построить графики  $U_{\text{вых}} / (U_{\text{вых}})_{\text{max}} = U_{\text{вых}}^{\text{отн}}$  от потенциала  $U$  ( $U_{\text{вых}}^{\text{отн}} = f(U)$ ) и для каждой длины определить задерживающий потенциал  $U_3$ .

5. Используя полученные значения задерживающего потенциала, построить график зависимости  $U_3$  от частоты  $\nu$ .

6. С помощью графика  $U_3 = f(\nu)$  и формул (11,12) определить *постоянную Планка*  $h$  и работу выхода  $A$  электрона из фотокатода.

### ВОПРОСЫ

1. Какие существуют виды фотоэффекта?
2. Сформулируйте основные законы внешнего фотоэффекта?
3. Какие основные характеристики фотокатода?

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. М.: Высшая школа, 1978. С. 360–371.
2. *Бутиков Е.И.* Оптика. М.: Высшая школа, 1986. С. 456–466.
3. Физический практикум / Под ред. Г.С. Кембровского. Мн.: Университетское, 1986. Работа № 45.

## СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица 1

### Длины волн и обозначения основных фраунгоферовых линий и показателей преломления для них

Элемент, излучающий линию	$\lambda$ , нм	Цвет линии	Обозначение линии (по Фраунгоферу)	Обозначение показателя преломления
К	766,5	Темно-красный	<i>A</i>	$n_A$
He	706,5	Красный	<i>b</i>	$n_b$
H	656,3	Красный	<i>C</i>	$n_C$
Na	589,3	Желтый	<i>D</i>	$n_D$
He	587,6	Желтый	<i>d</i>	$n_d$
Hg	546,1	Зеленый	<i>e</i>	$n_e$
H	486,1	Голубой	<i>F</i>	$n_F$
Hg	435,8	Синий	<i>g</i>	$n_g$
H	434,0	Синий	<i>G</i>	$n_G$
Hg	404,7	Фиолетовый	<i>h</i>	$n_h$

Таблица 2

### Показатели преломления жидкости (при 20 °С для линии D)

Жидкость	$n_D$	Жидкость	$n_D$
Анилин	1,586	Сероуглерод	1,630
Ацетон	1,359	Скипидар	1,470
Бензол	1,501	Спирт метиловый	1,331
Вода	1,333	Спирт этиловый	1,362
Глицерин	1,470	Толуол	1,487
Канадский бальзам	1,53	Углерод четырёххлористый	1,460
Метилен (хлористый)	1,424		
$\alpha$ -монобромнафталин	1,660	Фурфурол	1,526
Нитробензол	1,553	Хлороформ	1,446
Сероводород	1,885	Эфир этиловый	1,354

Таблица 3

### Показатели преломления некоторых стекол (для линии D)

Название	Марка	$n_D$	Название	Марка	$n_D$
Легкий крон	ЛК-3	1,4874	Легкий флинт	ЛФ-1	1,5406
	ЛК-4	1,4903		ЛФ-7	1,5783
Крон	К-1	1,4982	Флинт	Ф-1	1,6128
	К-2	1,5100		Ф-2	1,6031
	К-3	1,5163		Ф-3	1,6248
Баритоновый крон	БК-4	1,5302	Баритоновый флинт	БФ-1	1,5247
	БК-6	1,5399		БФ-16	1,6709
	БК-10	1,5688		БФ-28	1,6641
Тяжелый крон	ТК-1	1,5638	Тяжелый флинт	ТФ-1	1,6475
	ТК-7	1,6137		ТФ-5	1,7550
	ТК-21	1,6568		ТФ-10	1,8060



