

Лабораторная работа 5.02

Внешний фотоэффект

Исследование характеристик фотоэлемента с внешним фотоэффектом

Содержание

Введение	2
Экспериментальная установка	15
Проведение измерений	17
Обработка результатов	18
Контрольные вопросы	19
Литература	20
Приложение	21

Цели работы

1. Проверить на опыте справедливость законов фотоэффекта.
2. По вольт-амперной и спектральной характеристикам фотоэлемента определить порог фотоэффекта.

Задачи

1. Получить ВАХ фотоэлемента для различных источников света
2. Получить зависимость фототока насыщения от интенсивности источника
3. Определение красной границы фотоэффекта по зависимости $I(\lambda)$

Введение

Явление вырывания электронов из вещества при освещении его светом получило название фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта). Различают внешний и внутренний фотоэффект. При внешнем фотоэффекте электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду, в частности в вакуум. При внутреннем фотоэффекте оптически возбуждённые электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрической нейтральности последнего. Электроны, вырванные под действием света, называют фотоэлектронами.

Фотоэлектрическими свойствами обладают как металлы, так и диэлектрики, а также полупроводники и электролиты, причём необходимым, но не достаточным условием фотоэффекта является заметное поглощение используемого света в поверхностном слое освещаемого тела. Фотоэлектрический эффект с данного вещества сильно зависит от состояния его поверхности.

Для получения однозначных результатов исследование необходимо проводить в хорошем вакууме, предварительно тщательно очистив рабочую поверхность. Взаимодействуя с электроном веще-

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

Внешний фотоэффект в металлах. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

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

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

где $A_{\text{в}}$ – работа выхода электрона из металла, m_e масса электрона. Эта формула была получена Эйнштейном и носит его имя.

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

$$\vec{p}_э = \vec{p}_\Phi, \quad (2)$$

$$\vec{E}_\Phi + m_e c^2 = \vec{E}_э. \quad (3)$$

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

$$\vec{E}_э^2 = c\sqrt{p_э^2 + m_e c^2} \quad (4)$$

Получим явно абсурдный результат:

$$2E_\Phi m_e c^2 = 0$$

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

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

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

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

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

2. Существует низкочастотная граница фотоэффекта, т.е. такая частота ν_0 , ниже которой фотоэффект не наблюдается. Она зависит от состава облучаемого тела и состояния его поверхности. Величина ν_0 называется **порогом фотоэффекта**. Для металлов порог фотоэффекта равен работе выхода:

$$h\nu_0 = A_{\text{в}}. \quad (6)$$

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

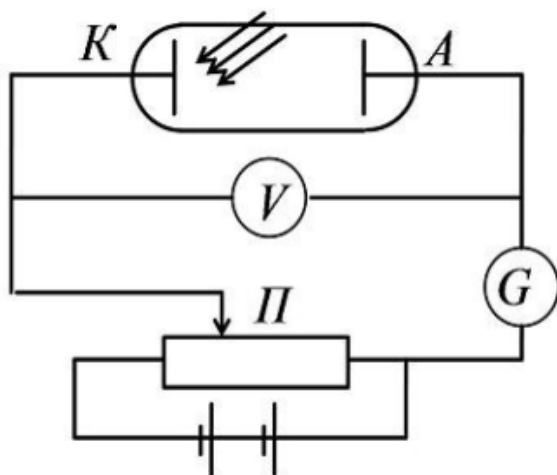


Рис. 1. Исследование внешнего фотоэффекта

стикой Ферми - Дирака, и при $T \neq 0$ электроны могут иметь энергию большую, чем энергия Ферми. Поэтому для определения ν_0 необходимо аппроксимировать зависимость $I(\nu)$ в области малых частот прямой и по её пересечению с осью частот ν_0 вычислять порог фотоэффекта $h\nu_0$. При рассмотрении фотоэффекта вводят понятие квантового выхода:

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

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

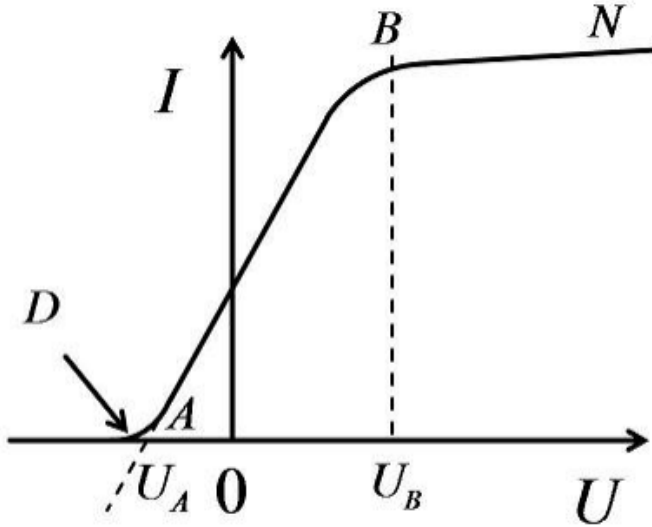


Рис. 2. Кривая зависимости фототока от напряжения

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

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

Она называется вольт-амперной характеристикой фотоэлемента. С ростом приложенного напряжения наступает момент, когда все элек-

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

Зависимость силы тока насыщения от приложенного напряжения

Фотоэлектрон, выбитый светом, может претерпеть столкновение с атомом внутри поверхностного слоя металла. Из-за этого он может замедлиться и даже не выйти наружу. Приложенное электрическое поле способствует ускорению замедлившихся электронов и выходу их из металла. Поэтому сила тока насыщения возрастает с ростом напряжения между анодом и катодом (участок N рис. 2).

Определение максимальной кинетической энергии электронов по вольт-амперной характеристике фотоэлемента

Для того, чтобы определить максимальную кинетическую энергию электронов при фотоэффекте, необходимо исключить влияние контактной разности потенциалов, весьма чувствительной к поверхностной обработке металлов и поэтому трудно контролируемой. Для этого на вольт-амперной характеристике фотоэлемента отмечают две точки: одну A , в которой ток обращается в нуль задерживающим полем, другую B , в которой начинается ток насыщения. Показания вольтметра, соответствующие этим точкам, обозначим через V_A и V_B . Это именно показания вольтметра, а разности потенциалов между анодом и катодом равны $V_A + V_C$ и $V_B + V_C$, где V_C – контактная разность потенциалов. Когда вольтметр показывает V_B , даже электроны с нулевой скоростью достигают анода, поэтому

$$0 = \frac{m_e V^2}{2} = -e(V_B + V_C), \quad (8)$$

Из (8) определяется контактная разность потенциалов

$$V_C = -V_B. \quad (9)$$

Когда вольтметр показывает V_A , электроны с максимальной скоростью начинают достигать анода. Приравнивая энергии электрона в точках A и B характеристики, получим с учётом (9)

$$\frac{m_e V_{max}^2}{2} = -e(V_A + V_C) = e(V_B - V_A) \quad (10)$$

Из (9) следует, что положение точки на вольтамперной характеристике фотоэлемента зависит только от контактной разности по-

тенциалов и не зависит от частоты падающего света. Напротив, положение точки А меняется с частотой, так как от частоты зависит максимальная энергия $m_e V_{max}^2/2$ определяет положение V_A см (10).

Зависимость тока насыщения от интенсивности падающего света

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

$$I_{\text{нас}} = C\Phi, \quad (11)$$

C – чувствительность фотоэлемента мкА/лм. Для белого света называют интегральной чувствительностью. Чувствительность является одной из важнейших характеристик фотоэлементов. Зависимость (11) справедлива в случае, если фотон получает энергию лишь от одного фотона. Такие процессы называются однофотонными. С изобретением лазеров были получены недостижимые прежде мощности световых пучков. Это дало возможность осуществить многофотонные процессы. При малых интенсивностях падающего света многофотонные процессы практически не наблюдаются, поэтому фототок насыщения линейно растёт с ростом интенсивности излучения.

Внешний фотоэффект в полупроводниках

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

$$h\nu = E_i + E_{\text{к.макс}}, \quad (12)$$

E_i - порог фотоэффекта. В самом простейшем случае

$$E_i = E_0 - E_{\text{Vмакс}},$$

где E_0 – уровень вакуума; $E_{\text{Vмакс}}$ – уровень максимума валентной зоны. Однако, для повышения чувствительности фотоэлементов и увеличения квантового выхода используют фотокатоды сложного состава, применяются различные обработки поверхности фотокатода, E_i определяется для каждого типа фотокатодов по-разному. Наибольшей чувствительностью в видимой и ближней ИК - областях спектра обладают фотокатоды с отрицательным электронным средством. Они представляют собой сильнолегированные полупроводники р-типа, работа выхода в которых снижена так, что уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости в объёме полупроводника. Такие фотокатоды изготавливаются на основе полупроводниковых соединений GaP, GaAs, InP и их твёрдых растворов, а также на основе Si. В процессе изготовления фотокатода поверхность полупроводника очищается прогревом в сверхвысоком вакууме, после чего работа выхода снижается адсорбцией цезия и кислорода. Наиболее высокую чувствительность имеют фотокатоды с отрицательным электронным средством, изготовленные на ос-

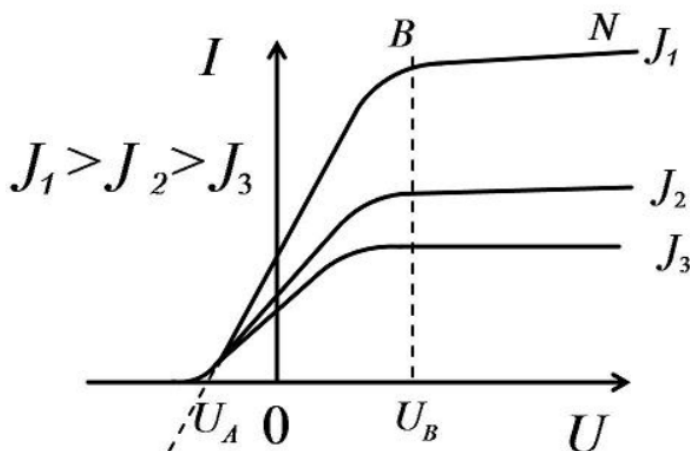


Рис. 3. Зависимость ВАХ фотоэлемента от интенсивности падающего света

нове совершенных полупроводниковых эпитаксиальных плёнок, обладающих большими диффузионными длинами.

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

Основными характеристиками фотоэлемента являются вольт–амперная, световая и спектральная. Вольт–амперные характеристики фотоэлемента. На рис 3 показаны вольтамперные характеристики фотоэлемента, полученные при одной частоте падающего света, но при различных его интенсивностях. В соответствии с (11) наблюдается рост силы тока насыщения при увеличении интенсивности падающего света.

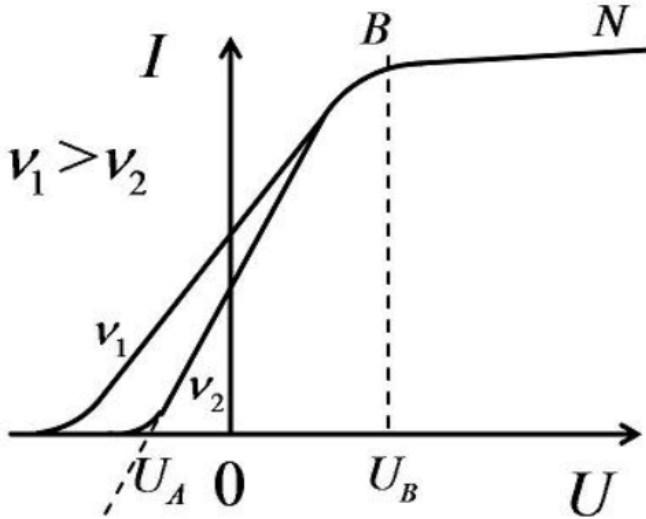


Рис. 4. Зависимость ВАХ фотоэлемента от частоты падающего света

На рис 4 показаны вольтамперные характеристики фотоэлемента, полученные при одинаковой интенсивности падающего света, но различных его частотах, при условии, что квантовый выход фотоэффекта не зависит от частоты падающего света. Рост энергии квантов падающего света приводит к увеличению величины задерживающего потенциала. См (9) и (10). Спектральной характеристикой фотоэлемента называется зависимость фототока насыщения фотоэлемента от частоты падающего света при неизменной величине потока монохроматического излучения разных длин волн:

$$I_{\text{нас}} = F(\nu)\Phi_{\nu=\text{const}}$$

Эти характеристики весьма разнообразны, определяются типом фотокатода и поляризацией падающего света. В настоящей работе, исследуя зависимость $I(\nu)$, требуется определить минимальную ча-

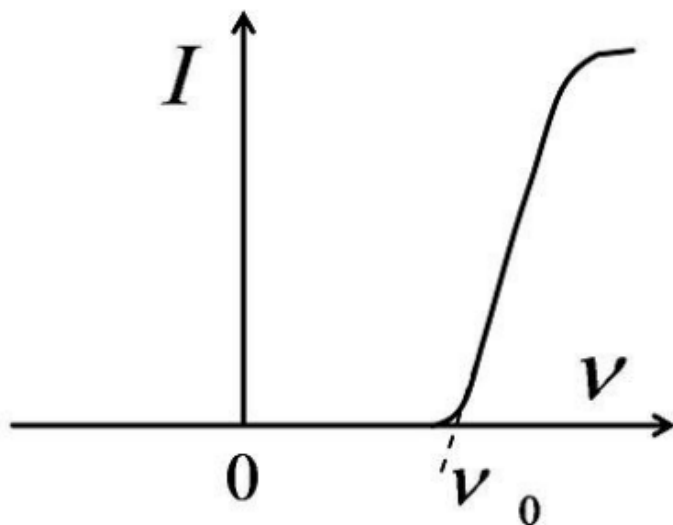


Рис. 5. Спектральная характеристика фотоэлемента

стоту, при которой возможен фотоэффект ν_0 и порог фотоэффекта ν_0 . Из-за теплового возбуждения электронов зависимость $I(\nu)$ отлична от нуля даже при частотах меньше ν_0 , однако, наклон кривой резко 18 изменяется. Поэтому для определения ν_0 необходимо аппроксимировать зависимость $I(\nu)$ в области малых частот прямой и по её пересечению с осью частот ν_0 вычислять порог фотоэффекта $h\nu_0$ (рис.5

Световой характеристикой фотоэлемента называется зависимость фототока насыщения от светового потока при неизменном его спектральном составе и постоянном напряжении: $I_{\text{нас}} = F(\Phi_\nu)_{U=\text{const}}$. В классической теории она определяется формулой (11) Однако, следует учитывать, что закон пропорциональности Столетова строго соблюдается лишь при условии, что ток насыщения образован толь-

ко электронами освобождёнными светом со светочувствительной поверхности тела. В современных приборах применяются различные способы усиления фототока. Это на несколько порядков увеличивает чувствительность, но может приводить к более сложной зависимости.

Экспериментальная установка

В качестве источников света в лабораторной установке используется набор светодиодов (кластер), излучающих в различных узких диапазонах длин волн. Эти диапазоны лежат в видимой и инфракрасной частях спектра. В качестве фотоэмиттера используется катод фотоэлемента (или полупрозрачный катод фотоэлектронного умножителя), изготовленный из полупроводника. Роль анода у фотоэлектронного умножителя играют соединённые между собой диноды. Фотоэлектроны, выбитые из фотокатода ускоряются электрическим полем и бомбардируют первый динод. Так как они обладают большой кинетической энергией, то один электрон может выбить из динода несколько электронов.

Это явление называется вторичной электронной эмиссией. В фотоумножителе ставится до 20 динодов, что позволяет получить до 1 миллиона электронов, вылетающих с последнего динода на один электрон, выбитый с катода. Электроны собираются на аноде и затем регистрируются с помощью усилителя тока. На рис. 6 представлена электрическая схема. В качестве источника ЭДС используется генератор регулируемого постоянного напряжения блока ИПС-1, работающий в диапазоне 0..20 В. Обратите внимание на правильность подключения полярности амперметра. Такое включение обеспечивает подавление сетевых наводок в измерительной цепи. (Есте-

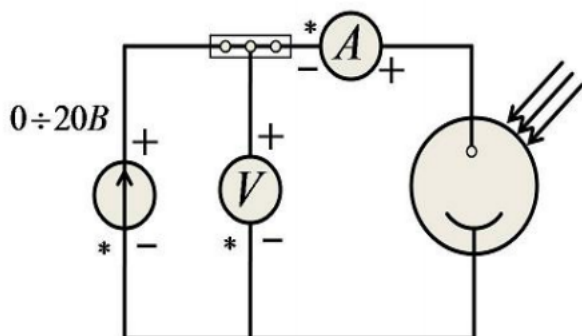


Рис. 6. Схема рабочей установки

ственно, знак “минус” перед показаниями амперметра при записи измерений учитывать не нужно.) При выполнении работы необходимо учитывать, что в лабораторной установке устанавливается не абсолютная, а относительная интенсивность излучения $\frac{J_1}{J_0}$, где J_0 некоторая константа, задаваемая измерительным прибором, её значение можно изменять с помощью регулятора.

Проведение измерений

1. Соберите схему 6.

2. Снимите семейство вольтамперных характеристик

$I = F(U)_{\frac{J_1}{J_0}=const, \lambda=const}$. Установите регулятор $\frac{J_1}{J_0}$ в диапазоне 1,1-1,2; выберите режим измерения амперметра 20 мкА, режим измерения вольтметра – 200 В.

Необходимо исследовать фототок в области ускоряющих напряжений с шагом 1 В до 12 В, а в области тормозящих напряжений (поменяйте полярность подключения источника) с шагом 0,5 В до тех пор, пока фототок не станет равным нулю. Чтобы исключить влияние усилителя, необходимо снять не только световую характеристику, но и темновую при $\frac{J_1}{J_0} = 0,01$. Разность светового и темнового токов даст истинное значение фототока. Рекомендуемые значения источников $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. Для **каждой из длин волны** заполните таблицу 1.

3. Снимите семейство вольтамперных характеристик

$I = F(\frac{J_1}{J_0})_{U=const, \lambda=const}$, выбрав U в области тока насыщения (от 9 до 22В). Измерения проводите для двух длин волн. Чтобы исключить влияние усилителя, необходимо снять не только световую характеристику, но и темновой ток при $\frac{J_1}{J_0} = 0,01$. Разность светового и темнового токов даст истинное значение фототока. Измерения проводите для двух длин волн. Для каждой длины волны заполните таблицу 2.

4. Снимите семейство спектральных характеристик

$I = F(\lambda)_{U=const, \frac{J_1}{J_0}=const}$, используя разные фотодиоды. При этом напряжение выберите в области насыщения, как в пункте 3. Вычислите частоту для каждого источника излучения. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Обработка результатов

1. По данным из таблицы 1 постройте графики полученных зависимостей, укажите на них частоты источников излучения. По вольтамперной характеристике определите максимальную энергию фотоэлектронов (см. (9) и (10)) и порог фотоэффекта. Графики рекомендуется строить на одной координатной плоскости.
2. По данным из таблицы 2 постройте графики полученных зависимостей на одной координатной плоскости. Сделайте вывод о характере полученных зависимостей.
3. По данным из таблицы 3 постройте графики полученной зависимости. По спектральной характеристике оцените порог фотоэффекта. Определите работу выхода и материал из которого сделан фотокатод.

Контрольные вопросы

1. Что такое внешний фотоэффект?
2. Изобразите графички ВАХ фотоэффекта?
3. Перечислите законы фотоэффекта?
4. Что такое работа выхода?
5. Чему равна энергия фотона с длиной волны 500 нм?
6. Что такое ток насыщения?
7. Как зависит величина тока насыщения от интенсивности источника?
8. Что такое красная граница фотоэффекта?
9. Как по ВАХ определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов?
10. Чему равно отношение энергии фотона к частоте фотона?

Литература

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

Приложение

Таблица 1: $\frac{J}{J_0} = \underline{\hspace{2cm}}$, $\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$

Измерить			Вычислить	Измерить			Вычислить
U прямое, В	$I_{\text{свет}}$, мкА	$I_{\text{темн}}$, мкА	$I_{\text{фото}}$, мкА	U обратное, В	$I_{\text{свет}}$, мкА	$I_{\text{темн}}$, мкА	$I_{\text{фото}}$, мкА
0				0			
1				0,5			
2				1			
3				1,5			
4				2			
5				2,5			
6				3			
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Таблица 2: $U = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_{\text{темн}} = \underline{\hspace{2cm}}$, $\lambda = \underline{\hspace{2cm}}$

Измерить		Вычислить
J/J_0	$I_{\text{свет}}$, мкА	$I_{\text{фото}}$, мкА
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1,0		
1,1		
1,2		

Таблица 3: $\frac{J}{J_0} = \underline{\hspace{2cm}}$, $U = \underline{\hspace{2cm}}$

Измерить	λ , нм								
	$I_{\text{свет}}$, мкА								
	$I_{\text{темн}}$, мкА								
Вычислить	ν , с ⁻¹								
	$I_{\text{темн}}$, мкА								