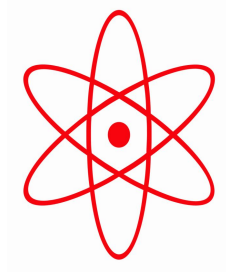


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



**ФКЛ-11**

**ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕМЕНТА.**

Тула, 2013 г

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТ - АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЭЛЕМЕНТА.

Цель работы: изучить явление внешнего фотоэффекта, построить вольт - амперные характеристики фотоэлемента при различной частоте освещающего света, оценить численно постоянную Планка.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Квантовые свойства электромагнитного излучения.

**Тепловое излучение.** Электромагнитное излучение, испускаемое источником, уносит с собой энергию. В зависимости от природы источника различают и виды излучения. Не будем их перечислять, поскольку нас интересует только одно излучение - тепловое, обусловленное нагреванием, т. е. подводом теплоты. Это излучение занимает особое место среди всех других видов излучения. В отличие от них тепловое излучение - это единственный вид излучения, которое может находиться в термодинамическом равновесии с телами.

Чтобы составить себе представление о характере теплового излучения, рассмотрим несколько тел, нагретых до различной температуры и помещенных в замкнутую полость, стенки которой полностью отражают падающее на них излучение. Опыт показывает, что такая система, в конечном счете, приходит в состояние теплового равновесия, при котором температура всех тел становится одинаковой. Так происходит и в том случае, когда между телами в полости будет вакуум, и тела могут обмениваться энергией только путем испускания и поглощения электромагнитных волн. За любой промежуток времени испускаемая телами энергия становится равной поглощаемой энергии, и плотность энергии излучения в пространстве между телами достигает определенной величины, соответствующей установившейся температуре. Такое состояние излучения в полости остается неизменным во времени. Оно находится, как уже было сказано, в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, и поэтому его называют равновесным или черным излучением,

Оказывается, плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав совершенно не зависят от размеров и формы полости и от свойств находящихся в ней тел. Характер равновесного излучения зависит только от температуры. Поэтому можно говорить о температуре самого излучения, считая её равной температуре тел, с которыми оно находится в тепловом равновесии. Равновесное излучение однородно, изотропно и неполяризовано.

Для экспериментального изучения спектрального состава равновесного излучения проделывают небольшое отверстие в стенке полости, поддерживаемой при определенной температуре. Выходящее наружу через отверстие излучение обладает таким же спектральным составом, что и внутри полости.

Распределение энергии по длинам волн  $\lambda$  или по частотам характеризуют спектральной плотностью излучения, так что величина  $u_\lambda d\lambda$  дает энергию единицы объема излучения с длинами волн в интервале  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ , а  $u_\omega d\omega$  — с частотами в интервале  $(\omega, \omega + d\omega)$ .

В случае равновесного излучения спектральная плотность  $u_\lambda$  или  $u_\omega$  представляет собой универсальную функцию только частоты (или длины волн) и температуры  $T$ . Основная проблема теории теплового излучения и заключалась в нахождении этой функции.

Все попытки решить данную проблему с помощью классических представлений потерпели неудачу. Задача о равновесии излучения с простейшим примером излучающего тела — линейным гармоническим осциллятором приводила к абсурдному результату. Проблема теплового излучения зашла в тупик...

Открытие постоянной Планка. Это произошло в 1900 г. Планк получил формулу для спектральной плотности  $u_\omega d\omega$  теплового излучения, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными. Однако для этого ему пришлось ввести гипотезу, коренным образом противоречащую представлениям классической физики. Планк предположил, что энергия осциллятора может принимать не любые, а только вполне определенные дискретные значения  $\varepsilon_n$ , пропорциональные некоторой элементарной порции — кванту энергии  $\varepsilon_0$ . В связи с этим испускание и поглощение электромагнитного излучения осциллятором (веществом) осуществляется не непрерывно, а дискретно в виде отдельных квантов, величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon_0 = \hbar\omega, \quad (1.1)$$

где коэффициент  $\hbar$  получил впоследствии название постоянной Планка. Определенное из опыта значение  $\hbar$  равно:

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Следует отметить, что, вообще говоря, постоянной Планка следует называть величину  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ , а  $\hbar$  правильнее называть приведенной постоянной Планка. Т. е.  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ .

В физике есть величина, имеющая размерность «энергия  $\times$  время». Ее называют действием. Постоянная Планка имеет ту же размерность, поэтому ее иногда называют квантом действия.

Постоянная Планка была определена экспериментально не только с помощью законов теплового излучения, но и другими, более прямыми и точными методами. Значения  $\hbar$ , полученные на основе разных физических явлений (тепловое излучение, фотоэффект, коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра и др.), хорошо согласуются друг с другом.

Постоянная Планка — это важнейшая универсальная константа, играющая в квантовой физике такую же фундаментальную роль, как скорость света в теории относительности. Открытие постоянной Планка и связанной с ней идеи квантования ознаменовало рождение новой, квантовой теории. Физику, как науку, стали подразделять на классическую (нерелятивистскую и релятивистскую) и квантовую, неразрывно связанную с фундаментальной константой  $\hbar$ .

Итак, Планк доказал, что правильную формулу для спектральной плотности энергии теплового излучения можно получить только в том случае, если допустить квантование энергии, противоречащее классическим представлениям.

Трудно было примириться с таким отказом от классических представлений, и Планк, совершив великое открытие, еще в течение нескольких лет пытался понять квантование энергии с позиций классической физики. Безуспешность этих попыток привела его к окончательному выводу, что в рамках классической теории природу теплового излучения понять невозможно.

## Фотоэффект

**Световые кванты.** Квантовая гипотеза Планка была оценена по достоинству и получила дальнейшее развитие, прежде всего в работах Эйнштейна. Он первый указал на то, что кроме теплового излучения существуют и другие явления, которые можно объяснить на основе квантовой гипотезы.

В 1905 г. Эйнштейн выдвинул гипотезу световых квантов. Он предположил, что дискретный характер присущ не только процессам испускания и поглощения света, но и самому свету. Гипотеза о корпускулярных свойствах света позволила объяснить результаты экспериментов по фотоэффекту, совершенно непонятные с позиций классической электромагнитной теории. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Фотоэлектрическим эффектом, или фотоэффектом называют испускание электронов веществом под действием света. Исследование закономерностей фотоэффекта проводят на установке, схематически показанной на рис. 1.1. При освещении катода К монохроматическим светом через кварцевое окошко (пропускающее и ультрафиолетовые лучи) из катода вырываются фотоэлектроны, и в цепи возникает фототок, регистрируемый гальванометром G. График за-

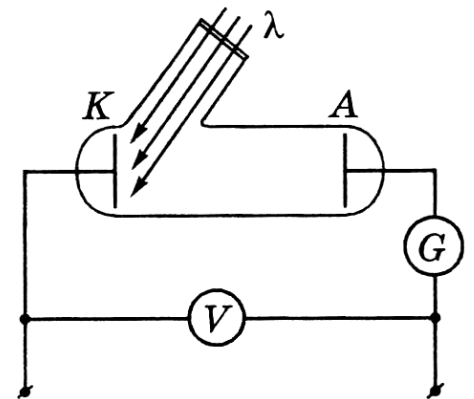


Рис. 1.1

зависимости фототока  $I$  от приложенного внешнего напряжения  $V$  между катодом и анодом А представлен на рис. 1.2. Этот график называют вольт – амперной характеристикой фотоэлемента, т. е. того прибора, в котором наблюдают фотоэффект. Для этой зависимости характерно наличие участка тока насыщения  $I_{\text{нас}}$ , когда все электроны, вырванные светом с поверхности катода К, попадают на анод А, и другого участка, на котором фототок уменьшается до нуля при некотором внешнем задерживающем напряжении  $V_1$  (на рис. 1.2  $V_1 < 0$ ).

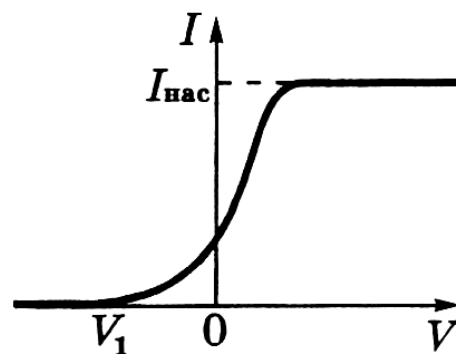


Рис. 1.2

Многочисленными экспериментами были установлены три основные закономерности фотоэффекта:

1. Фототок насыщения пропорционален падающему световому потоку (при одном и том же спектральном составе). Это значит, что число электронов, вырванных светом ежесекундно, пропорционально мощности падающего света. Впервые это было установлено А.Г. Столетовым (1889).

2. Для каждого металла существует максимальная длина волны света (или минимальная частота  $\omega_k$ ), при которой еще происходит вырывание электронов. Если длина волны превышает  $\lambda_k$  — так называемую красную границу фотоэффекта, — то испускание фотоэлектронов отсутствует даже при достаточно большой интенсивности падающего света. Следует отметить, что при очень больших интенсивностях излучения красная граница фотоэффекта исчезает (сфокусированное лазерное излучение).

3. Максимальная кинетическая энергия  $K$  фотоэлектронов линейно зависит от частоты  $\omega$  облучающего света (причем  $K_{\text{макс}}$  растет с увеличением  $\omega$ ) и не зависит от интенсивности света. Заметим, что максимальное значение кинетической энергии фотоэлектронов определяют по так называемой задерживающей разности потенциалов (этот вопрос рассмотрен ниже и именно по этой методике в данной работе определяется постоянная Планка).

С точки зрения классических волновых представлений сам факт вырывания электронов из металла неудивителен, так как падающая электромагнитная волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле. Электрон, поглощая энергию, может накопить ее в количестве, достаточном для преодоления потенциального барьера, удерживающего электрон в металле, т. е. для совершения работы выхода. Если это так, то энергия фотоэлектронов должна зависеть от интенсивности света. Увеличение же интенсивности света приводит лишь к возрастанию числа фотоэлектронов.

Более того, резкое расхождение теории с опытом возникает при очень малой интенсивности света. По классической волновой теории фотоэффект в этих условиях должен протекать с заметным запаздыванием, поскольку требуется конечное время для накопления необходимой энергии. Однако опыт показывает, что фотоэффект появляется практически мгновенно, т.е. одно-

временно с началом освещения (промежуток времени между началом освещения и появлением фототока не превышает  $10^{-9}$  с).

Все трудности отпадают, если фотоэффект рассматривать на основе гипотезы Эйнштейна о световых квантах. В соответствии с этой гипотезой падающее монохроматическое излучение рассматривается как поток световых квантов — фотонов, энергия  $\varepsilon$  которых связана с частотой  $\omega$  простым соотношением:

$$\varepsilon = \hbar\omega \quad (1.2)$$

При поглощении фотона его энергия целиком передается одному электрону. Таким образом, электрон приобретает кинетическую энергию не постепенно, а мгновенно. Этим и объясняется безынерционность фотоэффекта.

**Формула Эйнштейна.** Полученная электроном энергия  $\hbar\omega$  частично затрачивается на освобождение из металла. А остальная часть переходит в кинетическую энергию вылетевшего из металла фотоэлектрона. Минимальную энергию, необходимую для освобождения электрона из металла, т. е. для преодоления потенциального барьера, называют работой выхода  $A$ . Следовательно, для фотоэлектронов с максимальной кинетической энергией  $K_{\text{макс}}$  закон сохранения энергии в элементарном акте поглощения фотона можно записать так:

$$\hbar\omega = A + K_{\text{макс.}} \quad (1.3)$$

Эта формула впервые была получена Эйнштейном и носит его имя — формула Эйнштейна.

Вернемся к формуле Эйнштейна (1.3). Из нее автоматически вытекают следующие закономерности, находящиеся в строгом согласии с опытом.

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности. Интенсивность обуславливает только количество фотоэлектронов, но совершенно не влияет на их максимальную кинетическую энергию. Кстати отметим, что наклон прямой на графике  $K_{\text{макс}}(\omega)$  как видно из формулы (1.3), т. е.

$\frac{dK_{\text{макс.}}}{d\omega} = \hbar$ . На этом основан наш метод определения постоянной Планка.

2. Существует низкочастотная граница — порог фотоэффекта, т.е. такая частота  $\omega_0$ , ниже которой фотоэффект отсутствует. Эта частота согласно (1.3) соответствует равенству  $\hbar\omega = A$ . Если  $\omega < \omega_0$ , то энергии фотона не хватает, чтобы электрон мог преодолеть потенциальный барьер «высотой»  $A$  и выбраться из металла. На этом основан один из методов определения работы выхода. Однако следует заметить, что работа выхода может быть определена экспериментально независимо от фотоэффекта, например, с помощью исследования термоэлектронной эмиссии. Эта работа зависит от ряда факторов и имеет порядок нескольких эВ.

Частоте  $\omega_0$  соответствует красная граница фотоэффекта, длина волны которой  $\lambda_k = \frac{2\pi c}{\omega_0}$ . Наличие такой границы совершенно непонятно с волновой точки зрения. Значения  $\lambda_k$  для некоторых металлов приведены в табл. 1.1:

Таблица 1.1

Металл	Cs	Na	Zn	Ag	Pt
$\lambda_k$ , мкм	0,60	0,53	0,33	0,28	0,20

В справочной литературе наблюдается довольно большой разброс в значениях  $\lambda_k$  для одних и тех же металлов. Поэтому к значениям  $\lambda_k$  в табл. 1.1 следует относиться с определенной осторожностью.

### Экспериментальные исследования

Трудности эксперимента. Необходимо заметить, что получение точных результатов в данной работе сильно затрудняют два обстоятельства:

1) экспериментальная кривая  $I(V)$  в области  $V_1$  (см. рис. 1.2) подходит к оси  $V$  практически асимптотически, вследствие чего определение  $V_1$  довольно неопределенно;

2) всю кривую  $I(V)$  смещает (влево или вправо) наличие так называемой контактной разности потенциалов, т. е. разности потенциалов, которая возникает между двумя различными металлами (а это приходится, как правило, делать, поскольку катод  $K$  и анод  $A$  изготовляют по необходимости из различных металлов). Причем известно, что контактная разность потенциалов между катодом и анодом не зависит от природы проводников, их соединяющих.

Неизбежное присутствие контактной разности потенциалов и трудность ее учета, а также ряд других экспериментальных затруднений и источников ошибок — все это привело к тому, что достаточно точное подтверждение уравнения Эйнштейна (1.3) было получено не сразу.

Это уравнение было подтверждено в тщательных опытах Милликена (1916) и последующих исследователей, создавших установку, в которой катод  $K$  имел форму небольшого шарика, помещенного в центр сферической обкладки — анода  $A$  (рис. 1.3). При такой конфигурации

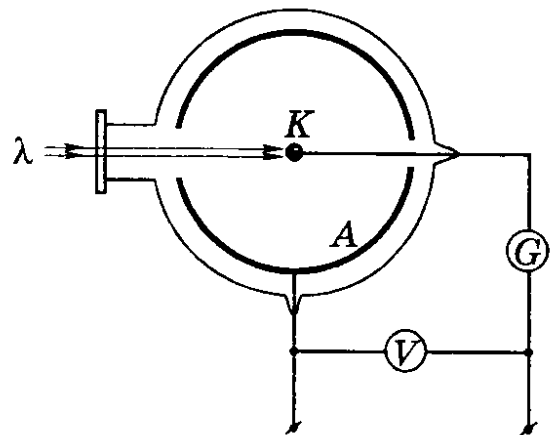


Рис. 1.3

практически все электроны, вырванные светом из катода, попадают на анод и в отсутствие ускоряющей разности потенциалов. Кроме того, характеристика такого фотоэлемента  $I(V)$  спадает к нулю достаточно круто, и значение  $V_1$  (см. рис. 1.2) может быть определено с хорошей точностью.

**Задерживающая разность потенциалов.** Именно эта величина позволяет задержать фотоэлектроны, вылетающие из катода с максимальной кинетической энергией  $K_{\text{макс}}$ , что и приводит к прекращению фототока. Если бы катод и анод фотоэлемента были изготовлены из одного и того же металла, то контактная разность потенциалов отсутствовала бы, и определение задерживающей разности потенциалов сводилось бы просто к измерению внешнего задерживающего напряжения, т. е. показаниям вольтметра  $V_3 < 0$  (рис. 1.4). Действительно, при  $V = 0$  все фотоэлектроны вне зависимости от начальной скорости достигали бы анода, и мы уже имели бы ток насыщения.

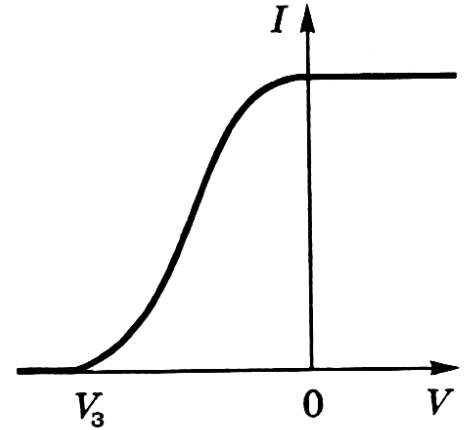


Рис. 1.4

Определение задерживающей разности потенциалов усложняется, если катод и анод изготовлены из разных металлов (что обычно и бывает). В этом случае начинает играть заметную роль контактная разность потенциалов. Если она есть и, например, такова, что тормозит вылетающие из катода фотоэлектроны, то приходится прикладывать внешнее напряжение ускоряющее напряжение  $V$  (измеряемое вольтметром), чтобы выйти на насыщение. И если это напряжение таково, что компенсирует тормозящую контактную разность потенциалов, то начало горизонтального участка (тока насыщения) — точка 2 на рис. 1.5 — сдвинется вправо, в сторону положительных значений показания вольтметра  $V$ .

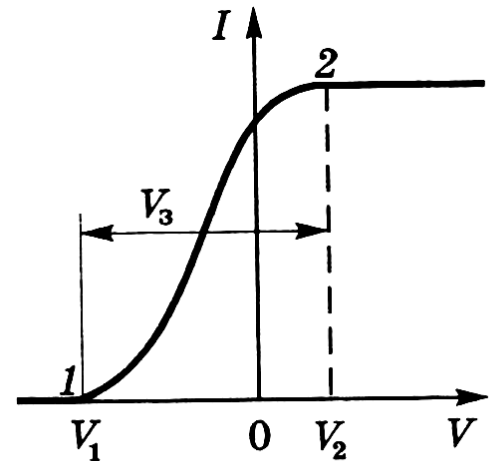


Рис. 1.5

Таким образом, по модулю, задерживающая разность потенциалов  $V_3$  будет равна:

$$V_3 = V_2 - V_1 \quad (1.4)$$

как показано на рис. 1.5, где  $V_1 < 0$  (знаки  $V_1$  и  $V_2$  учитываются). Заметим, что, вообще говоря,  $V_1$  есть величина алгебраическая, она может иметь любой знак или равняться нулю.

Если контактная разность потенциалов не тормозит, а ускоряет фото-



электроны, т.е. имеет противоположный знак, то характеристика фотоэлемента  $I(V)$  вместе с точкой 2 сместится влево. При этом выражение (1.4) для  $V_3$  остается, как легко убедиться, прежним, только в нем оба показания вольтметра ( $V_2$  и  $V_1$ ) могут оказаться отрицательными, но их разность по-прежнему будет по модулю положительной и равной  $V_3$ .

Итак, определив  $V_3$ , мы тем самым находим максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов —  $K_{\text{макс}}$  в формуле Эйнштейна (1.3):

$$K_{\text{макс.}} = eV_3 = e(V_2 - V_1) \quad (1.5)$$

**Замечание 1.** Отметим, что положение точки 2 на рис. 1.5, т. е. показание вольтметра  $V = V_2$ , зависит только от контактной разности потенциалов, положение же точки 1, т. е. показание  $V_1$  вольтметра — от частоты  $\omega_0$  падающего света. Значит, и задерживающая разность потенциалов  $V_3$  тоже зависит от  $\omega_0$ .

Если построить экспериментальный график зависимости  $K_{\text{макс.}}(\omega_0)$ , то получается прямая (рис. 1.6), что является убедительным подтверждением формулы Эйнштейна (1.3).

Заметим, что точка пересечения прямой с осью абсцисс определяет частоту  $\omega_0$  соответствующую красной границе фотоэффекта, а точка пересечения продолжения прямой с осью ординат - работу выхода  $A$ . Если же на оси ординат откладывать  $V_1$ ; (показание вольтметра, при котором фототок обращается в нуль), то отмеченные две точки не будут соответствовать  $\omega_0$  и  $A$  (из-за наличия контактной разности потенциалов). К сожалению, это часто не учитывают, и полученные результаты сильно отличаются от действительных значений.

**Однако в данной работе мы ставим задачу как можно точнее определить именно постоянную Планка.** Точное же определение точки насыщения (точки 2 на рис. 1.5) сильно затруднено, и как следствие, значение  $V_3 = V_2 - V_1$  остается достаточно неопределённым. Поэтому поступим следующим образом. Перепишем (1.3) с учетом (1.5):

$$e(V_2 - V_1) = h\nu - A \quad (1.6)$$

Учтём замечание 1 и т.к.  $V_2 = \text{const}$  (материал катода и анода не изменяются), то можно записать:

$$|eV_1| = h\nu - (A + eV_2) \quad (1.7)$$

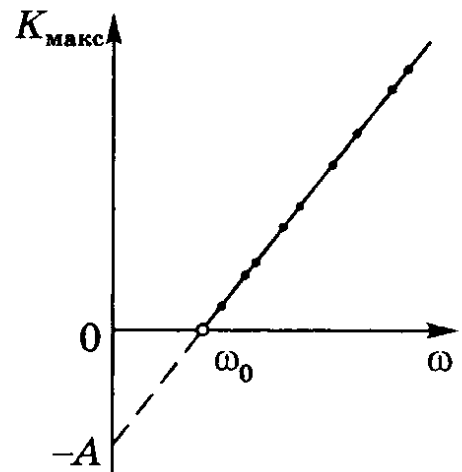


Рис. 1.6

Таким образом, пришли к уравнению прямой:

$$|V_1|(v) = Bv + A_0, \quad (1.8)$$

из которого численным способом находя коэффициент наклона  $B = \frac{h}{|e|}$ ,

где  $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл - модуль заряда электрона получаем искомое значение постоянной Планка:

$$h = B \cdot |e| \quad (1.9)$$

Коэффициент  $A_0$  в данном случае нас мало интересует. В то же время уравнение (1.7) не позволяет точно определить ни работу выхода электронов из металла, ни красную границу фотоэффекта  $\nu_0$ , т. к. по-прежнему остаётся неопределенной величина контактной разности потенциалов. **Далее для уяснения сути явления мы будем называть показания вольтметра  $V_1 \approx U_3$ , хотя это не совсем верно.**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Методика измерений. Особенности вольт-амперной характеристики.

На рис.2.1 показан фрагмент вольт-амперной характеристики при обратной полярности, получаемой в данной работе. В отличие от упрощенных характеристик на рис.1.2; 1.4; 1.5, реальная имеет следующую особенность. При увеличении напряжения ток уменьшается, а достигнув нуля, изменяет направление, и вскоре устанавливается небольшое, почти постоянное значение 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.2.2а, представляет собой алгебраическую сумму вольт-амперных характеристик основного (рис.2.2б) и побочного (рис.2.2в) фотоэлементов. Отсюда следует, что запирающее напряжение  $U_3$  (показания вольтметра  $V_1$ ) следует определять не в точке  $I=0$ , а там, где кривая переходит в участок со слабым наклоном (см. рис. 2.1 и 2.2). Как видно из рис.2.1, для нахождения  $U$  необходимо тщательно измерить и построить график ВАХ в области обратного тока.

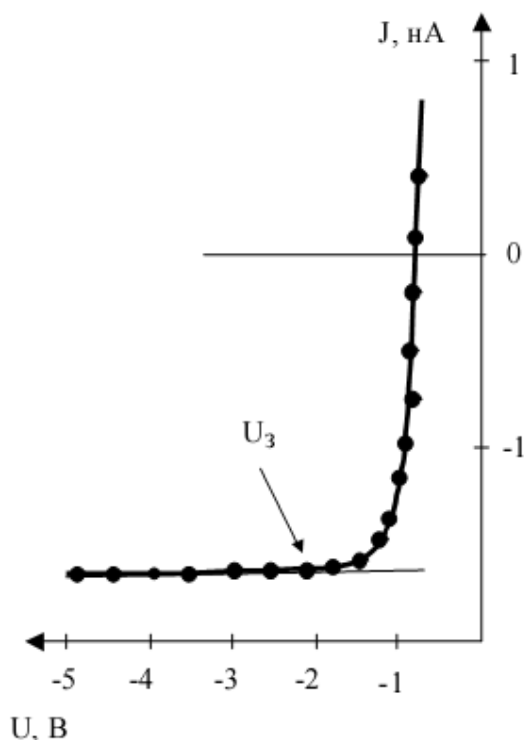


Рис.2.1

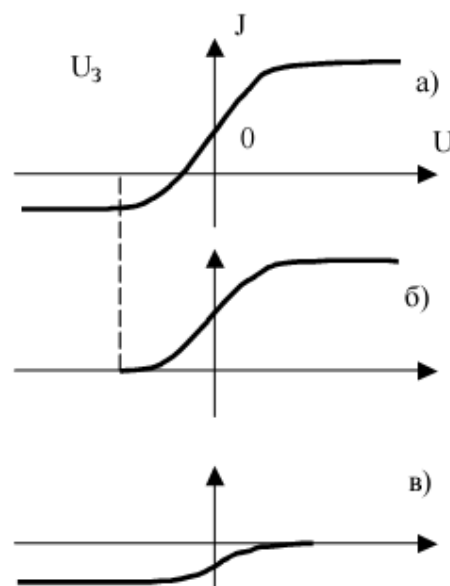


Рис.2.2

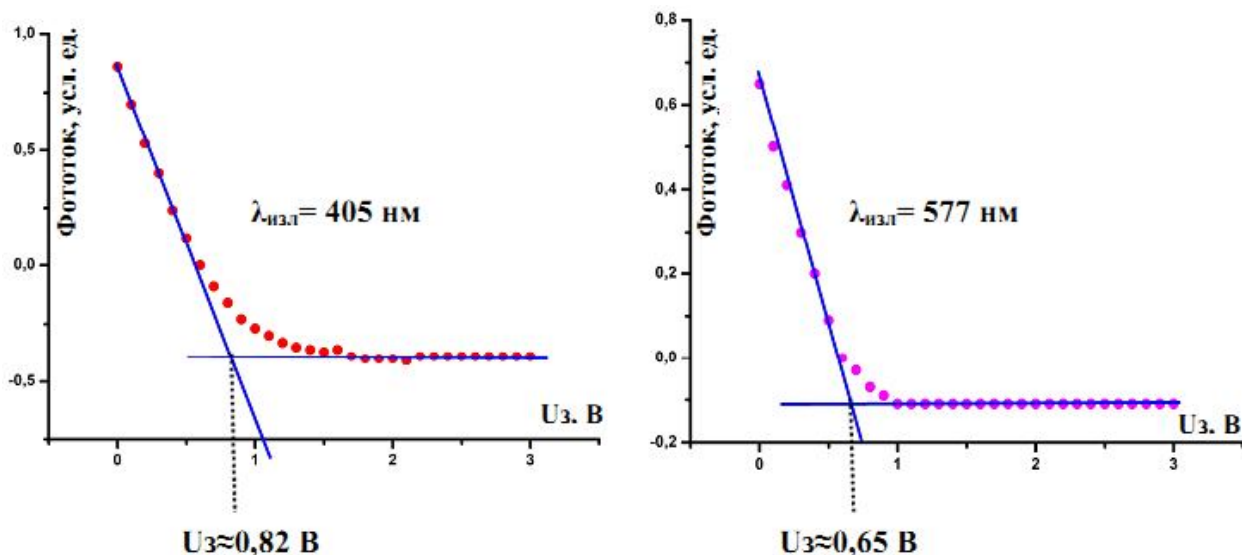


Рис.2.3. Определение задерживающего потенциала на лабораторной установке ФКЛ-11 при двух различных длинах волн, выделенных монохроматором МУМ-01.

Так как величина фототока при увеличении задерживающего потенциала достаточно плавно переходит в кривую, практически параллельную оси абсцисс (оси  $U_z$ ), то точное определение запирающего напряжения оказывается затруднено (рис. 2.3). Поэтому для определения  $V_1 \approx U_z$  для данной длины волны предлагается следующая методика. ВАХ фотоэлемента в области отрицательных напряжений на аноде следует аппроксимировать двумя прямыми линиями, как это показано на рис. 2.3: первая линия аппроксимирует точки до момента перехода ВАХ в прямую со слабым наклоном; вторая линия аппроксимирует точки, лежащие в области слабого наклона ВАХ, практически параллельно оси абсцисс. Абсциссу точки пересечения двух этих линий с достаточной степенью точности можно принять за напряжение задержки  $V_1 \approx U_z$  при данной длине волны.

### Приборы и оборудование Учебный Модуль ФКЛ-11.

Основные блоки установки – блок облучения, содержащий лампу ДРСк-125 в защитном кожухе, ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ (источник питания для лампы); фотоприемник, содержащий фотоэлемент СЦВ-3; блок измерения, содержащий специально настроенную чувствительную схему усиления слабых фототоков УФЭ-500; два универсальных мультиметра для измерения напряжения на фотоэлементе и фототока.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.4. Световой поток от источника (1) с помощью линзы-конденсора (2) собирается на входной щели монохроматора МУМ-01 (3), который выделяет из него узкий спектральный интервал. Полученное таким образом излучение падает на катод фотоэлемента (4), который помещен в защитный кожух и жестко закреплен у бокового выхода монохроматора. Световой поток, падающий на фотоэлемент, можно изменять с помощью установки на вход или выход монохроматора сменных щелей из комплекта. Фототок, возникающий в

цепи фотоэлемента, особенно при подаче на анод задерживающего потенциала, весьма мал (порядка  $10^{-10} \div 10^{-6}$  мкА), поэтому для его регистрации используется высокочувствительный усилитель постоянного тока DA1. Для уменьшения помех усилитель находится в защитном корпусе в непосредственной близости от фотоэлемента и соединяется с фотоприемником при помощи экранированных проводов. В основу работы усилителя положен принцип измерения слабых фототоков по величине падения напряжения на известном входном сопротивлении  $R1=100$  кОм прибора и усилении этого напряжения в  $K \approx 200$  раз. Перед началом работы необходимо производить калибровку усилителя «УФЭ-500». Для этого, в отсутствии внешнего напряжения на аноде ( $U_a=0,00$  В), измеряемого вольтметром PV1 и отсутствии светового потока, падающего на фотоэлемент, ручками управления «УСТАНОВКА НУЛЯ ГРУБО, ПЛАВНО» добиваются показаний  $0,00 \pm 0,02$  В на вольтметре PV2, показания которого пропорциональны фототоку. Резистор Кусил, регулирующий коэффициент усиления схемы, настроен наилучшим образом на  $K=200$  (коэффициент усиления фотоусилителя в данном приборе), находится внутри устройства и его регулировка не допускается.

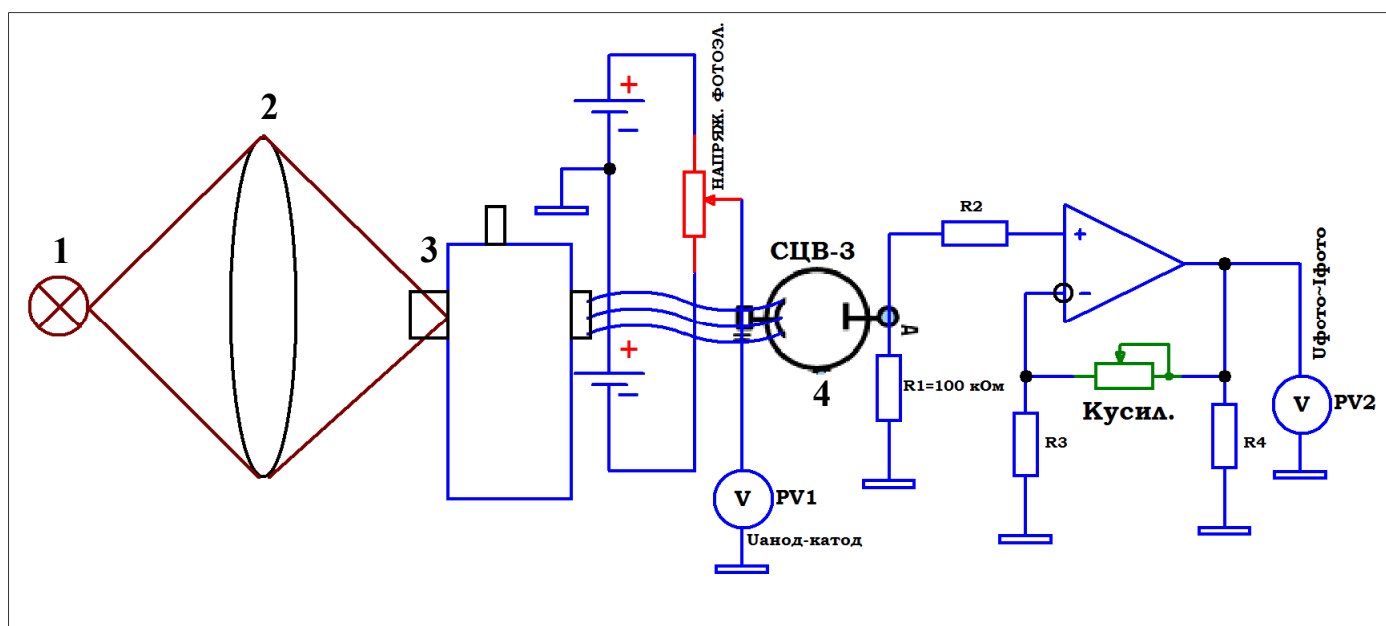


Рис.2.4. Принципиальная блок-схема установки ФКЛ-11

В качестве источника света в работе используется газоразрядная ртутная лампа ДРСк-125, имеющая интенсивный линейчатый спектр ртути как в видимой, так и в УФ областях спектра.

Для регистрации вольтамперных характеристик фотоэлемента применяется специальный электронный блок УФЭ-500. В состав этого блока входит источник постоянного напряжения, который позволяет изменять потенциал анода от 0 до +12 В в прямом и от 0 до -3 В в обратном направлении.

В данной работе используется вакуумный фотоэлемент типа СЦВ-3 с сурьмяно-цезиевым катодом. Это химическое соединение  $Cs_3Sb$ , обладает отчетливо выраженными полупроводниковыми свойствами. Небольшое на-

личие вакансий цезия в решетке, сообщает полупроводнику дырочный тип проводимости. Ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  равна примерно 1,66 эВ. Красная граница фотоэффекта  $\lambda_0 \approx 620-750$  нм. В максимуме спектральной характеристики ( $\lambda \approx 420-450$  нм), квантовый выход фотоэмиссии достигает  $0,25 \frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}$  (число вылетевших из образца электронов в расчете на один фотон света).

### Монохроматор МУМ-01

Свет от ртутной лампы поступает на вход (объектив) 2.5 монохроматора МУМ-01 (рис.2.5). Монохроматор имеет сферическую дифракционную решетку 2.6, боковой выход 2.3 (с жестко укрепленным фотоприемником), задний выход 2.1 (для визуального наблюдения спектра в видимой области), механизм 2.8 поворота решетки и связанный с ним механизм 2.7 отсчета длины волны излучения с приводом от вала с ручкой 2.9. на входе и на выходах имеется возможность устанавливать сменные щели. Излучение, вошедшее во входную щель 2.5, направляется на дифракционную решетку 2.6 неподвижным зеркалом 2.4. Длина волны излучения, отраженного от решетки в направлении выхода монохроматора зависит от ориентации решетки. Поворот решетки осуществляется вращением ручки 2.9. Длина волны отсчитывается по шкале 2.7 отсчетного устройства. Шкала имеет три барабана, показывающие значение длины волны в нанометрах. Правый барабан имеет дополнительную шкалу с ценой деления 0.2 нм, отсчет по которой производится по горизонтальной визирной линии (рис.2.5). Выбор выхода монохроматора осуществляется с помощью подвижного зеркала 2.2, перемещаемого штоком 2.10. Шкала монохроматора уже откалибрована в показаниях длин волн.

Параметры лампы стабилизируются через 5-7 минут после включения. **Запрещается выключать лампу от сети в процессе разгорания.** Горевшую лампу можно зажечь повторно лишь после 10 минутного перерыва. Ртутная лампа является мощным источником света в ультрафиолетовой области спектра, поэтому следует избегать попадания прямого светового потока излучения от лампы в глаза и длительного облучения кожи.

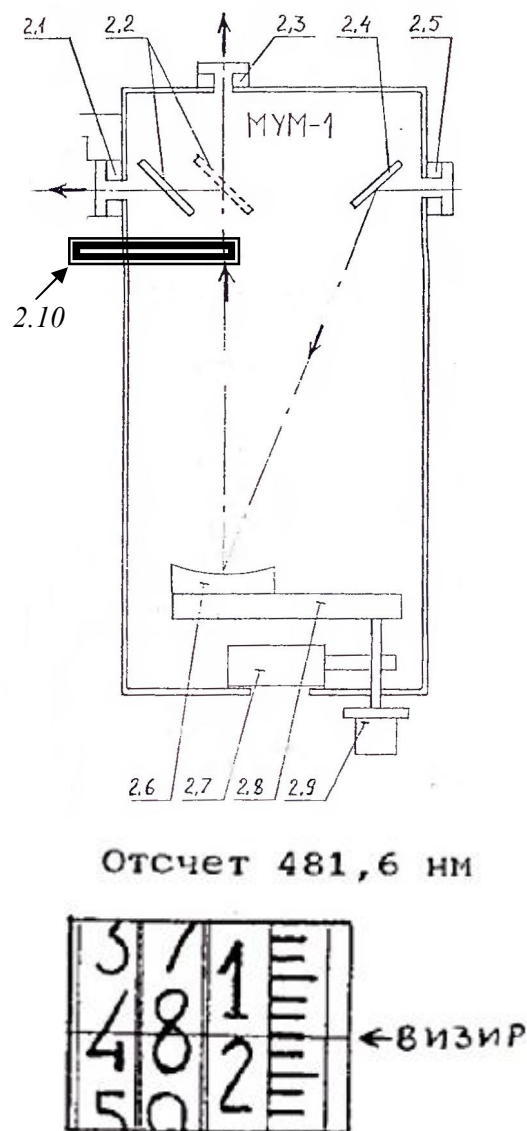


Рис. 2.5. Монохроматор учебный малогабаритный МУМ-1

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Включите усилительный блок «УСИЛИТЕЛЬ УФЭ-500» в сеть ~220 В и поставьте сетевой переключатель на блоке усилителя в положение «ВКЛ». Осветитель, питаемый через ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ, при этом должен быть выключен, **сетевая кнопка на ПУЛЬТЕ УПРАВЛЕНИЯ «ЛАМПА ДРСК-125» должна находиться в положении «ВЫКЛ»** (для проведения калибровки). Дайте прогреться измерительному устройству не менее 5 минут.

2. Подключите выход фотоэлемента, расположенного у бокового выхода монохроматора, ко входу «ФОТОЭЛЕМЕНТ» «УСИЛИТЕЛЯ УФЭ-500» специальными экранированными проводами (короткие перемычки), соблюдая полярность.

3. Подключите к выходам «УСИЛИТЕЛЬ УФЭ-500» универсальные мультиметры (см. рис. 2.6), также соблюдая полярность (по цвету: красный провод к разъему 4 мультиметра, черный к разъему 3). Вращая ручку 1, установите на мультиметрах **предел измерения 20 В  $V_{\text{DC}}$** , обеспечивающий измерения постоянного напряжения с точностью до 0,01 В. Подключите осветитель с лампой к выходу «ДРСК-125» БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ.

4. Переведите штوك 2.10 (см. рис. 2.5), расположенный на передней панели монохроматора в положение, обеспечивающее визуальное наблюдение спектральных линий. Для этого следует передвинуть шток до упора внутрь, не прилагая чрезмерных усилий и не вращая шток, так как это может привести к выходу из строя подвижного зеркала 2.2. Если шток уже вдвинут до упора, оставить его в таком положении.

5. Установите ручкой



«ПЛАВНО» и «ГРУБО» напряжение на аноде фотоэлемента 0,00 В (по показаниям мультиметра RV1, подключенному к выходу НАПРЯЖЕНИЕ усилителя УФЭ-500). Произвести калибровку измерительного прибора УФЭ-500 при отсутствии попадания света на фотоэлемент (для надежности перекрыть вход монохроматора). Для этого следует ручками управления «УСТАНОВКА НУЛЯ ГРУБО, ПЛАВНО» добиться показаний

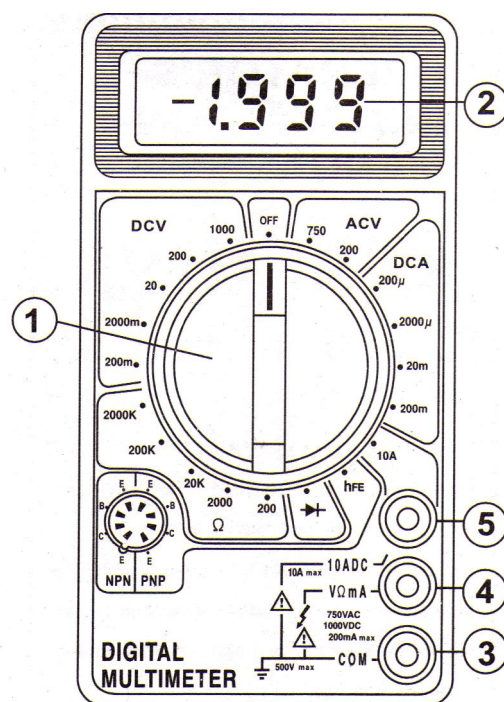


Рис. 2.6. Мультиметр универсальный.

1- ручка переключения диапазонов

4- разъем для подключения сигнального (красного) провода

3 - разъем для подключения ЗЕМЛИ (черного провода)

5 - разъем для измерения больших токов (не используется в работе)



0,00±0,02 В на вольтметре PV2 (рис. 2.4), измеряющего фототок с выхода «ФОТОТОК» усилителя при отсутствии освещения фотокатода.

6. Проверьте подключение осветителя к выходу «ЛАМПА ДРСК-125» БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ. Включите ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ в сеть ~220 В сетевым проводом евро-стандарта из комплекта и поставьте сетевую кнопку «ЛАМПА ДРСК-125» в положение «ВКЛ». При этом должен начаться дуговой разряд в лампе. Дать лампе прогреться не менее 7-10 минут. **Во время процесса разгорания выключать лампу от сети запрещается.** Защитный железный кожух осветителя в процессе работы достаточно сильно разогревается, поэтому во избежание ожогов трогать его запрещается.

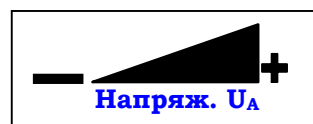
7. Установить на вход и задний выход 2.1 монохроматора щели, обеспечивающие наилучшее визуальное воспроизведение спектральных линий атома ртути. Для этого **рекомендуется установить на вход и выход 2.1 щели 0,05 мм в положение II (римская цифра II на щелях обращена наружу).** Для увеличения светового потока, попадающего на фотоэлемент, щель на боковом выходе 2.3 не устанавливается.

8. Изучение явления фотоэффекта производится на четырех наиболее интенсивных спектральных линиях ртути в видимом спектре:

Окраска линии	Относительная яркость	Длина волны, табличная, $\lambda_{табл}$ , нм
Фиолетовая 1	2	404,66
Синяя	8	435,83
Зеленая	10	546,07
Желтая 1	8	576,96

Выделить первую линию из спектра ртути, для чего медленно вращая ручку поворота 2.9 монохроматора добиться изображения первой фиолетовой линии ртути в центре окуляра (выходного зрительного окна) монохроматора. **Вращение ручки против часовой стрелки соответствует движению в область уменьшения длины волны, по часовой – увеличение длины волны.**

9. **Убрать щель со входа монохроматора** и перевести весь световой поток на боковой выход 2.3 к фотоэлементу, для чего плавно потянуть шток 2.10 на себя до упора не вращая. При этом мультиметр, измеряющий фототок, должен показать некоторое значение напряжения на выходе усилителя, которое пропорционально фототоку. Медленно вращая столик с осветителем либо монохроматором добиться максимального значения фототока по показаниям мультиметра «ФОТОТОК» (обычно максимальная освещенность достигается при расположении осветителя относительно входного окна монохроматора немного «под углом»).



10. Медленно вращая ручки «ГРУБО» против часовой стрелки снять отрицательную ветвь вольт-

«ПЛАВНО» и



амперной характеристики фотоэлемента, записывая значения напряжения и значения фототока в таблицу 1 с учетом знака, шаг изменения напряжения  $U_A$  следует делать не более 0,05 В. Напряжение на фотоэлементе измеряется универсальным мультиметром и в области отрицательных значений на дисплее высвечивается знак минус. Напряжение с выхода усилителя ФОТТОТОК, пропорциональное фототоку, измеряется также с учетом знака (см. **Особенности вольт-амперной характеристики стр. 11-13**) и при необходимости легко может быть пересчитано в реальные значения тока по формуле

$$I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых.фото}}}{R_1 \cdot K}, \text{ где } U_{\text{вых.фото}} - \text{значение напряжения с выхода усилителя (показание мультиметра, подключенного к выходу «ФОТТОТОК»), } R_1 = 100 \text{ кОм}$$

- входное сопротивление прибора,  $K = 200$  - коэффициент усиления. **Измерения необходимо производить особо тщательно в области выхода отрицательных значений фототока на некоторое постоянно значение вблизи  $U_3$  (рис. 2.1, 2.2, 2.3). Шаг изменения напряжения на аноде фотоэлемента должен составлять  $\sim 0,05$  В.**

11. Перейти к измерению прямой ветви ВАХ. Для этого необходимо некоторым образом ограничить световой поток, падающий на фотокатод фотоэлемента, чтобы усилитель работал корректно (усилитель специально настроен на измерение сверхмалых фототоков в области отрицательных значений ВАХ, при прямой же ветви при той же максимальной освещенности будут возникать уже много более значительные токи). Ограничить поток можно установив на вход монохроматора щель шириной 0,25 мм. Таким образом, прямая и обратная ветвь просто будут построены в разных масштабах, а для приведения их к единому масштабу можно использовать коэффициент

$$T = \frac{U_{\text{фото } d=\infty}}{U_{\text{фото } d=0,25}}, \text{ где } U_{\text{фото } d=\infty} \text{ и } U_{\text{фото } d=0,25} - \text{напряжения с выхода усилителя}$$

ФОТТОТОК при отсутствии щели на входе и при установленной щели шириной 0,25 мм на входе соответственно (предварительно установив напряжение анода равным нулю  $U_A=0,00$ ). Умножая измеренные значения фототока (напряжения с выхода ФОТТОТОК) при установленной щели на входе на коэффициент  $T$ , получим прямую ветвь ВАХ фотоэлемента в том же масштабе что и обратную. *При снятии прямой ветви вольт-амперной характеристики фотоэлемента переключатель диапазонов  $I$  мультиметра, измеряющего фототок можно перевести в положение 200 В  $\overline{\text{V}}$  (если показания на диапазоне 20 В будут нестабильными).*



12. Вращая ручку «ПЛАВНО» и «ГРУБО» по часовой стрелке, снять прямую ветвь вольт-амперной характеристики, записывая измеренные значения прямого напряжения на аноде и фототока в таблицу 1. **Не следует устанавливать значение прямого напряжения, подаваемого на анод выше 14 В.**

13. Переведите шток 2.10 (см. рис. 2.5), расположенный на передней панели монохроматора в положение, обеспечивающее визуальное наблюдение спектральных линий. Установить на вход и выход монохроматора щель 0,05 мм и выделить синюю линию  $\lambda=435,83$  из спектра ртути, для чего медленно вращая ручку поворота 2.9 монохроматора добиться изображения линии в центре окуляра (выходного зрительного окна) монохроматора.

14. Выполнить пп. 9-12 методического руководства.

15. Выполнить аналогичные измерения для зеленой  $\lambda=546,07$  нм и желтой  $\lambda=576,96$  нм.

*Примечание:* для улучшения результатов дополнительно можно провести определение задерживающего потенциала для УФ области спектра, для чего, направив световой поток на боковой выход, установить длину волны  $\lambda=365$  нм либо  $\lambda=312$  нм снять обратную ветвь ВАХ согласно пп.10. При работе в УФ области спектра направлять излучение на задний выход 2.1 запрещается.

16. Все измерения следует заносить в таблицу 1:

**Таблица 1**

$\lambda 1 = \dots$ $\nu 1 = \frac{c}{\lambda 1} = \dots$	<b>Обратная</b>	$U_{A, B}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых. фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых. фото}}}{R_1 \cdot K}$	...	...	...	...
	<b>Прямая</b>	$U_{A, B}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых. фото}} = U_{0 \text{ фото } d=0,25} \cdot T \sim I_{\text{фото}}$	...	...	...	...
$\lambda 2 = \dots$ $\nu 2 = \frac{c}{\lambda 2} = \dots$	<b>Обратная</b>	$U_{A, B}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых. фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых. фото}}}{R_1 \cdot K}$	...	...	...	...
	<b>Прямая</b>	$U_{A, B}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых. фото}} = U_{0 \text{ фото } d=0,25} \cdot T \sim I_{\text{фото}}$	...	...	...	...

17. Построить на миллиметровой бумаге семейство прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик фотоэлемента для различных длин волн.

18. Для каждой вольт-амперной характеристики найти напряжение  $V_1 \approx U_3$ , соответствующее полной задержки электронов. Для этого следует определить начало участка обратной ветви ВАХ, где кривая переходит в прямую со слабым наклоном, согласно методики, предложенной на рис. 2.3.

19. Все вычисления свести в таблицу 2. Для каждой длины волны в спектре ртути необходимо вычислить частоту света  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ,  $c=3 \cdot 10^8$  м/с. Это и будет частота света, который, попадая на фотоэлемент, вызывает фотоэффект.

Таблица 2

Окраска линии	Длина волны излучения $\lambda$ , нм	Частота, излучения, $\nu = c/\lambda$ , Гц	$V_1$ , В
1. Фиолетовая	405		
2. Синий	436		
3. Зеленый	546		
4. Желтый	578		
5. УФ область	365		
	312		

20. С помощью метода наименьших квадратов построить график зависимости  $|V_1|(\nu)$ . График должен иметь приблизительно вид прямой линии.

21. Из графика оценить значение постоянной Планка (см. формулы 1.8-1.9), оценить ошибку определения постоянной Планка  $\Delta h$ . Следует помнить, что результаты лабораторного эксперимента будут скорее оценочными, и постоянную Планка  $h$  в данных условиях опыта обычно удастся определить только по порядку величины.

**Сведения о методе наименьших квадратов, а также другую дополнительную информацию см. в приложении.**

Режим работы установки прерывистый – через каждые 45-50 минут работы делается перерыв на 10 мин.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта?
2. Что такое “красная граница ” фотоэффекта?
3. Сформулировать законы фотоэффекта.
4. Что такое контактная разность потенциалов и каким образом она влияет на характеристику фотоэлемента.
5. Почему максимальная кинетическая энергия электронов, соответствующая данной частоте  $\nu$  падающего света определяется как  $K_{\text{макс.}} = eV_{\text{задерж.}}$  ?
6. При последовательном освещении катода светом с частотой  $\nu = 1,0 \cdot 10^{15}$  Гц и  $\nu' = 1,4 \cdot 10^{15}$  Гц показания вольтметра, при которых фототок прекращался, оказались  $V_1 = - 0,40$  В и  $V_1' = - 2,0$  В (см. рис. 1.5). Найдите постоянную Планка, учитывая, что между катодом и анодом существует некоторая контактная разность потенциалов.
7. Для чего при проведении данного опыта необходим набор светофильтров с различной полосой пропускания длины волны  $\lambda$ ?
8. Объяснить ход прямой и обратной ветвей на вольт-амперной зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом.
9. Почему в данной работе в качестве источника света используется именно газонаполненная (ртутная) лампа? Можно ли использовать лампу накаливания?

## ПРИЛОЖЕНИЕ.

**Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)**  
Рассмотрим случай совместных измерений двух величин  $\beta$  и  $\alpha$ . Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения  $\beta$  и  $\alpha$  в результате многократных измерений некоторых других величин  $x_i$  и  $y_i$  получится линейная система условных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$y_i = \beta x_i + \alpha \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  - результаты  $i$ -го измерения величин  $x$  и  $y$ ;  $\beta$  и  $\alpha$  - искомые величины.

Система уравнений (1) будет, вообще говоря, несовместна, так как результаты измерений  $x$  и  $y$  неизбежно содержат погрешности. Поэтому из этих уравнений можно определить только оценки величин  $\beta$  и  $\alpha$  (соответственно  $B$  и  $A$ ), которые являются случайными величинами.

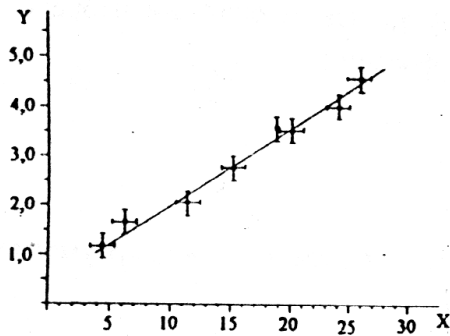


рис. 1

Для наглядности изложения представим все опытные данные  $x_i$  и  $y_i$  на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения  $\alpha$  и  $\beta$  состоит в определении параметров некоторой прямой: значения ординаты при нулевом значении абсциссы и тангенса угла наклона соответственно.

Так как между точками на графике можно провести не одну прямую, возникает задача - провести прямую наилучшим образом. Такая прямая характеризуется наиболее точными оцен-

ками коэффициентов  $\beta$  и  $\alpha$ , т.е. наиболее вероятным.

Оценка  $\beta$  (значение  $B$ ) определяется выражением

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Оценка  $\alpha$  (значение  $A$ ) определяется выражением

$$A = \bar{y} - B\bar{x}$$

Можно показать, что оценка стандартного отклонения коэффициента  $B$  выражается следующим образом:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Интервал, в котором с установленной вероятностью  $\alpha_0$  может находиться коэффициент  $\beta$ , записывается в виде  $\Delta B = t_{\alpha_0, (n-2)} S_B$

Тогда можно записать:

$$\beta = B \pm \Delta B$$

Стандартное отклонение коэффициента  $A$  определяется по формуле

$$S_A = \sqrt{\left( \frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{n-2}}$$

### СПЕКТР РТУТНОЙ ЛАМПЫ

Окраска линии	Относительная яркость	Длина волны, нм
Желтая	10	579,07
Желтая	8	576,96
Зеленая	10	546,07
Голубая	1	491,60
Синяя	8	435,83
Фиолетовая	1	407,78
Фиолетовая	2	404,66

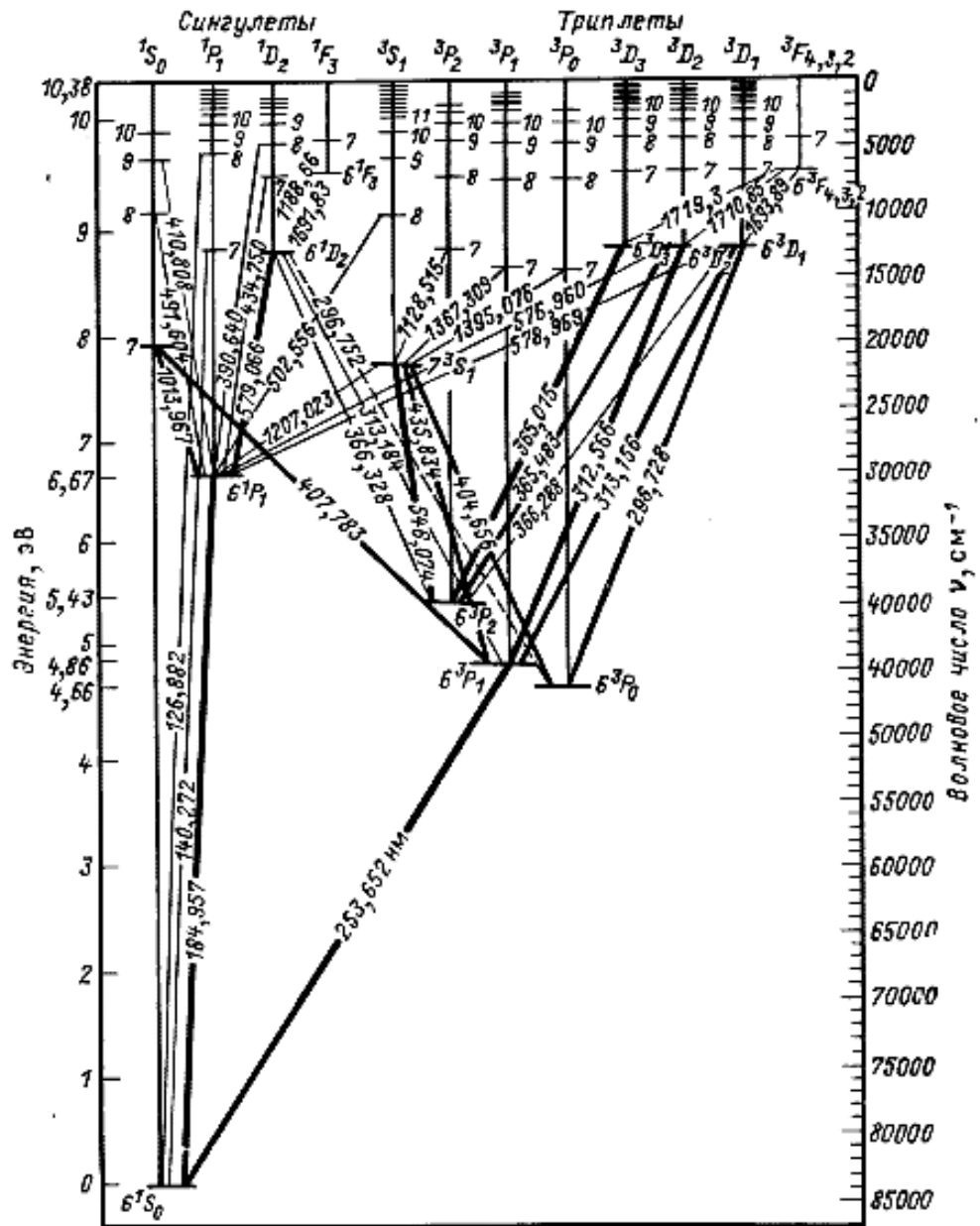


Схема энергетических уровней атома ртути

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.**

При составлении данного методического руководства использовалась следующая литература.

1. Иродов И. Е., Квантовая физика. Основные законы., М. 2002
2. Савельев И. В. Курс общей физики. М., 1982, т. 3
3. Шпольский Э. В., Атомная физика т.1, т.2
4. Курс физики, под редакцией Лозовского В.Н., С-Пб 2001.
5. Рохлин Г. Н., Разрядные источники света, М., Энергоатомиздат,1991.
6. Лабораторный практикум по физике, под ред. К. А. Барсукова, М. 1988.

**НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»  
ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ**