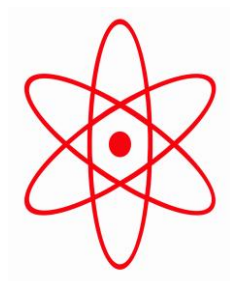


МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 304

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

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

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

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 $\hbar$.

$$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 0,659 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \quad (1.1)$$

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. $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

Фотоэффект

Световые кванты.

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 фотоэлементе, 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 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. Для этой зависимости характерно наличие участка тока насыщения

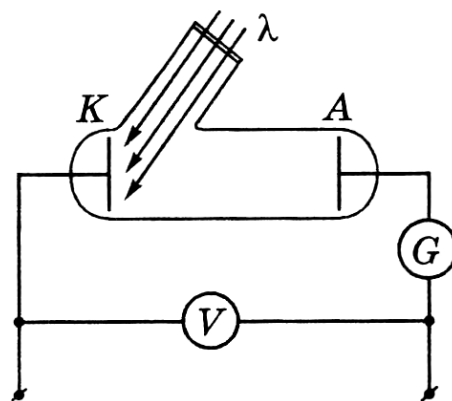


Рис. 1.1

$I_{\text{нас}}$, 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 $V_1 < 0$).

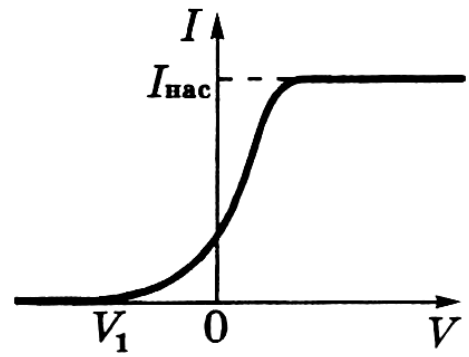


Рис. 1.2

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, вырываемых 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 ω_k), при которой еще происходит вырывание электронов. Если длина волны превышает λ_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 ω облучающего света (причем $K_{\text{макс}}$ растет с увеличением ω) 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 факт вырывания электронов из металла неудивителен, так как падающая электромагнитная волна вызывает вынужденные колебания электронов. 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.

Резкое расхождение теории с опытом возникает и 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, одновременно 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 ϵ которых связана с частотой соотношением:

$$\varepsilon = \hbar\omega = h\nu. \quad (1.2)$$

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, остальная часть переходит в кинетическую энергию вылетевшего фотоэлектрона. Минимальную энергию, необходимую для освобождения электрона из металла, 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.

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

2. Существует низкочастотная граница — порог фотоэффекта, т.е. такая частота ω_0 , ниже которой фотоэффект отсутствует. Эта частота согласно (1.3) соответствует равенству $\hbar\omega_0 = A$. 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. Эта работа зависит от ряда факторов и имеет порядок нескольких эВ.

Частоте ω_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 λ_k для некоторых металлов приведены в табл. 1.1:

Таблица 1.1

Металл	Cs	Na	Zn	Ag	Pt
λ_k , мкм	0,60	0,53	0,33	0,28	0,20

В справочной литературе наблюдается довольно большой разброс в значениях λ_k для одних и тех же металлов. Поэтому к значениям λ_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 контактной разности потенциалов, т. е. разности потенциалов, которая возникает между двумя различными металлами (поскольку катод K и анод A изготавливают по необходимости из различных металлов). Неизбежное присутствие контактной разности потенциалов и трудность ее учета и ряд других экспериментальных затруднений и источников ошибок — все это привело к тому, что достаточно точное подтверждение уравнения Эйнштейна (1.3) было получено не сразу.

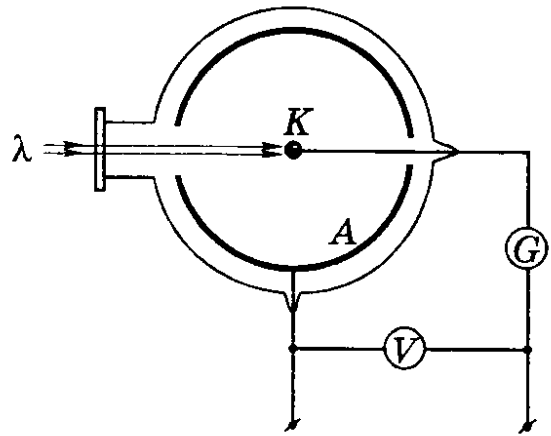


Рис. 1.3

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 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.

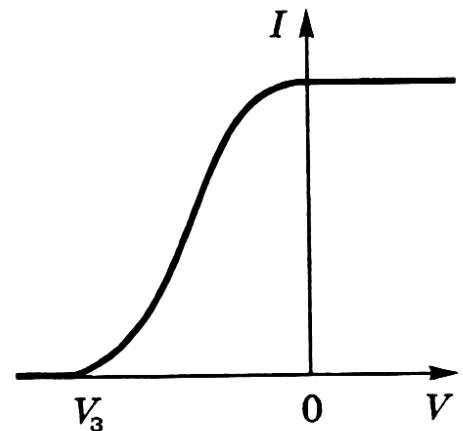


Рис. 1.4

Задерживающая разность потенциалов. Эта величина позволяет задержать фотоэлектроны, вылетающие из катода с максимальной кинетической энергией $K_{\text{макс}}$, что приводит к прекращению фототока. Если катод и анод фотоэлемента изготовлены из одного и того же металла, то контактная разность потенциалов отсутствовала бы, и определение задерживающей разности потенциалов сводилось к измерению внешнего задерживающего напряжения, т. е. показаниям вольтметра $V_3 < 0$ (рис. 1.4).

Определение задерживающей разности потенциалов усложняется, если катод и анод изготовлены из разных металлов (что обычно и бывает). Если она тормозит вылетающие из катода фотоэлектроны, то приходится прикладывать внешнее ускоряющее напряжение V (измеряемое вольтметром), чтобы выйти на насыщение. 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 и 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.

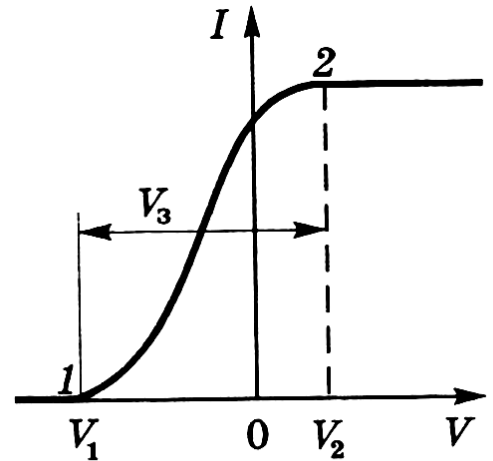


Рис. 1.5

Если контактная разность потенциалов не тормозит, а ускоряет фотоэлектроны, т.е. имеет противоположный знак, то характеристика фотоэлемента $I(V)$ вместе с точкой 2 сместится влево. При этом (1.4) для V_3 остается 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 ω падающего света. Значит, и задерживающая разность потенциалов V_3 тоже зависит от ω .

Если построить экспериментальный график зависимости $K_{\text{макс.}}(\omega)$, то получится прямая (рис. 1.6).

Заметим, что точка пересечения прямой с осью абсцисс определяет частоту ω_0 соответствующую красной гра-

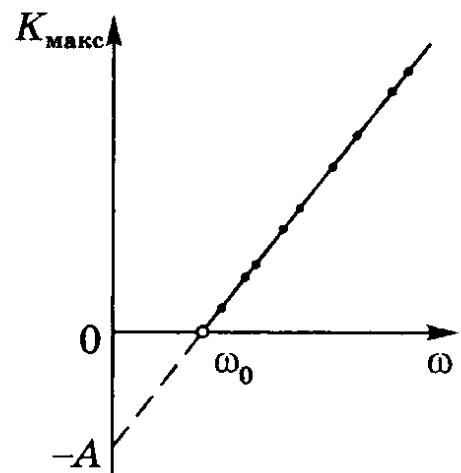


Рис. 1.6

нице 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 ω_0 и A (из-за наличия контактной разности потенциалов). К сожалению, это часто не учитывают, и полученные результаты сильно отличаются от действительных значений.

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:

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

Таким образом, пришли к уравнению прямой:

$$|V_1|(\nu) = B\nu + A_0, \quad (1.8)$$

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 ν_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. 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. 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.

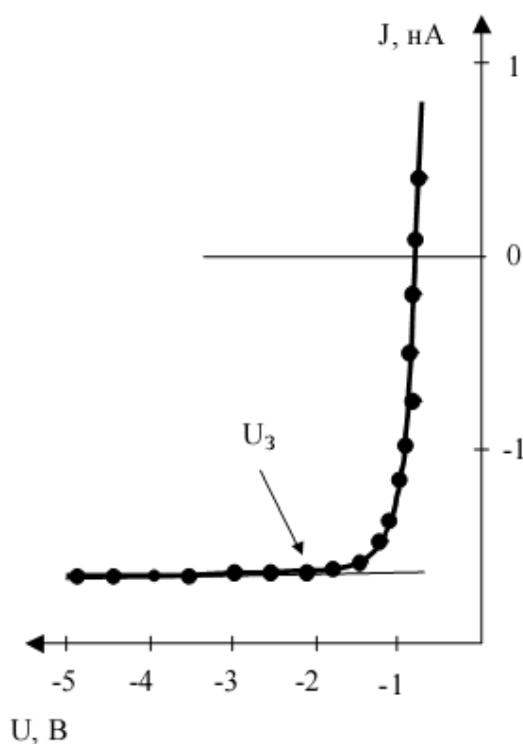


Рис.2.1

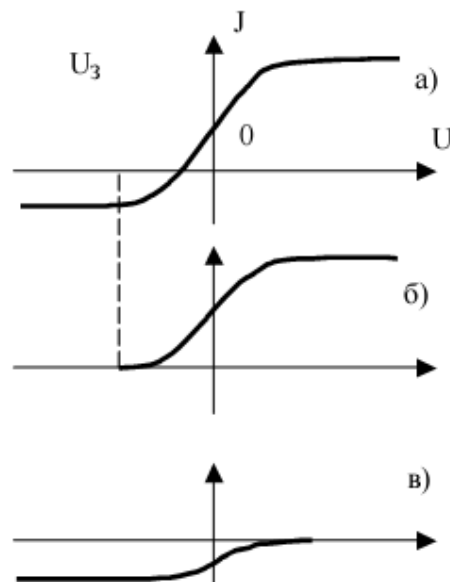


Рис.2.2

Приборы и оборудование Учебный Модуль ФКЛ-11.

Основные блоки установки – блок облучения, содержащий набор светодиодов в защитном кожухе; фотоприемник, содержащий фотоэлемент СЦВ-3; блок измерения, содержащий специально настроенную чувствительную схему усиления слабых фототоков; два универсальных мультиметра для измерения напряжения на фотоэлементе и фототока.

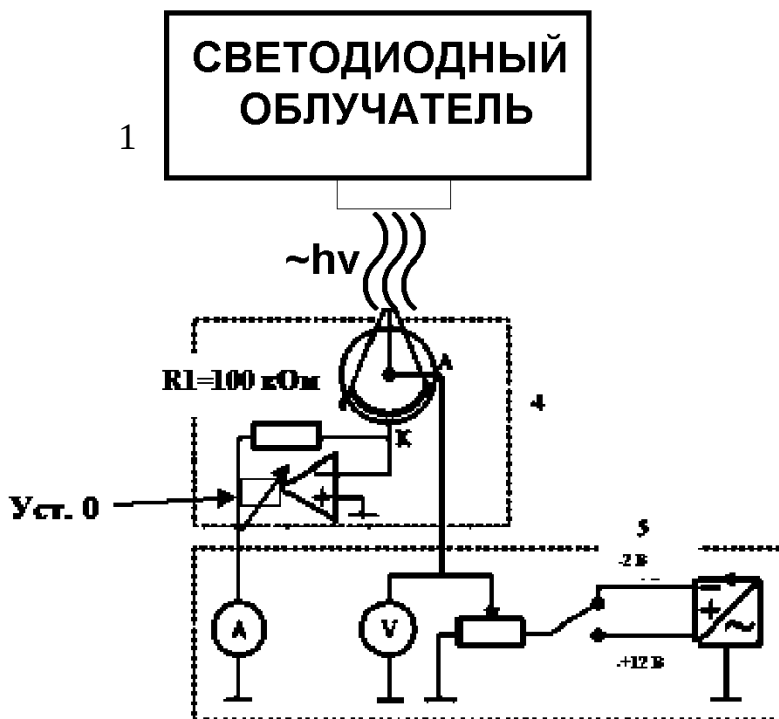


Рис.2.4. Принципиальная блок-схема установки ФКЛ-11М

В качестве источника монохроматического излучения применяется светоизлучающий модуль, содержащий 5 узкополосных источников (светодиодов с узкой спектральной характеристикой, имеющей ярко выраженный максимум при определенной длине волны).

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.4. Световой поток от светодиодного источника (1) представляющий собой узкий спектральный интервал, падает на катод фотоэлемента, который помещен в защитный кожух (4) и жестко закреплен в основном блоке. 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. 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 прибора и усилении этого тока в $E \approx 30$ раз.

Для регистрации вольтамперных характеристик фотоэлемента применяется специальный электронный блок (5). В состав этого блока входит источник постоянного напряжения, который позволяет изменять потенциал анода от 0 до +12 В в прямом и от 0 до -2 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 наличие вакансий цезия в решетке, сообщает полупроводнику дырочный тип проводимости. Ширина запрещенной зоны ΔE равна примерно 1,66 эВ. Красная граница фотоэффекта $\lambda_0 \approx 620\text{-}750$ нм. В максимуме спектральной характеристики ($\lambda \approx 420\text{-}450$ нм), квантовый выход фотоэмиссии достигает $0,25 \frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}$ (число вылетевших из образца электронов в расчете на один фотон света).



Рис.2.5. Принципиальная блок-схема установки ФКЛ-11М

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Включить прибор в сеть ~ 220 В, перевести переключатель «СЕТЬ» в положение «включено» и дайте прогреться устройству не менее 5 минут.

2. Изучение явления фотоэффекта производится на пяти линиях, выдаваемых узкополосными источниками в видимом спектре (фиолетовый, синий, зеленый, желтый, красный). Изменение длин волн осуществляется кнопками «установка длины волны». Индикация численного значения излучаемой длины волны производится на индикаторе «измерительный прибор».

3. Медленно вращая ручки «ГРУБО» снять обратную ветвь вольт-характеристики фотоэлемента, записывая



«ПЛАВНО» и амперной характеристики значения на

пряжении и значения фототока в таблицу 1 с учетом знака (ручки обладают высокой чувствительностью!). Напряжение и фототок на фотоэлементе показываются на индикаторе «измерительный прибор» и в области отрицательных значений на дисплее высвечивается знак минус. Реальные значения обратного фототока в $E \approx 30$ раз меньше чем показания индикатора (E - коэффициент усиления). **Измерения необходимо производить особо тщательно в области выхода отрицательных значений фототока на некоторое постоянно значение вблизи U_z (рис. 2.1, 2.2, 2.3). Шаг изменения напряжения на аноде фотоэлемента должен составлять $\sim 0,05-0,07$ В.**

4. Перейти к измерению прямой ветви ВАХ. Вращая ручку прямую ветвь вольт-записывая измеренные на аноде и фототока в таблицу 1.



мерению прямой ветви ВАХ. по часовой стрелке, снять амперной характеристики, за значения прямого напряжения

5. Указанные действия повторить для остальных светодиодов.

6. Измерения следует заносить в таблицу 1:

Таблица 1

$\lambda 1 = \dots$ $\nu 1 = \frac{c}{\lambda 1} = \dots$	Обратная	$U_{A,B}$	...	...	...	...
		$I_{\text{фото}} / E$	...	...	...	...
	Прямая	$U_{A,B}$	...	...	...	...
		$I_{\text{фото}}$	...	...	...	...
$\lambda 2 = \dots$ $\nu 2 = \frac{c}{\lambda 2} = \dots$	Обратная	$U_{A,B}$	...	...	...	...
		$I_{\text{фото}} / E$	...	...	...	...
	Прямая	$U_{A,B}$	...	...	...	...
		$I_{\text{фото}}$	...	...	...	...

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

8. Для каждой вольт-амперной характеристики найти напряжение V_1 , соответствующее полной задержки электронов (начало участка обратной ветви ВАХ, где кривая переходит в участок со слабым наклоном см рис. 2.1-2.3).

9. Все вычисления свести в таблицу 2. Для каждой длины волны 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 (светодиод)	Длина волны излучения λ , нм	Частота, излучения, $\nu = c/\lambda$, Гц	V_1 , В
1. Фиолетовый	410		
2. Синий	450		
3. Зеленый	540		
4. Желтый	580		
5. Красный	670		

10. построить график зависимости $|V_1|(\nu)$ (по указанию преподавателя воспользоваться методом наименьших квадратов). График должен иметь приблизительно вид прямой линии. **Сведения о методе наименьших квадратов, а также другую дополнительную информацию см. в приложении.**

11. Из графика оценить значение постоянной Планка (см. формулы 1.8-1.9), оценить ошибку определения постоянной Планка Δh .

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Энергия и импульс фотона.
2. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта?
3. Что такое “красная граница ” фотоэффекта?

4. Законы внешнего фотоэффекта.

5. Почему максимальная кинетическая энергия электронов, соответствующая данной частоте ν падающего света определяется как $K_{\text{макс.}} = eV_{\text{задерж.}}$?

СПИСОК 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)
Рассмотрим случай совместных измерений двух величин β и α . Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения β и α 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 ; β и α - 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 β и α (соответственно B и A), которые являются случайными величинами.

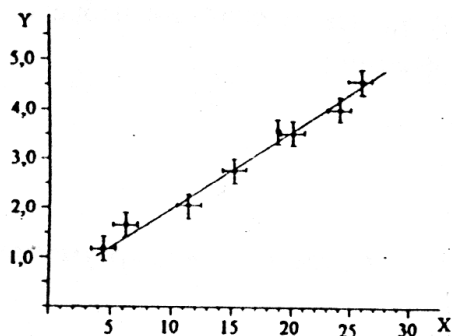


рис. 1

Для наглядности изложения представим все опытные данные x_i и y_i на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения α и β 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 β и α , т.е. наиболее вероятным.

Оценка β (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 α (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 α_0 может находиться коэффициент β , 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

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