

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

А.И. Аксенов
А.А. Шмидт

**ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ
ПЛАНКА С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ФОТОЭЛЕМЕНТА**

Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 621.383.29
ББК 32.851
А42

Рецензент:

Климов А.С., профессор кафедры физики, доктор технических наук

Аксенов, Александр Иванович

А42 Изучение внешнего фотоэффекта и определение постоянной планка с помощью вольтамперной характеристики фотоэлемента: методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов технических направлений подготовки / А.И. Аксенов, А.А. Шмидт. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 17 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Изучение внешнего фотоэффекта и определение постоянной планка с помощью вольтамперной характеристики фотоэлемента» для студентов технических направлений подготовки

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 621.383.29
ББК 32.851

© Аксенов А.И., Шмидт А.А. 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

Оглавление

1	Введение	4
2	Теоретическая часть	4
2.1	Фотоэффект.....	4
2.2	Задерживающая разность потенциалов.....	6
3	Описание экспериментальной установки.....	8
3.1	Методика измерений. Особенности вольт-амперной характеристики	8
3.2	Приборы и оборудование	10
4	Порядок выполнения работы.....	12
5	Контрольные вопросы.....	15
6	Содержание отчета	15
7	Список рекомендуемой литературы	16
	Приложение 1 (справочное) Понятие о методе наименьших квадратов.....	17

1 Введение

Целью настоящей работы является изучение явления внешнего фотоэффекта, ознакомление с устройством и принципом работы электронного фотоэлемента, освоение методики снятия вольт - амперных характеристик фотоэлемента при различной частоте освещающего света, численная оценка постоянной Планка.

2 Теоретическая часть

2.1 Фотоэффект

Открытие постоянной Планка произошло в 1900 г. Планк получил формулу для спектральной плотности теплового излучения, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными. Планк предположил, что энергия кристалла может принимать не любые, а только вполне определенные дискретные значения, пропорциональные некоторой элементарной порции — кванту энергии ε_0 . В связи с этим испускание и поглощение электромагнитного излучения кристаллом осуществляется не непрерывно, а дискретно в виде отдельных квантов, величина которых пропорциональна частоте излучения:

$$\varepsilon_0 = \hbar\omega, \quad (2.1)$$

где ω — циклическая частота световых колебаний, 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.

Постоянная Планка — это важнейшая универсальная константа, играющая в квантовой физике такую же фундаментальную роль, как скорость света в теории относительности.

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.

Фотоэлектрическим эффектом, или фотоэффектом называют испускание электронов веществом под действием света.

Основными законами внешнего фотоэффекта являются следующие экспериментально установленные соотношения:

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

2. Для каждого металла существует максимальная длина волны света (или минимальная частота $\nu_{кр}$), при которой еще происходит вырывание электронов. Если длина волны превышает $\lambda_{кр}$ — 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 E_{max} фотоэлектронов линейно зависит от частоты ν облучающего света (причем E_{max} растет с увеличением ν) 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 не удивителен, 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. 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 ν простым соотношением:

$$\varepsilon = h\nu . \quad (2.2)$$

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

Полученная электроном энергия $h\nu$ 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 $e\varphi_a$. Следовательно, для фотоэлектронов с максимальной кинетической энергией E_{\max} закон сохранения энергии в элементарном акте поглощения фотона можно записать так:

$$h\nu = e\varphi_a + E_{\max} , \quad (2.3)$$

где e – заряд электрона.

Формула 2.3 впервые была получена Эйнштейном и носит его имя – формула Эйнштейна. 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. Из формулы 2.3 видно, что наклон прямой на графике $E_{\max} = f(\nu)$,

т.е. $\frac{dE_{\max}}{d\nu} = h$. На этом основан метод определения постоянной Планка.

2. Существует низкочастотная граница – порог фотоэффекта, т.е. такая частота $\nu_{кр}$, ниже которой фотоэффект отсутствует. Эта частота согласно (2.3) соответствует равенству $h\nu_{кр} = e\varphi_a$. Если $\nu < \nu_{кр}$, то энергии фотона не хватает, чтобы электрон мог преодолеть потенциальный барьер «высотой» $e\varphi_a$ 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 $\nu_{кр}$ соответствует красная граница фотоэффекта, длина волны которой $\lambda_{кр} = \frac{2\pi c}{\nu_{кр}}$. Наличие такой границы совершенно непонятно с волновой точки зрения. Значения $\lambda_{кр}$ для некоторых металлов приведены в таблице 2.1:

Таблица 2.1

Металл	Cs	Na	Zn	Ag	Pt
$\lambda_{кр}$, мкм	0,60	0,53	0,33	0,28	0,20

2.2 Задерживающая разность потенциалов

Именно эта величина позволяет задержать фотоэлектроны, вылетающие из катода с максимальной кинетической энергией E_{max} , что и приводит к прекращению фототока. Если изготовить катод и анод фотоэлемента из одного и того же металла, то контактная разность потенциалов U_3 между ними будет равна нулю. В этом случае определение задерживающей разности потенциалов сводится просто к измерению внешнего задерживающего напряжения, т.е. показаниям вольтметра. Действительно, при разности потенциалов между катодом и анодом равной нулю, все фотоэлектроны вне зависимости от начальной скорости достигают анода. Ток анода в этом случае равен току эмиссии и называется – ток насыщения.

Определение задерживающей разности потенциалов усложняется, если катод и анод изготовлены из разных металлов. В этом случае между ними образуется контактная разность потенциалов, которая оказывает заметное влияние на протекание электрического тока между катодом и анодом. Если она есть и, например, такова, что тормозит вылетающие из катода фотоэлектроны, то приходится прикладывать внешнее ускоряющее напряжение U_a (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 рисунке 2.1 – сдвинется вправо, в сторону положительных значений показания вольтметра.

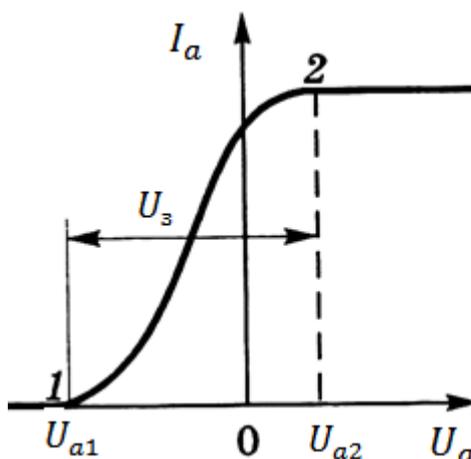


Рисунок 2.1 – Вольтамперная характеристика фотоэлемента

Таким образом, по модулю, задерживающая разность потенциалов U_3 будет равна:

$$U_3 = U_{a2} - U_{a1}, \quad (2.4)$$

как показано на рисунке 2.1, где $U_{a1} < 0$ (знаки U_{a1} и U_{a2} учитываются). Заметим, что, вообще говоря, U_{a1} есть величина алгебраическая, она может иметь любой знак или равняться нулю.

Если контактная разность потенциалов не тормозит, а ускоряет фотоэлектроны, т.е. имеет противоположный знак, вольтамперная характеристика фотоэлемента (рисунок 2.1) вместе с точкой 2 сместится влево. При этом выражение 2.4 для U_3 остается прежним, только в нем оба показания вольтметра могут оказаться отрицательными, но их разность по-прежнему будет по модулю положительной и равной U_3 .

Таким образом, определив U_3 , мы тем самым находим максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов E_{\max} .

$$E_{\max} = eU_3 = e(U_{a2} - U_{a1}), \quad (2.5)$$

где $e = |e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона.

Положение точки 2 на вольтамперной характеристике фотоэлемента (рисунок 2.1) зависит только от контактной разности потенциалов, положение точки 1 – от частоты падающего света (ν). Значит, и задерживающая разность потенциалов U_3 тоже зависит от ν .

На рисунке 2.2 представлен экспериментальный график зависимости максимальной энергии фотоэлектронов от частоты падающего света $E_{\max} = f(\nu)$.

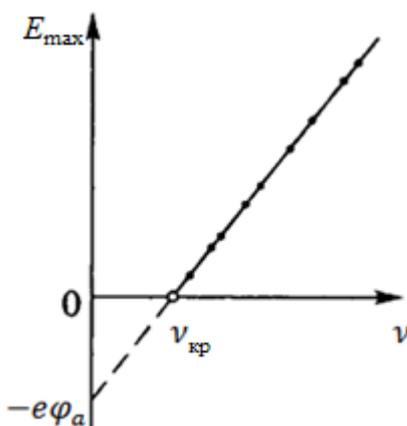


Рисунок 2.2 – Зависимость максимальной энергии фотоэлектронов от частоты падающего света

Точка пересечения прямой с осью абсцисс определяет частоту $\nu_{кр}$, соответствующую красной границе фотоэффекта, а точка пересечения продолжения прямой с осью ординат – работу выхода $e\phi_a$.

Если же на оси ординат откладывать U_{a1} (показание вольтметра, при котором фототок обращается в нуль), то отмеченные две точки не будут соответствовать $\nu_{кр}$ и $e\phi_a$ (из-за наличия контактной разности потенциалов). К сожалению, это часто не учитывают, и полученные результаты сильно отличаются от действительных значений.

Для точного определения точки насыщения (точки 2 на рисунке 2.1) сильно затруднено, и как следствие, значение $U_3 = U_{a2} - U_{a1}$ остается достаточно неопределённым. Перепишем (2.3) с учетом (2.5):

$$e(U_{a2} - U_{a1}) = h\nu - e\phi_a, \quad (2.6)$$

Истинное напряжение на фотоэлементе U , входящее в формулы (2.4) – (2.6), отличается от измеренного значения (показаний) вольтметра $U_{изм}$ в k раз, т. к. вольтметр подключён к схеме через аттенуатор (усилитель либо ослабитель сигнала в зависимости от схемы). Тогда:

$$U_a = k \cdot U_{изм} \rightarrow U_{a1} = k \cdot U_{изм1}; U_{a2} = k \cdot U_{изм2}.$$

С учетом сказанного, перепишем выражение (2.6) в виде:

$$e(k \cdot U_{\text{аизм2}} - k \cdot U_{\text{аизм1}}) = h\nu - e\varphi_{\text{а}}. \quad (2.6.1)$$

Раскрывая скобки, получим:

$$-e \cdot k \cdot U_{\text{аизм1}} = h\nu - e\varphi_{\text{а}} - e \cdot k \cdot U_{\text{аизм2}}. \quad (2.6.2)$$

Т.к. в нашем эксперименте $U_{\text{аизм1}} < 0$, то $|U_{\text{аизм1}}| = -U_{\text{аизм1}}$. Тогда запишем (2.6.2) в виде:

$$e \cdot k \cdot |U_{\text{аизм1}}| = h\nu - e\varphi_{\text{а}} - e \cdot k \cdot U_{\text{аизм2}}. \quad (2.6.3)$$

$U_{\text{а2}} = k \cdot U_{\text{аизм2}} = \text{const}$ (материал анода и катода не изменяются), то можно записать:

$$e \cdot k \cdot |U_{\text{аизм1}}| = h\nu - (e\varphi_{\text{а}} + e \cdot k \cdot U_{\text{аизм2}}). \quad (2.7)$$

Таким образом, пришли к уравнению прямой:

$$|U_{\text{аизм1}}| = B\nu + A_0, \quad (2.8)$$

где $A_0 = -(e\varphi_{\text{а}} + e \cdot k \cdot U_{\text{аизм2}})$, $B = \frac{h}{e \cdot k}$, $e = |e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона, k – коэффициент пересчета показаний измеренных $U_{\text{аизм}}$ значений напряжения на фотоэлементе в истинных значениях U_3 .

Численным способом, находя из уравнения (2.8) коэффициент наклона $B = \frac{h}{e \cdot k}$, получаем искомое значение постоянной Планка:

$$h = B \cdot k \cdot |e|, \quad (2.9)$$

Коэффициент A_0 в данном случае нас мало интересует. В то же время уравнение (2.7) не позволяет точно определить ни работу выхода электронов из металла, ни красную границу фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$, т. к. по-прежнему остаётся неопределённой величина контактной разности потенциалов. **Далее, для уяснения сути явления, мы будем называть показания вольтметра $U_{\text{аизм1}}$ напряжением задержки U_3 ($U_{\text{аизм1}} \approx U_3$), хотя это не совсем верно.**

3 Описание экспериментальной установки

3.1 Методика измерений. Особенности вольт-амперной характеристики

На рисунке 3.1 показан фрагмент вольт-амперной характеристики (ВАХ) при обратной полярности, получаемой в данной работе. В отличие от упрощённых характеристик на рисунке 2.1, 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 включённых антипараллельно фотоэлемента – основной и побочный; последний со значительно более слабым током. Поэтому результирующая ВАХ, показанная схематично на рисунок 3.2а, представляет собой алгебраическую сумму вольт-амперных характеристик основного (рисунок 3.2б) и побочного (рисунок 3.2в) фотоэлементов. Отсюда следует, что запирающее напряжение U_3 (показания вольтметра $U_{\text{аизм1}}$) следует определять не в точке $I = 0$, а там, где кривая переходит в участок со слабым наклоном (см. рисунки 3.1 и 3.2). Как видно из рисунка 3.3, для нахождения U_3 необходимо тщательно измерить и построить график ВАХ в области обратного тока.

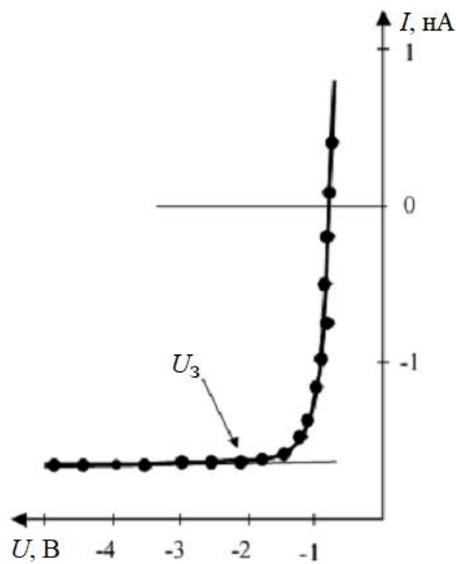


Рисунок 3.1 – Фрагмент вольт-амперной характеристики при обратной полярности

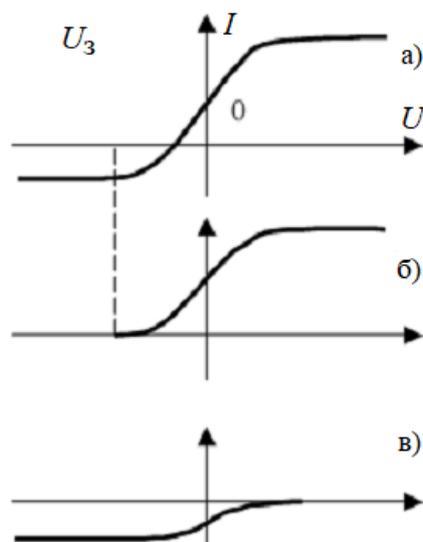


Рисунок 3.2 – Вольт-амперные характеристики фотоэлемента

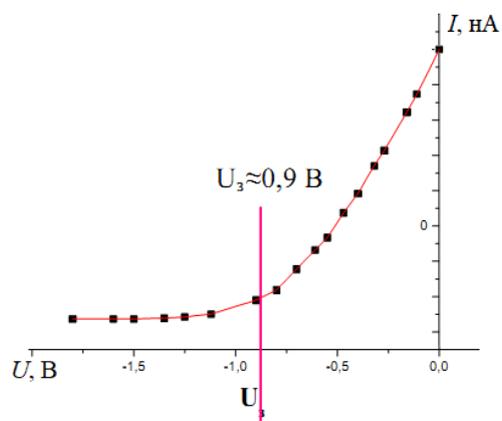


Рисунок 3.3 – Определение задерживающего потенциала на лабораторной установке ФКЛ-11М при $\lambda \approx 410$ нм (фиолетовый свет)

3.2 Приборы и оборудование

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 (УФЭ-500); два универсальных мультиметра для измерения напряжения на фотоэлементе и фототока. В качестве источника монохроматического излучения применяется светоизлучающий модуль, содержащий 4 узкополосных источника (светодиодов с узкой спектральной характеристикой, имеющей ярко выраженный максимум при определенной длине волны).

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 3.4.

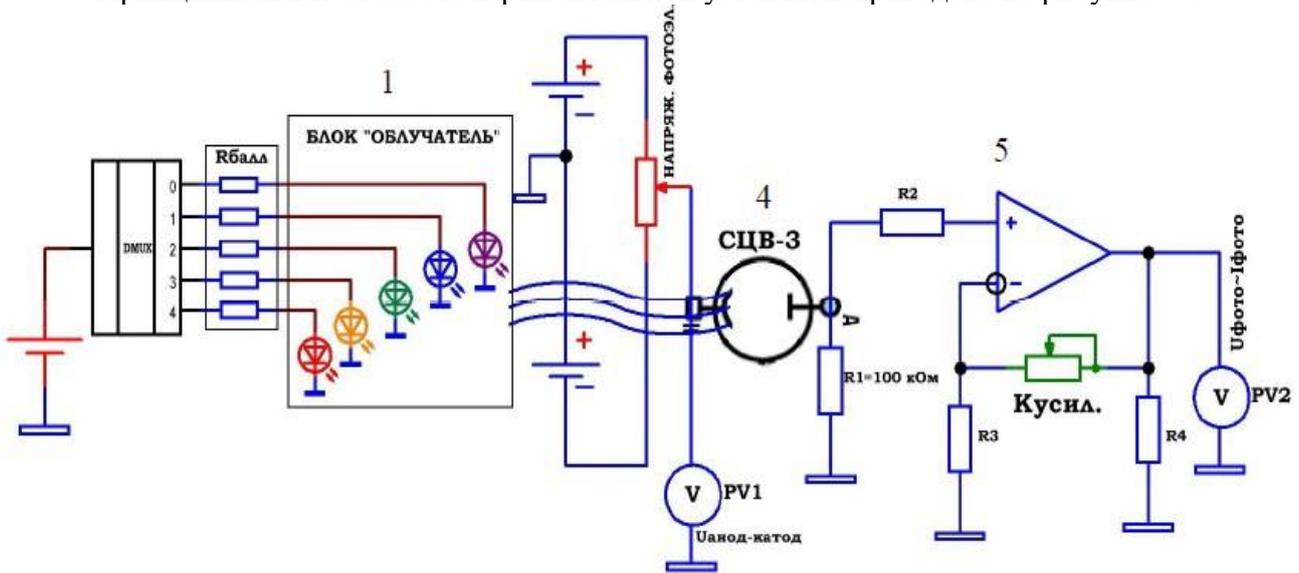


Рисунок 3.4 Принципиальная блок-схема установки ФКЛ-11М

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 по величине падения напряжения на известном входном сопротивлении $R_1 = 100$ кОм прибора и усилении этого напряжения в $K_{ус}$ раз (коэффициент усиления может быть жестко задан либо допускается его регулировка в зависимости от модели установки). **Не следует путать коэффициент усиления $K_{ус}$ фототока и коэффициент пересчёта напряжения на аноде фотоэлемента k в формулах (2.6) – (2.9).**

Перед началом работы необходимо производить калибровку усилителя «УФЭ-500». Для этого, в отсутствии внешнего напряжения на аноде фотоэлемента $U_{изм} = U_a = 0,00$ В, измеряемого вольтметром PV1 (анод-катод) и отсутствии светового потока, падающего на фотоэлемент (смотровое окно при его наличии следует закрыть плотным листом картона, светодиоды выключены), 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 (при его наличии) следует при этом установить в среднее либо максимальное положение в зависимости от эксперимента (снятие прямой либо обратной ветви), при этом во время измерений надо

следить за тем, чтобы показания мультиметра, измеряющего фототок с выхода усилителя не превышали $\pm 13 - \pm 14$ В, в противном случае усилитель находится в насыщении и не работает в нормальном линейном режиме. Если показания вольтметра PV2 остаются на уровне $\pm 13 - \pm 14$ В следует уменьшить коэффициент усиления прибора.

НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ МУЛЬТИМЕТРОВ СНАБЖЕНЫ ФУНКЦИЕЙ АВТОВЫКЛЮЧЕНИЯ: ПОСЛЕ 10 – 15 МИНУТ ИЗМЕРЕНИЙ МУЛЬТИМЕТР АВТОМАТИЧЕСКИ ВЫКЛЮЧАЕТСЯ. ДЛЯ ЕГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ СЛЕДУЕТ ПОСТАВИТЬ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ В ПОЛОЖЕНИЕ «ВЫКЛ.», А ЗАТЕМ СНОВА ПЕРЕВЕСТИ В РЕЖИМ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОТКЛЮЧИВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЩУПЫ ОТ СХЕМЫ!

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 – 3 В в обратном направлении.

В данной работе используется вакуумный фотоэлемент типа СЦВ-3 с сурьмяно-цезиевым катодом либо эквивалентный. 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 $\lambda_{кр} \approx 620 - 750$ 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).

Так как величина фототока при увеличении задерживающего потенциала достаточно плавно переходит в кривую, практически параллельную оси абсцисс (оси U_3), то точное определение запирающего напряжения может быть затруднено (рисунок 3.3). Поэтому для определения $U_{\text{аизм1}} \approx U_3$ для данной длины волны может быть предложена следующая методика. ВАХ фотоэлемента в области отрицательных напряжений на аноде следует аппроксимировать двумя прямыми линиями, как это показано на рисунке 3.5: 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 $U_{\text{аизм1}} \approx U_3$ при данной длине волны.

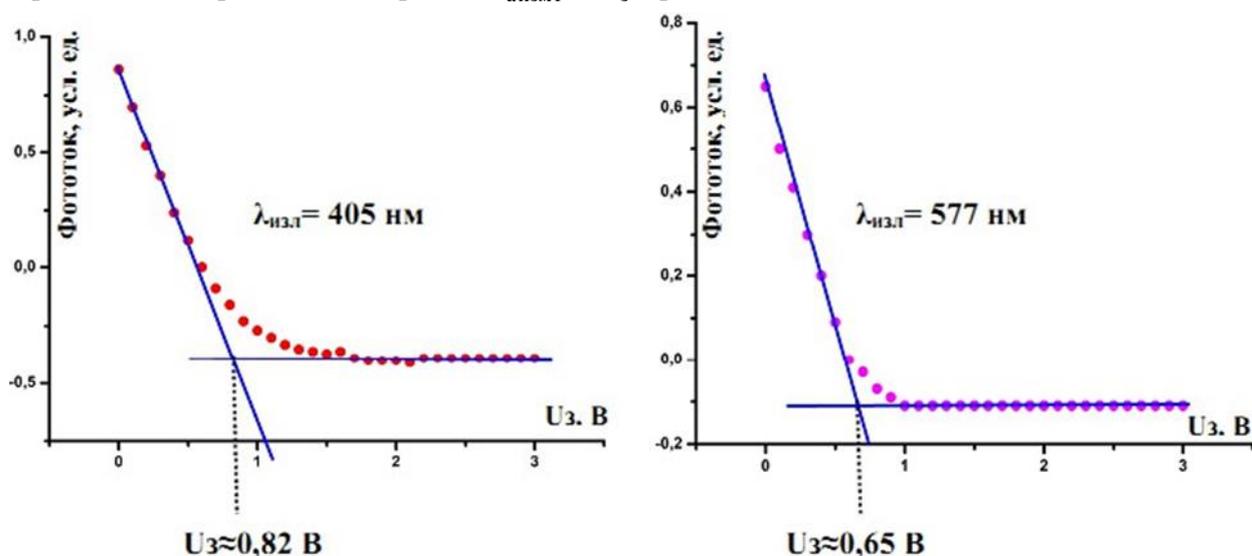


Рисунок 3.5. Методика определения задерживающего потенциала на лабораторной установке ФКЛ-11 (М) при двух различных длинах волн, выделенных монохроматором МУМ-01 либо полученных с помощью узкополосных источников излучения (светодиодов).

4 Порядок выполнения работы

1. Перед включением установки в сеть проверить целостность всех соединительных сигнальных и сетевых проводов.
2. Включите блок управления в сеть ~220 В, переведите переключатель «СЕТЬ» в положение «включено» и дайте прогреться измерительному устройству не менее 5 минут.
3. Подключите к выходам БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ универсальные мультиметры (рисунок 4.1), соблюдая полярность (по цвету: красный провод («+») к разъему 4 мультиметра, черный («-») к разъему 3 – COM) Вращая ручку 1, установите на мультиметре, измеряющем падение напряжения на входном сопротивлении усилителя (фототок), предел измерения **20 В DCV**, обеспечивающий измерения постоянного напряжения с точностью до 0,01 В. На мультиметре, измеряющем подаваемое на фотоэлемент напряжение, установите предел 20 В DCV. Некоторые модели мультиметров снабжены функцией автовыключения: через 10 – 15 минут работы мультиметр автоматически выключается для сохранения заряда батареек. Для его повторного включения следует сначала отключить измерительные щупы от схемы, поставить переключатель в положение «ВЫКЛ», а затем снова перевести в режим измерений.

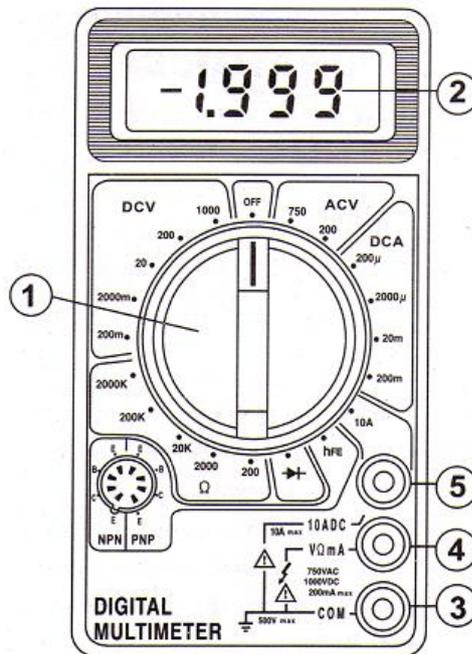


Рисунок 4.1 – Внешний вид мультиметра

4. Для исследования обратных ветвей характеристик фотоэлемента (при задерживающих напряжениях) следует установить среднее либо максимально возможное значение коэффициента усиления схемы $K_{ус}$ (150 – 180 единиц), вращением соответствующей ручки либо переключателем в зависимости от модели прибора с таким расчетом, чтобы показания мультиметра, измеряющего фототок с выхода усилителя не превышали $\pm 13 - \pm 14$ В, в противном случае усилитель находится в насыщении и не работает в нормальном линейном режиме.
5. Произвести калибровку измерительного прибора «ФОТОТОК» при отсутствии попадания света на фотоэлемент, для чего закрыть смотровое окно (при его наличии) плотным картоном, светодиоды при этом должны быть выключены. Установить ручками «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА ПЛАВНО/ГРУБО» нулевое значение напряжения, подаваемого на анод фотоэлемента по показаниям вольтметра PV1 $U_{аизм} = U_a = 0,00 \pm 0,02$ В.

6. Далее следует ручками управления «УСТАНОВКА НУЛЯ ГРУБО, ПЛАВНО» добиться показаний $0,00 \pm 0,02$ В на вольтметре PV2 (рисунок 3.4), измеряющего фототок с выхода «ФОТОТОК» усилителя при отсутствии освещения фотокатода и $U_a = 0,00 \pm 0,02$ В.

7. Изучение явления фотоэффекта производится на четырех линиях, выдаваемых узкополосными источниками в видимом спектре (фиолетовый, синий, зеленый, желтый). Для красного светодиода, длина волны излучения $\lambda_{кр} = 650$ нм которого находится на красной границе фотоэффекта, снятие обратной ветви ВАХ фотоэлемента чаще всего оказывается затруднено. Установка длины волны осуществляется подключением необходимого светодиода к схеме с помощью кнопок управления «ДЛИНА ВОЛНЫ».

8. Нажатием кнопок «ДЛИНА ВОЛНЫ» подключить в схему фиолетовый светодиод.

9. Медленно вращая ручки НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА «ПЛАВНО» и «ГРУБО» против часовой стрелки снять обратную ветвь вольт-амперной характеристики фотоэлемента, записывая значения напряжения $U_{анзм}$ и значения фототока в таблицу 4.1 с учетом знака (ручки обладают высокой чувствительностью!). Напряжение на фотоэлементе измеряется универсальным мультиметром и в области отрицательных значений на дисплее высвечивается знак минус. Напряжение с выхода усилителя ФОТОТОК, пропорциональное фототоку, измеряется также с учетом знака (см. Особенности вольт-амперной характеристики стр. 8-9) и при необходимости легко может быть пересчитано в реальные значения тока по формуле:

$$I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых фото}}}{R_1 \cdot K_{\text{ус}}},$$

где $U_{\text{вых фото}}$ – значение напряжения с выхода усилителя (показания мультиметра PV2 ФОТОТОК), $R_1 = 100$ кОм – входное сопротивление прибора, $K_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления (типичное значения для обратной ветви ВАХ $K_{\text{ус}} = 150 - 180$ единиц). **Измерения необходимо производить особо тщательно в области выхода отрицательных значений фототока на некоторое постоянно значение вблизи U_3 (рисунки 3.1, 3.2, 3.3). Шаг изменения напряжения на аноде фотоэлемента должен составлять $\sim 0,03-0,05$ В. Показания мультиметра, измеряющего фототок с выхода усилителя не должны превышать $\pm 13 - \pm 14$ В, в противном случае усилитель находится в насыщении и не работает в нормальном линейном режиме. Если показания вольтметра PV2 остаются на уровне $\pm 13 - \pm 14$ В следует уменьшить коэффициент усиления прибора.**

10. Перейти к измерению прямой ветви ВАХ. При снятии прямой ветви вольт-амперной характеристики фотоэлемента переключатель диапазонов 1 мультиметра, измеряющего фототок следует перевести в положение **20 В DCV**.

11. Вращая ручку «НАПРЯЖЕНИЕ АНОДА ПЛАВНО/ГРУБО» по часовой стрелке, снять прямую ветвь вольт-амперной характеристики, записывая измеренные значения прямого напряжения на аноде и фототока в таблицу 4.1. Учитывайте, что как и для обратной ветви ВАХ, **показания мультиметра, измеряющего фототок с выхода усилителя не должны превышать $\pm 13 - \pm 14$ В, в противном случае усилитель находится в насыщении и не работает в нормальном линейном режиме. Если показания вольтметра PV2 остаются постоянно на уровне $\pm 13 - \pm 14$ В следует уменьшить коэффициент усиления прибора.** Типичное значение коэффициента усиления для прямой ветви ВАХ $K_{\text{ус}} = 5 - 50$ единиц.

12. Включить синий светодиод в схему нажатием кнопок «ДЛИНА ВОЛНЫ» и выполнить действия, аналогичный пп. 9-11. Указанные действия повторить для остальных светодиодов (зеленый; желтый).

13. Все измерения следует заносить в таблицу 4.1:

Таблица 4.1

$\lambda_1 = \dots$ $\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \dots$	Обратная	$U_{\text{аизм}} = U_{\text{а}}, \text{ В}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых фото}}}{R_1 \cdot K_{\text{УС}}}$	...	...	...	...
	Прямая	$U_{\text{аизм}} = U_{\text{а}}, \text{ В}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых фото}}}{R_1 \cdot K_{\text{УС}}}$	...	...	...	...
$\lambda_2 = \dots$ $\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \dots$	Обратная	$U_{\text{аизм}} = U_{\text{а}}, \text{ В}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых фото}}}{R_1 \cdot K_{\text{УС}}}$	...	...	...	...
	Прямая	$U_{\text{аизм}} = U_{\text{а}}, \text{ В}$	...	...	...	...
		$U_{\text{вых фото}} \sim I_{\text{фото}} = \frac{U_{\text{вых фото}}}{R_1 \cdot K_{\text{УС}}}$	...	...	...	...

14. Построить семейство прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик фотоэлемента для различных длин волн.

15. Для каждой вольт-амперной характеристики найти напряжение $U_{\text{аизм}1} \approx U_3$, соответствующее полной задержки электронов (начало участка обратной ветви ВАХ, где кривая переходит в участок со слабым наклоном. См. рисунки 3.1-3.3, 3.5).

16. Все вычисления свести в таблицу 4.2. Для каждой длины волны необходимо вычислить частоту света $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Это и будет частота света, который, попадая на фотоэлемент, вызывает фотоэффект.

Таблица 4.2

№ п/п	Окраска линии (светодиод)	Длина волны излучения λ , нм	Частота излучения $\nu = c/\lambda$, Гц	$U_{\text{аизм}1} \approx U_3$, В
1	Фиолетовый	410		
2	Синий (голубой)	480		
3	Зеленый	540		
4	Желтый	580		

17. С помощью метода наименьших квадратов построить график зависимости $U_{\text{аизм}1} = f(\lambda)$. График должен иметь вид прямой линии.

18. Из графика оценить значение постоянной Планка (см. формулы 2.8-2.9), оценить ошибку определения постоянной Планка Δh . Коэффициент пересчета k для формул (2.6) – (2.9) указан на передней панели установки. Типичное значение $k \approx 1,8$ [ед.].

19. Построить кривую спектральной чувствительности материала фотокатода для любого анодного напряжения в диапазоне $U_{\text{а}} = +0,05 \dots +15,00$ В (желательно в области насыщения). Для этого следует построить график зависимости фототока от длины волны падающего на него света $I_{\text{фото}} = I_{\text{фото}}(\lambda)$ при $U_{\text{а}} = \text{const}$ при фиксированном внешнем анодном напряжении и при фиксированном коэффициенте усиления (см. рисунок 4.2).

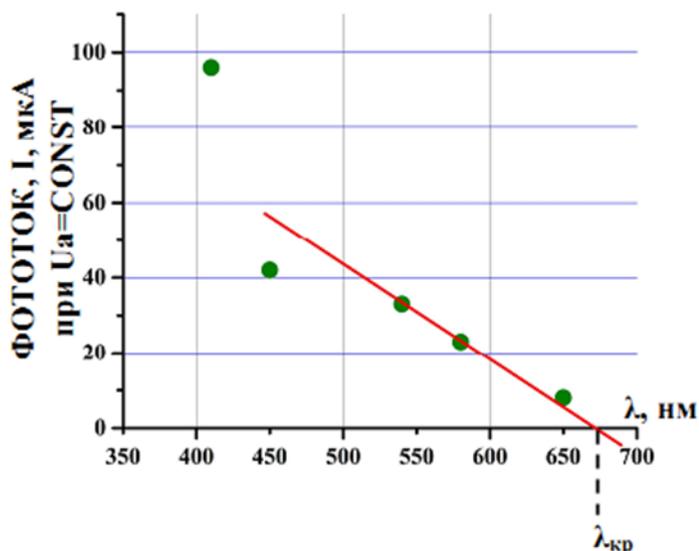


Рисунок 4.2 Пример спектральной характеристики фотоэлемента.

При этом $U(\lambda) \sim I(\lambda) = \frac{U_{\text{вых фото}}(\lambda)}{R_1 \cdot K_{\text{УС}}}$. Не забывайте, что, если показания вольтметра

PV2 остаются на уровне $\pm 13 - \pm 14$ В следует уменьшить коэффициент усиления прибора.

20. Оценить из графика $I_{\text{фото}} = I_{\text{фото}}(\lambda)$ красную границу фотоэффекта – длину волны, при которой фотоэффект прекращается и фототок стремится к нулю, для этого продолжить кривую до пересечения с осью λ , и оценить работу выхода электронов из материала катода.

Сведения о методе наименьших квадратов, а также другую дополнительную информацию см. в приложении 1.

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

5 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 падающего света, определяется как $E_{\text{max}} = eU_3$?
6. Для чего при проведении данного опыта необходим набор светофильтров с различной полосой пропускания длины волны λ ?
7. Объяснить ход прямой и обратной ветвей на вольт-амперной зависимости фототока от напряжения между катодом и анодом.

6 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. принципиальная блок-схема установки ФКЛ-11М
2. семейство прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик фотоэлемента для различных длин волн
3. результаты расчетов
4. выводы.

Структура отчета

1. титульный лист;
2. описание схемы и методики эксперимента;
3. основные расчетные формулы;
4. результаты работы и их анализ;
5. выводы.

7 Список рекомендуемой литературы

1. Рохлин, Г.Н. Разрядные источники света / Г.Н. Рохлин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
2. Иродов, И. Е. Квантовая физика. Основные законы: учебное пособие / И. Е. Иродов; художник Н. А. Лозинская, Н. А. Новак. – 8-е изд. — Москва: Лаборатория знаний, 2021. – 261 с.
3. Шпольский, Э. В. Атомная физика: учебник: в 2 томах / Э. В. Шпольский – 8-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022 – Том 1: Введение в атомную физику – 2022. – 560 с.
4. Лозовский, В. Н. Курс физики: учебник: в 2 томах / В. Н. Лозовский. – 6-е изд.,испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2022 – Том 2 – 2022. – 608 с.
5. Савельев, И. В. Курс физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – 9-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 308 с.

Приложение 1 (справочное)

Понятие о методе наименьших квадратов

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.

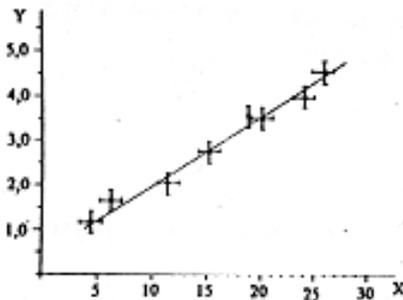


рис. 1

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 оценками 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 $\Delta B = t_{\alpha_0, (n-2)} \cdot S_B$

Тогда можно записать:

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

Стандартное отклонение коэффициента A определяется по формуле

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