

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА (на установке со светофильтрами)

11.1. Цель работы

1. Ознакомление с законами фотоэффекта и квантовой природой света.
2. Исследование зависимости энергии фотоэлектронов от частоты (длины волны) света.
3. Определение численного значения постоянной Планка.

11.2. Основные теоретические сведения

Фотоэффектом называется явление взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, при котором энергия излучения передаётся его электронам. Если явление сопровождается выходом свободных электронов за пределы вещества, то его называют внешним фотоэффектом или фотоэлектронной эмиссией, а вылетающие электроны – фотоэлектронами. Если фотоэффект не сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют внутренним (в этом случае он проявляется в изменении концентрации электронов и других носителей зарядов в различных частях вещества, изменяя его электрические и оптические свойства).

Впервые фотоэффект был открыт в 1887 г. Генрихом Герцем, который обнаружил, что искровой разряд между двумя металлическими шариками происходит значительно интенсивнее, если один из шариков освещать ультрафиолетовыми лучами.

Детальное экспериментальное исследование закономерностей внешнего фотоэффекта для металлов было выполнено год спустя в 1888-89 годы Александром Григорьевичем Столетовым. Позже эти исследования были продолжены П.И. Лукирским, С.С. Прилежаевым и др.

А.Г. Столетов экспериментировал на установке (рис. 11.1) с фотоэлементом в виде вакуумированной лампы с анодом (А) и металлическим катодом (К), который при освещении его через кварцевое окошко (О) видимым светом или ультрафиолетовым излучением испускал электроны. Схема подключения источника питания позволяла изменять его напряжение U и полярность электрического поля между электродами фотоэлемента так, чтобы можно было собрать все испущенные электроны на аноде при прямой полярности (когда на нём плюс), или запретить все электроны на освещаемом катоде при обратной

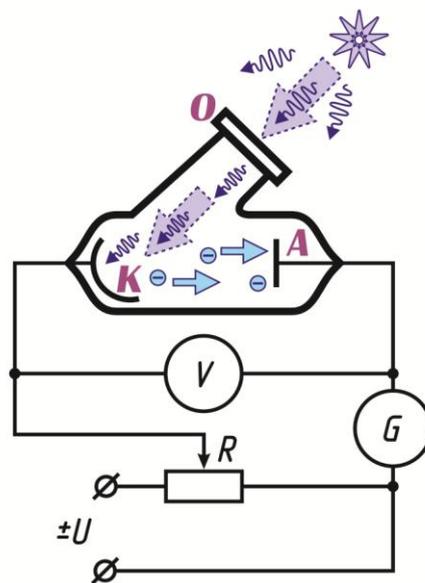


Рисунок 11.1

полярности. Эксперименты проводились с различной частотой и интенсивностью светового потока. Вылетевшие из катода отрицательно заряженные частицы, достигая анода, обеспечивали протекание в цепи электрического тока (*фототок*), который фиксировался гальванометром. Спустя 10 лет, в 1898 году Леннард и Томсон, измерив удельный заряд испускаемых частиц, установили, что это электроны.

В результате экспериментальных исследований были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Общее количество электронов, вылетающих с поверхности вещества в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте световой волны и не зависит от интенсивности света.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта – это такая минимальная частота световой волны, когда свет меньшей частоты фотоэффекта не вызывает.

4. Фотоэффект практически безынерционен.

Попытки объяснить фотоэффект на основе волновых представлений не имели успеха. Поэтому исследование внешнего фотоэффекта, наряду с изучением теплового излучения тел, способствовало развитию квантовых представлений о свете.

По квантовой теории свет излучается и поглощается веществом отдельными «порциями» – квантами с энергией $E = h\nu$, где ν – частота световой волны, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с – постоянная Планка. Световые кванты (фотоны) ведут себя как неделимые частицы. При поглощении фотон исчезает, а его энергия переходит к поглощаемому объекту. При внешнем фотоэффекте энергия поглощаемого в металле фотона переходит к одному из его свободных электронов. За счёт этой энергии электрон может выйти из металла, затратив на это энергию, которая называется работой выхода $A_{\text{вых}}$. Разность $h\nu$ и $A_{\text{вых}}$ остаётся у электрона в виде кинетической энергии. Исходя из этих представлений, можно записать уравнение закона сохранения энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}, \quad (11.1)$$

которое впервые было предложено Эйнштейном и поэтому называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. В его правой части второе слагаемое означает максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов. Это связано с тем, что в действительности выходящим из металла электронам соответствуют разные энергии от 0 до $mv_{\text{max}}^2/2$ даже при использовании света строго определенной частоты из-за частичной потери энергии при столкновениях в процессе движения электронов к поверхности металла. Часть электронов, потеряв энергию при столкновениях, так и не выходит из металла, то есть число выходящих электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов. Из (11.1) следует, что для возникновения фотоэффекта необходимо выполнение условия:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq A_{\text{вых}}, \quad (11.2)$$

где λ – длина волны, c – скорость света.

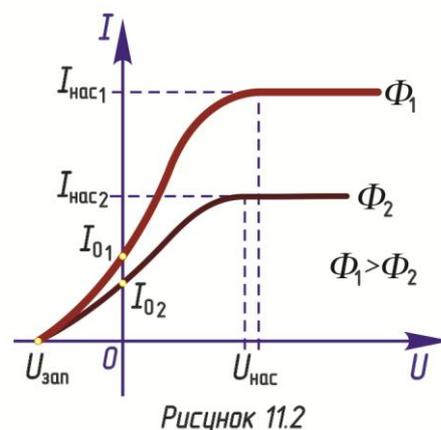
Квантовая теория объясняет все законы фотоэффекта. Интенсивность светового пучка определяется числом фотонов, падающих каждую секунду на металл. Число излучаемых фотоэлектронов пропорционально числу поглощаемых фотонов и, следовательно, интенсивности света. Для данного вещества работа выхода – строго определенная величина, поэтому максимальная энергия фотоэлектронов оказывается пропорциональной частоте падающего света. Частота света ν_0 , при которой энергия кванта равна работе выхода – и есть красная граница. То есть это соотношение определяет красную границу фотоэффекта. Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что электроны выходят практически одновременно с поглощением фотона из поверхностного слоя. Другие электроны при столкновениях теряют энергию и не смогут выйти из металла.

Примечание. Фотоэффектом в широком смысле называют различные процессы с поглощением фотона квантовой системой. Кроме внешнего и внутреннего фотоэффекта существует и вентильный фотоэффект для полупроводников. Например, в случае беспримесного полупроводника энергия поглощённого фотона затрачивается на образование пары электрон-дырка, в результате чего возрастает концентрация носителей тока и электропроводность полупроводника.

К фотоэффекту относят также процесс ионизации атома при поглощении фотона (фотоионизация). Например, атом водорода могут ионизовать фотоны УФ-излучения с энергией больше 13,6 эВ. Фотоны очень большой энергии (рентгеновского и гамма-излучения) вырывают электроны из внутренних оболочек тяжелых атомов. Это основной процесс поглощения рентгеновских лучей в свинце.

В нашей лабораторной установке (рис. 11.6) используется практически та же схема Столетова, только измерительные приборы заменены на современные датчики с усилителем, используются безопасная галогеновая лампа, а фотоэлемент – вакуумный.

На рис. 11.2 широкими линиями показаны типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) вакуумного фотоэлемента, то есть зависимость фототока от приложенного между анодом и катодом напряжения U (анодное напряжение) от источника питания, для двух разных интенсивностей света Φ , когда $\Phi_1 > \Phi_2$. При достижении какого-то положительного (прямая полярность) напряжения $U_{\text{нас}}$ фототок перестаёт увеличиваться, что соответствует насыщению $I_{\text{нас}}$, когда все электроны, испущенные с катода, достигают анода.



Фототок насыщения зависит от падающего на фотоэлемент светового потока Φ . Он будет тем больше, чем больше число фотонов в секунду падает на катод. То есть очевидно, что зависимость $I_{\text{нас}}(\Phi)$ должна быть прямо пропорциональная. По этой причине вакуумные фотоэлементы могут служить точными фотометрами, позволяющими измерять световые потоки.

Примечание для будущих учёных. Следует отметить, что при достаточно больших световых потоках ток насыщения перестаёт увеличиваться пропорционально световому потоку. Энергетические (или световые) характеристики (это зависимости фототока I от интенсивности светового потока Φ при неизменном анодном напряжении U источника питания) линейны в широком диапазоне изменения Φ , что определяется законом Столетова, согласно

которому фототок пропорционален интенсивности светового потока. Но при больших значениях Φ наблюдается отклонение от линейности, которое обусловлено влиянием объёмного заряда (поскольку $U = const$) и утомлением фотокатода, которое связано с физико-химическими процессами, происходящими в фотокатоде под действием ионной бомбардировки и при взаимодействии с остаточными газами.

Если световой поток, падающий на фотоэлемент, создаётся точечным источником, то его величина обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до фотоэлемента.

При нулевом напряжении (источника питания нет или он выключен) фототок I_0 обеспечивается за счёт наличия кинетической энергии у фотоэлектронов, направленно долетевших до анода. С ростом напряжения в отрицательном направлении (обратная полярность) фототок плавно уменьшается до нуля. Плавный спад фототока с увеличением обратного напряжения объясняется различной кинетической энергией, с которой электроны выходят из катода. При напряжении $U_{зап}$ (запирающая разность потенциалов) электрическим полем задерживаются все фотоэлектроны вплоть до тех, которые обладают максимальной кинетической энергией – фотоэлемент «заперт», то есть ток через него не проходит и, значит, запирающая разность потенциалов определяет максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = e|U_{зап}|, \quad (11.3)$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона.

Подставив (11.3) в уравнение Эйнштейна, получим:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + e|U_{зап}|. \quad (11.4)$$

Решив относительно $U_{зап}$, получим:

$$|U_{зап}| = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вых}}}{e}. \quad (11.5)$$

Следовательно, чтобы проверить пропорциональность максимальной кинетической энергии фотоэлектронов частоте света, достаточно показать, что зависимость $U_{зап}$ от ν является линейной (рис. 11.3).

Экстраполируя график зависимости $U_{зап} = f(\nu)$ до пересечения с осью частоты, получим красную границу ν_0 . Угловым коэффициентом этой зависимости есть постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

11.3.1. Методика измерения постоянной Планка на лабораторной установке

Максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов определяют *методом запирающего (задерживающего) напряжения*. Для этого измеряют ток фотоэлемента при обратной полярности напряжения источника питания U между фотокатодом и анодом, когда испущенные фотокатодом электроны движутся в тормозящем электрическом поле фотоэлемента. При увеличении напряжения в обратной полярности ток фотоэлемента уменьшается, и при некотором напряжении $U_{зап}$ (запирающее напряжение) фототок прекращается, то есть обращается в нуль (см. рис. 11.2).

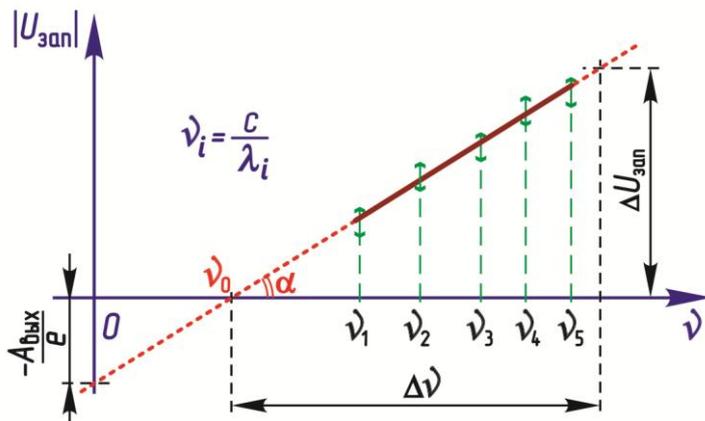


Рисунок 11.3

В лабораторной работе предстоит определить запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$ при освещении фотоэлемента через светофильтры монохроматическим светом различной длины волны λ . По полученным результатам строится график зависимости $U_{\text{зап}}$ от частоты ν , соответствующей указанной на свето фильтре длине волны (рис. 11.3). Если

полученные значения укладываются в прямую линию, то эксперимент согласуется с формулой (11.4) и подтверждает, что энергия фотона пропорциональна частоте света. А по наклону этой прямой определяется постоянная Планка. Для этого формулу (11.4) можно преобразовать, взяв приращения (дифференциалы) запирающего напряжения $\Delta U_{\text{зап}}$ и частоты $\Delta \nu$:

$$h \Delta \nu = e \Delta U_{\text{зап}},$$

откуда выводится формула для определения постоянной Планка:

$$h = e \frac{\Delta U_{\text{зап}}}{\Delta \nu} = e \operatorname{tg} \alpha, \quad (11.6)$$

где дифференциалы $\Delta U_{\text{зап}}$ и $\Delta \nu$ определяются из графика рис. 11.3 (α – угол его наклона)

Этот же график позволяет определить красную границу ν_0 по пересечению прямой с осью абсцисс (при $U_{\text{зап}} = 0$) и работу выхода по пересечению прямой с осью ординат (при $\nu = 0$). Прямая отсекает на этой оси отрезок в вольтах, численно равный работе выхода в электронвольтах ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Заметим, что используемый выше метод измерения $A_{\text{вых}}$ и ν_0 верен только когда работа выхода материала фотокатода и анода одинакова – тогда между электродами фотоэлемента отсутствует контактная разность потенциалов. Используемый в этой лабораторной работе фотоэлемент удовлетворяет этому условию.

Про фотоэлементы более подробно написано в разделе 11.7, материал которого относится к дополнительному чтению :)

11.3.2. Описание экспериментальной установки

Упрощённая принципиальная электросхема лабораторной установки (без источников питания и без переключателя полярности) изображена на рис. 11.4. Перерисуйте её в свои конспекты.

Примечание для будущих инженеров.

В соответствии с ГОСТ 2.710-81 «Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах» позиционное обозначение каждого элемента или устройства состоит из одно- или двухбуквенного кода и порядкового номера элемента (устройства) среди элементов (устройств) данного вида в изделии.

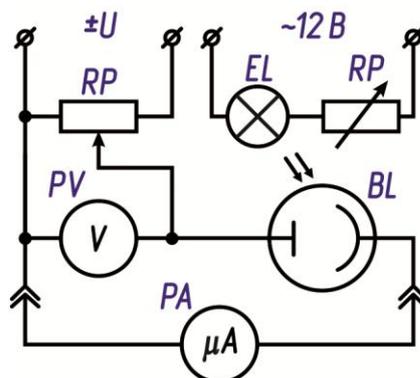


Рисунок 11.4

Некоторые буквенные коды вам уже хорошо знакомы: это С – конденсаторы, L – катушки индуктивности, R – резисторы, T – трансформаторы и т.д. Зная по рис. 11.5 из каких элементов состоит схема лабораторной установки, нетрудно догадаться, что EL – осветительная лампа, BL – фотозащитный элемент, RP – потенциометр, P – приборы измерительные. На нашей схеме PV – это вольтметр вместо встроенного датчика напряжения и PA – внешний микроамперметр, который подключается к клеммам на участке цепи фототока. Кстати, условные графические обозначения элементов на схеме, их вид и размеры выполнены тоже по ГОСТу.

В состав установки (рис. 11.5) входят:

- подвижный источник света – галогеновая лампа накаливания со сплошным спектром излучения (3), которая установлена на скамье с линейкой (11), где ноль линейки соответствует положению фотокатода,
- светонепроницаемый корпус, внутри которого установлен вакуумный фотозащитный элемент (1), а также все элементы не указанные на электросхеме (рис. 11.4): источники питания для лампы и для анодного напряжения. Перед фотозащитным элементом установлен фланец, в который

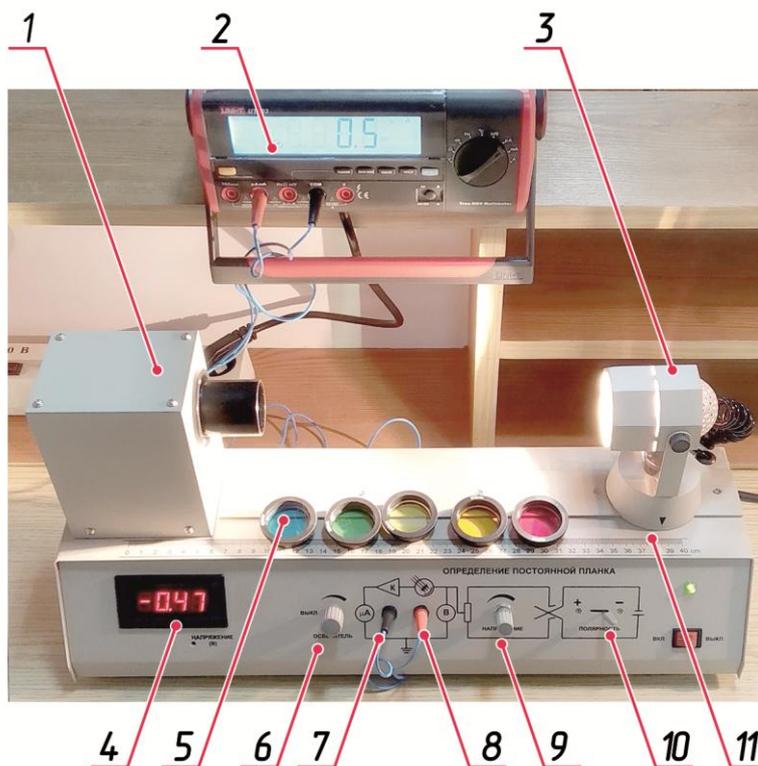


Рисунок 11.5

устанавливают узкополосные светофильтры (5) на разные длины волн. С их помощью получают монохроматическое излучение с различной длиной волны: 460 нм – синий цвет, 500 нм – зелёный, 540 нм – жёлто-зелёный, 570 нм – жёлтый и 635 нм – красный цвет.

Внимание!

Со светофильтрами обращайтесь очень бережно, постарайтесь их не ронять и храните в закрытой коробке на мягкой подкладке (их уже не выпускают).

Интенсивность светового излучения, падающего на фотозащитный элемент, можно изменять, регулируя яркость лампы рукояткой **Осветитель (6)**, или передвигая её по скамье, или устанавливая перед светофильтром сетку. В этой лабораторной работе нужно будет только передвигать на максимальной яркости.

На электроды фотозащитного элемента подаётся постоянное напряжение от источника питания в два этапа: первый, когда минус источника подключён к аноду – **режим обратного тока** (при этом электрическое поле в фотозащитном элементе будет тормозящим для электронов, вылетающих из фотокатода) и второй этап, когда минус источника подключён к катоду – **режим прямого тока**. Для этого имеется переключатель **Полярность (10)**. Напряжение источника подстраивается регулятором **Напряжение (9)** на его лицевой панели и контролируется по экрану вольтметра (4).

Ток I фотоэлемента очень слабый и для его регистрации требуется усилитель или чувствительный микроамперметр (2).

В данной установке ранее был встроенный усилитель в цепи фототока, но он вносил сильные искажения и поэтому значения силы тока получались некорректными. К тому же, оказалось, очень неудобно использовать одно единственное табло цифрового индикатора для регистрации как тока, так и напряжения, постоянно переключаясь между ними. Поэтому «слабые звенья» инженером были отключены и установка доработана для подключения внешнего мультиметра с точным датчиком силы тока в микроамперном диапазоне. Встроенный вольтметр остался прежний.

Точность измерения напряжения в данной установке составляет $\pm 3\%$ и она отражена в доверительных интервалах на рис. 11.3.

Точность измерения силы тока в данном диапазоне мультиметром UT801 составляет: $\pm(0,5\% + 3 \text{ ед. мл. р.})$

Кнопка питания настольного мультиметра UT801 находится на задней стенке прибора. Обычно она постоянно находится во включенном положении, а прибор включается/выключается одновременно с лабораторной установкой нажатием на кнопку блока розеток на рабочем столе.

Проверьте, что на мультиметре (рис. 11.6):

- большой круглый переключатель режима измерения установлен на μA ;
- включен режим измерения постоянного тока (нажать на синюю кнопку **SELECT**, чтобы на экране справа от цифр появился символ **DC**);
- провод от клеммы **COM** подключен к катоду (левая (7) клемма на установке), а провод от клеммы μAmA к аноду (правая (8) клемма);
- включен режим RS232, чтобы вывести прибор из режима энергосбережения и он не уходил бы в сон каждые 10 минут (нажать на кнопку **RS232**, чтобы слева на экране появился символ **RS232**).

На рисунке 11.6 показана лицевая панель мультиметра UT801 в процессе выполнения данной работы.

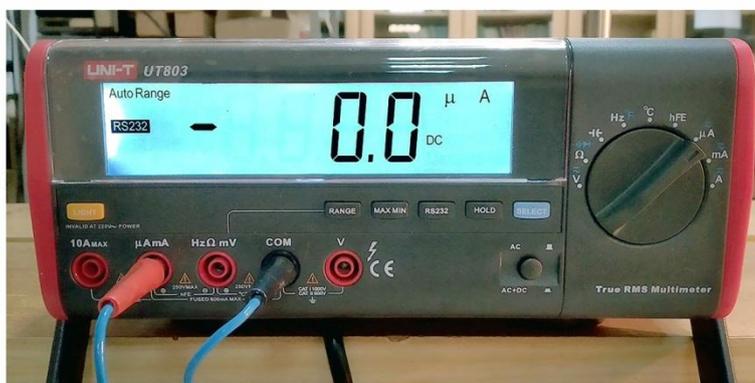


Рисунок 11.6

11.3.3. Особенность экспериментальной ВАХ.

В отличие от характеристик, которые обычно изображают в учебниках (рис. 11.2 и рис. 11.7А), реальная ВАХ при обратной полярности в данной работе имеет особенность: при увеличении анодного напряжения U в обратной полярности фототок уменьшается, а достигнув нуля, меняет направление (это появившийся минус перед нулями на рис. 11.6) и вскоре устанавливается небольшое по величине, почти постоянное значение обратного фототока. Этот обратный фототок объясняется эмиссией электронов с анода под действием того же света, рассеянного в фотоэлементе. Таким образом, в одном фотоэлементе можно считать присутствуют два фотоэлемента, фототоки которых направлены навстречу – основной и побочный (он со значительно более слабым током).

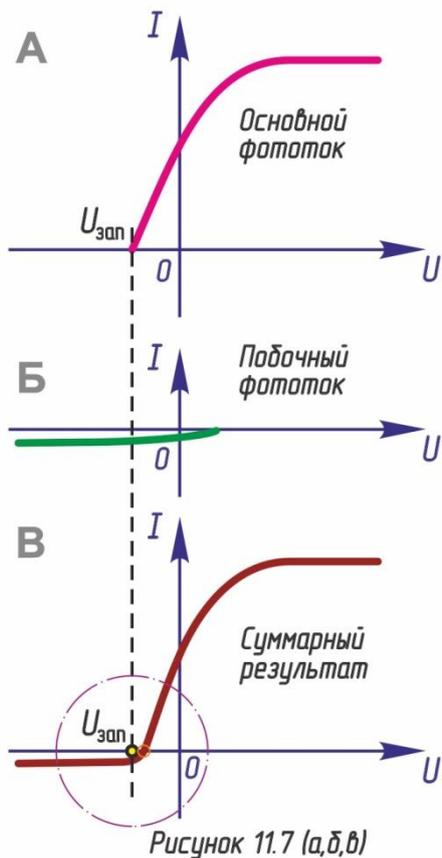


Рисунок 11.7 (а,б,в)

Поэтому результирующая реальная ВАХ, получаемая в лабораторном эксперименте и показанная схематично на рис. 11.7В, представляет собой алгебраическую сумму вольт-амперных характеристик основного (рис. 11.7А) и побочного (рис. 11.7Б) фотоэлементов. Отсюда следует, что в идеале запирающее напряжение $U_{зап}$ следует определять не в точке $I = 0$, а там, где кривая переходит в участок со слабым наклоном. Выделенная кругом область суммарной ВАХ из рис. 11.7В дана на рис. 11.8.

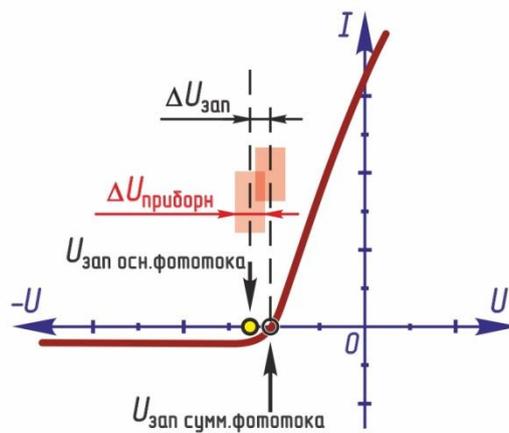


Рисунок 11.8

У лабораторного фотоэлемента обратный фототок наиболее заметно проявляется в фиолетовом диапазоне. В остальных случаях получаемые значения для обратного фототока весьма незначительны и попадают в диапазон Δ погрешности вольтметра, поэтому для определения $U_{зап}$ ими можно пренебречь.

11.4. Порядок выполнения работы

Заранее подготовьте в протоколе таблицы 11.1 и 11.2 (их также можно распечатать и вклеить в протокол).

Таблица 11.1

№ (i, j)	λ , нм	ν , Гц	Режим обратного тока		
			максимальная интенсивность света	уменьшенная интенсивность света	*среднее значение
			$U_{зап}$, В	$U_{зап}$, В	$\langle U_{зап} \rangle$, В
1	635				
2	570				
3	540				
4	500				
5	460				

*Погрешность измерения тока и напряжения в лаб.установке равна $\pm 3\%$

	λ , нм выбранного светофильтра	I , мкА								
		0 В	0,5 В	1 В	1,5 В	2 В	4 В	8 В	12 В	15,8 В
Φ_1 25 см										
Φ_2 40 см										

11.4.2. Задание 1. Измерение запирающего напряжения для различных частот при двух интенсивностях света

1. Включите питание установки, нажав красный переключатель в положение **Вкл.** Поверните регулятор **Осветитель** на максимальную интенсивность света и установите источник света на отметку 25 см. Дайте установке прогреться 2-3 минуты.

2. Установите переключатель **Полярность** на «-», поверните регулятор **Напряжение** против часовой стрелки до упора в нулевое значение на табло вольтметра.

3. Вставьте в фланец перед фотоэлементом красный светофильтр на $\lambda_1 = 635$ нм.

4. Медленно изменяя (увеличивая по модулю в отрицательную сторону) напряжение на фотоэлементе регулятором **Напряжение** внимательно смотрите за значением силы фототока на мультиметре – его надо довести до нулевого значения. Как только достигнете нуля, чуть поверните регулятор **Напряжение** до момента появления знака «минус» перед нулями на экране мультиметра (как на рис. 11.6) – это самое близкое к нулю значение фототока.

Для данного типа фотоэлемента анодное напряжение источника питания, при котором фототок равен нулю, можно принять за напряжение запираения $U_{\text{зап}}$.

Впишите найденное значение $U_{\text{зап}}$ в табл. 11.1 для этой длины волны.

5. Повторите п. 2 и п. 3 для светофильтров с другими длинами волн. Результаты измерений занесите в табл. 11.1.

6. Уменьшите интенсивность света, передвинув источник света на отметку 40 см, и повторите п. 2 со всеми светофильтрами. Результаты измерений запишите в табл. 11.1 в столбцы для уменьшенной интенсивности.

11.4.1. Задание 2. Построение ВАХ фотоэлемента для двух длин волн

1. Установите переключатель **Полярность** на «+», поверните регулятор **Напряжение** против часовой стрелки до упора в нулевое значение на табло вольтметра.

2. Для выполнения задания выберите себе сами по одному светофильтру из двух пар: (λ_1 или λ_2) и (λ_4 или λ_5).

3. Вставьте в фланец перед фотоэлементом первый выбранный светофильтр и при отсутствии напряжения от источника питания ($U = 0$ В) зафиксируйте в табл. 11.2 значение силы фототока I .
4. Увеличивая напряжение в прямой полярности с шагом по табл.11.2 до упора (15,8 В), впишите соответствующие значения силы фототока в табл. 11.2.
5. Поменяйте светофильтр на другой и повторите п. 4 и п. 5.
6. Передвиньте источник света на отметку 40 см и повторите п. 4-6 для меньшей интенсивности света.

11.4.3. Обработка результатов

1. По результатам измерения $U_{\text{зап}}$ при различной интенсивности света вычислите среднее значение запирающего напряжения $\langle U_{\text{зап}} \rangle$ для каждой частоты. Результаты вычисления внесите в табл. 11.1.

2. По значениям из табл. 11.2 постройте на миллиметровке на одних осях все ВАХ в положительной полярности. В отрицательной полярности продолжите линии ВАХ до средних значений $\langle U_{\text{зап}} \rangle$ из табл. 11.1, соответствующих их длинам волн.

3. Постройте на миллиметровке графическую зависимость среднего значения $\langle U_{\text{зап}} \rangle$ от частоты ν излучения. Для этого нанесите на график все экспериментальные точки из задания № 1 и проведите через них наилучшую прямую (см. рис. 11.3).

4. Определите по графику красную границу фотокатода и работу выхода.

5. Определите постоянную Планка $h_{\text{граф}}$ по графику, как это описано в разделе 11.3.1 (см. формулу (11.6)). Полученное значение $h_{\text{граф}}$ представьте с учётом относительной погрешности измерения $\varepsilon_{h_{\text{граф}}}$ в %, то есть из сравнения полученного в лабораторной работе значения $h_{\text{граф}}$ с табличным значением $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

6. Для будущих учёных.

Рассчитать постоянную Планка можно математически, если воспользоваться средним значением из результатов, полученных по формуле:

$$h_{ij \text{ расч}} = \frac{e(\langle U_{\text{зап} i} \rangle - \langle U_{\text{зап} j} \rangle) \lambda_i \lambda_j}{c(\lambda_i - \lambda_j)}, \quad (11.7)$$

где $c = 2,997 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в воздухе,

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона,

i и j – порядковые номера разных длин световых волн (нумерация указана в табл. 11.2 из задания №1). Пары волн для расчётов указаны в табл. 11.3

Из полученных вычислений определите среднее значение $\langle h \rangle_{\text{расч}}$, рассчитайте относительную погрешность $\varepsilon_{h_{\text{расч}}}$ и сделайте вывод.

Таблица 11.3

	λ_1 и λ_2	λ_2 и λ_3	λ_3 и λ_4	λ_4 и λ_5	λ_1 и λ_3	λ_1 и λ_4	λ_1 и λ_5	λ_2 и λ_4	λ_2 и λ_5	λ_3 и λ_5
$h_{ij \text{ расч}}$										
$\langle h \rangle_{\text{расч}}$										
$\varepsilon_{h_{\text{расч}}}$										

11.5. Контрольные вопросы

1. В чём состоит двойственная природа света?
2. В чём заключается квантовая гипотеза Планка?
3. В чём состоит явление фотоэлектрического эффекта?
4. Как формулируются законы фотоэффекта и основные положения фотонной теории света?
5. В чём суть формулы Эйнштейна для фотоэффекта? Кстати именно за открытие закона фотоэффекта и за эту формулу он стал лауреатом Нобелевской премии.
6. В чём состоит методика измерения постоянной Планка в данной работе?

11.6. Вопросы от инженера

1. На рис. 11.2 изображены ВАХ для $\Phi_1 > \Phi_2$ при $\nu = const$. Изобразите ВАХ при $\Phi = const$ для трёх значений частот, где $\nu_2 > \nu_1 > \nu_0$, а ν_0 – красная граница.
2. По результатам измерения $U_{зап}$ при различной интенсивности света, но одинаковой частоте, сделайте вывод, зависит ли максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов от интенсивности света?
3. Сделайте вывод, подтверждает ли полученный график $\langle U_{зап} \rangle$ от частоты ν излучения второй закон фотоэффекта?
4. По полученным в этой лабораторной работе данным можно с большой вероятностью назвать основной металл, из которого сделан катод фотоэлемента. Что для этого нужно знать и назовите этот металл.
5. Корректно ли было бы увеличить в два раза расстояние до источника света или уменьшить в два раза напряжение в цепи лампы лабораторной установки, чтобы интенсивность излучения, падающего на катод фотоэлемента, снизить также в два раза?

11.6. Литература для изучения

Ландсберг Г.С. Общий курс физики. Оптика – гл. 32. – М.:Наука, 1976.

Дополнительное чтение

11.7. Практическое применение внешнего фотоэффекта.

Фотоэффект сыграл огромную роль в становлении квантовой физики и нашёл широкое практическое применение в работе различных механизмов и устройств. Чтобы реагировать на свет они содержат *фотоэлементы* – электронные приборы, в которых энергия падающего света преобразуется в ЭДС (*фото-ЭДС*) или электрический ток (*фототок*). История создания фотоэлементов насчитывает уже более 130 лет. Первый фотоэлемент был основан на внутреннем фотоэффекте и изготовлен в 1875 г. А первый вакуумный фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте, был сделан в 1889 г. Хотя внутренний фотоэффект был открыт лет на 50 раньше внешнего,

вакуумные фотоэлементы приобрели широкое развитие раньше полупроводниковых. Промышленное производство вакуумных фотоэлементов в нашей стране было организовано Петром Васильевичем Тимофеевым в 1930 г. Создание новых фотоэлементов на основе полупроводниковых материалов началось уже в сороковых годах благодаря бурному развитию физики полупроводников и всестороннему изучению внутреннего фотоэффекта.

Кстати, помимо разработки фотоэлементов, электронных умножителей, электронных ламп, электронно-оптических преобразователей П.В. Тимофеев в 1933-1936 годах изобрёл передающие телевизионные электронные трубки, в том числе супериконоскоп, и другие электронно-оптические устройства, участвовал в разработке усилителей и фотоэлементов для звукового кино, телевидения и автоматики, а также разработал серию приборов инфракрасной техники для оборонной промышленности.

Вакуумные фотоэлементы просты и практически безынерционны – электроны эмитируют с поверхности фотокатода через $10^{-10} \dots 10^{-9}$ с после воздействия фотонов. Их применяют весьма широко, в том числе и в прецизионных устройствах, например, в автоматических спектроанализаторах. Чувствительность этих фотоэлементов составляет $20 \dots 80$ мкА/лм, но так как рабочие световые потоки обычно малы, то отдача тока лежит в пределах $10^7 \dots 10^{13}$ А. Поскольку внутреннее сопротивление вакуумных фотоэлементов весьма велико, задачу усиления столь малых токов можно решить, применив усилитель постоянного тока с большим входным сопротивлением, как сделано в этой лабораторной работе.

Чтобы увеличить чувствительность вакуумного фотоэлемента, поверхность фотокатода изготавливают из веществ, имеющих очень низкую работу выхода. Это обычно полупроводниковые материалы (в частности, соединения щелочных металлов с сурьмой и/или другими неметаллами). Надеюсь, группам с хим-профилем это будет особенно интересно.

В нашей лабораторной работе используется фотоэлемент с катодом из Sb-Cs (сурьяно-цезиевый, на основе антимонида цезия Cs₃-Sb).

Более чувствительные, чем наш учебно-лабораторный, бищелочные сурьяно-рубидиево-цезиевый Sb-Rb-Cs и сурьяно-калиево-цезиевый Sb-K-Cs фотокатоды часто используются для измерения ионизирующих излучений с помощью сцинтилляционных детекторов.

Состав полупроводниковых материалов формирует различные типы фотокатодов, которые связаны с их рабочим спектральным диапазоном, а также с величиной темнового тока. В физике и электронике темновым током называют малый электрический ток, который протекает по fotocувствительному элементу, в отсутствие падающих фотонов. Физической причиной существования темнового тока являются случайные генерации электронов и дырок в p-n слое устройства, которые затем начинают упорядоченно двигаться за счёт сильного электрического поля. Темновой ток – один из главных источников шума в таких светочувствительных приборах как ПЗС-матрицы, которые аналогичны применяемым в цифровых фотоаппаратах.

Следующим шагом в развитии стали высокотемпературный бищелочной (низкошумящий) (натриево-калиево-сурьяной, Na-K-Sb) фотокатод, который может работать при температурах до 175°C. При комнатной температуре такой

фотокатод работает с очень низким уровнем темнового тока, что делает его идеальным для приложений, использующих счёт фотонов.

Далее разработали мультищелочной фотокатод (натриево-калиево-сурьмяно-цезиевый, Na-K-Sb-Cs), называемый также S-20, который имеет широкий диапазон спектральной чувствительности от начальной ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. Он сейчас часто применяется для широкополосных спектрофотометров и приложений, использующих счёт фотонов. Длинноволновая область чувствительности может быть расширена до 900 нм при специальной активационной обработке фотокатода. Фотокатод состоит из плёнки бищелочного Na-K-Sb, покрытой дипольным поверхностным слоем Cs-Sb или Cs, снижающим работу выхода электрона до нуля или ниже.

Самым современным из универсальных считается Ga-As (арсенид-галлиевый) фотокатод. Чувствительность этого фотокатода охватывает ещё более широкий спектральный диапазон, чем мультищелочного, от ультрафиолета до 930 нм.

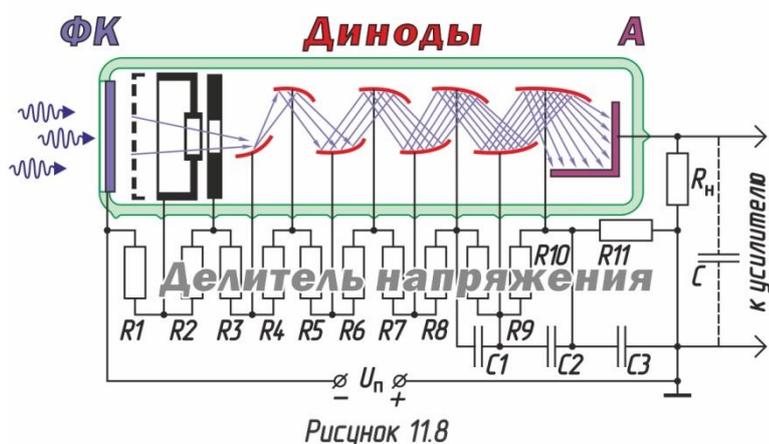
Также изготавливаются узкоспециализированные высокочувствительные In-Ga-As (арсенид галлия-индия) фотокатоды для инфракрасного диапазона от 900 до 1000 нм (при изготовлении по специальной технологии этот фотокатод может работать даже до 1700 нм). А также Cs-Te, Cs-I (теллурид цезия, иодид цезия) фотокатоды, которые чувствительны к вакуумному и ближнему ультрафиолету, но не к видимому свету. Их поэтому называют солнечно-слепыми. Cs-Te нечувствительными к длинам волн более 320 нм, а Cs-I к длинам волн более 200 нм. Существуют также солнечно-слепые фотокатоды из K-Br (бромид калия) и Rb-Te (теллурид рубидия).

Следующий шаг развития вакуумных фотоэлементов – **фотоэлектронные умножители** (ФЭУ), в которых фототок усиливается в умножительной системе в результате процесса вторичной электронной эмиссии.

Фотоэлектронный умножитель получает свет через стеклянное или кварцевое окно, покрытое фоточувствительной поверхностью – фотокатодом, который испускает электроны, а они в свою очередь умножаются в специальных электродах, называемых динодами. Обычно количество динодов в ФЭУ бывает от 9 до 13. Работа динода основана на эффекте вторичной электронной эмиссии – явления, когда первичный электрон, попадая на динод, выбивает несколько электронов (называемых вторичными). Сколько в среднем появляется вторичных электронов, зависит и от энергии первичного электрона и от материала динода. Эта величина называется коэффициентом вторичной эмиссии δ и обычно для современных ФЭУ лежит в пределах от 3 до 10. Чтобы вылетевший из фотокатода фотоэлектрон пришел на 1-ый динод, имея достаточную энергию, потенциал динода должен быть на несколько десятков или сотен вольт более положительным. Аналогично, чтобы появившиеся с 1-го динода примерно δ вторичных электронов достигли следующего 2-го динода, обладая достаточной энергией, потенциал 2-го динода также должен превышать потенциал 1-го на 100...200 В. Очень важно при этом, чтобы все вторичные электроны попали именно на динод, а не на стойки электродов и стекло колбы.

Реальные конструкции диодных систем весьма разнообразны, каждый тип имеет свои особенности. Наиболее распространены ФЭУ, в которых усиление электронного потока осуществляется при помощи системы дискретных диодов – электродов корытообразной, коробчатой или жалюзийной формы с линейным (как на рис. 11.8) (иногда и круговым) расположением, обладающих коэффициентом вторичной эмиссии $\delta > 1$. В конце диодной системы находится анод или собирательный электрод. Как правило, ток, идущий через анод пропорционален фототоку, генерируемому фотокатодом.

Пространство между первым диодом и фотокатодом называется входной камерой ФЭУ. Во входной камере точно также как и в электронной пушке осциллографа осуществляется фокусировка и ускорение фотоэлектронов, направляемых на первый диод. Для чего диодам и аноду сообщают



определенные потенциалы относительно фотокатода при помощи высоковольтного источника (напряжением 600...3000 В). Иногда применяется магнитная фокусировка, либо фокусировка в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Фотоэлектронные умножители могут производить сигнал даже в отсутствии света, так как существуют темновой ток, возникающий из-за термальной эмиссии электронов из фотокатода, утечка тока между диодами, а также случайные излучения. Электрический шум также относится к темновому току и обычно включается в значение темнового тока. Фотоэлектронные умножители не хранят заряда и отвечают на изменения входящих световых потоков в течении нескольких наносекунд. Благодаря этому, ФЭУ могут быть использованы для обнаружения и записи очень кратковременных событий. Характерной особенностью фотоэлектронных умножителей, используемых в научных целях, является высокое отношение сигнал-шум при умножении более одного миллиона вторичных электронов. Это связано с тем, что темновой шум может быть существенно снижен благодаря охлаждению фотоэлектронного умножителя.

Наиболее широкое применение ФЭУ нашли в ядерной физике в качестве элемента сцинтилляционного счётчика. Счётчик состоит из сцинтиллятора (это вещество, излучающее свет при поглощении ионизирующего излучения), ФЭУ, преобразующего вспышки сцинтиллятора в короткие электрические импульсы, и регистрирующего устройства, измеряющего количество импульсов в единицу времени или их амплитуду. Число вспышек в сцинтилляторе пропорционально количеству поглощённых частиц, а интенсивность вспышек – энергии частиц.

Почти одновременно с ФЭУ в разных странах изобретатели независимо друг от друга создали и другие электровакуумные устройства на основе использования внешнего фотоэффекта – это **электронно-оптические преобразователи** (ЭОП).

Конструктивно простейший ЭОП состоит из того же вакуумированного стеклянного баллона, на одну стенку которого так же нанесён полупрозрачный фотокатод, но на противоположную – флуоресцирующий экран. Между фотокатодом и экраном приложено постоянное напряжение 10...15 кВ. Внешний объектив строит на фотокатодe невидимое (или видимое) изображение. Под воздействием изображения возникает эмиссия фотоэлектронов, число которых в любой точке пропорционально имеющейся там освещенности. В момент выхода из фотокатода фотоэлектроны вылетают по различным направлениям, но благодаря ускоряющему электрическому полю фотоэлектроны стягиваются в узкий пучок, ускоряются и направляются к экрану в точку, лежащую против точки выхода (как в электронной линзе в между анодами электронной пушки в ЭЛТ осциллографа). На экране электронное изображение преобразуется в видимое благодаря флуоресценции экрана из-за бомбардировки его фотоэлектронами. С экрана изображение может передаваться либо на сетчатку глаза (либо непосредственно, либо с помощью окуляра), или на телевизионную трубку, или на любое другое устройство. Такой ЭОП даёт линейное однократное увеличение (отношение линейных размеров изображения на экране и на фотокатодe), так как электронные пучки фокусируются только за счёт действия однородного плоского электростатического поля.

ЭОП применяются в приборах ночного видения (ПНВ), а специально разработанные высококачественные приборы этого типа эффективно используются в астрономии и в приборах, регистрирующих быстропротекающие процессы, поскольку они практически безынерционно управляют электронным изображением с помощью электрических и магнитных полей.

Вот так в настоящее время применяется явление внешнего фотоэффекта :))

Что касается внутреннего фотоэффекта, это когда поглощение электромагнитного излучения в полупроводниках приводит к росту их электрической проводимости (явление используется в фоторезисторах, сопротивление которых может уменьшаться в сотни и тысячи раз при их освещении) или вентильного фотоэффекта, когда энергия светового излучения в контакте двух разных полупроводников преобразуется напрямую в электрическую без внешнего электрического поля (используется в солнечных батареях), то это темы для других новых лабораторных работ, которые, возможно, тоже появятся в физпрактикуме нашей школы.

*Составители И.В. Воронин, Н.С. Кулеба, Е.О. Татаринова
Иллюстрации И.В. Воронин
кафедра «Основы физики» СУНЦ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 г.*