

МИНИСТЕРСТВО НАРОДНОГО ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Брестский инженерно-строительный институт

Кафедра физики

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

(методические указания)

по курсу общей физики

Лабораторная работа К I

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Утверждено Ученым советом
электронно-механического
факультета 23 декабря 1988г.,
протокол № 2

Брест 1988

УДК 53 (076.5)

Физический практикум (методические указания) по курсу общей физики.

Лабораторная работа К1. Изучение явления внешнего фотоэффекта.

Брест, БИСИ, 1988.

В методических указаниях выполнение лабораторной работы по одному из фундаментальных явлений физики - внешнему фотоэффекту - построено как ТИРС.

Предназначены для студентов всех специальностей и всех форм обучения в БИСИ.

Рассмотрены на научно-методическом семинаре кафедры физики 88.12.19.

Рекомендовано кафедрой физики к публикации на ротапринтере БИСИ 88.12.19, протокол № 3.

Авторы: Гладышук А.А., Русаков К.И.

Рецензенты: кафедра физики БГПИ им. А.С.Пушкина;
доцент БГПИ, к.ф.-м.н. Косарев В.М.



Брестский инженерно-строительный институт, 1988

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА К I

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Основное содержание работы:

- практическое знакомство с явлением внешнего фотоэффекта;
- установление основных экспериментальных закономерностей для внешнего фотоэффекта;
- обсуждение полученных результатов с позиций классической электромагнитной теории;
- объяснение основных закономерностей фотоэффекта на основании квантовых представлений о взаимодействии света с веществом.

* * *

Явление внешнего фотоэффекта

Явление выбивания электронов из металла светом получило название **ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА** или **ФОТОЭФФЕКТА**.

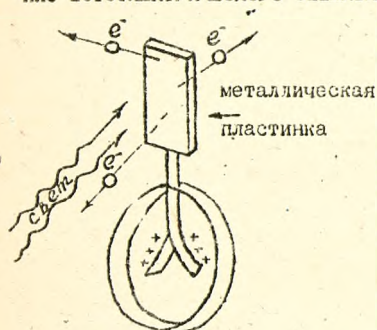


Рис. I

На рис. I схематически изображена суть явления. Нейтральный электроскоп соединён с металлической пластинкой. При освещении пластинки светом электроны покидают её (часто такие электроны называют **ФОТОЭЛЕКТРОНАМИ**) и попадают в другую среду или вакуум, а листочки электроскопа при этом заряжаются положительно. Такой фотоэффект называют **ВНЕШНИМ** (фотоэлектроны покидают данное вещество).

Историческая справка: Испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения было открыто в 1887 году немецким физиком Генрихом Герцем. Г.Герц обнаружил, что яркость электрической искры, проскакивающей между двумя высоковольтными электродами, увеличивается, если электроды освещать ультрафиолетовым светом.

* * *

Лабораторная экспериментальная установка

Исследования основных закономерностей внешнего фотоэффекта предлагается провести на лабораторной установке, состоящей из малогабаритного универсального монохроматора (1), источника света (2), фото-

элемента (3), источника стабилизированного напряжения (4), измерителей напряжения (5) и фототока (6).

Примечание: перечисленные устройства легко отыскать на рабочем месте по цифрам, указанным в круглых скобках и нанесенным на передние панели приборов.

1. Малогобаритный универсальный монохроматор (МУМ) предназначен для выделения монохроматического излучения в рабочем диапазоне длин волн $200 + 800$ нм и облучения им фотоэлемента. Представление о устройстве и работе монохроматора дает принципиальная оптическая схема, расположенная на рабочем столе.

Примечание: в МУМе для разложения светового пучка в спектр применена дифракционная решетка, работающая на отражение света с переменным шагом нарезки и криволинейными штрихами, что дает возможность значительно скомпенсировать расфокусировку и другие оптические aberrации.

? Прочитайте в любом учебнике по курсу общей физики (оптика) о дифракционной решетке и объясните принцип её работы и назначение.

Дифрагированное решеткой излучение направляется в выходную щель (при выведенном плоском зеркале) или в окуляр для визуального наблюдения (при введенном зеркале). Плоское зеркало выводится и вводится с помощью ручки, расположенной возле окуляра. Вплотную к выходной щели придвинут фотоэлемент, куда и попадает выделенное дифракционной решеткой монохроматическое излучение.

2. Источник света представляет собой галогенную лампу накаливания с конденсором, придвинутую вплотную к входной щели монохроматора. Лампа включается тумблером источника питания.

3. Фотоэлемент придвинут вплотную к выходной щели монохроматора и соединен электрически с измерителем фототока (6) и источником стабилизированного напряжения (4). В работе могут использоваться вакуумные или газонаполненные фотоэлементы промышленного изготовления.

4. Источник стабилизированного напряжения включен в сеть переменного напряжения 220 В и служит для создания задерживающей разности потенциалов на фотоэлементе.

5. Измеритель напряжения (цифровой вольтметр) служит для установки и измерения задерживающей разности потенциалов на фотоэлементе.

6. Измеритель фототока (цифровой прибор) служит для прямого измерения фототока, возникающего под действием света. Значение фототока измеряется в мкА или нА.

* * *

! меры безопасности

Питание источника стабилизированного напряжения (4), источника света (2), измерителей фототока (6) и напряжения (5) осуществляется от сети переменным напряжением 220 В и 50 Гц. Общий выключатель лабораторной установки находится на панели стола. Перед началом работы убедитесь в исправности заземления установки и приборов. При наладке установки необходимо отключать приборы от питающей сети. При работающей установке не дотрагивайтесь руками к кожуху источника света!

ЭКСПЕРИМЕНТ

! практическое знакомство с работой установки

• Ознакомившись с расположением приборов и установкой и получив разрешение преподавателя на выполнение работы, включите питание источника света (1), измерители фототока (4) и напряжения (5).

• В Вашем распоряжении находится набор входных щелей монохроматора, на оправе которых указана их ширина. Щели к монохроматору получите у лаборанта или преподавателя. Научитесь их вставлять поочередно в оправу монохроматора.

• С помощью ручки у окуляра монохроматора (движение от себя) введите зеркало в дифрагированный пучок света. В окуляре появится светящаяся щель.

• Вращая барабан механизма дифракционной решетки (расположен справа на корпусе МУМа), наблюдайте за разными областями спектра источника света и научитесь сосчитать длины волн по счетчику, расположенному у барабана.

• В случае возникающих сложностей обратитесь за консультацией к преподавателю.

? опыты со щелями

Если плоское зеркало вывести из дифрагированного пучка (ручку к себе), то монохроматический свет определенной длины волны (показания счетчика барабана) попадает на установленный у выходной щели фотоземмент. При этом измеритель фототока (6), включенный в электрическую цепь фотоземента, покажет на цифровом табло значения фототока (разберитесь в единицах измерения фототока).

Имея набор входных щелей с разными ширинами, можно установить, как ширина входной щели влияет на величину фототока при неизменном спектральном составе света, падающего на фотоземмент.

Интересно провести измерения фототока в зависимости от ширины

щели, а значит, от величины светового потока, падающего на фотоэлемент при разном спектральном составе света, например, для красной области или зеленой, или синей и т.д.

Проведение данных опытов организуйте самостоятельно, помня, что любое измерение необходимо повторить до пяти раз.

Количество запланированных опытов согласуйте с преподавателем.

Если обнаружите при проведении опытов какие-либо интересные наблюдения, например, при определенной длине волны светового пучка, падающего на фотоэлемент, фототок исчезает, занесите их в свой рабочий журнал.

Результаты наблюдений лучше всего оформить в виде таблицы.

При возникающих трудностях или сомнениях консультируйтесь с преподавателем.

I ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

• Полученные результаты лучше всего представить графически, как зависимость фототока (I_{φ}) от величины светового потока (в нашем случае от ширины щели x , которой пропорционален световой поток) при неизменном спектральном составе света, падающего на фотоэлемент ($\lambda = const$).

• Экспериментальные точки нанесите на миллиметровку, предварительно выбрав масштабы по осям ординат и абсцисс, указав на осях единицы измерений откладываемых величин. Рекомендуется экспериментальные точки, относящиеся к разным спектральным областям (λ), различать на графике символами (крестики, треугольники и т.д.) или цветами.

• Попробуйте без предварительной обработки результатов для разных λ построить графические зависимости.

• Выдвинув на Ваш взгляд наиболее подходящую гипотезу о функциональной зависимости полученных результатов $I_{\varphi} = I_{\varphi}(x)$, например, $I_{\varphi} = ax + b$ или другую, где a и b постоянные, которые необходимо определить МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ (МНК), постройте полученные зависимости на этом же графике для разных λ и сравните их с проведенными ранее. В случае затруднений обработки данных МНК обратитесь к дополнительным источникам информации [1].

• Не забудьте вычислить критерий согласия χ^2 , предварительно определив абсолютную погрешность измерений фототока (ΔI_{φ}), и определить доверительную вероятность $P\%$ с помощью таблиц распределения χ^2 , фрагмент которой имеется в лаборатории.

• Обработку результатов можно проводить на ЭВМ, имеющихся в лаборатории.

• Полученные результаты обсудите с преподавателем.

? опыты с задерживающей разностью потенциалов

Если включить источник стабилизированного напряжения (4) так, чтобы электрическое поле, создаваемое им в фотоэлементе, тормозило фотоэлектроны, то значение фототока уменьшится (это Вы сразу обнаружите по показаниям измерителя фототока (6)).

Тогда возникает идея следующих опытов: ПРИ НЕИЗМЕННОЙ ШИРИНЕ ЩЕЛИ ИЗМЕРИТЬ ЗНАЧЕНИЯ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ (U_z), ПРИ КОТОРЫХ ИЗЧЕЗАЕТ ФОТОТОК, ДЛЯ РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ИСТОЧНИКА СВЕТА (λ).

Для проведения экспериментов подберите 2 - 3 щели.

Контроль за задерживающей разностью потенциалов (U_z) осуществляется по шкале измерителя напряжения (5), а установка необходимой разности потенциалов производится набором цифр или ручкой потенциометра на передней панели стабилизированного источника напряжения (4) в зависимости от типа используемого источника.

Опыты рекомендуется начать с синей области спектра источника света (~ 450 нм).

Шаг изменения спектрального состава света рекомендуется выбрать в пределах 25 ± 40 нм, двигаясь в красную область.

При установленной щели и неизменном спектральном составе света, падающего на фотоэлемент ($\lambda = \text{const}$), нетрудно заметить, что максимальное значение I_{ϕ} соответствует $U_z = 0$. При увеличении U_z значения I_{ϕ} вначале быстро уменьшаются по некоторому закону, но при достижении фототоком некоторых значений обращение в нуль замедляется, как это показано на рис. 2.

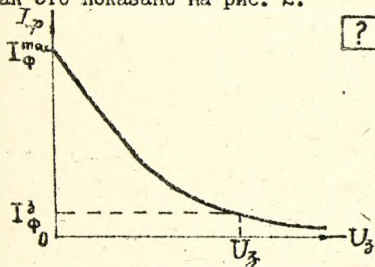


Рис. 2

методика измерений

? Возникает естественный вопрос, как наиболее корректно в условиях данного эксперимента провести измерения задерживающей разности потенциалов (U_z), при которых фототок (I_{ϕ}) практически обращается в нуль?

Как известно, дифракционная решетка, используемая как спектральный прибор, обладает следующим свойством. Если измерения проводятся

в 1-ом порядке спектра ($d \sin \varphi = m\lambda$, где $m = 1$, d - постоянная решетки, φ - угол отклонения дифрагированного света данной длины волны λ), то по одному и тому же направлению распространяются волны с длиной волны в 2 раза меньшей ($d \sin \varphi = m \frac{\lambda}{2}$), но для $m = 2$ (2-ой порядок спектра). Оказывается, фотоэлектроны, выбиваемые светом с $\lambda/2$, имеют большую скорость (Почему? Мы обсудим это ниже) по сравнению с фотоэлектронами, выбитыми с вещества светом длиной волны λ . Значит, и задерживающая разность потенциалов U_z для них необходима больше. В связи с этим возникает вопрос, при каких значениях U_z следует считать, что фотоэлектроны, вырванные светом с длиной волны λ , уже не достигают анода, а его продолжают достигать лишь электроны, вырванные светом с длиной волны $\lambda/2$? Т.е. практически, при каких значениях I_φ^{δ} (см. рис.2) мы можем взять отсчет U_z .

В основу могут быть положены следующие соображения. Считая источник света абсолютно черным телом, можно найти отношение спектральных плотностей излучателя при λ и $\lambda/2$. Поскольку фототок пропорционален спектральной плотности излучателя (см. опыты со щелями), то отношение фототока I_φ^{\max} при $U_z = 0$ к I_φ^{δ} при U_z (см. рис.2) должно приблизительно равняться отношению соответствующих спектральных плотностей источника света при λ и $\lambda/2$. Значит, можно заранее для каждой λ рассчитать отношение $I_\varphi^{\max} : I_\varphi^{\delta}$ и, имея эти расчеты в виде зависимости от λ , заранее определять то значение фототока I_φ^{δ} , при котором задерживающая разность потенциалов U_z является искомой, т.е. практически все фотоэлектроны, выбитые светом длиной волны λ не достигают анода, а фототок I_φ^{δ} в основном определяется фотоэлектронами, выбитыми светом с длиной волны $\lambda/2$.

Такой способ измерения U_z в данном эксперименте представляется наиболее реальным, хотя и он не лишен недостатков, т.к. есть еще ряд обстоятельств, влияющих на значение задерживающей разности потенциалов, которые мы не обсуждаем в данной работе.

.....

Итак, разобравшись с методикой определения задерживающей разности потенциалов (U_z) можно приступить к самим опытам. Необходимая для измерений U_z зависимость $I_\varphi^{\max} : I_\varphi^{\delta} = f(\lambda)$ представлена в виде графика на рабочем столе.

Не ограничивайтесь одиночными измерениями U_z для данной λ и повторите их 3 - 5 раз.

Если в ходе эксперимента у Вас возникнут идеи по улучшению организации проведения опытов, обсудите их с преподавателем и действуйте.

Результаты полученных измерений удобнее всего свести в таблицу. Запишите в рабочий журнал другие наблюдения, которые на Ваш взгляд являются интересными.

Повторите опыты с разными щелями. В случае необходимости консультируйтесь с преподавателем.

2) обработка результатов измерений

• Полученные результаты, как и в опытах со щелями, представьте графически.

• Для удобства дальнейшей обработки данных рекомендуется длины волн λ , для которых измерялась U_z , пересчитать в частоты ν , по известной формуле $\nu = c / \lambda$, где $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света.

• Значения U_z и соответствующие им ν нанесите на миллиметровку, указав масштабы по осям. Экспериментальные точки, полученные при разных щелях, различите цветом или символами.

• Попробуйте построить без обработки результатов графическую зависимость (проведите ее на графике).

• Используя метод наименьших квадратов, проведите необходимые расчеты с помощью ЭВМ и постройте на этом же графике полученную зависимость.

• По критерию согласия χ^2 (для этого необходимо вычислить абсолютную погрешность ΔU_z) определите доверительную вероятность $P\%$ и обсудите полученные результаты с преподавателем.

1) РЕЗУЛЬТАТ

Из зависимости величины фототока (I_{ϕ}) от ширины щели (a), т.е. величины светового потока, которая носит линейный характер, можно заключить:

1) ПРИ НЕИЗМЕННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ СОСТАВЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛА ФОТОТОКА (I_{ϕ}) ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ПАДАЮЩЕМУ НА ФОТОЭЛЕМЕНТ СВЕТОВОМУ ПОТОКУ, Т.Е. ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ПАДАЮЩЕГО СВЕТА, ЗАВИСИТ ЧИСЛО ВЫЛЕТЕВШИХ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ,

Сравнивая значения задерживающей разности потенциалов (U_z) на втором графике для разных щелей, по соответствующие одинаковой спектральной области (λ) можно продолжить:

1) ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ПАДАЮЩЕГО СВЕТА ЗАВИСИТ ТОЛЬКО ЧИСЛО ВЫЛЕТЕВШИХ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ, НО НЕ ЗАВИСИТ ЗАДЕРЖИВАЮЩАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСТАНОВКИ ВЫЛЕТЕВШИХ ЭЛЕКТРОНОВ (Иными словами -

ЭНЕРГИЯ ВЫЛЕТЕВШИХ ЭЛЕКТРОНОВ).

Результаты, полученные во второй серии опытов с задерживающей разностью потенциалов (чем больше λ излучения и, соответственно меньше ν , тем меньше задерживающая разность потенциалов U_z) позволяют сделать вывод:

2) МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТОЛЬКО ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЛИ ЧАСТОТОЙ ПАДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Наконец, если на втором графике (зависимость U_z от ν) продолжить полученную прямую до пересечения ее с осью ν , то Вы получите ν_0 , для которой $U_z = 0$, т.е. для излучения с такой частотой (ν_0) и меньшей фотоэффект не наблюдается:

3) ДЛЯ КАЖДОГО ВЕЩЕСТВА СУЩЕСТВУЕТ ОПРЕДЕЛЕННАЯ ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ν_0 ($\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$, где c - скорость света в вакууме), ТАКАЯ, ЧТО ИЗЛУЧЕНИЕ МЕНЬШЕЙ ЧАСТОТЫ (БОЛЬШЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ) НЕ МОЖЕТ ВЫБИВАТЬ ФОТОЭЛЕКТРОНЫ, КАКОЙ БЫ НИ БЫЛА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ. ЭТА ГРАНИЧНАЯ ЧАСТОТА ν_0 НАЗЫВАЕТСЯ КРАСНОЙ ГРАНИЦЕЙ ФОТОЭФФЕКТА.

Полученные результаты называют ЗАКОНАМИ ФОТОЭФФЕКТА.

ОБОЗНАЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

§ классическая электромагнитная теория

Согласно классической электромагнитной теории интенсивность света прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля электромагнитной волны, т.е.

$$I \sim E^2.$$

Как известно, при падении световой волны на металл на каждый свободный электрон действуют силы как со стороны электрического, так и со стороны магнитного полей электромагнитной волны

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{V} \times \vec{B},$$

где e - заряд электрона; \vec{V} - скорость его движения в металле; \vec{B} - индукция магнитного поля.

Оценим действие каждой из двух составляющих: электрической силы $\vec{F}_E = e\vec{E}$ и действие магнитного поля - силы Лоренца $\vec{F}_H = e\vec{V} \times \vec{B}$. Связь между величинами напряженностей электрического (E) и магнитного (H) полей в электромагнитной волне выражается следующим образом:

$$\sqrt{\epsilon_0} \epsilon^7 E = \sqrt{\mu_0} \mu^7 H, \text{ т.к. } H = \frac{B}{\mu_0 \mu}, \text{ то}$$

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon' E} = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \mu}}$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная; μ_0 - магнитная постоянная;
 ϵ - диэлектрическая проницаемость; μ - магнитная проницаемость
среды. Тогда для электронов вблизи поверхности металла можно считать,
что на них действует поле электромагнитной волны, для которого μ и ϵ
можно принять близким к единице и отношение

$$\frac{B}{E} \approx \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

Оценим величину средней квадратичной скорости движения свободного
электрона при комнатной температуре (~ 300 К):

$$V_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 300 \text{ К}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} \approx 10^5 \text{ м/с}$$

(k - постоянная Больцмана; m_e - масса электрона).

Принимая движение электрона перпендикулярным направлению индукции
магнитного поля электромагнитной волны ($\vec{V} \perp \vec{B}$), найдем отношение
величин силы Лоренца ($F_L = eV B$) к электрической силе
($F_E = eE$):

$$\frac{F_L}{F_E} = \frac{eVB}{eE} = \frac{V}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{V}{c} = 3 \cdot 10^{-4}$$

(согласно электромагнитной теории $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с называ-
ют электродинамической постоянной, которая совпадает со скоростью
света в вакууме).

Из приведенных оценок видно, что действием силы Лоренца в нашем
случае можно пренебречь.

Тогда можем записать, что на свободный электрон в металле дей-
ствует сила $F = eE = eV I$,
где I - интенсивность света.

За время t электрон в металле приобретает скорость

$$V = at = \frac{F}{m_e} t = \frac{eE}{m_e} t = \frac{eVI}{m_e} t$$

(считаем, что движение после столкновения электрон начинает без на-
чальной скорости).

Кинетическая энергия электрона при этом

$$E_k = \frac{m_e V^2}{2} = \frac{e^2 t^2}{2m_e} I, \quad \text{т.е.}$$

энергия электрона пропорциональна интенсивности света.

Часть этой энергии электрон расходует на совершение работы выхода из металла ($A_{\text{вых}}$). Таким образом, кинетическая энергия, приобретенная электроном при выходе из металла под действием света согласно представлениям классической электронной теории может быть любой: все зависит от интенсивности света.

Вывод: Кинетическая энергия фотоэлектронов согласно классической электромагнитной теории зависит только от интенсивности падающего света.

? Более детально с классической электромагнитной теорией можно ознакомиться в учебниках по курсу общей физики. Смотрите, например [2].
Теперь посмотрим на наши результаты с точки зрения классической электромагнитной теории.

Если первая часть первого закона фотоэффекта [1] как будто не противоречит классике, то его вторая часть [1'] - от интенсивности падающего света зависит только число вылетающих фотоэлектронов, но не зависит задерживающая разность потенциалов (U_z), необходимая для остановки вылетающих фотоэлектронов - становится непонятной. Ведь согласно полученному нами выводу энергия фотоэлектрона прямо пропорциональна интенсивности света, т.е. увеличили интенсивность света и надо тут же увеличить задерживающую разность потенциалов, чтобы вернуть электрон обратно.

А второй закон фотоэффекта [2] и вовсе ставит нас в тупик: максимальная энергия фотоэлектронов определяется только длиной волны или частотой падающего излучения. О третьем законе [3] и говорить уже не стоит.

Получается, что выводы полученные на основании классических электромагнитных представлений о волновой природе света, на основании которых так хорошо объясняются известные световые явления интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии и т.д. здесь бессильны.

Итак, основные законы фотоэффекта невозможно объяснить, исходя из классических электромагнитных представлений о волновой природе света.

§ Квантовые представления о взаимодействии света с веществом

Впервые квантовые представления были введены в 1900 году немецким физиком Максом Планком в работе, посвященной теории теплового излучения. Существовавшая к тому времени теория теплового излучения, построенная на основе классической электродинамики и статической физики приводила к бессмысленному результату, состоявшему в том, что

тепловое (термодинамическое) равновесие между излучением и веществом не может быть достигнуто, т.к. вся энергия должна перейти в излучение (этот результат известен в физике как "ультрафиолетовая катастрофа").

М.Планк решил это противоречие и получил результаты, прекрасно согласующиеся с опытом, предположив, что СВЕТ ИСПУСКАЕТСЯ НЕ НЕПРЕРЫВНО (как это следует из классической теории излучения), а ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ДИСКРЕТНЫМИ ПОРЦИЯМИ ЭНЕРГИИ - КВАНТАМИ. Величина такого кванта энергии зависит только от частоты света и равна

$$\varepsilon = h\nu,$$

h - относится к универсальным мировым константам и называется постоянной Планка.

Именно эта идея М.Планка была в дальнейшем развита А.Эйнштейном, который предположил, что свет не только испускается, но и поглощается квантами, т.е. дискретность присуща и процессу поглощения света. Световые кванты были позднее названы ФОТОНАМИ.

Таким образом А.Эйнштейн обобщил, высказанную М.Планком гипотезу о квантовом обмене энергий. Далее, он понял, что при взаимодействии с веществом ФОТОН СЕБЯ ВЕДЕТ ПОДОБНО ЧАСТИЦЕ И ПЕРЕДАЕТ СВОЮ ЭНЕРГИЮ НЕ ВЕЩЕСТВУ В ЦЕЛОМ, И ДАЖЕ НЕ АТОМУ В ЦЕЛОМ, А ТОЛЬКО ОТДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОНАМ.

Т.е. внешний фотоэффект (иначе его ещё называют фотоэлектронной эмиссией) - результат трех последовательных процессов:

- 1) поглощения фотона свободным электроном и появления электрона с более высокой (по сравнению со средней) энергией;
- 2) движения этого электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеяться;
- 3) выхода электрона в другую среду через поверхность раздела.

Согласно таким представлениям, кинетическая энергия фотоэлектрона должны быть равна разности между энергией фотона ($h\nu$), падающего излучения на металл и минимальной энергией, необходимой для освобождения электрона из металла и называемой РАБОТОЙ ВЫХОДА из этого вещества ($A_{\text{вых}}$). Следует подчеркнуть, что электроны являются свободными только в объеме металла. Для того же, чтобы удалить такой электрон из металла необходимо совершить некоторую работу. Это вызвано тем, что вблизи поверхности металла в результате теплового движения электроны, покидая металл, образуют очень тонкий отрицательный слой. В свою очередь приповерхностный слой металла обедняется электронами и заряжается положительно. Таким образом, образовавшийся двойной электрический слой препятствует выходу свободных электронов из

металла и на преодоление этого энергетического барьера необходимо затратить работу, которая и называется РАБОТОЙ ВЫХОДА ($A_{\text{ВЫХ}}$). Сформулированное условие будет соответствовать максимальной кинетической энергии фотоэлектрона

$$\boxed{\text{КИНЕТИЧЕСКАЯ МАКСИМАЛЬНАЯ}} = \boxed{\text{ЭНЕРГИИ}} - \boxed{\text{РАБОТА}} \\ \boxed{\text{ЭНЕРГИИ ФОТОЭЛЕКТРОНА}} = \boxed{\text{ФОТОНА}} - \boxed{\text{ВЫХОДА}} \\ \frac{1}{2} m_e V_{\text{max}}^2 = h\nu - A_{\text{ВЫХ}}$$

Эта формула называется ФОРМУЛОЙ ДИШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФЕКТА.

Свободные электроны, выбитые светом с поверхности металла, в действительности имеют различные кинетические энергии, поскольку электроны, освобожденные в толще материала, до выхода с поверхности теряют энергию при столкновении с атомами.

Поэтому в наших опытах задерживающая разность потенциалов U_z , снижающая ток фотоэлектронов практически до нуля (I_z), соответствует кинетической энергии самых быстрых фотоэлектронов. Т.е. можно записать, что

$$eU_z = \frac{m_e V_{\text{max}}^2}{2}$$

Теперь объяснение полученных результатов (законов фотоэффекта) не вызывает затруднений.

Задерживающая разность потенциалов U_z определяется максимальной скоростью фотоэлектронов V_{max} , а V_{max} в свою очередь, зависит только от частоты падающего света ($\mathcal{E} = h\nu$), потому что работа выхода ($A_{\text{ВЫХ}}$) для данного вещества величина неизменная и ее можно найти в справочнике, зная из какого вещества изготовлена светочувствительная часть фотоэлемента. Таким образом, содержания законов [1] и [2] становится понятным.

Из формулы Динштейна следует, что если $h\nu \leq A_{\text{ВЫХ}}$, то фототок прекращается, так как энергии квантов света (фотонов) недостаточно для выбивания электронов. Принимая во внимание, что в данном случае, каждый акт вырывания из вещества происходит после однократного поглощения кванта света, что при частоте ν_0 , когда $h\nu_0 = A_{\text{ВЫХ}}$, электрон покинуть вещество не может. Значит, определяющей здесь является не интенсивность света, а частота падающего излучения (третий закон фотоэффекта [3]). Поэтому при частоте ниже граничной (ν_0 - красная граница фотоэффекта) фотоэффект не наблюдается. Из сказанного ясно, что граничная частота (ν_0) определяется химическим составом фотоэлемента.

? определение работы выхода ($A_{\text{ВЫХ}}$)

• Вернемся к результатам полученным в опытах с задерживающей разностью потенциалов: зависимость $U_g = U_g(\nu)$.

• После обработки данных методом наименьших квадратов (МНК) Вами получена зависимость

$$U_g = a\nu + b,$$

где a, b - коэффициенты прямой, вычисленные МНК.

• Если ν предположить равной нулю ($\nu = 0$), то

$$U_g^0 = b.$$

Реально такой результат получить нельзя, так как при $\nu = 0$ никакого фотоэффекта не будет, но формально можно продлить полученную прямую до пересечения оси U_g . Тогда для этого случая уравнение Эйнштейна примет вид

$$\frac{1}{2} m_e V_{\text{max}}^2 = - A_{\text{ВЫХ}},$$

но $\frac{1}{2} m_e V_{\text{max}}^2 = -e U_g^0$ (U_g^0 - имеет отрицательное значение - ниже 2 оси абсцисс), поэтому

$$A_{\text{ВЫХ}} = e U_g^0$$

• Полученное значение работы выхода ($A_{\text{ВЫХ}}$) в Дж переведите в эВ и, пользуясь справочной литературой (справочники по физике, сборники задач по физике и т.п.), определите из какого материала изготовлен фоточувствительный слой фотоэлемента.

• Результат обсудите с преподавателем.

? определение постоянной Планка (h)

• Для прекращения фототока необходимо приложить задерживающую разность потенциалов не менее U_g (см. результаты измерений в опытах с задерживающей разностью потенциалов), т.е.

$$\frac{1}{2} m_e V_{\text{max}}^2 = e U_g,$$

следовательно, уравнение Эйнштейна можно переписать так:

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + e U_g.$$

Предположим, что измерения задерживающей разности потенциалов проведены для двух частот спектра излучения источника света, которые отличаются на $\Delta\nu$, т.е. ν и $\nu + \Delta\nu$. Тогда приведенное уравнение для каждого случая будет иметь вид:

$$h(\nu + \Delta\nu) = A_{\text{ВЫХ}} + e(U_2 + \Delta U_2),$$

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + eU_2 \dots$$

Возьмем разность этих выражений

$$h\Delta\nu = e\Delta U_2, \quad \text{, откуда}$$

$$h = e \frac{\Delta U_2}{\Delta\nu}$$

- Для вычисления постоянной Планка h ΔU_2 и $\Delta\nu$ возьмите с Вашей графической зависимости $U_2 = U_2(\nu)$.
- Вычисленное значение постоянной Планка h сравните с таблицей.

ВСЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЫ, ВКЛЮЧИТЕ В СВОЙ КРАТКИЙ ОТЧЕТ И ОБСУДИТЕ С ПРЕПОДАВАТЕЛЕМ.

Историческая справка: 1905г. А.Эйнштейн предложил теорию, которая давала объяснение совокупности экспериментальных сведений о фотоэффекте. Кстати, в этом же году появилась, разработанная Эйнштейном теория броуновского движения.

Первые фундаментальные исследования по фотоэффекту были выполнены русским физиком А.Т.Столетовым в 1888г., а затем немецким физиком Ф.Ленардом (1899г.). Большой вклад в теоретические и экспериментальные исследования фотоэффекта внесли русские и советские физики А.Ф.Иоффе (1907г.), П.И.Лукирский и С.С.Прилежаев (1928г.), И.Е.Тамм и С.П.Щубин (1931г.).

Тщательные измерения фотоэффекта для нескольких химических элементов были проведены, начиная с 1916г., американским физиком Ф.Миллиkenом. По наклону прямой, характеризующей зависимость U_2 от ν , были получены наилучшие для того времени значения постоянной Планка h .

За теорию фотоэлектрического эффекта (а вовсе не за теорию относительности!) А.Эйнштейн был награжден в 1921г. Нобелевской премией. Р.Милликен получил Нобелевскую премию в 1923г. за экспериментальные работы по определению численных значений e и h .

Авторы работы:

Монтаж экспериментальной установки и методика проведения измерений выполнены ассистентом Русаковым К.И.

Методику выполнения работы и описание работы подготовил зав.кафедрой Гладышук А.А.

Авторы благодарят доцента кафедры Чопчица И.И. за предложенную методику измерений задерживающей разности потенциалов и полезные дискуссии при подготовке работы, а также ассистента Луценко Е.В. за практическую помощь.

Источники дополнительной информации

1. Лабораторные работы по курсу физики. Часть I. Физические основы механики. ИЗУЧЕНИЕ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ И КИНЕМАТИКИ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ (методические указания). Брест. Ротапринт БИСИ. 1987.
2. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики, т.3, М., 1979 - 1982.
3. Савельев И.В. Курс общей физики, т.3, М., 1979-1984.
4. Мэррион Дж.Б. Физика и физический мир, М., Мир, 1975.

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ
(методические указания) по курсу
общей физики.
Лабораторная работа К I
"Изучение внешнего фотоэффекта"

Гладышук Анатолий Антонович
Русаков Константин Иванович

Методические указания
утверждены Ученым советом
электронно-механического
факультета в качестве официального
материала

Подписано к печати 23.12.88 Бумага писч. М1. Офсетная печать
Формат 60x84/16. Уч. изд. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Заказ № 361. Тираж
250 экз. Бесплатно. Отпечатано на роталпринте Брестского инженер-
но-строительного института. 224017, Брест, ул. Московская, 267.