

Лабораторная работа 3.14

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА И РАБОТЫ ВЫХОДА

В.А. Давыдов, Ю.В. Коробкин, Ф.А. Шаталов

Цель работы: Экспериментальная проверка основных законов фотоэффекта. Определение постоянной Планка и работы выхода электронов из металла.

Задание: экспериментально проверить независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности падающего излучения; по экспериментально полученному графику оценить постоянную Планка и величину работы выхода материала фотокатода. Определить, из какого металла изготовлен катод.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: изучить теорию фотоэффекта, объяснить принцип работы фотоэлемента, освоить методику измерений и порядок расчетов, ответить на контрольные вопросы.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - СПб.: Издательство «Лань», 2018, гл. 2, § 9.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Издательский центр «Академия», 2019, гл. 26, §§ 202 – 204.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление фотоэффекта?
2. Какие формулы используют для расчета энергии, импульса и массы фотона?
3. Объясните физический смысл уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.
4. Каковы основные законы фотоэффекта?
5. Что в экспериментах по фотоэффекту противоречит предсказаниям классической физики?
6. Почему энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения?
7. Дайте определение работы выхода и объясните физическую причину возникновения такого понятия.
8. Зависит ли работа выхода от частоты падающего света?
9. Какая величина называется красной границей фотоэффекта. Как она связана

с работой выхода?

10. Какова размерность постоянной Планка? Какая величина в механике имеет такую же размерность?
11. Что такое внешний и внутренний фотоэффекты?
12. Какие применения фотоэффекта вам известны?

Теоретическое введение

Фотоэффект (точнее – внешний фотоэффект) это явление испускания электронов вещества под действием падающего светового излучения. Фотоэффект устанавливает непосредственную связь между электрическими и оптическими явлениями. Различают внешний, внутренний и фотоэффект в запирающем слое. Фотоэффект был открыт в 1887 г. Генрихом Герцем, который обнаружил, что проскакивание искры между электродами разрядника сильно облегчается при облучении электродов ультрафиолетовым излучением.

Принципиальная схема установки для наблюдения и исследования фотоэффекта весьма проста (см. рис. 1). Свет известной частоты пройдя через прозрачное окно вакуумного диода, падает на катод, в результате чего происходит испускание электронов. Выбитые электроны двигаются к аноду, создавая электрический ток (фототок) в замкнутой цепи. Фототок измеряется наноамперметром или миллиамперметром. Величину и знак напряжения между катодом и анодом можно менять. Можно изменять также частоту и интенсивность падающего светового излучения.

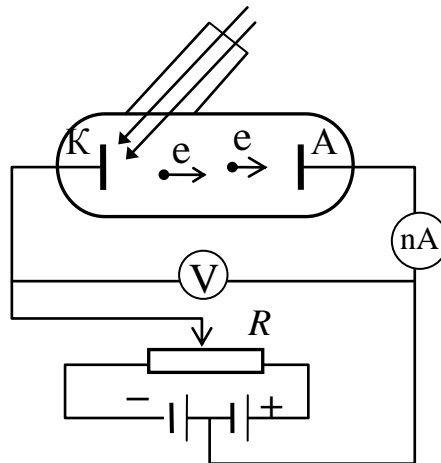


Рис. 1

Основные законы фотоэффекта можно сформулировать следующим образом.

1. Максимальный фототок при фиксированной частоте света пропорционален

интенсивности падающего на катод светового пучка.

2. Максимальная скорость фотоэлектронов зависит только от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности. При этом скорость электронов (а, следовательно, и их кинетическая энергия) увеличивается с ростом частоты света.
3. Для каждого вещества существует минимальная частота (так называемая красная граница фотоэффекта), ниже которой фотоэффект невозможен. Иногда красной границей называют максимальную длину волны (обратно пропорциональную частоте), выше которой фотоэффект невозможен.

Попытки классической физики описать явление фотоэффекта состояли примерно в следующем. Как известно, свет представляет собой электромагнитные волны. В электромагнитной волне существуют переменные электрические и магнитные поля. Электрическое поле волны воздействует на свободные электроны, раскачивая их, в результате чего электроны приобретают энергию достаточную для вылета из вещества. Чем больше амплитуда колебаний электрического поля в волне, тем большую энергию приобретают электроны.

Если первый закон фотоэффекта можно еще можно как-то примирить с классической теорией, то второй и третий законы полностью ей противоречат. Действительно, интенсивность электромагнитной волны пропорциональна квадрату ее амплитуды. Поэтому энергия электронов в рамках классического рассмотрения не может не зависеть от интенсивности падающего света. Наличие красной границы также противоречит волновым представлениям, согласно которым фотоэффект должен иметь место при любой частоте волны. Главное, чтобы ее интенсивность была достаточно велика.

Законы фотоэффекта были объяснены в 1905 г. А. Эйнштейном с точки зрения квантовой теории света. В работе Эйнштейна содержалась гипотеза о том, что свет не только излучается и поглощается порциями (как уже предполагал М. Планк), но и распространяется в виде порций, которые называются световыми квантами или фотонами. Каждый фотон имеет энергию $\varepsilon = h\nu$, где ν – частота света, а h – постоянная Планка – одна из фундаментальных физических констант ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с).

Таким образом, с точки зрения квантовой теории свет представляет собой поток фотонов. При этом интенсивность света определяется не амплитудой волны, а плотностью фотонов в пучке. Согласно идеям Эйнштейна вылет электрона с поверхности металла представляет собой результат взаимодействия этого электрона с одним фотоном из падающего пучка. Уже это утверждение позволяет объяснить второй закон фотоэффекта – для одного электрона не важ-

но, сколько других фотонов упало на поверхность вещества.

Внутри металла электрон находится в потенциальной яме. Чтобы его оттуда извлечь, необходимо затратить некоторую энергию. *Минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из металла, называется работой выхода* $A_{\text{вых}}$. Работа выхода является табличной характеристикой вещества. При взаимодействии фотон передает электрону всю свою энергию, которая идет на преодоление потенциального барьера и увеличение кинетической энергии электрона.

Явление, состоящее в испускании электронов твердыми телами при воздействии на них излучения, называется внешним фотоэффектом. Как уже отмечалось выше, Эйнштейн (развив квантовую теорию Планка) предположил, что свет излучается, распространяется и поглощается веществом в виде квантов (фотонов), энергия которых равна

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме ($c = 2,99 \times 10^8$ м/с); λ – длина волны монохроматического излучения.

При взаимодействии фотона с энергией ε со свободным электроном часть энергии фотона тратится на вырывание электрона из металла (эта часть энергии определяется работой выхода $A_{\text{вых}}$ и долей энергии, потерянной при столкновении с другими электронами и атомами вещества), а остаток реализуется в виде кинетической энергии высвободившегося электрона. Для описания процесса фотоэффекта используется уравнение

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + T_{\text{max}}, \quad (2)$$

которое носит название **уравнения Эйнштейна для фотоэффекта**. Заметим, что в этом соотношении T_{max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, то есть тех электронов которые не испытали ни одного столкновения при выходе на поверхность металла. Формула (2) объясняет третий закон фотоэффекта. Действительно, если энергия фотона будет меньше, чем работа выхода, электрон не сможет преодолеть потенциальный барьер и вылететь из металла. Таким образом, красная граница фотоэффекта равна

$$\nu_{\text{гр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (3)$$

Если между катодом и анодом в схеме, приведенной на рис. 1, создать задерживающее напряжение, энергия электронов, подлетающих к аноду, уменьшится. При достаточно большом задерживающем напряжении U_0 эта энергия станет равной нулю, и фототок прекратится. Условие прекращения тока имеет вид

$$T_{\max} = eU_0, \quad (4)$$

где $e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл. – элементарный заряд (равный по модулю заряду электрона). Подстановка (4) в (2) приводит к следующему выражению для задерживающего напряжения

$$U_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e}. \quad (5)$$

Эта линейная зависимость U_0 от ν и будет использована для экспериментального определения постоянной Планка h и работы выхода $A_{\text{ВЫХ}}$.

Описание аппаратуры и метода измерений

Для изучения законов фотоэффекта используется установка, схема которой аналогична той, что показана на рис. 1. Общий вид этой установки представлен на рис. 2. Она состоит из вакуумного фотоэлемента на основе цезиевого катода и измерительных приборов: вольтметра 3 и наноамперметра 2. В качестве источников излучения используются пять светодиодов с различными длинами волн: 472 нм, 505 нм, 525 нм, 588 нм и 611 нм. Светодиоды присоединяются к приемной камере 4, с помощью разъема 5. Блок подключается к сети через адаптер и разъем 6. Питание светодиода осуществляется через разъем 7. Рукоятка 10 предназначена для изменения яркости свечения светодиодов.



Рис. 2

Методика проведения измерений основана на изменении с помощью потенциометра анодного напряжения. Верхний регулятор 8 предназначен для грубой регулировки напряжения, нижний 9 – для тонкой подстройки. Напряжение следует изменять до тех пор, пока фототок в цепи фотоэлемента не обратится в нуль. При этом вольтметр покажет численное значение запирающего напряжения U_0 для света данной длины волны. Произведение этого напряжения на заряд электрона eU_0 будет равно максимальной кинетической энергии фотоэлектронов T_{\max} .

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Проверка независимости энергии фотоэлектрона от интенсивности падающего излучения

1. Ознакомиться с работой экспериментальной установки.
2. Подключить установку к сети переменного напряжения 220 В.
3. Для одного из светодиодов менять интенсивность свечения с помощью потенциометра 10, снять зависимость запирающего напряжения U_0 от интенсивности I излучения светодиода в пределах 0,1 – 1,0 (в относительных единицах). Произвести не менее 10 измерений. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I , отн. ед.										
U_0 , В										

Упражнение 2. Определение постоянной Планка и работы выхода электронов из материала фотокатода

1. Подключая поочередно различные светодиоды на вход фотоэлемента, определить значения запирающего напряжения U_0 для каждой длины волны
2. Занести результаты измерений в таблицу 2.

Таблица 2

λ , нм	ν , ТГц	U_0 , В	$T_{\max}=eU_0$, Дж

Обработка результатов измерений

Упражнение 1.

1. По результатам измерений на миллиметровой бумаге построить график зависимости запирающего напряжения от интенсивности излучения в относительных единицах. Убедиться в независимости энергии фотоэлектронов от интенсивности падающего излучения.

Упражнение 2.

1. Перевести значения длин волн, указанные на светодиодах в единицы частоты, используя формулу $\nu = c/\lambda$. При этом полученные значения частоты записать в терагерцах (1 ТГц равен 10^{12} Гц) и занести в таблицу 2.
2. Рассчитать и занести в таблицу 2 значения максимальной кинетической энергии фотоэлектронов T_{\max} .
3. На миллиметровой бумаге построить график зависимости энергии электронов T_{\max} от частоты падающего излучения. За начало отчета по оси абсцисс принять частоту излучения $\nu = 400$ ТГц.
4. По угловому коэффициенту прямой на графике определить постоянную Планка.
5. Продлить полученную прямую до пересечения с осью абсцисс и по полученному значению частоты найти работу выхода для материала фотокатода.
6. Пользуясь справочником физических величин, определить название металла, из которого сделан фотокатод в данной экспериментальной установке.
7. Рассчитать погрешности в измерениях постоянной Планка и работы выхода. В данной работе эти погрешности можно оценить по формулам

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta U_0}{U_0} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (7)$$

Считать при этом, что относительная погрешность измерения U_0 составляет 0,5%, погрешность для длины волны 0,5 нм, погрешность в измерении частоты ≈ 3 ТГц. Расчеты производить для длины волны $\lambda = 500$ нм.

8. Записать результат в виде

$$h = h \pm \Delta h,$$

$$A_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} \pm \Delta A_{\text{вых}}.$$