

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания
по выполнению лабораторной работы
по курсу «Физика»

Пенза 2014

УДК 531.23
ББК 22я7
И89

Рекомендовано Редсоветом университета
Рецензент – кандидат технических наук, доцент
Н.А. Очкина (ПГУАС)

Исследование внешнего фотоэффекта: методические указания
И89 по выполнению лабораторной работы / Г.И. Грейсух, С.А. Степанов, З.А. Сидякина.– Пенза: ПГУАС, 2014. – 16 с.

Дана методика и описаны компьютерные эксперименты по исследованию основных закономерностей внешнего фотоэлектрического эффекта.

Методические указания подготовлены на кафедре «Физика и химия» и предназначены для студентов, обучающихся по направлению 21.03.02 «Землеустройство и кадастры».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2014

© Грейсух Г.И., Степанов С.А.,
Сидякина З.А., 2014

Цель работы:

- изучение и проверка законов внешнего фотоэффекта;
- снятие вольтамперной характеристики;
- определение постоянной Планка.

Приборы и принадлежности: IBM-совместимый персональный компьютер, пакет программ, входящих в компьютеризированный лабораторный практикум «Фундаментальные опыты по физике».

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрический эффект (фотоэффект) – процесс взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества. Для твердых тел различают внешний и внутренний фотоэффекты. **Внешним фотоэффектом (фотоэлектронной эмиссией)** называют явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием электромагнитного излучения. При **внутреннем фотоэффекте** электроны, оставаясь в веществе, изменяют свое энергетическое состояние. Это, в частности, приводит к изменению электропроводности полупроводников.

В газах фотоэффект заключается в ионизации и диссоциации атомов и молекул газа под действием электромагнитного излучения.

Внешний фотоэффект был открыт Генрихом Герцем в 1887 г. В 1888–90 гг. российский ученый Александр Столетов исследовал внешний фотоэффект более детально. Он, в частности, обнаружил, что под действием электромагнитного излучения вырываются отрицательно заряженные частицы и открыл первый закон фотоэффекта (закон Столетова). В современной трактовке **первый закон фотоэффекта** формулируется следующим образом: *при неизменной частоте излучения, падающего на поверхность вещества, число вырываемых электронов прямо пропорционально интенсивности излучения*. Филипп Ленард (1899–1902 гг.) продолжил исследования этого явления и доказал, что вырываемыми отрицательно заряженными частицами при фотоэффекте являются электроны, а также открыл второй и третий его законы. **Второй закон фотоэффекта:** *максимальная скорость вырванных с поверхности вещества электронов не зависит от интенсивности излучения, а определяется лишь его частотой;* **третий закон фотоэффекта:** *для каждого вещества существует минимальная частота (ν_0 , соответственно, максимальная длина волны) падающего электромагнитного излучения («красная» граница фотоэффекта), начиная с которой возможен внешний фотоэффект.*

Если задачу о внешнем фотоэффекте решать теоретически, полагая, что электромагнитное излучение (и, в частности, свет) представляет собой поток электромагнитных волн, то можно получить следующие результаты:

1. При постоянной частоте излучения:

– увеличение интенсивности света приводит как к увеличению числа вырванных электронов, так и к увеличению их скорости;

– вырывание электронов носит пороговый характер и, если интенсивность света становится меньше некоторой предельной величины, зависящей от химической природы вещества, фотоэффект прекращается.

2. При постоянной интенсивности увеличение частоты излучения приводит к снижению скорости вырываемых электронов.

Сравнивая перечисленные результаты с вышеприведенными формулировками законов фотоэффекта, видно, что волновое представление о свете верно объясняет лишь первый закон и вступает в противоречие со вторым и третьим законами фотоэффекта. Альберт Эйнштейн (1905 г.) объяснил все законы фотоэффекта, выдвинув гипотезу о том, что свет представляет собой поток особого рода частиц – **фотонов**, или квантов электромагнитного поля.

Таким образом, в соответствии с современными представлениями свет имеет двойственную корпускулярно-волновую природу (корпускула – частица): в одних явлениях (интерференция, дифракция, поляризация) свет проявляет волновые свойства, а в других явлениях, в частности в фотоэффекте, он ведет себя как поток фотонов.

Двойственная природа света математически выражается с помощью соотношений, связывающих волновые свойства света (частоту f и длину λ) и его квантовые свойства (энергию E_p , импульс p_p и массу m_p фотона):

$$E_p = hf = \frac{hc}{\lambda}; \quad (1)$$

$$p_p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}; \quad (2)$$

$$m_p = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}, \quad (3)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, введенная в физику в 1900 г. в связи с проблемой теплового излучения;

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Качественно внешний фотоэффект объясняется тем, что при поглощении света фотон отдает свою энергию электрону вещества. Если этой энергии достаточно для того, чтобы электрон преодолел силы, удерживающие его внутри вещества, то он выходит за пределы вещества. При

линейном фотоэффекте (который здесь и рассматривается) каждый электрон вещества поглощает энергию одного фотона. Поэтому число вырванных под действием света электронов (фотоэлектронов) пропорционально числу поглощаемых веществом фотонов, которое при заданной частоте света пропорционально его интенсивности. Кинетическая энергия фотоэлектрона зависит от энергии поглощенного фотона, определяемой частотой света, и не зависит от числа фотонов, поглощенных веществом.

Количественно фотоэффект описывается уравнением Эйнштейна:

$$hf = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (4)$$

где A – **работа выхода электрона**, численно равная наименьшей энергии, которую необходимо сообщить электрону для того, чтобы он смог покинуть вещество;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона;

v – скорость фотоэлектрона в момент вылета из вещества.

Из уравнения Эйнштейна следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, а следовательно, и его максимальная начальная скорость зависит от частоты света и работы выхода, но не зависит от интенсивности света:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m}(hf - A)}. \quad (5)$$

Из уравнения Эйнштейна также видно, что фотоэффект возможен лишь при энергии фотона, большей работы выхода. Энергии фотона должно, по меньшей мере, хватить на то, чтобы оторвать электрон от вещества:

$$hf \geq A. \quad (6)$$

Обозначив через f_{\min} наименьшую частоту света, при которой возможен внешний фотоэффект («красная» граница фотоэффекта), имеем:

$$f_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что «красная» граница фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, т.е. от химической природы вещества.

Часть энергии электрон может потерять вследствие случайных столкновений с частицами вещества. В результате такой потери происходит нагревание вещества. Если же электрон, получив от фотона энергию hf , не испытывает столкновений с частицами вещества, то после вырывания с поверхности вещества его кинетическая энергия будет максимальной, что и отражено в уравнении (4).

Схема простейшей установки, с помощью которой можно экспериментально изучать закономерности внешнего фотоэффекта, представлена на рис. 1.

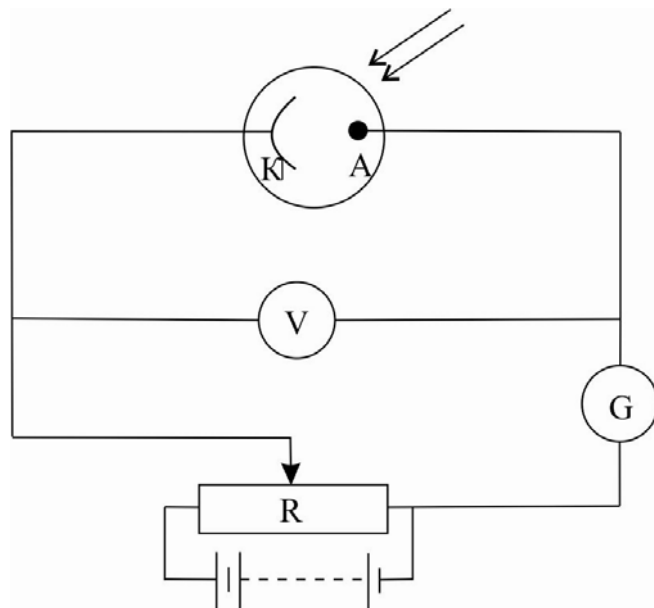


Рис. 1. Схема установки для изучения внешнего фотоэффекта

Основной частью установки является фотоэлемент, представляющий собой баллон, из которого откачан воздух. Внутри баллона помещены два электрода: катод (K) и анод (A). Если на катод через кварцевое стекло (оно, в отличие от обычного стекла, пропускает ультрафиолетовые лучи) направить пучок света, то, по крайней мере, часть вырванных с его поверхности электронов может достичь анода, что обеспечивает прохождение в электрической цепи фототока. Сила фототока измеряется с помощью гальванометра (G), величина электрического напряжения между электродами изменяется с помощью реостата (R) и измеряется с помощью вольтметра (V).

Если полярность источника напряжения такова, что анод заряжен положительно, а катод – отрицательно, то электростатическое поле между катодом и анодом будет ускорять фотоэлектроны. В результате при постоянной интенсивности света и неизменности его спектрального состава величина фототока I растет с напряжением U . При достаточно больших значениях U все фотоэлектроны попадают на анод и фототок достигает максимальной величины (**фототока насыщения I_s**).

Поскольку фототок насыщения создается всеми вырванными под действием света электронами, то величина I_s может быть принята за меру фотоэлектрического действия света, а первый закон фотоэффекта сформулирован так: *сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности падающего на поверхность вещества излучения*. Именно в этой

формулировке и проверяется первый закон фотоэффекта во втором задании лабораторной работы.

При смене полярности источника напряжения (т.е. когда анод заряжен отрицательно, а катод положительно) электростатическое поле между катодом и анодом будет тормозить фотоэлектроны. При некотором значении напряжения, называемом **задерживающим напряжением** U_c , даже самые быстрые фотоэлектроны не будут достигать анода, и ток в цепи прекратится. Зависимость фототока от напряжения графически изображают кривой, называемой вольтамперной характеристикой фотоэлемента (рис. 2).

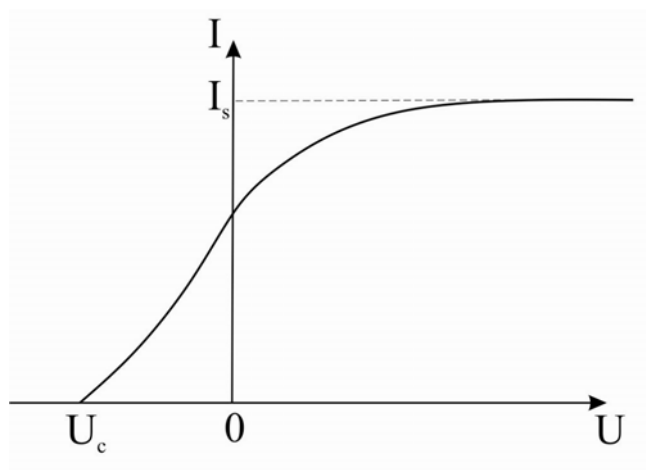


Рис. 2. Типичная вольтамперная характеристика фотоэлемента

Из закона сохранения энергии легко получить, что величина задерживающего напряжения U_c связана с максимальным значением кинетической энергии фотоэлектронов уравнением

$$-eU_c = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (8)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — элементарный электрический заряд; задерживающее напряжение $U_c < 0$.

Из уравнений (4) и (8) следует, что

$$eU_c = A - hf, \quad (9)$$

т.е. при неизменном материале катода задерживающее напряжение зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

Уравнение (9) позволяет определить постоянную Планка. Действительно, освещая катод сначала светом одной частоты f_1 , определяем величину задерживающего напряжения U_{c1} . Затем, освещая этот же катод светом частотой f_2 , получаем величину задерживающего напряжения U_{c2} . Зная частоты света f_1 , f_2 и найденные значения задерживающих напря-

жений U_{c1} , U_{c2} , используя уравнение (9), получаем, что постоянную Планка можно вычислить по формуле

$$h = \frac{e(U_{c1} - U_{c2})}{f_2 - f_1}. \quad (10)$$

На фотоэлектрическом эффекте работают все фотоэлектронные приборы. Это простейшие вакуумные и кристаллические фотоэлементы, преобразующие световую вспышку в электрический импульс; солнечные батареи, обеспечивающие электроэнергией бытовые приборы и космические аппараты; матричные фотоприемники видеокамер, преобразующие цветное оптическое изображение в электрический сигнал телевизионного стандарта; датчики электромагнитного излучения в системах контроля, обнаружения, защиты и автоматического управления, фотоприемники оптических средств связи и т. д.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задание 1. Получение вольтамперной характеристики фотоэлемента

Определение зависимости фототока от приложенного напряжения между катодом и анодом производится на компьютерном имитаторе лабораторной установки при заданном материале катода (оксид бария), неизменном спектральном составе излучения (УФ-излучение) и двух значениях эффективной мощности освещающей лампы. Задание выполняется в следующем порядке.

1. С помощью мыши войти в меню файла «Фундаментальные опыты по физике» и выбрать в нем лабораторную работу «Опыт Столетова».

2. В меню лабораторной работы выбрать опыт 1.

3. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки. Установить эффективное значение мощности излучения $P_{eff} = 40$ Вт. Для этого коэффициент параметра вертушки выбрать равным 1/3, мощность лампы 120 Вт. В качестве материала катода выбрать оксид бария, в качестве цвета излучения – «ультрафиолет». Данные о материале катода, спектральном составе излучения и эффективной мощности лампы внести в табл. 1. Выйти из меню.

4. Нажать на клавишу «Esc», войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 2.

5. С помощью клавиши «→» уменьшить напряжение до нуля и поменять полярность источника напряжения, нажав на клавишу F3.

6. Постепенно увеличивая по модулю отрицательное напряжение с помощью клавиши «←», зафиксировать момент, когда гальванометр

станет показывать нулевой фототок, и снять величину задерживающего напряжения U_c . Эту величину внести в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Материал катода	Спектральный состав излучения	Эффективная мощность излучения P_{eff} , Вт	Напряжение U , В	Сила тока I , мкА
			$U_c =$	
			-4	
			-3	
			-2	
			-1	
			0	
			10	
			...	
			100	
			$U_c =$	
			-4	
			-3	
			-2	
			-1	
			0	
			10	
			...	
			100	

7. Постепенно уменьшая по модулю напряжение до нуля с помощью клавиши «→», снять зависимость фототока I от напряжения U для отрицательных его значений. Данные внести в табл. 1.

8. Нажать на клавишу F3 и поменять полярность источника напряжения.

9. Постепенно увеличивая напряжение с помощью клавиши «←», снять зависимость фототока I от напряжения U для положительных его значений. Данные внести в табл. 1.

10. Нажать на клавишу «Esc», войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 1.

11. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки. Установить максимальное эффективное значение мощности излучения $P_{eff} = 300$ Вт. Для этого отключить вертушку и выбрать лампу мощностью 300 Вт. Выйти из меню.

12. Повторить пп. 4–9.

13. На одном графике построить вольтамперные характеристики, соответствующие минимальной и максимальной интенсивности излучения. Сделать выводы.

Задание 2. Проверка первого закона фотоэффекта

В этом задании проверяется первый закон фотоэффекта, т.е. устанавливается прямо пропорциональная зависимость между интенсивностью излучения и фототоком насыщения. Частота излучения неизменна и выбирается максимально возможной исходя из условия, чтобы фотоэффект наблюдался для всех выбранных материалов катода. Напряжение между катодом и анодом поддерживается неизменным и равным $U = 100$ В. Как видно из данных табл. 1, при таком значении напряжения обеспечивается фототок насыщения независимо от эффективной мощности излучения лампы.

Изменение интенсивности падающего на катод излучения осуществляется с помощью набора ламп различной мощности, а также вертушки, помещаемой между лампой и фотоэлементом, которая пропускает заданную мощность падающего на вертушку излучения. В результате эффективная мощность падающего на катод излучения, в данном случае линейно связанная с интенсивностью, оказывается равной произведению коэффициента пропускания вертушки на мощность лампы. Задание выполняется в следующем порядке.

1. С помощью клавиши «Esc» войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 2.

2. Используя навыки, полученные при выполнении предыдущего задания, установить напряжение между катодом и анодом $U = 100$ В.

3. Нажать на клавишу «Esc», войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 1.

4. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки. В качестве первого материала катода выбрать оксид бария, в качестве цвета излучения – «ультрафиолет».

5. Установить эффективное значение мощности излучения $P_{eff} = 40$ Вт. Для этого коэффициент параметра вертушки выбрать равным $1/3$, мощность лампы 120 Вт.

6. Выйти из меню параметров установки и снять показание гальванометра. Данные о значениях P_{eff} и силы фототока насыщения I_s внести в табл. 2.

7. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки и, последовательно устанавливая P_{eff} , равной 60, 80, 100, 120, 180, 200 и 300 Вт

(выбором соответствующей вертушки и лампы), снять для каждого значения мощности величину фототока насыщения, повторив п. 6.

8. Повторить пп. 4–7, выбрав в качестве материала катода цинк.

9. По данным табл. 2 построить график зависимости силы фототока насыщения I_s от эффективной мощности излучения P_{eff} . Сделать выводы.

Т а б л и ц а 2

Материал катода: оксид бария								
P_{eff} , Вт								
I_s , мкА								
Материал катода: цинк								
P_{eff} , Вт								
I_s , мкА								

Задание 3. Определение постоянной Планка

Постоянная Планка определяется на основе данных о величине задерживающего напряжения, полученных при различных частотах излучения и для различных материалов катода. Задание выполняется в следующем порядке.

1. С помощью клавиши «Esc» войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 1.

2. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки. Установить какое-либо значение эффективной мощности излучения, например 180 Вт, и выбрать в качестве материала катода барий, для которого можно определить задерживающее напряжение для двух частот излучения, соответствующих синему цвету и УФ-излучению.

3. Выбрать синий цвет излучения и выйти из меню параметров установки.

4. Нажать на клавишу «Esc», войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 2.

5. С помощью клавиши «→» уменьшить напряжение до нуля и при необходимости поменять полярность источника напряжения, нажав на клавишу F3 (при выполнении данного задания напряжение на источнике должно быть отрицательным).

6. Постепенно увеличивая по модулю отрицательное напряжение с помощью клавиши «←», зафиксировать момент, когда гальванометр станет показывать нулевой фототок, и снять величину задерживающего напряжения U_c . Эту величину внести в табл. 3 в строку, соответствующую выбранному материалу катода и выбранной частоте излучения.

Т а б л и ц а 3

Материал катода	Частота излучения f , Гц	U_c , В	Постоянная Планка h , Дж·с	$\langle h \rangle$, Дж·с	Δh , Дж·с	$\langle \Delta h \rangle$, Дж·с
Барий	$6,7 \cdot 10^{14}$ (синий цвет)					
	$15,1 \cdot 10^{14}$ (УФ-излучение)					
Оксид бария	$6,7 \cdot 10^{14}$ (синий цвет)					
	$15,1 \cdot 10^{14}$ (УФ-излучение)					
Цинк	$6,7 \cdot 10^{14}$ (синий цвет)					
	$15,1 \cdot 10^{14}$ (УФ-излучение)					

7. Нажать на клавишу «Esc», войти в меню лабораторной работы и выбрать опыт 1.

8. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки. Не меняя другие параметры, выбрать УФ-излучение и затем выйти из меню.

9. Повторить пп. 4–7.

10. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки и выбрать в качестве материала катода оксид бария, для которого аналогичным образом можно определить задерживающее напряжение для тех же двух частот излучения.

11. Повторить пп. 3–9.

12. С помощью клавиши F4 войти в меню параметров установки и выбрать в качестве материала катода цинк, для которого аналогичным образом можно определить задерживающее напряжение для тех же двух частот излучения.

13. Повторить пп. 3–9.

14. С помощью формулы (10) рассчитать постоянную Планка для выбранных материалов катода, а затем определить ее среднее значение. Данные вычислений внести в табл. 3.

15. Используя формулу (11), рассчитать абсолютную погрешность найденного значения постоянной Планка для каждого материала катода:

$$\Delta h = |h - \langle h \rangle|. \quad (11)$$

16. Рассчитать среднее значение абсолютной погрешности $\langle \Delta h \rangle$.

17. Записать результат измерений в виде $\langle h \rangle - \langle \Delta h \rangle \leq h \leq \langle h \rangle + \langle \Delta h \rangle$. Проверить принадлежность табличного значения постоянной Планка полученному интервалу. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Фотоэлектрический эффект и его виды.
2. Законы внешнего фотоэффекта.
3. Корпускулярно-волновой дуализм.
4. Явление фотоэффекта с точки зрения волновых и квантовых представлений.
5. Схема экспериментальной установки по изучению внешнего фотоэффекта.
6. Построить вольтамперную характеристику фотоэлемента. Что такое фототок насыщения и задерживающее напряжение?
7. Методика определения постоянной Планка.
8. Цель и порядок выполнения лабораторной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст] / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2014.
2. Стафеев, С.К. Основы оптики [Текст]: учебное пособие / С.К. Стафеев, К.К. Боярский, Г.Л. Башнина. – СПб.: Питер, 2006.
3. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст] / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая школа, 2006.
4. Ландсберг, Г.С. Элементарный учебник физики [Текст] : в 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / Г.С. Ландсберг. – М.: Физматлит, 2012.

Учебное издание

Грейсух Григорий Исаевич
Степанов Сергей Алексеевич
Сидякина Зоя Александровна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания
по выполнению лабораторной работы

Р е д а к т о р Н.Ю. Шалимова
В е р с т к а Н.А. Сазонова

Подписано в печать 27.08.2014. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз.
Заказ №283.

Издательство ПГУАС.
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.