

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА»

Г.А. Рахманкулова, А.Л. Суркаев

## **ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА**

Методические указания



Волгоград  
2015

УДК 53 (075.5)

Рецензент:

*Канд. физ.-мат. наук, доцент Т.А. Сухова*

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

Г.А. Рахманкулова, **Изучение внешнего фотоэффекта** [Электронный ресурс]: методические указания / Г.А. Рахманкулова, А.Л. Суркаев //Сборник «Методические указания» Выпуск 3.-Электрон. текстовые дан.(1файл:141Kb) – Волжский: ВПИ (филиал) ГОУВПО ВолгГТУ, 2015.-Систем.требования:Windows 95 и выше; ПК с процессором 486+; CD-ROM.

Методические указания содержат рекомендации к выполнению лабораторной работы, представленной в третьей части практикума кафедры «Прикладная физика и математика» Волжского политехнического института.  
Предназначены для студентов всех форм обучения.

©Волгоградский  
государственный  
технический  
университет, 2015  
© Волжский  
политехнический  
институт, 2015

## Лабораторная работа № 345

### ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

**345.1. Цель работы:** Изучение явления внешнего фотоэффекта, экспериментальное подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта; экспериментальное определение красной границы фотоэффекта, работы выхода фотокатода и постоянной Планка.

#### 345.2. Краткая теория

М. Планк выдвинул идею квантов, что излучение происходит порциями энергии – *квантами*. Впоследствии было отмечено, что не только излучение, но и поглощение происходит также квантами. Идеи Планка получили дальнейшее развитие, прежде всего, в работах А. Эйнштейна. В 1905 г. А. Эйнштейн выдвинул гипотезу световых квантов. Он предположил, что дискретный характер присущ не только процессам испускания и поглощения света, но и самому свету, т.е. что свет распространяется в виде дискретных частиц–квантов – *фотонов*. Эта гипотеза получила признание только в 1923–26 гг.

*Фотоны* по современным представлениям – это частицы (кванты), поток которых является одной из моделей *электромагнитного излучения* (ЭМИ).

*Фотонная теория света* (ЭМИ) – свойства фотона.

1. *Масса покоя фотона*  $m_0 = 0$ .

2. *Энергия фотона*  $\varepsilon_\phi = h\nu = \hbar\omega$ , где  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка (например, для зеленого света  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  и  $\varepsilon_\phi = 2,5 \text{ эВ}$ );  $\hbar = h/2\pi = 1,055 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – также постоянная Планка, соотношенная с циклическими частотами;  $\nu$  – частота излучения,  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота. Энергия часто измеряется во внесистемных единицах «электрон-вольтах»:  $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

3. *Скорость фотона* всегда равна  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорости света. Фотоны движутся со скоростью  $c$  не только в вакууме, но и в веществе. «Замедление» света в веществе обусловлено тем, что фотоны поглощаются атомами и затем испускаются вновь. Между актами поглощения и испускания проходит некоторое время, вследствие чего средняя скорость фотонов в веществе оказывается меньше  $c$  в вакууме.

4. *Масса фотона* связана с его энергией соотношением Эйнштейна

$$\varepsilon_{\phi} = m_{\phi}c^2, \text{ отсюда} \quad m_{\phi} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

5. *Импульс фотона*  $p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{c}$ , где  $\lambda$  – длина волны ЭМИ.

Корпускулярные свойства излучения наиболее отчетливо обнаруживаются в явлении освобождения электронов из вещества под действием света, получившем название *фотоэффекта*. Влияние света на электрические процессы было открыто Г. Герцем (1887 г., *Генрих Рудольф Герц, немецкий физик, 1857–1894*), заметившим, что проскакивание искры между находящимися под напряжением цинковыми электродами облегчается при освещении их ультрафиолетовым излучением. Подробно это явление было исследовано А.Г. Столетов (*Александр Григорьевич Столетов, русский физик, 1839–1896*).

Различают фотоэффект внешний, внутренний, вентильный.

1. *Внешний* – испускание электронов веществом под действием света (твердые тела: металлы, полупроводники, диэлектрики; и газы). Вылетевшие электроны условно называются *фотоэлектронами*.

2. *Внутренний* – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу, что приводит к возникновению *фотопроводимости*.

3. *Вентильный* – возникновение ЭДС (*фото–ЭДС*) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла, при отсутствии внешнего электрического поля. Это прямой путь преобразования солнечной энергии в электрическую.

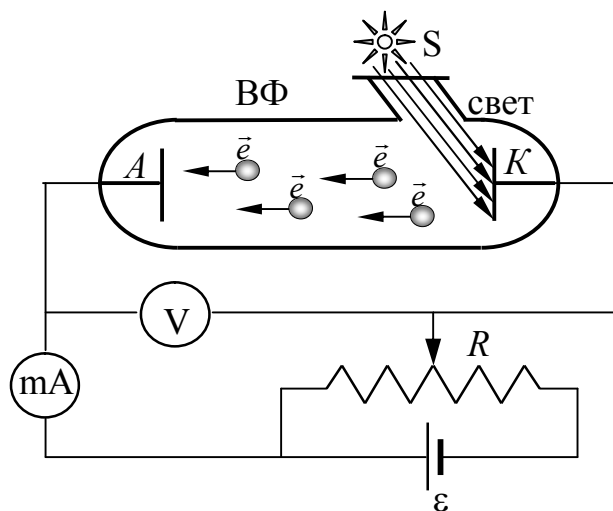


Рис. 345.1

Для исследования закономерностей фотоэффекта используют установку, схематически показанную на рис. 345.1. В фотоэлементе ВФ поддерживается высокий вакуум. Между анодом *A* и катодом *K* источник тока  $\epsilon$  создает электрическое поле. Так как электрическая цепь разомкнута, то при от-

сутствии света электрический ток через фотоэлемент не идет. При освещении катода свет вырывает из него электроны, которые под действием сил электрического поля движутся к аноду. В цепи появляется электрический ток, называемый *фототоком*. Сила фототока измеряется миллиамперметром mA, напряжение между анодом *A* и фотокатодом *K* – вольтметром V. Изменяя напряжение с помощью потенциометра *R*, находят зависимость силы фототока от напряжения – вольтамперную характеристику.

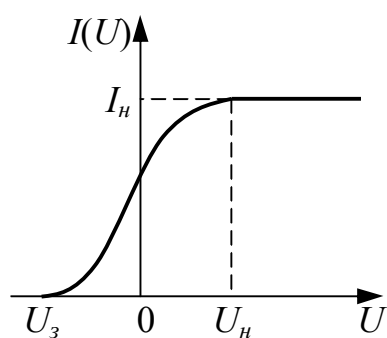


Рис. 345.2

На рис. 345.2 изображена вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента. При  $U = 0$  (между катодом и анодом электрического поля нет) сила фототока все равно не равна нулю. Это обусловлено тем, что электроны, вырванные светом из катода, имеют некоторую начальную скорость  $v$  (а значит, и кинетическую

энергию) и часть из них может достигать анода и при отсутствии электрического поля.

Если увеличивать напряжение между катодом и анодом (подавая отрицательный потенциал на катод, а на анод – положительный), будет увеличиваться сила тока. Это объясняется тем, что теперь электроны, которые при  $U = 0$  не достигали анода, под действием сил электрического поля притягиваются к аноду.

Из рис. 345.2 видно, что при некотором значении  $U = U_n$  сила фототока достигает наибольшего значения, получившего название тока насыщения  $I_n$ . Дальнейшее увеличение напряжения уже не вызывает роста силы тока. Это значит, что все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Если за единицу времени свет вырывает из фотокатода  $n$  электронов, то ток насыщения будет равен

$$I_n = en,$$

где  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона.

Если поменять полярность электронов, т.е. подать на катод положительный потенциал, а на анод – отрицательный, то электрическое поле будет тормозить движение электронов от катода к аноду. За счет работы сил электрического поля ( $A_E = eU$ ) кинетическая энергия движущихся электронов будет уменьшаться. Если первоначальная кинетическая энергия электрона  $W_k$  будет больше работы электрического поля ( $W_k > A_E$ ), электроны будут достигать анода, в цепи будет идти ток. При  $W_k \leq eU$  электроны анода не достигнут и ток прекратится.

*Запирающим (задерживающим) напряжением* называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода.

При  $U = U_z$  даже самые быстрые электроны, имеющие максимальную скорость  $v$ , не достигают анода. В этих условиях:

$$eU_3 = \frac{m v_{\max}^2}{2}.$$

Таким образом, измеряя на опыте  $U_3$ , можно вычислить максимальную кинетическую энергию электронов, вылетающих из катода.

В 1905 г. Эйнштейн объяснил экспериментальные закономерности фотоэффекта на основе гипотезы световых квантов. Качественная картина с этой точки зрения выглядит следующим образом. Падающее монохроматическое излучение рассматривается как поток фотонов, энергия которых связана с частотой соотношением  $\varepsilon_{\phi} = h\nu$ .

При поглощении фотона его энергия целиком передается одному электрону, и если эта энергия достаточна для того, чтобы освободить от удерживающих его связей, то он может выйти за пределы поверхности металла.

Вероятность одновременного поглощения двух фотонов света одним электроном мала, поэтому каждый фотоэлектрон получает энергию от одного фотона. Вообще говоря, не каждый поглощенный фотон приводит к освобождению электрона, т.е. *квантовый выход* – отношение числа фотоэлектронов к числу поглощенных атомами фотонов составляет порядка  $10^{-5} \div 10^{-3}$ .

Часть поглощенной энергии расходуется на освобождение электрона из вещества, оставшаяся часть сообщается электрону в виде кинетической энергии. Если электрон не тратит энергию на неупругие столкновения в металле, то его кинетическая энергия при выходе из металла будет максимальна. Минимальную энергию  $A_{\text{вых}}$ , необходимую для освобождения электрона из металла, называют *работой выхода*. Таким образом, для фотоэлектронов, имеющих *максимальную* скорость  $v_{\max}$  и массу покоя  $m$ , закон сохранения энергии в элементарном акте поглощения фотона можно записать в виде:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m v_{\max}^2}{2}. \quad (345.1)$$

Уравнение (345.1) и есть *уравнение Эйнштейна* для объяснения фотоэффекта, за которое он был удостоен Нобелевской премии.

Работа выхода электрона  $A_{\text{вых}}$  зависит только от природы вещества и от состояния его поверхности. *Для данного фотокатода работа выхода – величина постоянная.*

Из уравнения Эйнштейна следует, что максимальная кинетическая энергия вылетающих из катода электронов прямо пропорциональна частоте света (*второй закон фотоэффекта*).

Из этого же уравнения следует, что фотоэффект возможен, если энергия фотона  $h\nu$  больше или равна работе выхода электрона ( $h\nu \geq A_{\text{вых}}$ ). При условии  $h\nu < A_{\text{вых}}$  энергия фотона будет недостаточно для вырывания электрона из металла. Следовательно, минимальная энергия фотона  $h\nu_{\text{min}}$ , при которой еще возможен фотоэффект, равна работе выхода  $A_{\text{вых}}$  ( $h\nu_{\text{min}} = A_{\text{вых}}$ ), а красная граница фотоэффекта:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}. \quad (345.2)$$

Красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода электрона, то есть от природы вещества катода (*третий закон фотоэффекта*).

Световой поток определяется числом фотонов, падающих на поверхность катода в единицу времени. Следовательно, число вырванных в единицу времени электронов  $n$  (а значит и сила тока насыщения  $I_n$ ) прямо пропорционально световому потоку (*первый закон фотоэффекта*).

### 345.3. Порядок выполнения работы

1. Запустите программу «Открытая физика». Выберите в содержании раздел «Квантовая физика», модель «Фотоэффект» (рис.345.3).

2. Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.



3. По полученному у преподавателя номеру варианта выберите по таблице 345.2 значения запирающего напряжения  $U_{ЗАП 1}$ ,  $U_{ЗАП 2}$ ,  $U_{ЗАП 3}$ ,  $U_{ЗАП 4}$  и запишите их в таблицу 345.1.

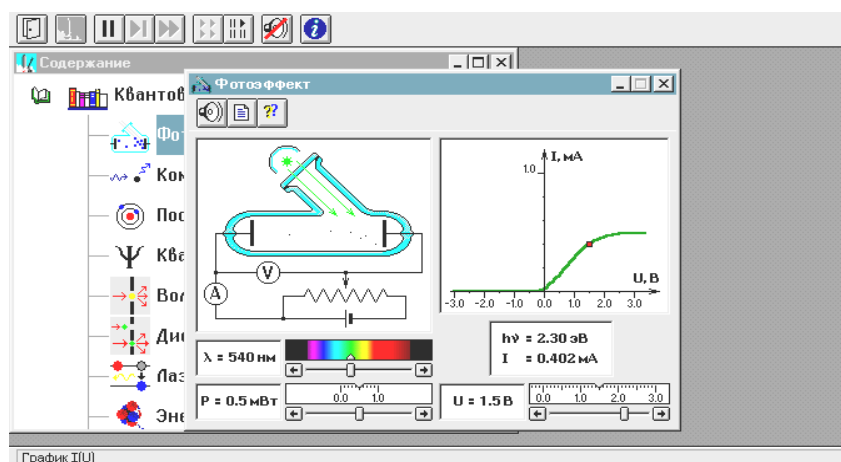


Рис.345.3

4. Подведите маркер мыши к движку регулятора интенсивности (мощности) облучения фотокатода и установите его на максимум ( $P = 1 \text{ мВт}$ ).

5. Подведите маркер мыши к движку регулятора запирающего напряжения  $U$  и установите значение напряжения между анодом и фотокатодом  $U = 0 \text{ В}$ .

6. Подведите маркер мыши к движку регулятора длины волны облучающего излучения  $\lambda$  и, зацепив его мышью, перемещайте вертикальную метку на спектре слева направо, постепенно увеличивая длину волны облучения фотокатода.

При этом, наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, изменяя длину волны  $\lambda$  до такого максимального значения  $\lambda_{max}$ , при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении электронов вы видите, что практически все электроны долетают до анода и после этого движутся обратно к катоду, а в правом нижнем поле программы  $I = 0 \text{ mA}$ ).

Установите самую большую длину волны (она будет равна  $\lambda_{кр} = \lambda_{max}$ ), при которой фототок еще присутствует ( $I = 0,001 \text{ mA}$ ).

Запишите значение длины волны красной границы фотоэффекта  $\lambda_{кр} = \lambda_{max}$  в протокол.

7. Повторите операции по пунктам 5–6 для значений запирающего напряжения  $U = U_{ЗАП 1}, U_{ЗАП 2}, U_{ЗАП 3}, U_{ЗАП 4}$ . Запишите полученные значения  $\lambda_{max}$  в таблицу 345.1.

Таблица 345.1.  
Результаты измерений

$i =$	1	2	3	4
$U_{ЗАП i}, B$				
$\lambda_{max i}, нм$				
$1/\lambda_i, 10^6 м^{-1}$				

Таблица 345.2.  
Значения запирающего напряжения  
(не перерисовывать)

Вариант	$U_{ЗАП 1}$	$U_{ЗАП 2}$	$U_{ЗАП 3}$	$U_{ЗАП 4}$
1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.9
3	-0.3	-0.5	-0.7	-1.0
4	-0.4	-0.7	-0.8	-1.1

### 345.5. Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в таблицу 345.1 обратные длины волн  $1/\lambda_i$ .
2. Постройте график зависимости напряжения запираения ( $U_{ЗАП}$ ) от обратной длины волны ( $1/\lambda$ ).
3. Определите постоянную Планка, используя график и формулу:

$$h = \frac{e \Delta(U_{ЗАП})}{c \Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)}$$

4. Используя длину волны красной границы фотоэффекта (345.2), вычислите значение работы выхода материала фотокатода по формуле

$$A_{вых} = \frac{hc}{\lambda_{кр}}$$

По значению работы выхода  $A_{вых}$  из таблицы 345.3 выберите материал фотокатода.

5. Рассчитайте погрешности определения работы выхода.
6. Запишите ответ и, проанализировав ответ и график, сделайте вывод.

Таблица 345.3. Значения работы выхода для некоторых материалов

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{ВЫХ}}, \text{эВ}$	2,2	2,3	6,3	2,1	4,7	2,0	4,0

### 345.6. Контрольные вопросы

1. От чего зависит сила фототока в фотоэлементе?
2. Влияет ли частота света на силу фототока в фотоэлементе?
3. Что такое фотон по современным представлениям?
4. Какими доказательствами существования фотона располагает наука?
5. Поясните термин «работа выхода» для явления фотоэффекта.
6. В чем заключается явление корпускулярно-волнового дуализма?
7. Почему мы не замечаем проявлений корпускулярно-волнового дуализма на окружающих нас объектах?

**Литература, рекомендуемая для обязательной проработки:** [1], §1.2; [2], §§56, 57; [3], §§1, 2; [4], §§202, ..., 205; [5], §§36.1, ..., 36.6.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы: Учебное пособие для физич. спец. вузов. – 3-е изд. стер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 256 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 4-х томах. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М.: КноРус, 2012. – Т.3. – 368 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Атомная и ядерная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, МФТИ, 2006. – Т.5. – 784 с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – 20-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 560 с.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во «Академия», 2014. – 720 с.

Учебное издание

Галлия Алиевна **Рахманкулова**  
Анатолий Леонидович **Суркаев**

## **ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА**

*Методические указания*

План электронных изданий 2010 г. Поз. № 16В  
Подписано на «Выпуск в свет» 08.10.10. Уч–изд. л. 1,08.  
На магнитносителе.

Волгоградский государственный технический университет.  
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.