

## Работа 3.09

### ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

#### Цель работы

Исследование внешнего фотоэффекта в оптическом диапазоне видимых волн.

#### Задачи

1. Получить зависимость запирающей разности потенциалов от частоты света.
2. Рассчитать значение постоянной Планка.
3. Определить красную границу фотоэффекта и найти работу выхода для данного фотоэлемента.

#### Введение

Внешним фотоэлектрическим эффектом [1,2] или фотоэффектом называется испускание (эмиссия) электронов веществом под действием света, (поэтому внешний фотоэффект называют ещё фотоэмиссией электронов).

Впервые экспериментальное исследование внешнего фотоэффекта было проведено русским учёным А.Г.Столетовым. Позже эти исследования были продолжены П.И. Лукирским, С.С. Полежаевым и другими.

В результате экспериментальных исследований были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Общее количество электронов, вылетающих с поверхности металла в единицу времени, пропорционально интенсивности света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте световой волны и не зависит от интенсивности света.
3. Для каждого металла существует минимальная частота  $v_{min} = v_k$ , называемая красной границей фотоэффекта, такая, что 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.

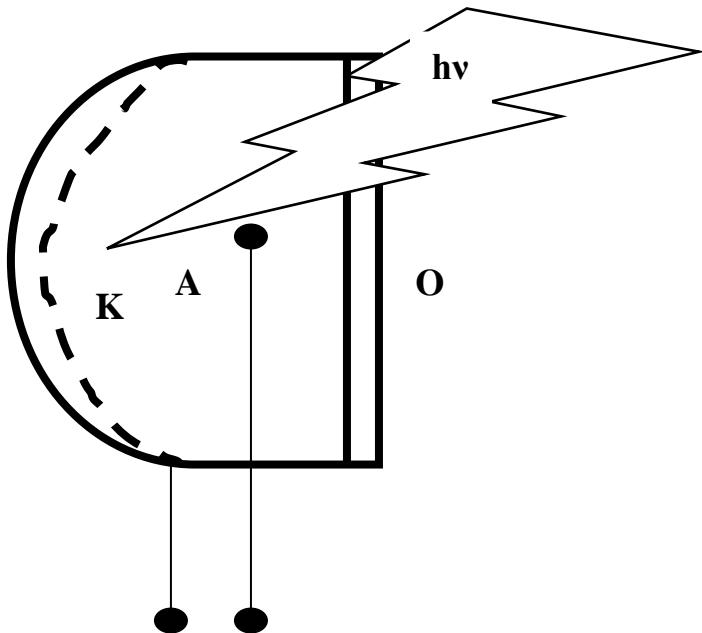
По квантовой теории свет испускается и поглощается веществом отдельными «порциями» - квантами с энергией  $E = h\nu$  ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света). Световые кванты (фотоны) ведут себя как неделимые частицы. При поглощении фотон исчезает, а его энергия переходит поглощающему 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  $A$ . Разность ( $h\nu - A$ ) остаётся у электрона в виде кинетической энергии. Исходя из этих представлений, можно записать уравнение, закона сохранения энергии:

$$h\nu = A + (mv^2/2)_{\max}, \quad (1)$$

которое было впервые предложено Эйнштейном и поэтому называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Второе слагаемое правой части в этом уравнении означает максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов. В действительности выходящие из металла электроны имеют разные кинетические энергии от нуля до максимальной даже при использовании монохроматического света, т.е. света строго определённой частоты. Это связано с тем, что электрон в процессе движения к поверхности металла испытывает столкновения с другими электронами, что приводит к частичной потере энергии. Часть электронов, потеряв энергию, так и не выходит из металла, поэтому число испущенных электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов. Только те электроны, которые покинули металл с его поверхности, т.е. без столкновений, обладают максимальной кинетической энергией, но таких электронов мало.

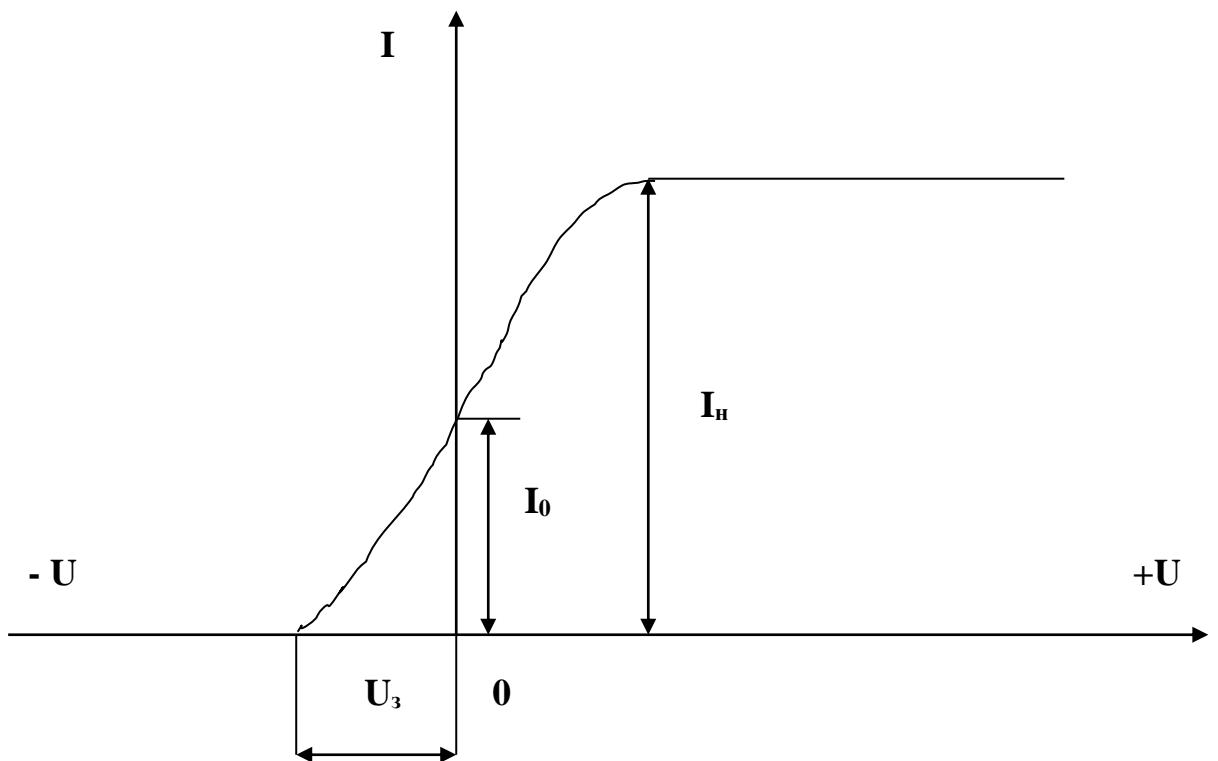
Квантовая теория объясняет все законы фотоэффекта. Интенсивность светового пучка определяется числом фотонов, падающих ежесекундно на металл. Число испускаемых фотоэлектронов пропорционально числу поглощаемых фотонов и, следовательно, интенсивности света. Для данного металла работа выхода – строго определённая величина, поэтому максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов оказывается пропорциональной частоте падающего света. Частота света, при которой энергия кванта равна работе выхода ( $h\nu_{kp} = A$ ) и есть  $\nu_{kp}$  - (красная граница).

Безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что электроны выходят практически одновременно с поглощением фотона из приповерхностного слоя. Другие электроны при столкновениях теряют энергию и не могут выйти из металла.



**Рис. 9.1.** Схема вакуумного фотоэлемента (К - фотокатод, А - анод, О - окно, пропускающее свет).

В данной работе исследование внешнего фотоэффекта осуществляется с помощью вакуумного фотоэлемента (рис. 9.1). Светочувствительный катод (к) в виде сферической поверхности освещается светом через окно (о). Анод (а) в виде небольшого шарика расположен в центре сферы. При такой конструкции все электроны, вырванные светом из катода, попадают на анод. На рис. 9.2 показана типичная вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента. При достаточно больших положительных напряжениях на аноде фототок остаётся постоянным, что соответствует току насыщения  $I_n$ , когда все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. При нулевом напряжении фототок  $I_0$  отличен от нуля за счёт наличия у фотоэлектронов кинетической энергии. При обратном (отрицательном) напряжении на аноде фототок плавно уменьшается с его ростом до нуля. Плавный спад фототока с увеличением обратного напряжения объясняется различной кинетической энергией, с которой электроны выходят из катода.



**Рис. 9.2.** Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента ( $U_3$  – задерживающая разность потенциалов,  $I_0$  – фототок при нулевом напряжении,  $I_h$  – фототок насыщения)

При напряжении  $U_3$  (задерживающая разность потенциалов) электрическим полем задерживаются все фотоэлектроны вплоть до тех, которые обладают максимальной кинетической энергией (фотоэлемент «заперт», т.е. ток через него не проходит). Следовательно, задерживающая разность потенциалов определяет максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, т.е.

$$eU_3 = (mv^2/2)_{\max}, \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона.

Подставив (2) в уравнение Эйнштейна (1), получим:

$$eU_3 = h\nu - A$$

Если построить экспериментальный график  $eU_3(v)$ , то должна получиться прямая, что будет убедительным подтверждением, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте света. Экстраполируя этот график до пересечения с осью абсцисс ( $v$ )

получим красную границу  $v_{kp}$ . Произведение  $hv_{kp} = A$  даёт работу выхода электрона из фотокатода. Угловой коэффициент этой зависимости есть постоянная Планка  $h = eU_3/v$ , выраженная в эВ·с, если  $U_3$  – в вольтах.

## Методика эксперимента

Схема установки приведена на рис 9.3, а её фотография на рис 9.4. Источником света является лампа накаливания ЛН (2) мощностью 15 Вт, которая подключена к блоку питания БП-1 (1) напряжением 13 В. Лампа имеет сплошной спектр излучения в области видимых волн и расположена непосредственно перед входной щелью призменного монохроматора УМ-2.(5). В монохроматоре установлена призма Аббе, которая не только раскладывает входной луч в спектр, но и поворачивает выходной луч на 90 градусов относительно входного луча. Поворачивая барабан (4) настройки монохроматора, мы поворачиваем призму и тем самым изменяем длину волны света, который выходит из выходной щели монохроматора и попадает на фотоэлемент ФЕ (9). Барабан отградуирован в делениях. На установке имеется градуировочная кривая, с помощью которой можно деления перевести в длины волн. Фотоэлемент марки СЦВ-4 имеет сурьмяно-цезиевый фотокатод и обладает наибольшей чувствительностью в зелёно-синей области (520-450) нм. Регулируемое запирающее напряжение на фотоэлементе поступает с блока питания БП-2(10) и измеряется вольтметром В (6). Сила фототока измеряется наноамперметром А (7), в качестве которого используется вольтметр В-7-17 в режиме измерения тока. Чтобы исключить попадание рассеянного света на светочувствительный слой фотоэлемента входная щель и лампа, выходная щель и фотоэлемент закрыты светонепроницаемыми экранами (11), которые не рекомендуется трогать.

## Указания по выполнению работы

1. Убедитесь, что входная щель монохроматора открыта (рычажок (3) находится в положении «открыто»). Микровинт (8), регулирующий ширину выходной щели, показывает максимальную её величину – 4.60 мм (условие максимальной освещённости фотокатода). Проверьте, что клавиши управления на вольтметре В-7-17, обозначенные зелёными точками, находятся в нажатом положении.

2. Нажмите клавишу «сеть» на блоке розеток и включите все приборы, за исключением лампы накаливания. Установите барабан монохроматора на

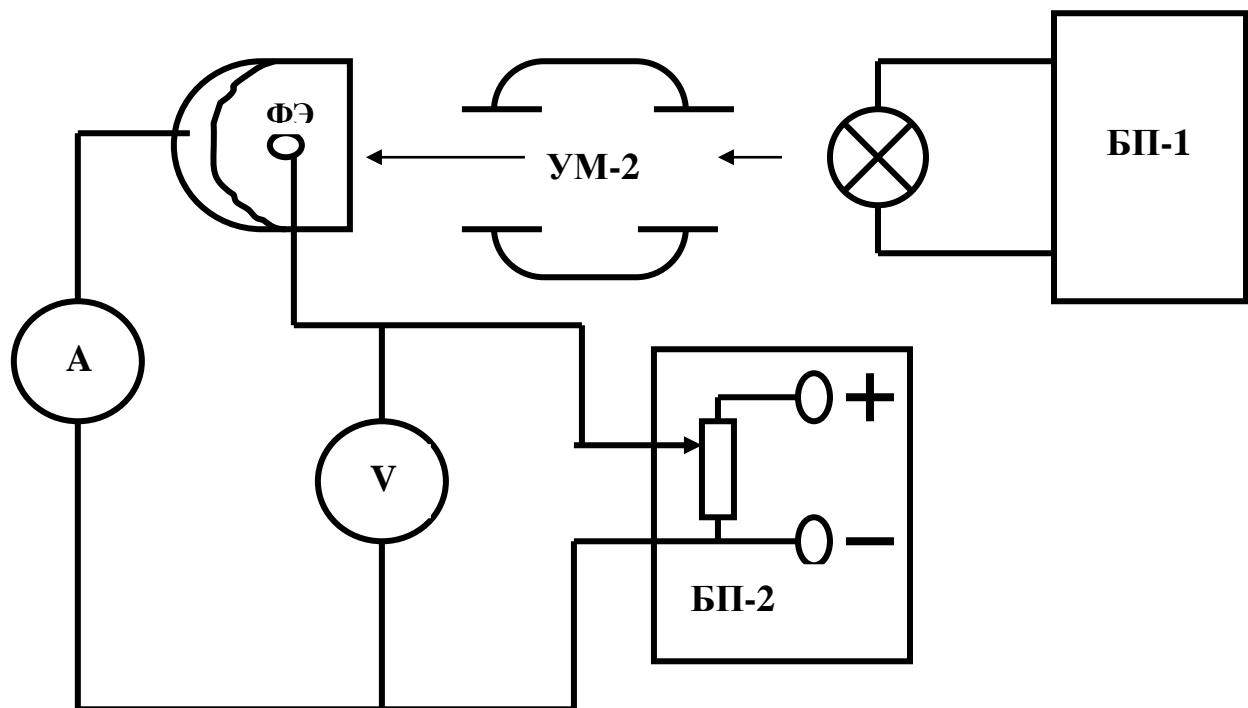
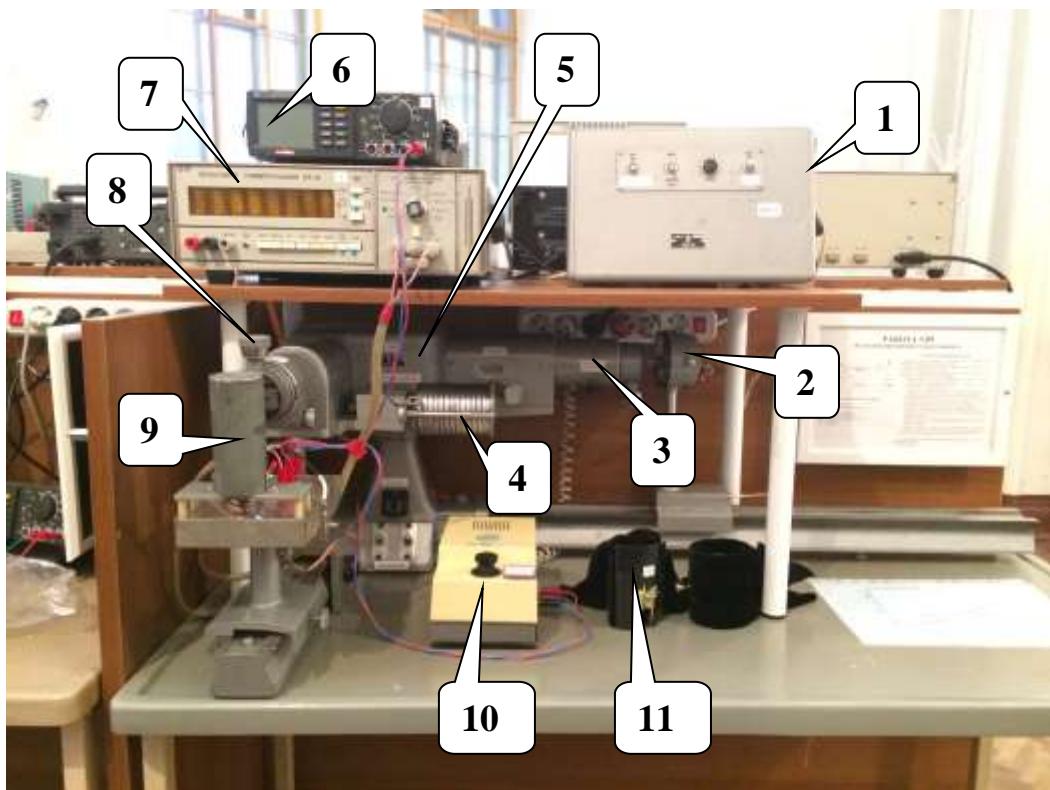


Рис. 9.3. Схема экспериментальной установки.



#### Рис. 9.4. Фотография экспериментальной установки

деление 2000. Установите отрицательное анодное напряжение равным нулю вольт. Убедитесь, что темновой фототок отсутствует ( $I_o = 0 - 0.1$  нА.) т.к. лампа выключена.

3. Включите лампу и измерьте фототок. Если  $I_o \geq 20$  нА, то установка настроена правильно и можно продолжать измерения.

4. Регулировкой ширины выходной щели добейтесь, чтобы  $I_o = 20$  нА. Плавно увеличивая отрицательное напряжение на аноде, убедитесь, что фототок спадает. Измерьте запирающее напряжение  $U_3$ , при котором фототок обращается в ноль. При точном попадании в 0.0 нА знаки фототока плюс или минус должны периодически сменять друг друга (моргать). Запишите первые экспериментальные данные ( $N = 2000$  и  $U_3$ ) в таблицу.

5. Произведите десять измерений  $N$  и  $U_3$ , уменьшая каждый раз показания барабана на 100 делений.

Таблица. Измерение зависимости  $U(v)$ .

№, п/п	N, дел.	$U_3$ , В	$\lambda$ , нм.	$v$ , Гц.
1	2000			
...	...			
10	1100			

#### Обработка результатов

1. Заполните таблицу до конца. По градуировочному графику  $\lambda(N)$  переведите значения делений барабана в значения длины волны света. По формуле  $v = c/\lambda$  вычислите частоту света.
2. Постройте график  $[eU_3(v)]_{\max}$  - зависимость максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты  $v$ . Экстраполируя график до пересечения с осью частоты, определите красную границу фотоэффекта  $v_{kp}$ . Вычислите работу выхода сурьмяно-цезиевого катода в электрон-вольтах по формуле  $A = hv_{kp}$ , где  $h = 4, 14 \cdot 10^{-15}$  эВ·с. Сравните это значение с работами выхода чистых металлов, взятых из таблицы 18 задачника по общей физике И.Е.Иродова издательства Лань 2006 года на стр. 412.
3. Вычислите постоянную Планка и её погрешность как угловой коэффициент в зависимости  $[eU_3(v)]_{\max}$  методом парных точек.

Полученное значение  $h$  в размерности эВ·с переведите в размерность Дж·с. Значение величины  $h$  в эВ·с и Дж·с с погрешностями приведите в окончательном результате.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое фотоэффект?
2. Сформулируйте законы фотоэффекта.
3. Как объясняется фотоэффект на основе квантовой теории?
4. Изобразите вольт-амперную характеристику фотоэффекта.
5. Что такое запирающая разность потенциалов и что она определяет?

### **Литература**

1. Савельев И.В. Курс физики, том 3, стр. 35, 2007, изд - во Лань.
2. Иродов И.Е. Квантовая физика. Основные законы, стр. 12, 2007, изд-во БИНОМ. Лаборатория знаний.
3. Обработка экспериментальных данных, учебное пособие / Агапьев Б.Д. и др. СПб, изд – во Политехнического ун – та, 2002.