

Ярославский государственный педагогический  
университет им. К. Д. Ушинского

**Лабораторная работа № 2**

**Изучение внешнего  
фотоэффекта  
и определение постоянной  
Планка**

*для студентов специальности "физика"*

Ярославль  
2002

---

## Оглавление

1. Краткая теория . . . . .	3
2. Описание установки . . . . .	6
3. Порядок выполнения работы . . . . .	7
4. Контрольные вопросы . . . . .	10

## Лабораторная работа № 2

### Изучение внешнего фотоэффекта и определение постоянной Планка

**Цель работы:** Знакомство с методом задерживающего потенциала, определение постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода электрона.

**Приборы:** фотоэлемент СЦВ-4 в кожухе, осветитель ОИ-9М, монохроматор УМ-2, микроамперметр, вольтметр, выпрямитель, реостат.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1976, гл 32.
2. Матвеев А.Н. Атомная физика. М., 1989, п.1.
3. Савельев И.В. Курс физики. том 3, М., 1989, п.8.

## 1. Краткая теория

Фотоэффект принадлежит к числу явлений, в которых обнаруживаются корпускулярные свойства света. Столкновение фотонов с электронами приводит к выбиванию электронов из фотокатода. Энергетический баланс этого взаимодействия устанавливается уравнениями Эйнштейна.

$$h\nu = E_{max} + A, \quad (1.1)$$

$E_{max}$  — максимальная кинетическая энергия  
освободившегося электрона.

$A$  — работа выхода электрона из фотокатода,

$h$  — постоянная Планка,

$\nu$  — частота света.

Произведение  $h\nu$  определяет, как известно, энергию фотона для света с частотой  $\nu$ .

Даже при монохроматическом освещении энергия электронов, вылетающих из катода, оказывается неодинаковой. Электроны в веществе обладают разными энергиями, располагаясь по разрешенным энергетическим уровням разрешенных зон. Под работой выхода  $A$  понимают энер-

гию, необходимую для удаления электрона с самых верхних энергетических уровней. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон с ниже расположенных уровней, превосходит  $A$ , и кинетическая энергия таких электронов оказывается меньше. Кроме того, электроны могут терять часть своей энергии на пути к поверхности фотокатода. Соотношение (1.1) определяет поэтому кинетическую энергию не всех, а только наиболее быстрых фотоэлектронов.

При измерении энергии фотоэлектронов обычно пользуются методом задерживающего потенциала. Вблизи фотокатода располагается второй электрод (анод), к которому прикладывается отрицательный по отношению к катоду потенциал  $U$ . Как уже было сказано, вылетевшие из фотокатода электроны имеют различные энергии. Те электроны, энергия которых удовлетворяет условию  $E < U$  ( $e$  — заряд электрона), не могут достичь анода. Поэтому при увеличении  $U$  анодный ток уменьшается. При некотором значении  $U = U_3$  (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода, и анодный ток прекращается. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов связана с задерживающим потенциалом соотношением:

$$E_{max} = e \cdot U_3. \quad (1.2)$$

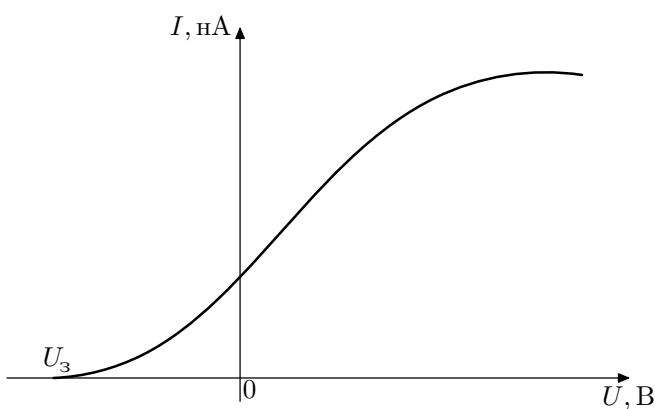


Рис. 1.1

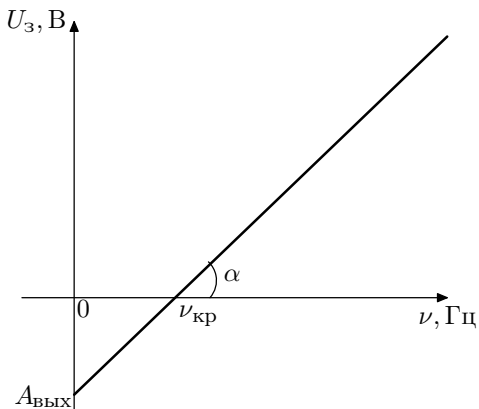


Рис. 1.2

На опыте обычно изучается зависимость электронного тока в фотоэлементе от величины задерживающего потенциала  $U_3$ . Как следует из сказанного, форма кривой зависит от материала и толщины фотослоя. Она зависит, кроме того, от формы электродов и от условий освещения.

Интерес представляет поэтому не сама кривая, а лишь точка пересечения кривой с осью  $J = 0$ , определяющая потенциал запираения (рис. 1.1).

Подставляя (1.2) в (1.1), получаем

$$h\nu = eU_3 + A \quad \text{или окончательно}$$

$$U_3 = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{A}{e}. \quad (1.3)$$

Из уравнения (1.3) видно, что величина запирающего потенциала  $U_3$  линейно зависит от частоты света (рис. 1.2).

При экспериментальной проверке уравнения Эйнштейна следует убедиться в том, что величина потенциала запираения  $U_3$  зависит только от частоты света и притом линейно (рис. 1.2). По тангенсу угла  $\alpha$  наклона прямой  $U_3(\nu)$  к оси частот можно определить постоянную Планка:

$$\frac{\Delta U_3}{\Delta \nu} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dU_3}{d\nu} = \frac{h}{e}. \quad (1.4)$$

(При этом следует иметь в виду, что  $\operatorname{tg} \alpha$  в этом случае имеет физический смысл, и следовательно, является *размерной* величиной. Таким образом при расчете по графику величины  $\frac{\Delta U_3}{\Delta \nu}$  надо брать их в выбранных на графике единицах измерения.)

Таким образом, в расчетную формулу для определения не входит работа выхода  $A$ , что существенно упрощает проведение эксперимента. Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс можно определить по графику, либо аналитически с помощью метода наименьших квадратов.

Экспериментальная часть задания сводится к определению запирающего потенциала  $U_3$ . Точное определение этого потенциала наталкивается на ряд трудностей. Как показывает опыт, график  $J = f(U_3)$  (рис. 1.1) подходит к оси абсцисс под небольшим углом и даже заходит в область отрицательных значений  $J$ .

Значение запирающего потенциала становится несколько неопределенным. Такой ход кривой связан с наличием обратного фотоэффекта (т.е. фотоэффекта с анода) и с ионными токами в фотоэлементе из-за несовершенства вакуума. Поэтому следует проводить измерения  $U_3$  несколько раз в каждой точке.

## 2. Описание установки

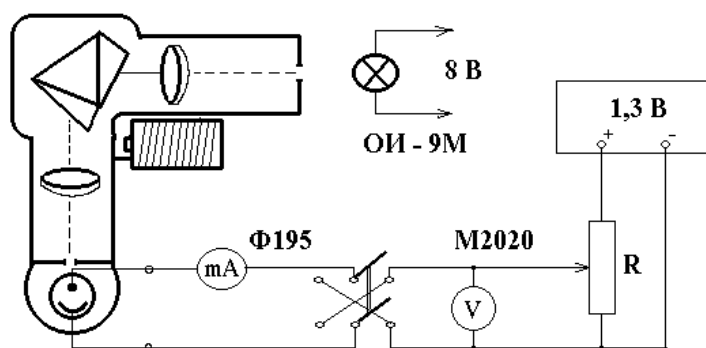


Рис. 2.1

Схема лабораторной установки приведена на рис. 2.1. В качестве источника света используется осветитель от микроскопа ОИ-9М. Свет от источника направляется на входную щель монохроматора УМ-2 и, пройдя через диспергирующую призму внут-

ри монохроматора, которую можно поворачивать при помощи барабана, разлагается в спектр. Выходная щель монохроматора вырезает небольшой участок спектра, который через матовое стекло попадает на фотоэлемент СЦВ-4. Напряжение на фотоэлемент подается от выпрямителя СИМ-1 и регулируется реостатом, полярность подводимого напряжения изменяется с помощью ключа, фототок измеряется микроамперметром Ф195, а напряжение милливольтметром М2020.

Чтобы можно было определить длину волны по углу поворота барабана монохроматора, его предварительно калибруют по известному спектру в котором известны длины волн спектральных линий, например по спектру ртути (подробнее об устройстве монохроматора и о том, как проводится его калибровка см. в лабораторной работе № 5).

Можно подобрать эмпирическую формулу достаточно хорошо согласующуюся с калибровочным графиком:

$$\nu = A_0 + A_1\varphi + A_2\varphi^2 + A_3\varphi^3 + \dots$$

$\nu$  — частота излучения,

$\varphi$  — поворот барабана монохроматора в градусах.

На практике вполне достаточно оказывается ограничиться квадратичным приближением:

$$\nu = A\varphi^2 + B\varphi + C.$$

Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  определяются исходя из экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Для монохроматора, использу-

### 3. Порядок выполнения работы

---

емого в данной работе калибровка была произведена. Длина волны излучения проходящего через выходную щель монохроматора связана с углом поворота по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{A\varphi^2 + B\varphi + C} \text{ (нм)}, \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} A &= -1,309 \cdot 10^{-10}, \\ B &= -3,5985 \cdot 10^{-8}, \\ C &= 2,5108 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Ширина спектрального интервала, который вырезает щель, а также удвоенная среднеквадратичная погрешность в определении частоты света зависит от ширины щели и задается отношением:

$$\Delta\nu = HcF(2A\varphi + B) \text{ (Гц)}, \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} F &= 75 \text{ град/мм}, \\ c &\text{ — скорость света } 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \\ H &\text{ — ширина выходной щели в мм.} \end{aligned}$$

## 3. Порядок выполнения работы

**Задание 1.** Определение красной границы фотоэффекта.

Включить источник питания СИМ-1, установить потенциометром  $U = 0$  и установить на милливольтметре предел измерений 1500 мВ, включить микроамперметр Ф195 и установить предел измерений 100 нА при положении кнопки переключателя диапазонов 50-0-50. (При этом миллиамперметр регистрирует ток от  $-50$  до  $+50$  нА). Поворотом ручки на источнике питания СИМ-1 включить лампу накаливания и сфокусировать ее свет на входную щель монохроматора. Установить ширину выходной и входной щелей монохроматора 2 мм, напряжение  $U = 0$ .

Поворачивая барабан монохроматора определить угол поворота барабана при которых ток через фотоэлемент  $J = 0$  и при котором ток имеет максимальное значение. Найти для этих углов поворота барабана монохроматора по формуле 2.5 соответствующие длины волн. Найти значение красной границы фотоэффекта для материала катода фотоэлемента.

---

**Задание 2.** Проверить, что величина запирающего потенциала не зависит от интенсивности падающего света.

Поворотом барабана монохроматора установить угол соответствующий максимальному току фотоэлемента. Переключатель диапазонов на микроамперметре – в положение 0-100.

Для трех значений ширины выходной щели монохроматора (подобрать экспериментально, чтобы анодный ток при  $U = 0$  отличался при различных размерах щели на 15 – 20%) снять вольт-амперные характеристики фотоэлемента.

Для получения вольт-амперной характеристики реостатом меняется напряжение на фотоэлементе через 0,05 и снимается часть вольт-амперной характеристики в области отрицательных напряжений от 0 до прекращения фототока.

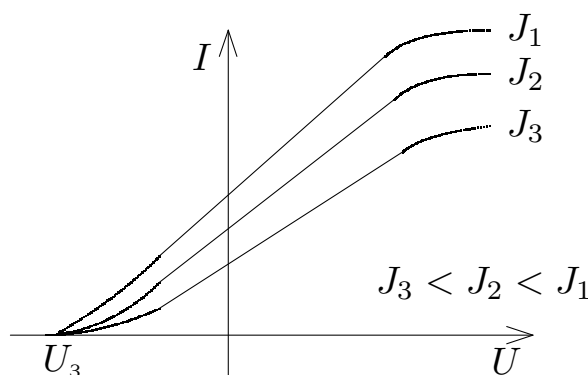


Рис. 3.1

Все три вольт-амперные характеристики построить на одном графике (рис. 3.1). По полученным результатам показать, что величина задерживающего потенциала не зависит от интенсивности падающего на фотоэлемент излучения.

**Задание 3.** Определение постоянной Планка по графику зависимости запирающего потенциала от частоты света.

Установить ширину входной щели монохроматора до 4 мм (по необходимости!), выходной щели монохроматора 1 – 2 мм. Поворачивая барабан монохроматора через 100 градусов снять зависимость задерживающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  в интервале поворота барабана монохроматора от 800 до 2000 градусов.

Для этого необходимо для каждого установленного поворота барабана определить соответствующую ему длину волны и по ней частоту света по формуле (2.5), а также ошибку в определении частоты по форму-



### 3. Порядок выполнения работы

---

ле (2.6).

Для каждого поворота барабана установить реостатом напряжение при котором ток через фотоэлемент равен нулю. При каждом повороте барабана рекомендуется получить не менее 5 значений запирающего потенциала  $U_3$ , каждый раз меняя напряжение реостатом. По полученным значениям  $U_{31}$ ,  $U_{32}$ ,  $U_{33}$  и т.д. вычислить среднее значение  $U_3$  и среднеквадратичную ошибку в определении задерживающего потенциала.

Следует отметить, что разумное значение запирающего потенциала можно получить если при  $U = 0$  стрелка микроамперметра отклоняется не менее, чем на 3 – 4 деления.

Полученные данные удобно свести в таблицу:

$\varphi$	$\lambda$ нм	$\nu$ Гц	$\Delta\nu$	$U_{31}$	...	$U_{35}$	$U_3$	$\Delta U_3$
800								
900								
...								
2000								

По полученным данным построить график  $U_3 = f(\nu)$

Обработку результатов провести графически или аналитически (по методу наименьших квадратов). По полученному графику определить постоянную Планка, работу выхода электрона, красную границу фотоэффекта с учетом погрешности. Полученное значение постоянной Планка сравнить с значением, взятым из справочника. Значение красной границы фотоэффекта сравните с значением, полученным в первом задании.

---

## 4. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
2. Что называется красной границей фотоэффекта и от чего зависит ее значение?
3. В чем заключается метод задерживающего потенциала для определения постоянной Планка?
4. Какие закономерности фотоэффекта не удастся объяснить с позиции волновой теории света?
5. По классической электромагнитной теории поток световой энергии от источника распространяется непрерывно во все стороны. Через какой промежуток времени отдельный атом танталового катода может накопить столько энергии, чтобы стал возможен вылет фотоэлектрона. Катод на расстоянии 10 м от 25-ваттной лампочки. Работа выхода для тантала составляет 4 эВ. Считать, что электрону передается вся энергия, накапливающаяся в атоме тантала, диаметр которого можно считать равным  $3 \text{ \AA}$ .
6. Может ли свободный электрон поглотить фотон?
7. В чем заключается метод задерживающего потенциала для определения постоянной Планка?
8. Чем определяется точность полученных результатов в данной работе? Какой из методов определения красной границы фотоэффекта (в первом или в третьем задании) является на Ваш взгляд более точным?
9. Докажите, что формула (2.6) является следствием формулы (2.5).