

1.1. Экспериментальная проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

Дополнительное описание

Фотоэффект — испускание электронов фотокатодом, облучаемым светом — хорошо объясняется фотонной теорией света: фотон с энергией $\hbar\omega$ выбивает электрон из поверхности металла и сообщает электрону кинетическую энергию.

Энергетический баланс этого взаимодействия описывается уравнением:

$$\hbar\omega = W + E_{\max}, \quad (1)$$

где W — работа выхода электрона из катода, E_{\max} — максимальная кинетическая энергия электрона после выхода из фотокатода. Реально энергетический спектр вылетевших из фотокатода электронов непрерывный — он простирается от нуля до E_{\max} .

Для измерения энергии вылетевших фотоэлектронов вблизи фотокатода обычно располагается второй электрод (анод), на который подаётся задерживающий ($V < 0$) или ускоряющий ($V > 0$) потенциал. При достаточно больших ускоряющих напряжениях фототок достигает насыщения (рис. 1): все испущенные электроны попадают на анод. При задерживающих потенциалах на анод попадают лишь электроны, обладающие достаточно большой кинетической энергией, в то время как медленно движущиеся электроны заворачиваются полем и возвращаются на катод. При некотором значении $V = -V_0$ (потенциал запираения) даже наиболее быстрые фотоэлектроны не могут достичь анода.

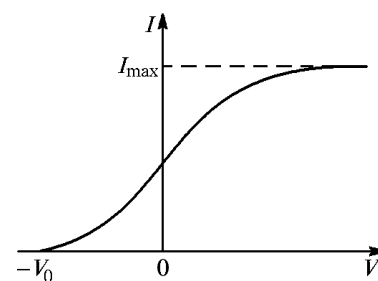


Рис. 1. Зависимость фототока от напряжения на аноде

Максимальная кинетическая энергия E_{\max} электронов связана с запирающим потенциалом V_0 очевидным соотношением: $E_{\max} = eV_0$. Подставляя это соотношение в равенство (1), мы получаем уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$eV_0 = \hbar\omega - W. \quad (2)$$

Чтобы определить величину запирающего напряжения, нам надо правильно экстраполировать получаемую токовую зависимость к нулю, т.е. определить, какова функциональная зависимость $I(V)$. Расчёт для простейшей геометрии — плоский катод, освещаемый светом, и параллельный ему анод — приводит к зависимости

$$\sqrt{I} \propto (V_0 - V). \quad (3)$$

то есть, корень квадратный из фототока линейно зависит от запирающего напряжения.

Для экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна по графикам $\sqrt{I} = f(V)$ определяются потенциалы запираения V_0 при разных частотах и строится зависимость $V_0(\omega)$, которая, как следует из (2), должна иметь вид

$$V_0(\omega) = \frac{\hbar\omega - W}{e}. \quad (11)$$

Потенциал запирающего V_0 для всякого данного катода линейно зависит от частоты света ω . По наклону прямой на графике $V_0(\omega)$ (рис. 4) можно определить постоянную Планка:

$$\frac{dV_0}{d\omega} = \frac{\hbar}{e}. \quad (12)$$

Как показывает формула (12), угол наклона прямой $V_0(\omega)$ не зависит от рода вещества, из которого изготовлен фотокатод. От рода вещества, однако, зависит величина фототока, работа выхода W и форма кривой $I(V)$ (рис. 1). Всё это определяет выбор пригодных для опыта катодов.

В особенности важно, чтобы кривая $I(V)$ достаточно круто подходила к нулю.

Экспериментальная установка. Схема установки приведена на рис. 5. Свет от источника S (электрическая лампа накаливания) с помощью конденсора фокусируется на входную щель призматического монохроматора УМ-2, выделяющего узкий спектральный интервал, и попадает на катод фотоэлемента Ф-25. В качестве катода в данном фотоэлементе используется $\text{Na}_2\text{K Sb(Cs)}$ покрытие. На рис. 6 показаны относительная спектральная чувствительность фотокатода (6а) и спектральная характеристика излучения лампы накаливания (6б).

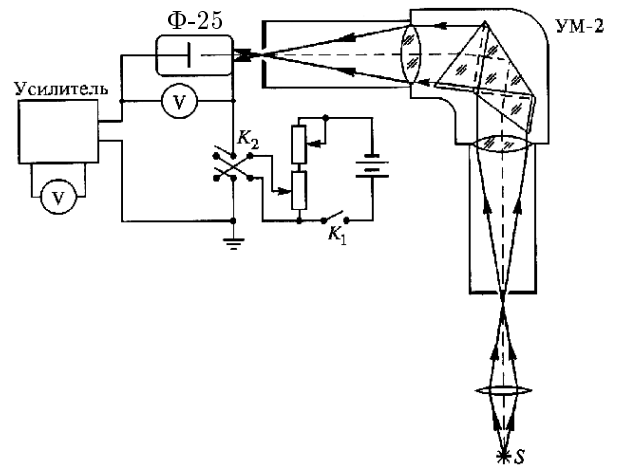


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Призматический монохроматор-спектрометр УМ-2 (универсальный монохроматор) предназначен для спектральных исследований в диапазоне от 0,38 до 1,00 мкм. Основные элементы монохроматора представлены на рис. 7.

1. Входная щель 1, снабжённая микрометрическим винтом 9, который позволяет открывать щель на нужную ширину (в диапазоне 0,01–4 мм).

2. Коллиматорный объектив 2, снабженный микрометрическим винтом 8. Винт позволяет смещать объектив относительно щели при фокусировке спектральных линий различных цветов.

3. Сложная спектральная призма 3, установленная на поворотном столике 6. Призма 3 состоит из трёх склеенных призм П_1 , П_2 и П_3 . Первые две призмы с преломляющими углами 30° изготовлены из тяжёлого флинта, обладающего большой дисперсией. Промежуточная призма П_3 сделана из крона. Лучи отражаются от

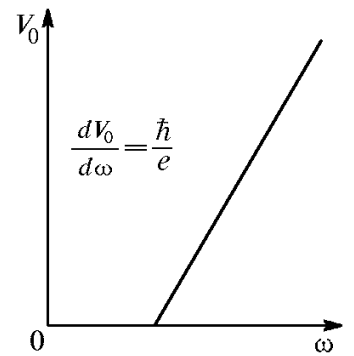


Рис. 4. Зависимость потенциала запирающего от частоты

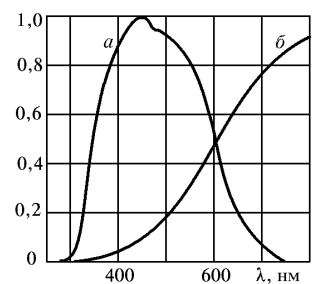


Рис. 6. Чувствительность фотокатода (а) и характеристика излучения лампы накаливания (б)

её гипотенузной грани и поворачиваются на 90° . Благодаря такому устройству дисперсия призм Π_1 и Π_2 складывается.

4. Поворотный столик 6, вращающийся вокруг вертикальной оси при помощи микрометрического винта 7 с отсчётным барабаном. На барабан нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. Вдоль дорожки скользит указатель барабана. При вращении барабана призма поворачивается, и в центре поля зрения появляются различные участки спектра.

5. Зрительная труба, состоящая из объектива 4 и блока окуляра 5. Объектив даёт изображение входной щели 1 различных цветов в своей фокальной плоскости. В этой же плоскости расположено острие указателя 10. Изображение щели рассматривается через окуляр 5.

Тумблеры, расположенные на основании спектрометра, позволяют включать лампочки осветителей шкал и указателя спектральных линий. Яркость освещения указателя регулируется реостатом.

В случае необходимости, освободив винт 12, блок окуляра можно заменить входной щелью фотоэлемента, пропускающей всего одну из линий спектра на фотоэлемент.

6. Массивный корпус 11, предохраняющий прибор от повреждений и загрязнений.

7. Оптическая скамья, на которой могут перемещаться рейтеры с источником света L и конденсором K , служащим для концентрации света на входной щели. Входная щель спектрометра, конденсор и источник должны быть на одной высоте. Проходящий через входную щель световой пучок хорошо заполняет конденсор и призму, если выполнено соотношение $D_k/b = D_2/f_2 = 1/6$, где D_k – диаметр конденсора, b – расстояние от конденсора до входной щели, D_2 и f_2 – диаметр и фокусное расстояние коллиматорного объектива 2.

Изображение удобно наблюдать на белом колпачке с крестиком (таким колпачком прикрывают щель при юстировке системы).

8. Пульт управления (на рис. 5 не показан), служащий для питания лампы накаливания и осветительной системы спектрометра.

При подготовке УМ-2 к наблюдениям особое внимание следует обращать на тщательную фокусировку, с тем чтобы указатель 10 и спектральные линии имели чёткие, ясные границы. Фокусировка производится в следующем порядке. Перемещая окуляр, следует получить резкое изображение острия указателя 10. Осветив входную щель прибора неоновой лампой, нужно найти одну из спектральных линий и получить её резкое изображение при помощи микрометрического винта 8. При проведении измерений в другой части спектра, последняя операция по фокусировке должна проводиться вновь.

Для отсчёта положения спектральной линии её центр совмещается с острием

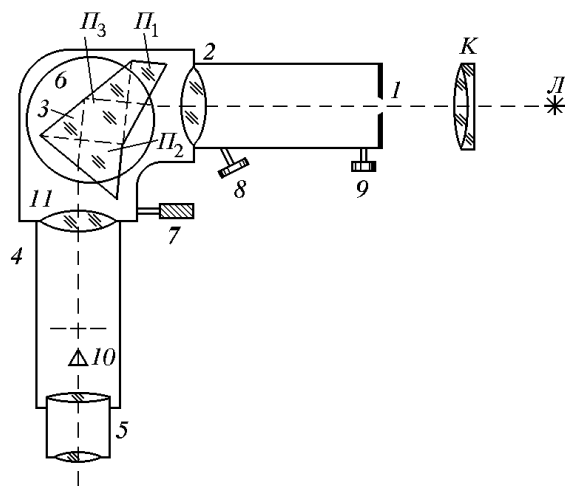


Рис. 7. Схема монохроматора

указателя. Отсчёт проводится по делениям барабана. Для уменьшения ошибки ширину входной щели делают по возможности малой (0,03–0,05 мм). Для наблюдения очень слабых линий щель приходится несколько расширять. Глаз лучше замечает слабые линии в движении, поэтому при наблюдении полезно слегка поворачивать барабан в обе стороны от среднего положения.

Монохроматор УМ-2 нуждается в предварительной градуировке при помощи неоновой лампы. Таблицы спектральных линий неона с визуальной оценкой их относительной интенсивности приведены на установке.

Фототок, протекающий в фотоэлементе, мал, особенно при потенциалах, близких к V_0 , и не может быть измерен непосредственно. Для его измерения используется усилитель постоянного тока (рис. 5.) Для уменьшения погрешностей измерений, обусловленных наводками, усилитель фототока смонтирован в одном корпусе с фотоэлементом. Абсолютные значения фототока нам не нужны, поэтому ток измеряется в относительных единицах по шкале цифрового вольтметра В7-78, подключённого к выходу усилителя. Эти показания пропорциональны величине измеряемого тока. Тормозящий потенциал регулируется при помощи двух потенциометров «Грубо» и «Плавно», установленных на корпусе блока питания. Измерение тормозящего потенциала осуществляется с помощью мультиметра GDM-8145, подключённого к фотоэлементу.

Точное измерение тормозящего потенциала провести очень трудно, и связано это со следующим обстоятельством. Если составить электрическую цепь из различных проводников, то возникает контактная разность потенциалов, величина которой определяется разностью работ выходов между крайними проводниками. Контактная разность потенциалов может составлять несколько долей вольта, это значительно усложняет в такой разнородной цепи измерение разности потенциалов, возникающей за счёт других причин. Это же относится и к измерению приложенной к цепи внешней разности потенциалов.

Контактная разность потенциалов мешает точному определению величины V_0 , но не оказывает влияния на определение постоянной Планка, которая выражается через производную $dV_0/d\omega$.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается прокалибровать барабан монохроматора по спектру неоновой лампы; снять зависимость фототока от потенциала катода для 6–8 длин волн в диапазоне 540–700 нм; по результатам измерений определить постоянную Планка и оценить работу выхода материала катода.

I. Подготовка установки к работе

1. Ознакомьтесь с устройством и принципом работы монохроматора (см. раздел «Экспериментальная установка»).
2. Установите ручки «ПЛАВНО» и «ГРУБО» на блоке питания на минимум сигнала (поворот до упора против часовой стрелки) и включите в сеть блок и неоновую лампу. Закройте входную щель колпачком с крестиком. Отцентрируйте по высоте

сначала источник света (неоновую лампу), затем конденсор, поочерёдно приближая их вплотную к входной щели прибора.

3. Расположите конденсор на расстоянии 25–30 см от щели (≈ 6 диаметров конденсора). Перемещая источник вдоль оптической оси, получите увеличенное изображение источника в центре колпачка, прикрывающего входную щель. При этом плоскость конденсора всегда должна быть **перпендикулярна** оптической оси — смещение изображения по горизонтали осуществляется винтом конденсора, перемещающим центр линзы. Закрепите рейтеры.
4. Откройте входную щель: снимите колпачок и установите флажок под щелью в положение «Открыто». Включите подсветку окуляра монохроматора тумблером у основания прибора. Вращая глазную линзу окуляра, настройтесь на резкое изображение кончика указателя. Отрегулируйте яркость освещения указателя (реостатом у основания прибора). Горизонтальное кольцо над окуляром позволяет менять светофильтр. Для особенно точных измерений подбирают цвет указателя, совпадающий с цветом линии.
5. Вращая барабан, подведите к указателю одну из ярких линий неона; перемещая коллиматор (винт 8 на рис. 7), получите чёткое изображение линии. Это предварительная настройка, окончательную проведём после выбора ширины щели.
6. Для выбора ширины входной щели определите начало отсчёта. Установите винт 9 вблизи нулевого деления [$\approx -(1-2)$ мм]. Если при этом в окуляре виден просвет в изображении щели, возможно, соринка или зазубринка мешают полному закрытию. Обычно это не играет роли — следует уловить момент начала увеличения ширины щели (закрывая щель, не следует уходить далеко за ноль, т.к. при этом откручиваются и выпадают внутренние винты).

Глядя в окуляр и медленно увеличивая ширину щели, заметьте момент начала её расширения. Эту операцию проводят трижды, каждый раз возвращаясь немного назад и вращая винт 9 всё медленнее.

Установите ширину щели 0,05–0,10 мм (5–10 малых делений от нового нуля). Критерием правильного выбора служит хорошее разрешение линий 8 и 9 неона (см. таблицу на установке).

7. Следует проверить, что барабан позволяет определить координаты всех необходимых линий. Для этого настройтесь на длинноволновую часть спектра (линии 1–2 или 3–4 неона) и убедитесь, что отсчётная риска (ЧЁРНЫЙ ШТРИХ на ползунке барабана) находится в пределах оцифрованной части барабана. Если это не так, обратитесь к лаборанту.
8. Спектральная линия кажется одинаково резкой в широком диапазоне смещения коллиматора, поэтому точность настройки проверяется по отсутствию параллакса. Параллакс отсутствует, если при смещении глаза влево-вправо от центра окуляра кончик указателя «привязан» к линии (линия не должна появляться то слева, то справа от кончика указателя).

II. Градуировка монохроматора

1. Используя окуляр, проградуируйте барабан монохроматора по спектру неоновой лампы. Расположение спектральных линий неона, относительные интенсивности и длины волн приведены в таблице, расположенной на установке.
2. Закончив градуировку, установите барабан в диапазоне 550–600 нм и закройте вход монохроматора (флажок — в положении «Закрыто»).

III. Исследование зависимости фототока от величины запирающего потенциала

1. Подготовьте к работе приборы: убедитесь, что
 - а) регуляторы напряжения на блоке питания установлены на минимум, знак U: «+»;
 - б) напряжение с фотоэлемента подано на клеммы «COM–V» мультиметра GDM-8145; выбран режим измерения постоянного напряжения (кнопка «V»), диапазон — «20 В» (описание мультиметра смотрите в конце папки); включите мультиметр в сеть;
 - в) напряжение, пропорциональное фототоку, подано на клеммы «1000 В, 700 В» цифрового вольтметра В7-78;включите вольтметр в сеть; после окончания автоматического тестирования нажатием кнопок «↑» и «↓» установите режим, при котором вольтметр будет отображать напряжение с точностью до 0,01 В.
2. Убедитесь, что входная щель блока фотоэлемента закрыта [отсчёт по микрометрическому винту $\simeq -(1-2)$ мм].

Держать открытой щель фотоэлемента на свету категорически воспрещается!

3. Освободите стопорный винт (12 на рис. 7) и снимите блок окуляра монохроматора. Установите блок фотоэлемента (микрометрический винт обращён вниз) и закрепите стопорный винт.
4. Уберите неоновую лампу. Установите и включите электрическую лампу (тумблер «К-12» на блоке питания). Перемещая лампу, получите её резкое изображение на колпачке входной щели. Закрепите рейтеры.
5. Снимите колпачок. При закрытом входе монохроматора (флажок в положении «Закрыто») ручкой блока питания «Установка нуля» установите показание вольтметра В7-78 близким к нулю.
6. Установите ширину входной щели монохроматора около 0,1–0,15 мм. При закрытом входе монохроматора (флажок в положении «Закрыто») показания вольтметра В7-78 не должны отклоняться от нуля, т.е. усилитель не должен регистрировать темновой ток.
7. Установите регуляторы напряжения на блоке питания на максимум (знак U: «+»);
8. Откройте вход монохроматора (флажок — «Открыто»), при этом показания вольтметра В7-78 могут отличаться от нуля.

9. Плавно открывая щель блока фотоэлемента, по началу увеличения фототока (напряжения на вольтметре В7-78) определите момент открытия щели. Установите ширину щели блока фотэлемента $\simeq 0,1$ мм.
10. Перемещаясь с помощью барабана по спектру, выберите длину волны света, при которой наблюдается максимальная величина фототока.
Если при этом напряжение меньше 0,5–0,6 В, увеличьте ширину щели фотоприёмника (не более 0,2 мм). Если сигнал по-прежнему мал, можно увеличить входную щель монохроматора (не более 0,2 мм). При дальнейшей работе ширину щелей желательно не изменять.
11. Проведите предварительные измерения: с помощью потенциометров «Грубо» и «Плавно» подробно исследуйте зависимость фототока от потенциала на фотоэлементе (от I_{\max} до $I \simeq 0$, см. рис. 1) для минимальной длины волны исследуемого спектрального интервала. Особенно аккуратно нужно проводить измерения вблизи потенциала запирающего: изменяя потенциал на фотоэлементе, каждый раз следует дожидаться, когда значение напряжения на вольтметре В7-78 установится (т.е. закончится монотонное изменение напряжения).
Повторите измерения для максимальной длины волны.
Постройте предварительный график в координатах $I = f(V)$ и определите из него приближённо диапазон значений V , при котором графики можно экстраполировать квадратичной зависимостью (кривые при малых значениях фототока).
12. Снимите зависимости фототока от напряжения для 6–8 значений длин волн в интервале 540–700 нм, меняя V в диапазоне, который вы выбрали по предварительному графику. Помните, что рекомендованная ширина входной щели не должна превышать 0,1 мм, щели фотоприёмника — 0,2 мм.
13. Закончив работу,
 - а) закройте флажком входную щель и наденьте на неё колпачок;
 - б) уберите напряжение до нуля, выключите лампу;
 - в) закройте щель блока фотоэлемента [до $\simeq -(1-2)$ мм]; освободив стопорный винт, снимите блок фотоэлемента и положите его щелью под корпус УМ-2;
 - г) установите окуляр на место, закрепите стопорный винт и убедитесь, что подсветка окуляра работает;
 - д) отключите подсветку тумблером на корпусе УМ-2; отключите блок питания и вольтметр от сети.

IV. Обработка результатов

1. Постройте градуировочную кривую монохроматора на мм-бумаге в крупном масштабе.
2. На одном листе постройте серию графиков $\sqrt{I} = f(V)$; для каждой длины волны определите величину запирающего потенциала, экстраполируя полученные кривые к оси абсцисс. Оцените ошибку в определении V_0 .
3. Постройте график зависимости $V_0(\omega)$. По графику определите постоянную Планка, оцените погрешность результата и сравните найденное значение с табличным. Оцените по графику красную границу в ангстремах и работу выхода материала катода в электронвольтах (с точностью до контактной разницы потенциалов).