

Лабораторная работа 5.02V (VirtualLab)

Исследование внешнего фотоэффекта

Цели и задачи работы

1. Получение зависимости запирающей разности потенциалов от частоты света.
2. Значение красной границы фотоэффекта и работы выхода для ряда материалов фотокатодов.
3. Оценка значения постоянной Планка h .

Введение

Явление вырывания электронов из вещества при освещении его светом получило название фотоэлектрического эффекта (фотоэффекта). В конденсированных (твёрдых и жидких) веществах выделяют внешний и внутренний фотоэффект. При внешнем фотоэффекте электроны освобождаются светом из поверхностного слоя вещества и переходят в другую среду, в частности, в вакуум. При внутреннем фотоэффекте оптически возбуждённые электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрической нейтральности последнего. Фотоэффект в газах состоит в ионизации атомов или молекул под действием излучения.

Внешний фотоэффект был открыт в 1887 году Генрихом Герцем. При работе с открытым резонатором он заметил, что освещение ультрафиолетом цинковых разрядников существенно облегчает возникновение искрового пробоя.

Систематическое экспериментальное исследование внешнего фотоэффекта было проведено в 1888-1890 гг. А. Г. Столетовым, опубликовавшим шесть основополагающих работ в данной области. В дальнейшем эти исследования были продолжены П. И. Лукирским, Ф. Ленардом, Дж.Томсоном, Р. Миллиkenом.

В результате экспериментальных исследований были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Общее количество электронов, вылетающих с поверхности вещества в единицу времени, пропорционально интенсивности света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте световой волны и не зависит от интенсивности света.
3. Каждому веществу присуща минимальная частота $\nu_{min} = \nu_{кр}$, называемая красной границей фотоэффекта, такая, что свет меньшей частоты фотоэффекта не вызывает.
4. Фотоэффект практически безынерционен - он немедленно возникает при освещении поверхности тела, при условии, что частота света выше или равна красной границе фотоэффекта и эффект существует.

Важной количественной характеристикой фотоэффекта является квантовый выход γ — число эмитированных электронов в расчёте на один фотон, падающий на поверхность тела. Величина γ определяется свойствами вещества, состоянием его поверхности и энергией фотонов.

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.

Взаимодействуя с электроном вещества, фотон может обмениваться с ним энергией и импульсом. Такой процесс напоминает удар шаров и поэтому образно называется столкновением. Фотоэффект возникает при неупругом столкновении фотона с электроном. При таком столкновении фотон поглощается, а его энергия передаётся электрону. Таким образом, электрон приобретает кинетическую энергию не постепенно, а сразу - в результате единичного акта столкновения. Этим объясняется безынерционность фотоэффекта.

Согласно положениям квантовой теории свет излучается и поглощается веществом отдельными «порциями» — квантами с

энергией $E = h\nu$, где $h \cong 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка, основная константа квантовой теории, коэффициент, связывающий величину энергии кванта электромагнитного излучения с его частотой, так же как и вообще величину кванта энергии любой линейной колебательной физической системы с её частотой. Световые кванты (фотоны) ведут себя как неделимые частицы. При поглощении фотон исчезает, а его энергия переходит к поглощающему объекту.

Энергия фотона затрачивается на отрыв электрона от атома внутри металла. Оторванный электрон может взаимодействовать с атомом, теряя при этом часть своей энергии. Максимальной энергией вылетевший электрон будет обладать тогда, когда внутри металла он был свободен, т.е. не связан с атомом, а при вылете наружу практически не расходовал энергию на взаимодействие с атомом. В этом случае кинетическая энергия электрона тратится только на преодоление задерживающих сил, действующих в поверхностном слое металла, т.е. на работу выхода. Предположим, что электрон получил кинетическую энергию при столкновении только с одним фотоном. Многофотонные процессы возможны, но при слабых интенсивностях света (линейная оптика) маловероятны. Тогда максимальная кинетическая энергия, которой будет обладать вылетевший электрон, определится формулой:

$$h\nu = A + E_{max} = A + \frac{mv_{max}^2}{2}, \quad (1)$$

где A — работа выхода, m — масса электрона. Уравнение (1) впервые было предложено А. Эйнштейном и поэтому называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. В нем второе слагаемое правой части означает *максимальную* кинетическую энергию фотоэлектронов. Это связано с тем, что в действительности выходящим из металла электронам соответствуют разные энергии от 0 до $\frac{mv_{max}^2}{2}$ даже при использовании света строго определенной частоты из-за частичной потери энергии при столкновениях в процессе движения электронов к поверхности

металла. Часть электронов, потеряв энергию при столкновениях, так и не выходит из металла, поэтому число выходящих электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов.

Квантовая теория объясняет все законы фотоэффекта. Интенсивность светового пучка определяется числом фотонов, падающих каждую секунду на металл. Число излучаемых фотоэлектронов, пропорционально числу поглощаемых фотонов и, следовательно, интенсивности света. Для данного вещества работа выхода — строго определенная величина, поэтому максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов оказывается пропорциональной частоте падающего света. Частота света, при которой энергия кванта равна работе выхода и есть $\nu_{\text{кр}}$ (красная граница).

Рассмотрим процесс поглощения фотона свободным электроном с точки зрения закона сохранения энергии и импульса. Воспользуемся системой отсчёта, в которой электрон первоначально покоился. Пусть электрон поглотил фотон с импульсом $\vec{p}_{\text{ф}}$ и энергией $E_{\text{ф}}$. Обозначим импульс электрона после взаимодействия через $\vec{p}_{\text{э}}$, а его энергию через $E_{\text{е}}$. Из законов сохранения импульса и энергии следует, что

$$\vec{p}_{\text{э}} = \vec{p}_{\text{ф}} \quad (2)$$

$$E_{\text{ф}} + mc^2 = E_{\text{е}} \quad (3)$$

Возведём в квадрат уравнение (2) и вычтем его из (3). При этом примем во внимание, что в классической релятивистской механике полная энергия и импульс частицы связаны соотношением:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \quad (4)$$

Полученное соотношение будет иметь вид

$$2E_{\text{ф}} mc^2 = 0, \quad (5)$$

что возможно только в случае $E_{\text{ф}} = 0$, то есть таким образом, поглощение фотона свободным электроном невозможно.

Электрон проводимости в металле не является свободным. Он как бы заперт в ящике, вблизи стенок которого действует задерживающее поле. Фотон взаимодействует не только с электроном, но происходит взаимодействие обеих этих частиц с металлом в целом. При взаимодействии же трёх тел законы сохранения энергии и импульса могут выполняться одновременно: импульс фотона воспринимается, как электроном, так и металлом, энергия же передаётся только электрону, как объекту с наименьшей массой.

На рис. 1 показана классическая схема по исследованию фотоэффекта, предложенная Ф. Ленардом и Дж. Томпсоном в 1898 г. Именно они, измерив удельный заряд испускаемых светом частиц, установили, что это электроны.

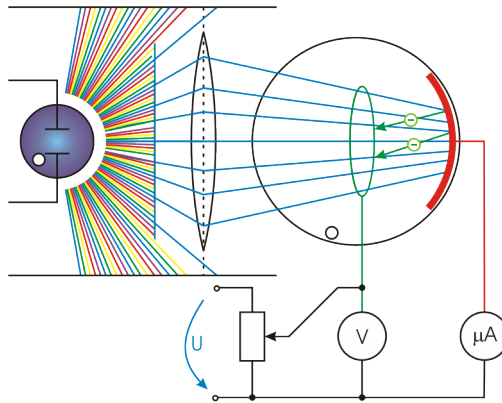


Рис. 1. Схема исследования фотоэффекта

Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, движутся под действием электрического поля к аноду. В результате в цепи течёт фототок, измеряемый гальванометром. Напряжение между анодом и катодом можно изменять с помощью потенциометра.

На рис. 2 показана серия типичных вольт-амперных характеристик вакуумного фотоэлемента при различных плотностях ($\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1$) потока фотонов.

При достаточно больших положительных напряжениях фототок остается постоянным, что соответствует насыщению, когда

все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. При нулевом напряжении фототок обеспечивается за счет наличия у фотоэлектронов, импульс которых направлен к аноду, конечной кинетической энергии. При обратном напряжении фототок плавно уменьшается с его ростом до нуля и даже может стать отрицательным.

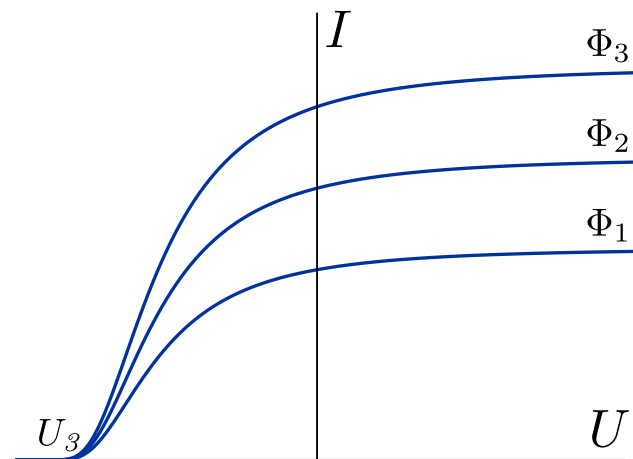


Рис. 2. Пример графика исследуемой зависимости

Плавный спад фототока с увеличением обратного напряжения объясняется различной кинетической энергией, с которой электроны выходят из катода. При напряжении U_3 (запирающая 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, запирающая разность потенциалов определяет максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов: $eU_3 = \frac{mv_{max}^2}{2}$, где $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона.

Используя уравнение Эйнштейна (1), можно найти явную связь между величиной задерживающего напряжения и частотой излучения, падающего на фотокатод:

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}. \quad (6)$$

Для того чтобы проверить пропорциональность максимальной кинетической энергии фотоэлектронов частоте света, необходимо показать что зависимость U_3 от ν является линейной.

Экстраполируя график зависимости $U_3 = U_3(\nu)$ до пересечения с осью частот ν , можно найти значение частоты, соответствующей красной границе фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$. Если U_3 задано в вольтах, то угловой коэффициент этой зависимости есть постоянная Планка в эВ·с.

Лабораторная установка

Общий вид прототипа экспериментальной установки для создания виртуальной модели представлен на рис. 3.

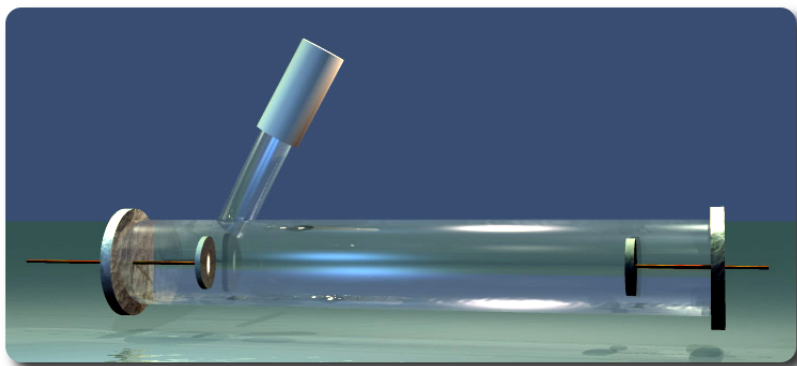


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

В левой части вакуумированной трубки из кварцевого стекла расположен фотокатод, на который направляется поток монохроматического излучения регулируемой интенсивности. Электроны, эмитированные с поверхности фотокатода, достигают анода, который находится в правой части трубки. В катод-анодную цепь включены также высокочувствительный амперметр, источник регулируемого задерживающего напряжения и вольтметр (на рисунке не показаны).

Как и любая модель, стенд виртуальной лабораторной работы проще, чем реальный, для фокусировки внимания на главных аспектах проведения измерений. В этом случае сделанные допущения влияют на внешний вид модели, но фактические экспериментальные данные - связь между частотой, напряжением и током - являются корректными. Два основных упрощения, которые сделаны в виртуальной модели:

1. Не все эмитируемые электроны имеют одинаковую энергию. Некоторые из электронов приходят из глубины металла, и в отличие от испускаемых непосредственно с поверхности, имеют меньшее значение энергии на выходе. Электроны, покидающие металл, имеют целый диа-

пазон энергий, от максимальной до почти нулевой. Вот почему ток изменяется с изменением напряжения - оно определяет, какое количество энергии должен иметь электрон, чтобы пройти весь межэлектродный промежуток, так что меньшее количество электронов сделает это по мере того, как запирающее напряжение увеличивается. В виртуальной модели ток будет монотонно уменьшается при росте задерживающего потенциала, пока он не будет достаточно высоким, чтобы остановить все электроны, затем ток уменьшается до нуля и прекратит изменяться.

2. Электроны на самом деле покидают металл во всех направлениях, а не только по прямой линии к аноду. Только те электроны, которые достигают анода, вносят свой вклад в ток. Это другая причина, из-за которой напряжение влияет на ток; даже если электрон имеет достаточную энергию, чтобы достичь анода, но если он идет не в осевом направлении, он имеет шанс промахнуться, и электроны с меньшей энергией за время полета к катоду будут отклоняться сильнее. (Интересно, что это означает, что если вы измените знак напряжения, то ток фактически увеличится, так как анод будет притягивать электроны, которые в противном случае промахнулись бы (эта ситуация в модели не реализована). Максимальный ток - это когда напряжение достаточно сильное, чтобы собрать все электроны, независимо от того, в каком направлении они были эмитированы катодом.

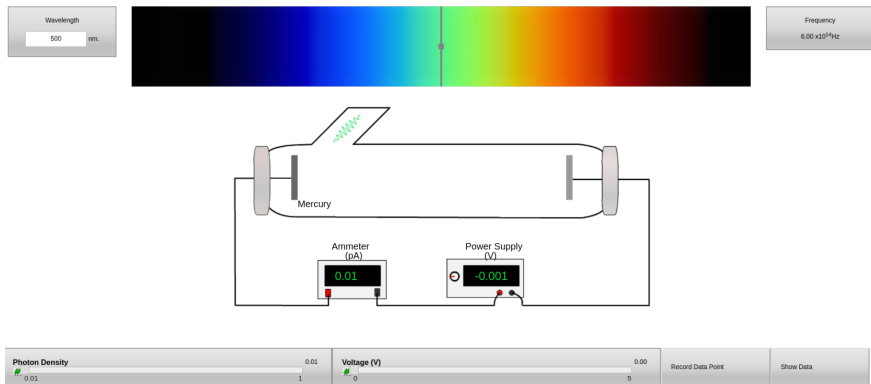


Рис. 4. Стенд виртуальной лабораторной работы

Проведение измерений и обработка их результатов

1. В рабочем пространстве виртуальной модели в меню «Options»-«Metals» выберите материал фотокатода, соответствующий первому из трех по вашему варианту задания к лабораторной работе (см. Приложение, Таблица 1).
2. Установите максимальную плотность потока фотонов $I = 1,00$ с помощью слайдера в нижней левой части экрана. При нулевом значении запирающего напряжения подберите длину волны при которой начинается эмиссия электронов $\lambda = \lambda_{кр}$.
3. Разделите весь доступный для измерений спектральный диапазон от минимального значения длины волны для данной модели $\lambda_{min} = 200 \text{ нм}$ до $\lambda_{кр}$ на 20 равных интервалов, определив таким образом шаг по длине волны, см. соотношение

$$\Delta\lambda = \left[\frac{\lambda_{кр} - \lambda_{min}}{20} \right], \quad (7)$$

где в правой части произведено отбрасывание дробной части после выполнения деления.

4. Для каждого значения длины волны из определенной в предыдущем пункте последовательности значений $\lambda_i = \lambda_{кр} - i \cdot \Delta\lambda$ найдите величину задерживающего напряжения, постепенно увеличивая его до достижения силой тока фоновое (шумовое) значения. Потенциал следует менять с шагом не более $\Delta U = 0,01 \text{ В}$. Для этого удобно использовать не слайдер, а возможность прямой записи устанавливаемого напряжения в поле ввода, которое появляется при нажатии на кнопку с символом #.
5. После установки запирающего напряжения для данной длины волны внесите результат в электронную рабочую таблицу, нажав на кнопку «Record Data Point». Оперативно отслеживать содержимое рабочей таблицы можно нажав на кнопку «Show Data Point».
6. После прохождения всего доступного участка спектра выгрузите электронную рабочую таблицу в формате csv.

7. Повторите данный цикл измерений аналогичным образом для двух других материалов фотокатода.
8. По данным рабочих таблиц постройте графики зависимости запирающего напряжения от частоты для трех фотокатодов в одном и том же графическом поле. Используя любой из стандартных методов нахождения параметров линейных зависимостей (метод парных точек, МНК) определите угловые коэффициенты и координаты точек пересечения интерполяций экспериментальных данных с осью напряжений (см. рис. 5). В соответствии с формулой (6) определите значения работы выхода A (в электрон-вольтах) и величины постоянной Планка (в $\text{эВ}\cdot\text{с}$)

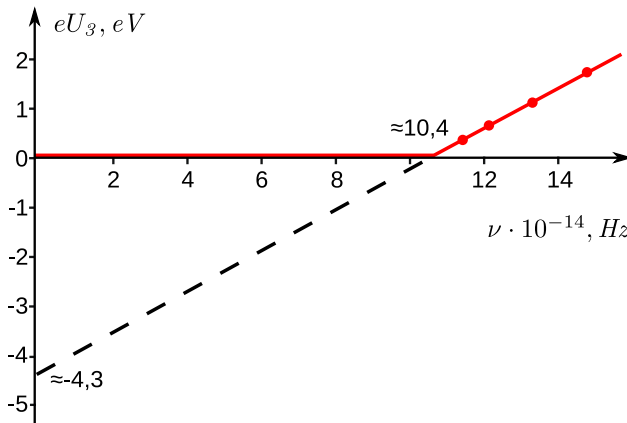


Рис. 5. Зависимость запирающего напряжения от частоты света

9. Значения постоянной Планка, полученные по трем сериям спектральных зависимостей усредните, оцените погрешность и внесите окончательный результат в отчет. Величины работ выхода для различных фотокатодов внесите в отчет, приведя сравнение с табличными данными.
10. Файлы с исходными данными в формате `csv` также следует приложить к отчету по лабораторной работе.

Приложение

Таблица 1: Варианты заданий к лабораторной работе

Вариант	Материал фотокатода		
	№1	№2	№3
1	Натрий (sodium)	Алюминий (aluminium)	Золото (gold)
2	Калий (potassium)	Медь (copper)	Железо (iron)
3	Цезий (cesium)	Кадмий (cadmium)	Свинец (lead)
4	Цинк (zinc)	Магний (magnesium)	Кобальт (cobalt)
5	Кальций (calcium)	Никель (Nickel)	Платина (platinum)
6	Натрий (sodium)	Селен (selenium)	Ртуть (mercury)
7	Калий (potassium)	Бериллий (beryllium)	Серебро (silver)
8	Цезий (cesium)	Алюминий (aluminium)	Ниобий (niobium)
9	Цинк (zinc)	Кадмий (cadmium)	Углерод (carbon)
10	Кальций (calcium)	Магний (magnesium)	Уран (Uranium)