МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ФОТОЭФФЕКТ

Учебно-методическое пособие

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2016

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией
физического факультета
Председатель комиссии Н.Г. Брянцева

В методическом пособии рассматривается качественная квантовомеханическая теория внешнего фотоэффекта. Приводится методика эксперимента по проверке зависимости фототока от интенсивности падающего света.

Для студентов физических специальностей дневной формы обучения.

СОСТАВИТЕЛЬ: доцент *Н.И. Федяйнова*

РЕЦЕНЗЕНТ: *Э.Д. Ковалёнок*

ФОТОЭФФЕКТ

Цель работы: ознакомиться с явлением фотоэффекта. Экспериментально исследовать зависимость фототока от интенсивности падающего излучения.

ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА

Различают два вида фотоэлектрического эффекта: внешний и внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) заключается в испускании электронов с поверхности вещества, на которую падает электромагнитное излучение.

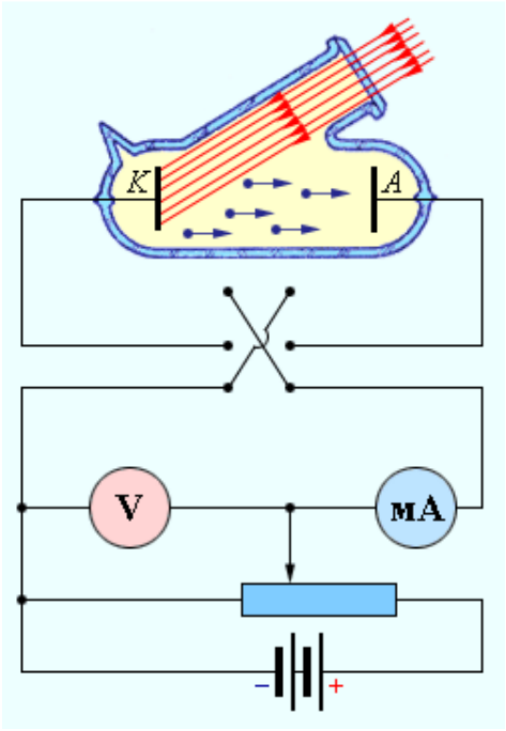

Рис. 1

Обычно длины волн излучения, вызывающего фотоэффект, лежат в оптическом диапазоне. Внутренний фотоэффект связан с перераспределением электронов атомов по их состояниям в твёрдом теле, при поглощении им электромагнитного излучения.

Начало исследований фотоэффекта было положено в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем. Он установил, что под действием ультрафиолетового излучения электрическая искра между двумя металлическими стержнями – электродами проскакивает при меньшей разности потенциалов, чем в отсутствие облучения.

Детально фотоэффект был впервые изучен русским физиком А.Г. Столетовым в 1888 г. Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 1. В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение U, полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод К) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны λ.

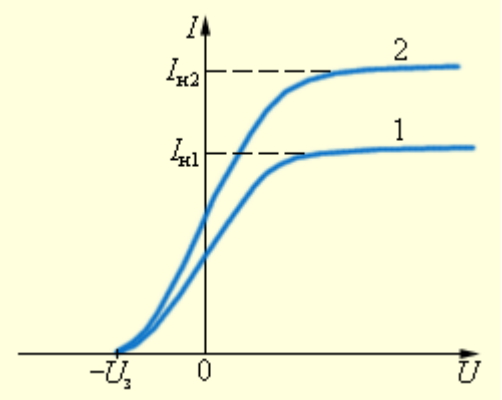

Рис. 2

При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока I от приложенного напряжения. На рис. 2 изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значе-

ниях интенсивности светового потока, падающего на катод. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока. $U_з$ – запирающее напряжение – минимальное тормозящее напряжение между анодом и катодом при котором отсутствует ток в цепи, то есть фотоэлектроны не долетают до анода.

По мере увеличения напряжения U фототок постепенно возрастает, то есть всё большее количество фотоэлектронов достигает анода. Пологий характер кривых показывает, что электроны вылетают из катода с различными скоростями. Максимальное значение тока $I_н$ – фототок насыщения – определяется таким значением U, при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. $I_н = en$, где n – число электронов, испускаемых катодом в одну секунду.

Тщательные измерения позволили установить следующие экспериментальные законы фотоэффекта:

1. При фиксированной частоте падающего излучения сила фототока насыщения (то есть число фотоэлектронов, эмитируемых с поверхности катода в единицу времени) прямо пропорциональна интенсивности излучения.

2. Величина запирающего напряжения, которая определяется максимальной кинетической энергией фотоэлектронов, не зависит от интенсивности падающего излучения и линейно возрастает с ростом его частоты.

3. Для каждого вещества существует длинноволновая («красная») граница фотоэффекта $\lambda_{кр}(\mathcal{V}_{кр})$, за которой (при $\lambda > \lambda_{кр}$ или $\mathcal{V} < \mathcal{V}_{кр}$) фотоэмиссия не наблюдается.

4. Для процесса фотоэлектронной эмиссии характерна безинерционность (даже при очень малой интенсивности падающего излучения фотоэлектроны появляются практически сразу после начала освещения).

Открытие и исследование фотоэффекта сыграло важную роль в экспериментальном обосновании квантовой теории. Только на основе гипотезы о квантовании энергии электромагнитного поля, проявляющемся в процессах испускания и поглощения света, А. Эйнштейну (1905г.) удалось объяснить основные закономерности фотоэффекта. За работы по фотоэффекту Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия (1921 г.).

КВАНТОВАЯ МОДЕЛЬ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Свободный электрон не может полностью поглотить фотон, так как при этом не могут быть одновременно соблюдены законы сохранения энергии ε и импульса p. Это видно уже из того, что для оптического перехода свободного электрона из состояния E_1, p_1 в состояние E_2, p_2 в отсутствие третьего тела (конденсированной среды, атома или рассеянного фотона) законы сохранения энергии и импульса $E_2 - E_1 = h\mathcal{V};\ p_2 - p_1 = h\mathcal{V}/c$ несовместимы ни при какой скорости электрона, меньшей скорости света в вакууме.

Рассмотрим в общих чертах механизм выбивания электронов при фотоэффекте. При этом ограничимся рассмотрением только металлических тел.

Согласно зонной теории твёрдых тел электроны в твёрдых телах могут находиться стационарно лишь на определённых, разрешённых квантовой механикой, уровнях энергии. Группы близко расположенных энергетических уровней образуют энергетические зоны разрешённых состояний, разделённых запрещёнными зонами (рис. 3).

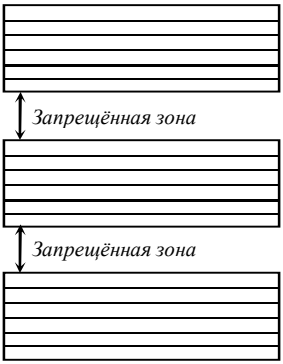

Рис. 3

Электроны распределены по различным энергетическим уровням в соответствии с принципом Паули. У металлов при температуре $T = 0$ K верхняя из заполненных зон заполнена электронами частично до некоторого уровня $E = E^{\max}$ – уровня Ферми (рис. 4).

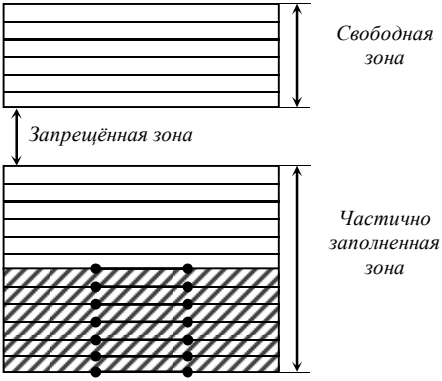

Рис. 4

Следует отметить, что при температуре, отличной от температуры абсолютного нуля, энергетическое распределение электронов не имеет верхней границы (не существует $E = E^{\max}$). Но при достаточно низкой температуре (комнатная температура для целей данной работы может рассматриваться как «низкая) электронами, находящимися на уровнях выше уровня Ферми можно пренебречь.

В явлении фотоэффекта при поглощении излучения в акте взаимодействия фотона с электроном, энергия фотона целиком передаётся электрону. Если до поглощения фотона электрон в металле обладал энергией E, то после поглощения фотона его энергия становится равной $E + h\mathcal{V}$. А поскольку внутри твёрдого тела электроны распределены по различным энергетическим уровням, то и после поглощения излучения электроны будут обладать различными энергиями даже, если свет является монохроматическим. Кроме того, на пути к поверхности тела часть их энергии может быть рассеяна при различных взаимодействиях внутри кристаллической решётки. Поэтому электроны, преодолевшие поверхностный потенциальный барьер, выходят за пределы вещества с различной начальной кинетической энергией.

С полной определённостью можно говорить лишь о величине максимальной кинетической энергии фотоэлектронов - $E_{\text{кин}}^{\max}$. С максимальной кинетической энергией выходят те

электроны, которые в момент поглощения фотона обладали наивысшей энергией внутри твёрдого тела (то есть находились на наивысшем уровне энергетического распределения $E^{\max}$) и после поглощения фотона покинули фотоэмиттер без рассеяния энергии, затратив её только на преодоление поверхностного потенциального барьера или, что то же самое, на совершение работы выхода A.

Работа выхода A складывается из двух компонент: работы против сил двойного электрического слоя на поверхности тела и работы против сил притяжения к индуцированному вышедшим электроном положительному заряду на поверхности металла.

Существование двойного электрического слоя на поверхности металла можно качественно объяснить следующим образом. Разобьём кристалл на одинаковые элементарные ячейки, каждая из которых содержит положительный ион и распределённый по её объёму отрицательный заряд. Ячейка, находящаяся в глубине вещества, является электрически нейтральной и обладает нулевым электрическим дипольным моментом. Ячейка же, расположенная на поверхности металла, оказывается в иных условиях: со стороны вакуума силы на её заряды не действуют, тогда как, с противоположной стороны её заряды испытывают силы взаимодействия с зарядами соседних ячеек. Таким образом, силы, действующие на поверхностную ячейку с различных сторон, оказываются не скомпенсированными. Под действием этих сил ячейка искажается – положительный заряд смещается в сторону вещества, отрицательный – в сторону вакуума. В результате у поверхности возникает двойной электрический слой. Величина работы выхода различна для разных металлов, а также зависит от состояния поверхности тела.

Таким образом, для электронов, вышедших с поверхности металла с максимальной скоростью, можно записать уравнение:

$$h\mathcal{V} = \left(\frac{mV^2}{2}\right)^{max} + A.$$

Это соотношение носит название уравнения Эйнштейна.

Из уравнения Эйнштейна непосредственно следует существование «красной» границы. Действительно при уменьшении частоты света $\mathcal{V}$ максимальная скорость фотоэлектронов уменьшается и при частоте $\mathcal{V} = \mathcal{V}_{\text{кр}}$, удовлетворяющей соотношению $h\mathcal{V}_{\text{кр}} = A$, обращается в нуль. Следовательно, при $\mathcal{V} \leq \mathcal{V}_{\text{кр}}$ фотоэффект наблюдаться не будет.

Кроме того, если представить излучение, падающее на поверхность фотоэмиттера, как поток фотонов с энергией $h\mathcal{V}$, то интенсивность света (энергия I, проходящая через единицу поверхности в единицу времени) может характеризоваться числом фотонов N, падающих на единицу поверхности в единицу времени:

$$N = \frac{I}{h\mathcal{V}}.$$

Поскольку, каждый фотон действует на электроны твёрдого тела независимо от других фотонов, причём существует определённая вероятность α того, что это действие приведёт к эмиссии электрона, то при падении на поверхность N фотонов электронный поток с единицы поверхности в единицу времени составит

$$n = \alpha N = \frac{\alpha}{h\mathcal{V}} \cdot I$$

Таким образом, между числом освобождённых в единицу времени электронов и интенсивностью падающего света существует прямая пропорциональная зависимость, что подтверждает первый закон фотоэффекта.

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

Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между анодом и катодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает $|eU|$. При $U = U_{\text{з}}$ максимальная кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода

$$\left(\frac{mV^2}{2}\right)^{\max} = eU_{\text{з}},$$

где e – заряд электрона.

Тогда уравнение Эйнштейна преобразуется к виду:

$$eU_з = h\mathcal{V} - A.$$

Следовательно, величина $U_з = \text{Е}_к$ не зависит от интенсивности падающего светового потока и линейно возрастает с увеличением частоты света $\mathcal{V}$.

Рис. 5

Внешний фотоэффект находит широкое применение в различных по конструкции и назначению приборах, например, в фотоэлементах (рис. 5), предназначенных для индикации и измерения световых потоков. В этих приборах освещаемая светом поверхность, с которой испускаются электроны, служит в качестве катода. При приложении к промежутку «катод – анод» разности потенциалов и освещении катода светом возникает электрический ток, по величине которого можно судить об интенсивности света.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для решения сформулированной выше задачи, применяется установка, схема которой изображена на рис. 6.

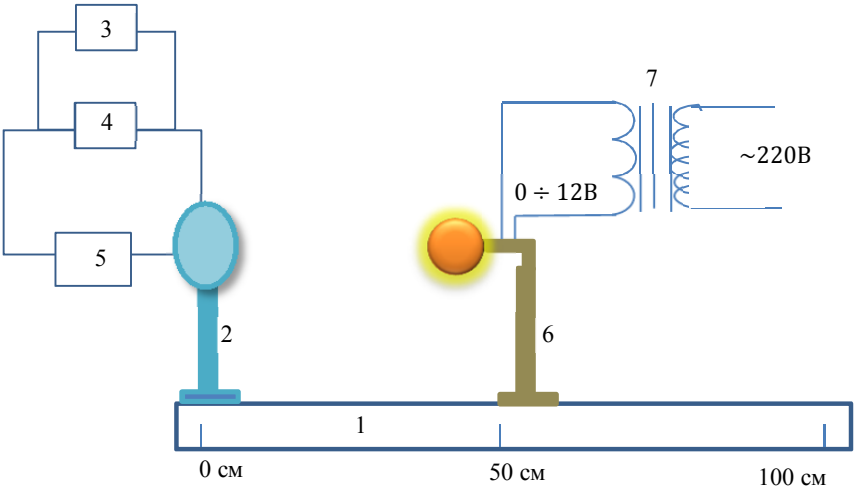

Рис. 6:
1 – оптическая скамья со шкалой; 2 – неподвижный держатель с фотоэлементом; 3 – микроамперметр для измерения фототока; 4 – шунт, предназначенный для расширения пределов измерения тока; 5 – источник постоянного напряжения с вольтметром, 6 – подвижный ползунок с лампой накаливания; 7 – понижающий трансформатор для питания лампы накаливания

Оптическая скамья с фотоэлементом и источником света изолирована от постороннего освещения непрозрачной ширмой.

В случае точечного источника света и изотропной среды распространения излучения интенсивность светового потока, падающего на фотоэлемент, обратно пропорциональна квадрату расстояния от лампы до фотоэлемента. Следовательно, согласно первому закону фотоэффекта, должна наблюдаться линейная зависимость между величиной $\left({}^{1}/_{r^2}\right)$ и величиной фототока насыщения фотоэлемента.

Внимание: лампа накаливания находится на 5см ближе к началу шкалы, чем указатель подвижного ползунка.

1. Проверить электрическую схему. Ручка потенциометра выпрямителя должна быть повёрнута против часовой стрелки до упора. Указатель пределов амперметра установить на «шунт». Проверить установку микроамперметра на нуль.

2. По вольтметру выпрямителя подать на его выход 20В. Включить лампу накаливания.

3. Поставить подвижной ползун с лампой на расстояние 40см от фотоэлемента. Шунт установить на такой предел, чтобы отклонение стрелки амперметра было максимальным. Снять первый отсчёт фототока.

4. Удаляя лампу ступенями по 5см, снять остальные отсчёты.

5. Повторить эти измерения 5 раз, возвращая лампу в первоначальное положение теми же ступенями и вновь удаляя.

6. Во время измерений каждый из полученных результатов заносить в таблицу.

7. Определить для каждого положения лампы среднее из всех проведённых опытов значение фототока и результаты занести в таблицу.

8. Нанести полученные средние значения фототока на график зависимости $i = f\left(1/r^2\right)$.

9. На полученной экспериментальной зависимости выделить линейный участок.

10. Через точки, относящиеся к линейному участку, методом наименьших квадратов, провести прямую, соединив её плавной кривой с нелинейным участком экспериментальной зависимости (если он имеется).

11. Обсудить в отчёте полученный график, обоснованно объяснив отклонение экспериментальной зависимости $i = f\left(1/r^2\right)$ от линейной функции, если такое отклонение будет наблюдаться.

12. На основании полученных результатов и их анализа сделать вывод о справедливости первого закона фотоэффекта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается явление фотоэффекта?
2. Сформулировать законы внешнего фотоэффекта.
3. На основе квантовых представлений объяснить эти законы.
4. Нарисуйте принципиальную схему установки и объясните её работу.
5. Почему в данном эксперименте при малых расстояниях источника света от фотокатода зависимость фототока $i = f\left(1/r^2\right)$ может отклоняться от линейной?

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпольский Э.В. Атомная физика. М. : Наука, 1984. 552 с.
2. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. М. : Наука, 1986. 416 с.

Издание подготовлено в авторской редакции

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета

Заказ № 1945 от «29» июня 2016 г. Тираж 100 экз.