

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

Цель работы: экспериментальная проверка закона Столетова, установление красной границы фотоэффекта, определение работы выхода и постоянной Планка.

Основные законы внешнего фотоэффекта

К числу явлений, в которых обнаруживаются корпускулярные свойства света, принадлежит прежде всего фотоэффект.

В 1888 году Г.Герц заметил, что проскакивание искры между цинковыми шариками разрядника значительно облегчается, если один из них, заряженный отрицательно, осветить ультрафиолетовым светом. Это явление было подробно изучено в классических работах А.Г.Столетова, который разработал методику исследования фотоэффекта и установил ряд его закономерностей. Оказалось, что это явление основано на удалении с поверхности металлов отрицательного электричества. После открытия электрона в 1897 г. Дж.Дж.Томсоном опытами самого Томсона, а также Ленарда вскоре был найден удельный заряд e/m для частиц, теряемых телами при освещении. Он оказался таким же, как и для частиц катодных лучей. Таким образом, сущность фотоэффекта заключается в вырывании электронов с поверхности металлов. Данное предположение подтверждается простым опытом по облучению ультрафиолетовым светом отрицательно заряженного электрометра, который при этом разряжается (рис.1).

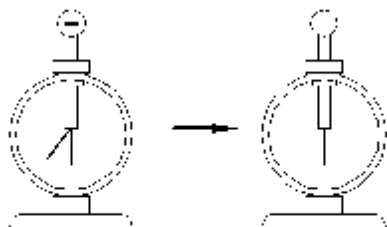


Рис.1. Действие света на отрицательно заряженный электрометр

При облучении ультрафиолетовым светом положительно заряженный шарик сохраняет свой заряд (рис.2).

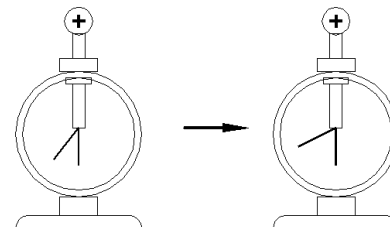


Рис.2. Действие света на положительно заряженный электрометр

Таким образом, это опровергает возможное предположение о том, что при облучении шарiku передается положительный заряд.

Явление вырывания электронов из вещества при освещении его светом получило название фотоэлектрического эффекта или, короче, фотоэффекта. Различают 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 возбужденные электроны остаются внутри освещаемого тела, не нарушая электрическую нейтральность последнего. Для обоснования гипотезы фотонов основное значение имеет *внешний фотоэффект*, который и рассматривается в этой работе.

Электроны, вырванные под действием света, называются *фотоэлектронами*. Фотоэлектрическими свойствами обладают как металлы, так и диэлектрики, а также полупроводники и электролиты, причем необходимым (но недостаточным) условием фотоэффекта является заметное поглощение используемого света в поверхностном слое освещаемого тела. Фотоэлектрический эффект вызывается не только ультрафиолетовыми лучами. Щелочные металлы — литий, натрий, калий, рубидий, цезий — весьма чувствительны к фотоэлектрическому действию и в видимой области спектра. А специальная обработка поверхностей этих и других металлов делает их способными испускать фотоэлектроны даже под действием инфракрасных лучей.

Для изучения количественных характеристик фотоэффекта используется схема, представленная на рис.3. Излучение источни-

ка света (лампы накаливания) направляется на фотоэлемент. Для выделения определенной длины волны света используется свето-фильтр $СФ$. Фотоэлемент представляет собой откачанный до высокого вакуума резервуар, в который впаяны металлический катод и анод. Между катодом и анодом создается регулируемая потенциометром R разность потенциалов, измеряемая вольтметром V . Сила тока, проходящего между катодом и анодом, определяется микроамперметром μA .

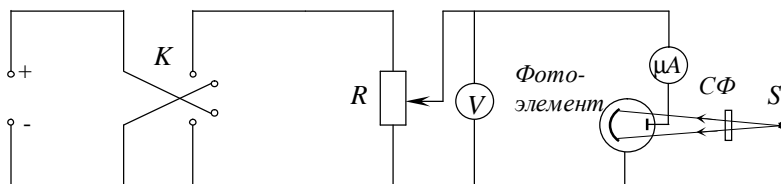


Рис.3. Схема установки для исследования фотоэффекта

Если облучения катода нет, то и ток между катодом и анодом отсутствует. При наличии облучения возникает электрический ток, сила которого зависит от разности потенциалов, интенсивности светового потока, материала катода и частоты света.

Опыты подобного рода в ранних исследованиях производились в газах. Но их лучше производить в вакууме, так как газ только осложняет явления, происходящие в поверхностном слое металла.

Фотоэффект с данного вещества сильно зависит от состояния его поверхности. Для получения однозначных результатов исследование этого явления необходимо производить в хорошем вакууме, предварительно тщательно очистив поверхность исследуемого тела. Перед помещением электродов в прибор материал, служащий катодом, подвергают перегонке в вакууме, а затем наносят тонким слоем на какую-либо подложку.

Вольтамперная характеристика прибора при неизменной интенсивности света и заданной его частоте ν имеет вид, показанный на рис.4 (кривая 1). Изучение ее позволяет установить, что под действием света вырываются электроны, обладающие некоторой начальной скоростью.

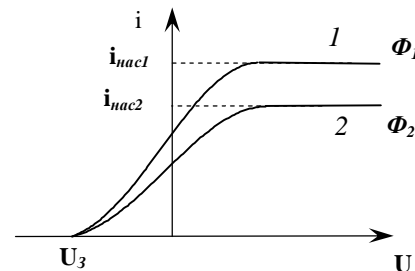


Рис.4. Вольтамперные характеристики фотоэлементов, полученные для двух различных световых потоков ($\Phi_1 > \Phi_2$)

Для торможения их приходится создавать встречное запирающее электрическое поле, подавая на анод отрицательное (относительно катода) напряжение U_3 . Существование тока насыщения, не зависящего от приложенного напряжения, говорит о том, что число электронов, вырываемых в единицу времени, ограничено.

Кривая 2 на том же рисунке свидетельствует о возрастании числа вырываемых в единицу времени электронов при увеличении интенсивности света данной частоты. Но поразительным является совпадение начальных точек обеих кривых, свидетельствующее о том, что максимальная скорость вырываемых светом электронов не зависит от интенсивности света.

На основании экспериментальных исследований фотоэффекта были установлены его основные законы.

1. Сила фототока насыщения, а следовательно, и количество фотоэлектронов, вылетающих в единицу времени с единицы поверхности фотокатода, прямо пропорционально интенсивности падающего излучения, если его спектральный состав остается неизменным (рис. 5, закон Столетова).

2. Скорость фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения.

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты монохроматического излучения, вызывающего фотоэффект.

4. Для каждого материала катода существует максимальная длина волны (минимальная частота, рис.6) при которой фотоэффект прекращается. Эта длина волны называется *красной грани-*

цей фотоэффекта. Соответствующая ей частота называется *граничной частотой*.

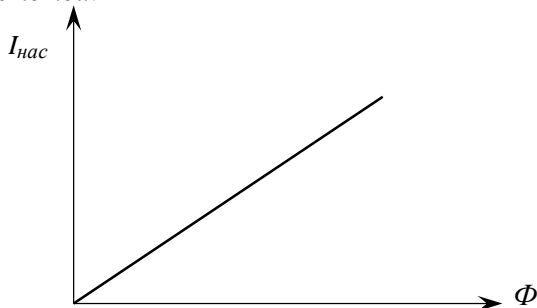


Рис.5. Зависимость силы фототока насыщения от величины светового потока

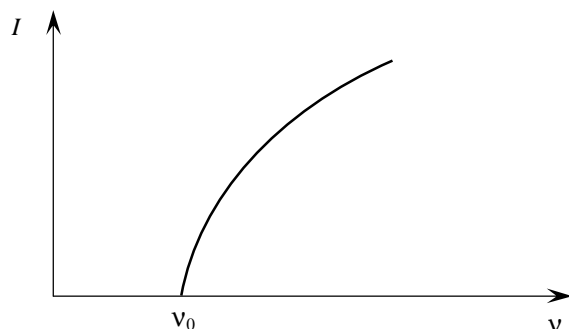


Рис.6. Зависимость силы фототока от частоты света

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не представляет трудности. В самом деле, это объяснение могло бы выглядеть так: падающая электромагнитная волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле; при резонансе между собственным периодом колебания электрона и периодом падающей волны амплитуда колебаний электрона становится настолько большой, что он может вырваться за пределы поверхности металла. Очевидно, что если эта картина верна, то кинетическая энергия, с которой электрон покидает металл, должна заимствоваться у падающей волны, и поэтому есте-

ственно ожидать, что энергия фотоэлектрона должна находиться в прямой связи с интенсивностью падающего света.

На самом же деле многочисленные опыты показали, что энергия фотоэлектронов абсолютно не зависит от интенсивности света: повышение интенсивности увеличивает лишь число фотоэлектронов и притом в количестве, строго пропорциональном интенсивности, — но не их скорость. Последняя зависит только от частоты падающего света, а именно, с увеличением частоты линейно возрастает и энергия фотоэлектронов.

Другое резкое расхождение с опытом получится, если на основе приведенного объяснения оценить *время возникновения фотоэффекта*. При малых интенсивностях падающего света фототок должен появляться спустя некоторое время, необходимое для накопления электронами энергии, достаточной для того, чтобы покинуть поверхность металла. Между тем *опыт показывает, что фотоэффект протекает безынерционно, т.е. фототок появляется мгновенно — одновременно с освещением*. Именно на такой безынерционности основаны практически все научно-технические применения фотоэффекта.

Эйнштейн указал на то, что все эти трудности исчезают, если рассматривать свет как поток фотонов с энергией $h\nu$, т.е. стать на чисто корпускулярную точку зрения.

Качественная картина механизма фотоэффекта с этой точки зрения такова: фотон, поглощаясь, отдает свою энергию электрону, и если эта энергия достаточна для того, чтобы освободить электрон от удерживающих его связей, то он выходит за пределы поверхности металла. Так как вероятность одновременного поглощения двух фотонов одним электроном ничтожно мала, то каждый освобожденный электрон заимствует свою энергию у одного фотона (обратное, вообще говоря, не имеет места, т.е. не каждый поглощенный фотон освобождает электрон).

Поэтому число освобожденных фотоэлектронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т.е. пропорционально интенсивности света (закон Столетова). Но энергия фотоэлектрона зависит только от энергии поглощенного фотона; последняя же равна $h\nu$, откуда следует, что энергия фотоэлектрона должна линейно зависеть от частоты и вовсе не зависеть от интенсивности (числа фотонов). Энергетический баланс при поглощении фотона может быть в самом общем случае выражен следующим простым уравнением, которое обычно называется уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = P_1 + P_2 + \frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (1)$$

Здесь P_1 — энергия отрыва электрона от атома (энергия ионизации); P_2 — работа выхода электрона за пределы поверхности тела и $\frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2}$ — кинетическая энергия освобожденного фотона.

Металлы характеризуются тем, что у них имеется большое количество свободных электронов; поэтому для металлов P_1 можно считать равным нулю. Зато для выхода за пределы поверхности металла электрон должен преодолеть поле, благодаря наличию которого электроны оказываются запертыми внутри металла как бы в ящике. Работа, которую нужно затратить на преодоление этого поля, и есть работа выхода P_2 . Таким образом, для металлов уравнение Эйнштейна имеет вид

$$h\nu = \frac{m\nu_{\text{макс}}^2}{2} + P_2. \quad (2)$$

Очевидно, что если $h\nu < P_2$, то электрон не сможет выйти за пределы поверхности металла. Это значит, что существует некоторая минимальная частота $h\nu_0 = P_2$, которая еще способна вызывать фотоэффект; при меньших частотах он не наблюдается (красная граница фотоэффекта).

Энергию $E_{\text{макс}}$ фотоэлектронов можно определить методом задерживающего напряжения. Если на фотоэлемент подать некоторое отрицательное напряжение U , то фотоэлектроны будут тормозиться, и анода смогут достичь только те электроны, энергия которых E удовлетворяет условию $E > eU$, где e — заряд электрона. Поэтому анодный ток в цепи уменьшится. При некотором значении задерживающего напряжения U_3 даже самые быстрые фотоэлектроны не смогут достичь анода и анодный ток в цепи прекратится.

Экспериментально изучается зависимость электронного тока в фотоэлементе от величины приложенного задерживающего потенциала. Эта зависимость выражается плавной кривой. Практический интерес представляет точка пересечения кривой с осью U , определяющая потенциал запирающий (рис. 4).

По закону сохранения энергии $E_{\text{макс}} = eU_3$. Тогда из (2) получаем

$$U_3 = \frac{h\nu}{e} - \frac{P_2}{e}.$$

Таким образом, задерживающее напряжение U_3 линейно зависит от частоты ν падающего на фотоэлемент излучения.

Если построить график $U_3 = f(\nu)$ (рис.7), то должна получиться прямая линия, продолжение которой отсечет на оси ординат отрезок, равный $-P_2/e$, что позволит определить работу выхода P_2 . По наклону прямой определяется постоянная Планка.

$$h = e \frac{\Delta U}{\Delta \nu}. \quad (3)$$

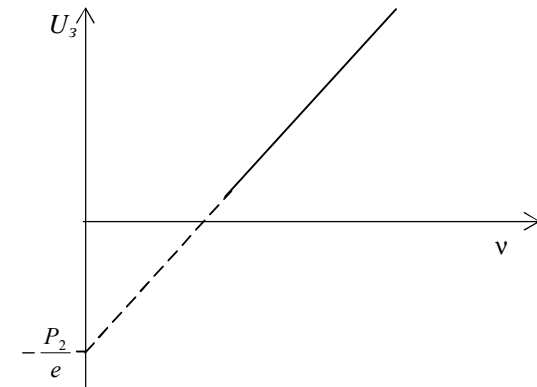


Рис.7. Зависимость задерживающего напряжения от частоты света

Практическая часть

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

В качестве источников света в данном осветительном устройстве используются светодиоды. Спектральные характеристики светодиодов приведены на рис. 1 и в таблице.

Прибор рассчитан на питание от источника постоянного тока напряжением 15 В и силой тока 30 мА. Переключение светодиодов осуществляется при помощи галетного переключателя. Так как падение напряжения на светодиодах неодинаково, то для обеспечения необходимого тока последовательно к ним подсоединены соответствующие резисторы.

Таблица. Оптические характеристики светодиодов, используемых в осветительном устройстве

Положение светодиода	Длина волны максимума излучения, нм	Полуширина линии излучения, нм
1	593	17
2	561	30
3	455	20
4	474	22
5	461	21
6	525	34
7	445	20

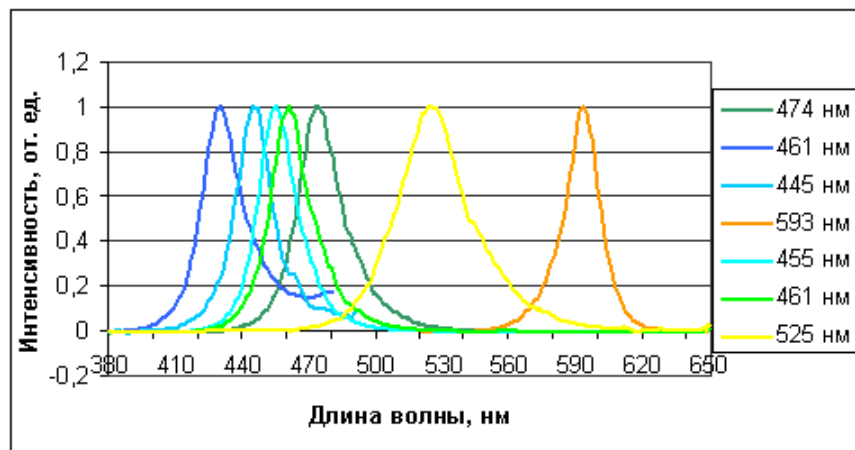


Рис.1. Спектральные характеристики используемых светодиодов

В состав излучателя входят: диск для фиксации светодиодов, диск для контактных площадок, переключатель со скользящим контактом, держатель.

Внешний вид источника показан на рис. 2.

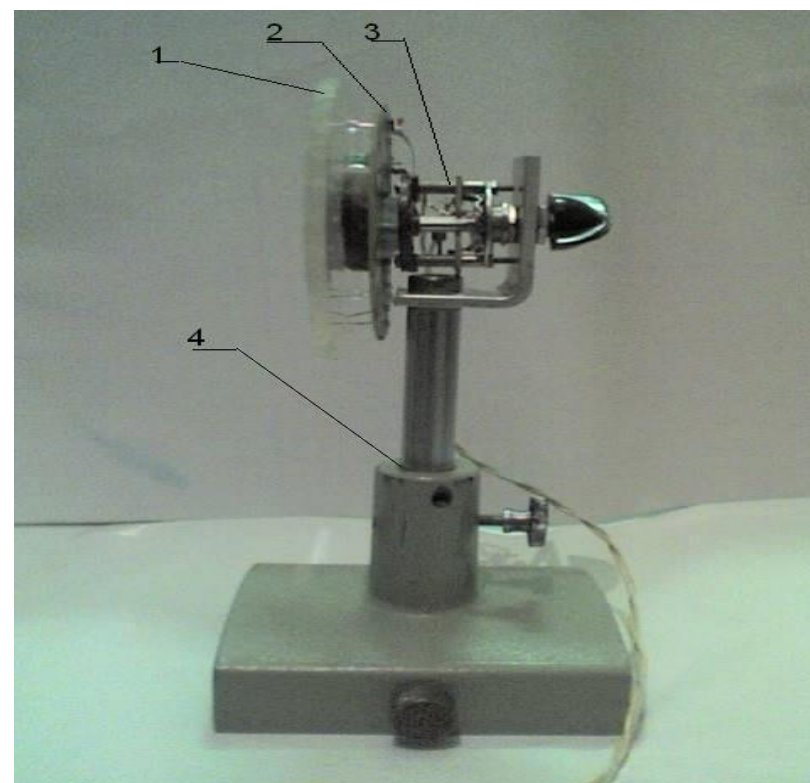


Рис. 2. Внешний вид источника света

Конструкция прибора позволяет поочередно в опытах использовать до одиннадцати светодиодов с различной длиной волны излучения. Переключение светодиодов происходит таким образом, что каждый следующий светодиод становится на место предыдущего и при этом не нарушается юстировка лабораторной установки.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Упражнение 1. Изучение вольтамперной характеристики фотозлемента. Определение постоянной Планка и работы выхода электронов

1. Перед выполнением работы ознакомиться с установкой и используемыми в ней электрическими приборами.

2. Для каждого светодиода снять зависимость фототока от напряжения в области ускоряющих потенциалов, изменяя напряжение от 0 до 3В через каждые 0,3В.

Примечание. а) при измерении вольтамперной характеристики расстояние от светодиодов до фотозлемента устанавливается равным 5 см для 1-го и 2-го и светодиодов, и 20 см для остальных светодиодов.

б) при работе с включенным фотозлементом не допускается попадания света от расположенных вблизи источников освещения (настольных ламп, и др.)

3. Изменив полярность переключателя, снять зависимость тока от напряжения в области задерживающих напряжений, изменяя U_3 от 0 до -0,8 В, фиксируя фототок через каждые 0,05 В.

4. Прodelать пункты 2-3 для всех светодиодов,

5. Построить графики зависимостей $I = f(U)$ и для каждой длины волны определить задерживающее напряжение.

6. Используя полученные значения задерживающего напряжения, построить график зависимости U_3 от частоты n света ($n = c/\lambda$ – скорость света).

7. С помощью графика $U_3 = f(n)$ и формулы $h = e(\Delta U / \Delta n)$ определить красную границу фотоэффекта λ_0 , постоянную Планка h и работу выхода фотоэлектронов из фотокатода P_2 , выразив полученное значение в электронвольтах (1эВ = 1,6·10⁻¹⁹ Дж).

Упражнение 2. Экспериментальная проверка закона Столетова

1. Установить фотозлемент в положение, соответствующее 0 шкалы столика соответствующее от светодиодов и на расстояние 20 см.

2. Установить питание фотозлемента в положение, соответствующее току насыщения.

3. Передвигая фотозлемент измерить зависимость фототока для 3, 4, 7-го светодиода от расстояния источника до фотозлемента.

4. Построить график зависимости $I_{нас} = f(1/r^2)$.

Так как световой поток Φ , падающий на фотозлемент, пропорционален величине $1/r^2$, т.е. $\Phi \sim 1/r^2$, то, построив график зависимости

$I_{нас} = f(1/r^2)$, мы можем проверить выполнимость закона Столе-

това на основании линейности полученного графика.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные законы внешнего фотоэффекта.

2. В чем сущность квантовой теории фотоэффекта Эйнштейна?

3. Что необходимо понимать под работой выхода электронов из вещества?

4. Что собой представляет вольтамперная характеристика вакуумного фотозлемента при его освещении монохроматическим светом? Как изменится ее вид, если при постоянном световом потоке изменить длину волны?

5. Как изменится вольтамперная характеристика, если, не изменяя длину волны, увеличить световой поток?

6. Нарисуйте графики зависимости запирающего напряжения U_3 от частоты для двух различных металлов.

7. Изобразите зависимость силы фототока от частоты света. Чем определяется вид этой зависимости?

8. Сравните полученное в работе значение постоянной Планка с табличным. Какие, по вашему мнению, экспериментальные факторы влияют на точность определения этой величины?

9. Согласно законам сохранения энергии и импульса при столкновении фотона с электроном передача последнему всей энергии фотона (поглощение) невозможна. Почему в таком случае наблюдается явление фотоэффекта?