Министерство науки и
высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

Л.Г. Скорняков, А.В. Демин, О.В. Денисова

Законы внешнего фотоэффекта

Электронный текстовый ресурс

Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Атомная физика» для студентов всех форм обучения. Направления: 23.03.01 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах», 14.03.03 «Физика кинетических явлений», 14.03.05 «Ядерные и энергетические установки», 22.01.00 «Системный анализ и управление», 20.04.02 «Инженерное дело в медико-биологической практике», 14.03.07 «Радиационная безопасность человека и окружающей среды», 20.03.00 «Биомедицинская инженерия», 23.02.00 «Информационные системы», 14.03.06 «Электроника и автоматика физических установок», 01.06.00 «Прикладные математика и физика» 14.03.02 «Физика атомного ядра и частиц»

Позволяют провести экспериментальное изучение законов внешнего фотоэффекта и измерить постоянную Планка. Содержат теоретическую, экспериментальную части и вопросы для самоконтроля.

Подготовлено кафедрой «Теоретической физики и прикладной математики»

Екатеринбург
2019

Цель работы: знакомство с явлением фотоэффекта, его законами и их объяснением с точки зрения теории Эйнштейна. Экспериментальное подтверждение законов фотоэффекта и получение фундаментальной физической константы – постоянной Планка.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Теоретическая часть 4

1.1. Введение 4

1.2. Явление фотоэффекта 5

1.3. Законы фотоэффекта 8

1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта 10

1.5. Краткие сведения о зонной структуре твёрдых тел 11

1.6. Виды фотоэффекта 13

2. Экспериментальная часть 15

2.1. Лабораторная установка 15

2.3. Действия при включении установки 17

2.4. Измерение спектральной характеристики - зависимости сигнала от длины волны 18

2.5. Вольтамперная характеристика фотоэлемента при разных интенсивностях падающего света 19

2.6. Обратная ветвь вольтамперной характеристики фотоэлемента для разных длин волн 21

2.7. Изучение зависимости $T_{макс}$ от частоты. Определение постоянной Планка 22

2.8. Оформление отчета 23

3. Контрольные вопросы 23

4. Литература 25

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Введение

Прохождение электрического тока через вакуум на первый взгляд представляется абсурдным, поскольку в вакууме нет носителей заряда. Однако, в начале XX столетия это явление широко изучалось, и для его теоретического описания пришлось использовать такие понятия как: контактная разность потенциалов (КРП), токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ); туннельный эффект и т. д. Каждое из них само по себе требует отдельного внимательного разбора и только в этом случае объясняет ту или иную особенность наблюдаемых на эксперименте характеристик [1-5]. По этой причине, приступая к изучению ещё более сложного явления, такого как фотоэффект, не следует тешить себя надеждой, что, используя простейшие соотношения и методики в учебном эксперименте, можно с минимальными систематическими и случайными погрешностями получить верные количественные значения измеряемых величин.

Явление, которое Вы экспериментально будете изучать в данной лабораторной работе называется внешним фотоэффектом, далее просто фотоэффектом (ФЭ), сущность которого состоит в выбивании электронов из вещества под действием света. ФЭ был открыт выдающимся немецким физиком Генрихом Герцем (Heinrich Rudolf Hertz) [6] в 1887 году. И, вслед за фундаментальными работами Планка, посвященными тепловому излучению [7, 8], является одним из доказательств корпускулярной природы электромагнитного излучения. Ирония судьбы заключается в том, что за свою короткую жизнь (всего 37 лет) Герц получил как экспериментальное подтверждение электромагнитной теории света Максвелла [9-11], подробно исследовав отражение, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн, доказав, что скорость их распространения совпадает со скоростью распространения света, так и открыл явление ФЭ, законы которого описываются совершенно новой – квантовой физикой.

В 1905 году Альберт Эйнштейн в своей работе [12], исходя из общего

положения, что при взаимодействии излучения с веществом должен выполняться закон сохранения энергии, и встав чисто на корпускулярную точку зрения, объяснил все наблюдаемые при ФЭ экспериментальные факты. Наиболее тщательно внешний фотоэффект изучил Милликен [13].

В ходе данной лабораторной работы предлагается ознакомиться с явлением ФЭ, его законами и их объяснением с точки зрения теории Эйнштейна, освоить методику определения постоянной Планка и определить её величину.

1.2. Явление фотоэффекта

Явление фотоэффекта очень разнопланово. Различают внешний фотоэффект, который имеет свои особенности в металлах, полупроводниках (ПП) и диэлектриках. В данной работе изучается внешний эффект в ПП. Кроме того, возможен внутренний фотоэффект [14], ядерный фотоэффект, многофотонный фотоэффект и др. Сначала рассмотрим эксперимент и теорию ФЭ на металле.

Для экспериментального наблюдения ФЭ используют фотоэлемент, представляющий собой вакуумный стеклянный баллон, с запаянными в него анодом **А** и катодом **К** (рис. 1).

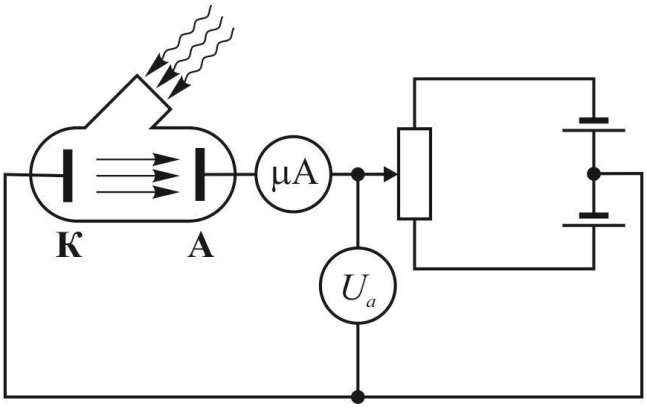

Рис. 1. Принципиальная схема для наблюдения ФЭ

Катод и анод фотоэлемента подключены к источнику постоянного напряжения с возможностью регулировки как величины, так и знака, анодного напряжения $U_а$. При освещении катода светом ФЭ обнаруживается по наличию тока в анодной цепи, так называемого фототока $I_ф$.

На настоящее время в результате многочисленных экспериментов установлен ряд закономерностей, характерных для ФЭ. Для ознакомления с ними удобнее всего начать с вольтамперных характеристик (ВАХ), наблюдаемых при постоянной частоте излучения и различных уровнях освещенности *J* фотокатода, рис.2.

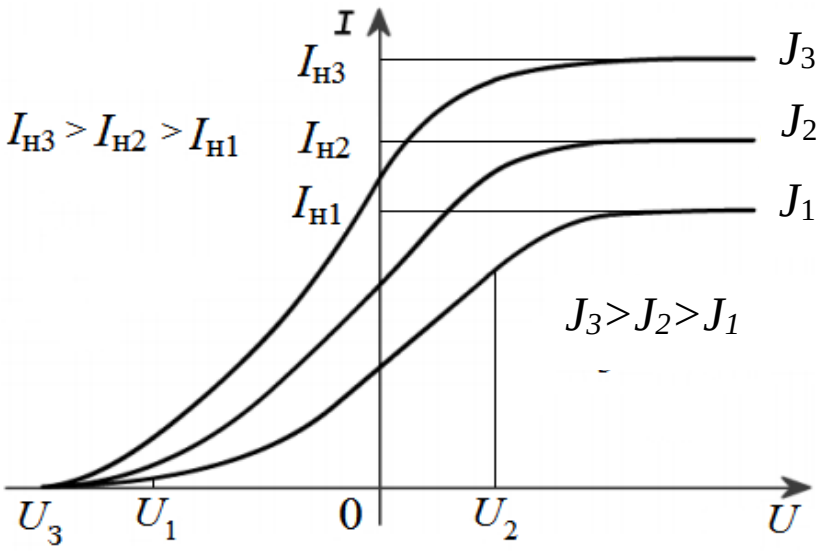

Рис.2. Примерный вид ВАХ фотоэлемента

Бросается в глаза, что ВАХ фотоэлемента является нелинейной.

При этом:

1) Анодный ток растет с освещенностью.

2) Существует ток насыщения $I_н$, при котором все электроны, испущенные катодом, попадают на анод.

3) Доля электронов, отвечающая силе тока при напряжении равном нулю, обладает скоростями достаточными для достижения анода самостоятельно, без помощи ускоряющего поля.

4) Для обращения тока в нуль необходимо приложить задерживающее напряжение $U_з$, при котором ни одному электрону не удается достигнуть анода, следовательно,

$$T_{макс} = e \cdot U_з, \qquad (1)$$

где $T_{макс}$ – максимальная кинетическая энергия электронов при вылете из металла.

Реальная величина задерживающего напряжения $U_З$ отличается от

экспериментально наблюдаемой по ВАХ на величину (КРП) между материалами анода и катода. Наличие КРП послужило одной из экспериментальных трудностей, затруднивших объяснение фотоэффекта. КРП смещает всю кривую по горизонтали.

Второй экспериментальной трудностью был асимптотический подход ВАХ к темновому значению тока. На начальном участке (от $U_з$ до U_1) ток медленно возрастает при увеличении анодного напряжения. Связано это с тем, что электроны, двигающиеся из глубины металла наружу, но не имеющие достаточной энергии для выхода из него, образуют вблизи поверхности электронное облако с толщиной порядка межатомного расстояния. Электроны вблизи приповерхностных ионных слоев под воздействием отрицательно заряженного электронного облака будут оттесняться вглубь металла и приповерхностные ионные слои создадут избыточный положительный заряд. Поэтому вблизи поверхности металла образуется двойной электрический слой из ионов и электронного облака с толщиной порядка межатомного расстояния [15], поле которого препятствуют выходу электронов. Поэтому можно считать, что электроны в металле находятся в потенциальной яме, выбраться из которой они могут, если имеют достаточную энергию.

Для плоской конфигурации электродов указывается на экспоненциальную зависимость тока от напряжения [15]. Это объясняется противодействием анодному полю поля объёмного отрицательного заряда и разбросом начальных скоростей электронов. Наблюдаемый нелинейный рост тока в области между U_1 и U_2, рис. 2, приближённо подчиняется закону степени 3/2 (закону Ленгмюра–Чайльда):

$$I = gU_a^{3/2},$$

который объясняется в рамках модели ТОПЗ [15].

На ВАХ, рис.2, при минимальной освещенности фотокатода примерно выделены области: $U_з < U < U_1$ - начальная область; $U_1 < U < U_2$ – область ТОПЗ; $U > U_2$ – область тока насыщения.

Таким образом, большую часть интервала отрицательных напряжений

занимает именно область ТОПЗ. Следовательно, для определения запирающего напряжения остаётся небольшой интервал напряжений, отмеченный на рис. 2 как начальная область (от $U_з$ до U_1). При этом границу между начальной областью и областью ТОПЗ (в силу непараллельной конфигурации электродов и недостаточному соотношению сигнал/шум на учебной установке) можно установить лишь приблизительно, что сказывается на предлагаемой в данном пособии методе определения задерживающего потенциала.

1.3. Законы фотоэффекта

Из формулы (1) следует, что, измерив задерживающий потенциал, можно определить максимальную энергию, которую имеют электроны при вылете из металла. К 1905 г. было установлено, что максимальная энергия электронов не зависит от интенсивности света, а зависит только от его частоты. Увеличение частоты приводит к возрастанию энергии, и задерживающего потенциала. Оказалось, что задерживающий потенциал и, следовательно $T_{макс}$, линейно зависят от частоты.

На основании перечисленных экспериментальных фактов, большую часть из которых иллюстрируют приводимые ниже графики (рис. 3) были сформулированы законы фотоэффекта.

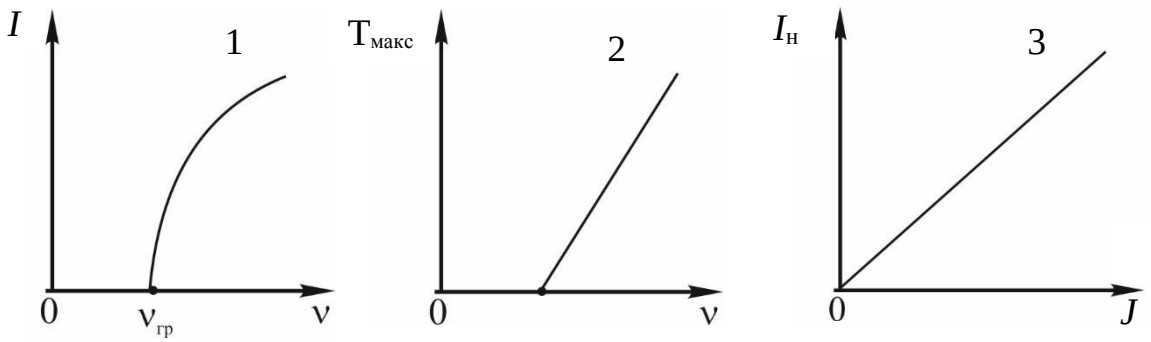

Рис. 3. Графики, иллюстрирующие три закона ФЭ.

1. Существует граничная частота света $\nu_{гр}$, так называемая «красная граница фотоэффекта», ниже которой для данного материала катода

фотоэффект отсутствует, независимо от плотности светового потока и времени облучения.

2. Электроны покидают поверхность катода с энергиями от нуля до максимальной $T_{макс}$, которая не зависит от плотности светового потока и линейно зависит от частоты.

3. При фиксированной частоте излучения число электронов, выбитых из катода в единицу времени, прямо пропорционально интенсивности света $I_н \sim J$.

4. Время запаздывания фототока относительно начала облучения катода не больше чем 10^{-12} с [16].

На первый взгляд объяснение ФЭ с точки классической электродинамики не представляет никаких трудностей: падающая электромагнитная волна (ЭМВ) вызывает вынужденные колебания электронов в металле. При совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебаний, амплитуда колебаний электрона становится настолько большой, что он может вырваться за пределы металла. Очевидно, что, если эта картина верна, то кинетическая энергия, с которой электрон покидает металл, должна заимствоваться у падающей волны, и поэтому естественно ожидать, что энергия фотоэлектрона должна находиться в прямой связи с интенсивностью падающей волны. Однако многочисленные опыты показали, что энергия фотоэлектронов АБСОЛЮТНО НЕ ЗАВИСИТ от интенсивности падающего света. Повышение интенсивности увеличивает лишь количество фотоэлектронов, строго пропорционально интенсивности и не влияет на время запаздывания, но не изменяет их энергию. Причём энергия прямо пропорциональна частоте, рис. 3.2.

ПРОТИВОРЕЧИЯ законов фотоэффекта законам классической физики:

1. Несовместимость наличия «красной» - длинноволновой границы фотоэффекта с волновыми представлениями.

2. Экспериментально измеренное время запаздывания фотоэффекта во много раз меньше нижней границы для теоретической оценки согласно классическим представлениям.

3. Независимость скорости фотоэлектронов от плотности светового потока, облучающего катод.

Независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности света пытались объяснить тем, что свету приписывалась роль спускного механизма, то есть предполагалось, что электрон набирает свою энергию не за счет падающей волны, а за счет тепловых движений в металле, так что роль света сводится только к освобождению электрона. Однако, при этом остается совершенно непонятным влияние частоты света и, кроме того, если бы это было верно, фотоэффект должен был бы зависеть от температуры металла, чего на самом деле нет.

1.4. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

В 1905 году Альберт Эйнштейн [12] указал на то, что все вышеперечисленные трудности исчезают, если рассматривать свет как поток квантов величины $h\nu$, то есть встать на чисто корпускулярную точку зрения.

Он исходил из того, что при взаимодействии излучения с веществом должен выполняться закон сохранения энергии, который в случае ФЭ на металлах выглядит как общеизвестное соотношение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{вых} + T_{макс} \qquad (2)$$

где $A_{вых}$ - работа выхода – минимальная энергия необходимая для вырывания электрона из металла, $h\nu$- энергия падающего фотона, $T_{макс}$ – максимальная кинетическая энергия вырванного из металла электрона. В частном случае нерелятивистских энергий $T_{макс} = p^2/(2m)$, где p и m – соответственно, импульс и масса покоя электрона.

Наблюдаемые экспериментально закономерности объясняются следующим образом:

1. Существование граничной частоты очевидно, причем, $\nu_{гр} = A_{вых}/h$.

2. Наличие задерживающего потенциала и его линейная зависимость от частоты записаны собственно в уравнении Эйнштейна (2).

3. Зависимости $T_{макс}$ от интенсивности не возникает по причине индивидуального взаимодействия электрона и фотона при малых плотностях мощности.

4. При выполнении последнего условия каждый электрон может провзаимодействовать только с одним фотоном, следовательно, должна выполняться пропорциональность между числом выбитых электронов и световым потоком.

5. Вследствие локализации фотона в пространстве, электрон взаимодействует с квантом за очень малый промежуток времени, поэтому запаздывание фототока практически отсутствует.

6. Отсутствие тока насыщения, наблюдаемое на фотоэлементах с сурьмяно-цезиевыми фотокатодами, напылёнными непосредственно на стекло колбы фотоэлемента обусловлено значительным сопротивлением фотокатода вдоль слоя, следовательно, падением напряжения вдоль поверхности фотокатода имеет не физический, а электротехнический характер [17].

1.5. Краткие сведения о зонной структуре твёрдых тел

Из курса атомной физики известно, что энергетический спектр атомов имеет дискретную структуру. При объединении атомов в коллективы – молекулы, жидкости, твёрдые тела (ТТ), вследствие законов квантовой механики, энергетический спектр таких коллективов отличается от спектра изолированного атома: по-прежнему остаются области (зоны) запрещённых энергий, но вместо дискретных разрешённых значений энергии образуются также зоны разрешённых энергий. Именно от ширины этих зон и величины промежутков между ними зависит с веществом какого типа мы имеем дело, с металлом, диэлектриком или полупроводником (ПП). На рис. 4 схематически показано как примерно выглядят зонные схемы металла и ПП.

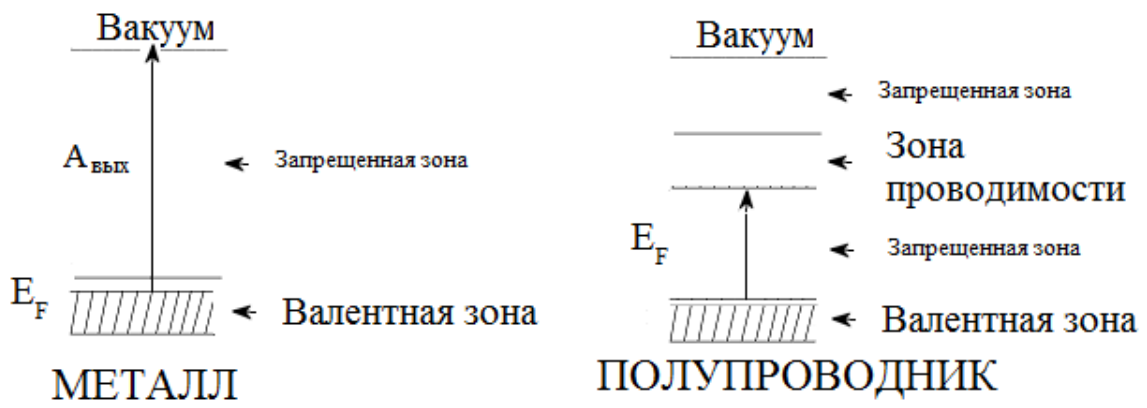

Рис.4. Зонная структура твёрдых тел

Видно, что схема для ПП более сложна. Схема для диэлектрика не приведена по той причине, что качественно она совпадает со схемой для ПП, а её количественное отличие состоит в величине запрещённой зоны между зоной проводимости и валентной зоной – у ПП это промежуток меньше 2,5 -3,0 эВ, а у диэлектриков больше.

В данной лабораторной работе производится измерение ФЭ при облучении тонкой плёнки соединения цезия с сурьмой. Это соединение проявляет свойства ПП, однако, в качестве первого шага сначала качественно будет рассмотрен ФЭ при освещении металлической поверхности.

Как указывалось ранее, в металлах, как и в атоме, электроны находятся в потенциальной яме (рис. 5). Поэтому электрону, находящемуся вблизи поверхности металла и стремящемуся покинуть его, необходимо преодолеть потенциальный барьер, то есть совершить работу выхода, $A_{вых}$.

Согласно зонной теории, при абсолютном нуле температуры электроны металла последовательно заполняют энергетические уровни зоны проводимости вплоть до энергии Ферми E_F, (рис. 5а).

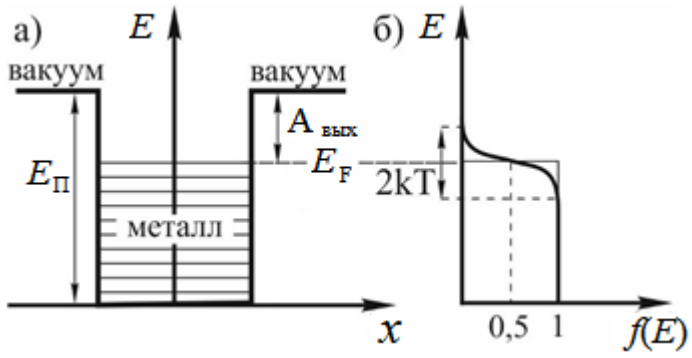

Рис. 5. а) Потенциальная энергия $E_П$ электронов в металле в зависимости от их пространственной координаты, б) Функция распределения $f(E)$ электронов в металле при температуре, отличной от нуля Кельвинов. E_F – энергия Ферми

Таким образом, работа выхода $A_{вых}$ – минимальная энергия, необходимая для вырывания электрона из металла, есть разность энергии покоящегося электрона, находящегося на бесконечно большом расстоянии от поверхности металла $E_п$ и энергии Ферми E_F (рис. 5 а). Работа выхода зависит как от материала, так и от состояния его поверхности. Для большинства металлов она составляет величину порядка нескольких электрон-вольт.

Таблица 1.

Работа выхода для некоторых материалов [18]

Вещество	$A_{вых}$, эВ	Вещество	$A_{вых}$, эВ
Серебро, Ag	4,7	Цезий, Cs	1,9
Аллюминий, Al	4,2	Барий, Ba	2,29
Золото, Au	4,8	Никель, Ni	1,37
Цинк, Zn	4,25	Сурьмяно-цезиевый катод, SbCs	1,3

При температуре отличной от абсолютного нуля уровень Ферми «размывается», то есть появляются электроны с энергиями больше энергии Ферми (рис. 5 б). Однако при комнатной температуре ($T \sim 300\ K$) тепловой энергии даже самых быстрых электронов недостаточно для их выхода из потенциальной ямы.

1.6. Виды фотоэффекта

Внутренний фотоэффект

Внутренний фотоэффект был открыт в 1873 г. У. Смитом [14], на 14 лет раньше, чем внешний фотоэффект. Во внешнем фотоэффекте энергия фотона передается электронам, составляющим в металле электронный газ. То есть в металле внешние электроны не привязаны к отдельным атомам и фотону нет необходимости отрывать электрон от отдельно взятого атома, поэтому уравнение Эйнштейна записывают в виде (2). Несколько иная ситуация наблюдается в диэлектриках и полупроводниках. В этом случае энергетический баланс должен учесть энергию отрыва электрона от атома (энергию ионизации P), тогда уравнение Эйнштейна запишется в виде:

$$h\nu = A_{вых} + P + T_{max} \qquad (3)$$

Если энергия фотона лежит в пределах $P < h\nu < P + A_{вых}$ и попадает в интервал допустимых значений энергии в кристалле, то тогда электрон отрывается от своего атома, но остается в пределах кристалла и может в течение какого-то времени по нему перемещаться, то есть в этом случае при освещении кристалла в нём возможен электрический ток. Явление возрастания проводимости при освещении полупроводников и диэлектриков называется внутренним фотоэффектом и находит широкое практическое применение.

Ядерный фотоэффект

При ядерном фотоэффекте происходит поглощение очень коротковолнового электромагнитного излучения (гамма - излучения) ядрами атомов, в результате чего происходит вылет нуклонов (протонов и нейтронов) из ядер.

Многофотонный фотоэффект

В рассмотренных выше явлениях электрон получал энергию от одного фотона. Такие процессы называются однофотонными. С изобретением лазеров были получены недостижимые прежде мощности и плотности мощности световых пучков. Это позволило наблюдать, в частности многофотонный фотоэффект, в ходе которого электрон, получает энергию не от одного, а от N фотонов $N = 2, 3, \ldots$. Формула Эйнштейна в этом случае выглядит

следующим образом:

$$Nh\nu = A_{вых}+T_{макс} \quad (4)$$

Очевидно, что при этом минимальная частота излучения, при которой наблюдается ФЭ, смещается в сторону более длинных волн (меньших частот), $\nu_{гр} = A_{вых}/(Nh)$. А поскольку вероятность сложного процесса эквивалентна произведению вероятностей составляющих процессов, то, фототок $I_п$ зависит от интенсивности J следующим образом: $I_н \sim J^N$

Возвращаясь к классическому ФЭ, видим, что, подставляя в уравнение Эйнштейна для ФЭ (2) экспериментально измеряемый задерживающий потенциал $U_з$ ($h\nu = A_{вых}+T_{макс}$ и $T_{макс} = eU_з$) и, беря конечные небольшие приращения левой и правой части, получаем формулу для определения постоянной Планка:

$$h = e\Delta U_з/\Delta\nu \quad (5)$$

где табличные значения заряда электрона $e = 1{,}602\cdot10^{-19}$ Кл, а постоянной Планка $h = 6{,}626\cdot10^{-34}$ Дж·с.

В данной лабораторной работе предлагается экспериментально проверить законы ФЭ и справедливость уравнения Эйнштейна, рассчитав на его основе постоянную Планка. Отметим, что попытки наблюдения фотона как частицы продолжаются практически до последнего времени [19].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Лабораторная установка

Для изучения законов ФЭ используется лабораторная установка, блок-схема которой приведена на рис. 6 а, и общий вид на рис. 6 б.

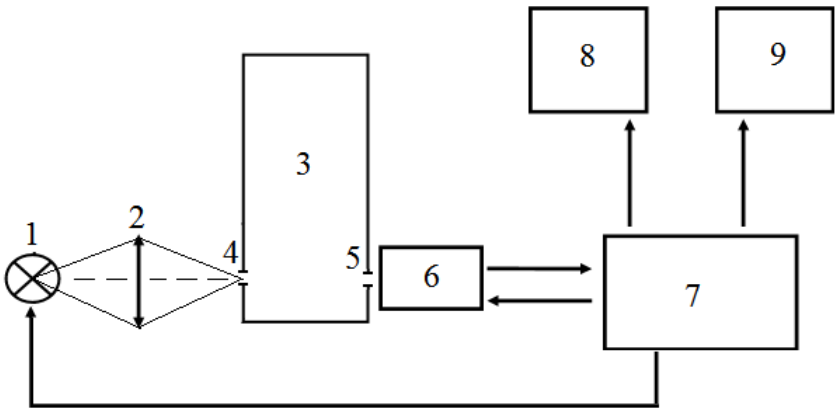

Рис. 6 а. Блок-схема лабораторной установки.

1 – источник излучения, галогеновая лампа; 2 – собирающая линза; 3 – дифракционный монохроматор МУМ-01; 4 - входная щель монохроматор; 5 – выходная щель монохроматора; 6 – блок фотоэлемента и усилителя; 7 – блоки питания фотоэлемента и излучателя; 8 – вольтметр, измеряющий падение напряжения на нагрузочном сопротивлении; 9 – вольтметр, измеряющий анодное напряжение на фотоэлементе.

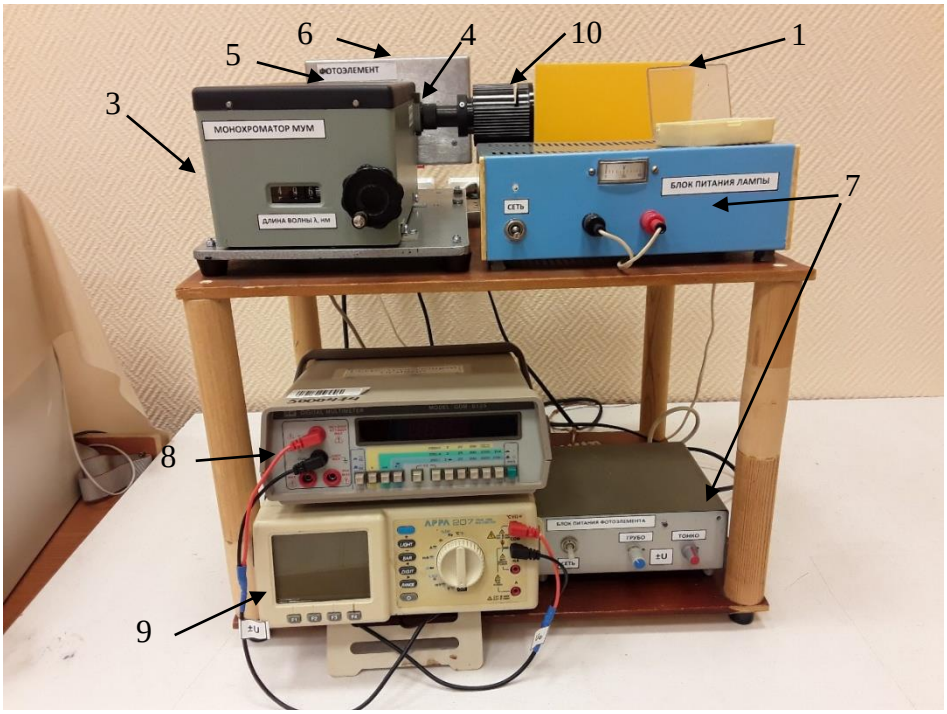

Рис. 6 б. Внешний вид установки.

Источником излучения является лампа накаливания с кварцевым баллоном (рис. 6 б.). Свет от лампы собирается на входной щели дифракционного монохроматора, а затем направляется на фотоэлемент с сурьмяно-цезиевым катодом — СЦВ-3. Ток, проходящий через анодную цепь

фотоэлемента, создаёт падение напряжения $U_ф$ на нагрузочном сопротивлении, которое регистрируется вольтметром 8, рис. 6 б. Величину фототока можно рассчитать по формуле:

$$I_ф, \text{ мкА} = 0{,}267 \cdot U_ф, \text{ В} \qquad (6)$$

Для регулирования величины и полярности анодного напряжения используется блок питания фотоэлемента. Для измерения анодного напряжение $U_а$ служит вольтметр 9 (рис. 6 б). Изменение интенсивности света производится введением нейтральных светофильтров на в блоке 10 на входе монохроматора.

2.3. Действия при включении установки

1. Изучить блок-схему лабораторной установки по рисунку 6 а и её реализацию (рис. 6 б).
2. Уяснить принцип действия установки.
3. Определить пределы измерений монохроматора $\lambda_{макс}$ и $\lambda_{мин}$. Определить отсчётную погрешность измерения длины волны.
4. Включить блок питания фотоэлемента и усилителя 7, рис. 6 б.
5. Включить вольтметр анодного напряжения 8, (рис. 6 б) и вольтметр сигнала 9 (рис. 6 б). Дать им прогреться в течение 10 минут.
6. Определить отсчётную погрешность вольтметра, измеряющего сигнал на самом чувствительном пределе.
7. Определить отсчётную погрешность вольтметра, измеряющего анодное напряжение.
8. Занести характеристики всех приборов в протокол измерений.
9. Включить блок питания излучателя 7 (рис. 6 б) при этом лампа должна загореться.
10. Шторкой в блоке нейтральных фильтров 10 (рис. 6 б) перекрыть доступ света от лампы на фотоэлемент.
11. Ручками грубо и тонко на блоке питания фотоэлемента установить значение -1,0 В на вольтметре управляющего напряжения.

12. По показаниям вольтметра, измеряющего падение напряжения на нагрузочном сопротивлении, измерить значение темнового сигнала. По результатам измерений с шагом 30 с заполнить табл. 2.

Таблица 2.

Определение случайной погрешности при измерении темнового сигнала

t, с	$U_т$, В
0 30 60 ... 270	___ ___ ___ ... ___

13. Вычислить среднее арифметическое значение темнового сигнала $\langle U_{случ} \rangle$, среднее квадратическое отклонение от среднего арифметического $\Delta U_{случ}$. Записать результат в виде: $U_{темн} = \langle U_{темн} \rangle \pm \Delta U_{темн}$.
14. Вычислить итоговую погрешность в определении темнового сигнала по формуле $\Delta U_{темн} = \sqrt{(\Delta U_{случ})^2 + (\Delta U_{отсч})^2}$.
15. Записать результат в виде: $U_{темн} = \langle U_{темн} \rangle \pm \Delta U_{темн}$.
16. На монохроматоре установить длину волны 500 нм.
17. Установить анодное напряжение +8 В.
18. Установить на вольтметре сигнала предел измерения V.
19. Убрать шторку в блоке нейтральных фильтров из хода лучей.
20. Если показания вольтметра сигнала резко возросли – установка готова к работе.

2.4. Измерение спектральной характеристики - зависимости сигнала от длины волны

1. Установить входную щель монохроматора 3 мм.
2. Установить анодное напряжение +8 В.
3. Вращая ручку монохроматора установить длину волны λ = 300 нм.

4. Измерить зависимость сигнала от длины волны $U_ф(\lambda)$ в интервале длин волн от 300 ÷700 нм, с шагом 10 нм.
5. Определить отсчётные погрешности $\Delta U_ф$ на всех использованных пределах измерения вольтметра сигнала.
6. Записать данные в табл. 3.

Таблица 3.

Спектральная характеристика фототока

λ, нм	$U_ф$, мВ	$\Delta U_ф$, мВ
300 ... 700	___ ... ___	___ ... ___

7. По данным табл. 3 построить график спектральной характеристики $U_ф(\lambda)$ с указанием на нём погрешностей по длине волны и сигналу. Определить длину волны, соответствующую «красной» границе фотоэффекта $\lambda_{гр}$. Сравнить $\lambda_{гр}$ с табличной величиной для сурьмяно-цезиевого катода, указанной в теоретической части методической разработки

2.5. Вольтамперная характеристика фотоэлемента при разных интенсивностях падающего света

1. На монохроматоре установить длину волны $\lambda_{макс}$, соответствующее максимуму спектральной характеристики.
2. При неизменной длине волны, $\lambda = \lambda_{макс}$, измерить семейство ВАХ фотоэлемента при пяти освещенностях фотокатода.
3. Прямое напряжение устанавливать от 0 В до +12 В с шагом 0,5 В, обратное напряжение от 0 до -1,0 В, с шагом 0,1 В. Данные занести в табл. 4.

Таблица 4.

ВАХ фотоэлемента для разных освещённостей, λ =_____нм

	$U_ф$, В				
U, В	$J_1 = J_{макс}$	$J_2 = J_{макс}\cdot 0{,}74$	$J_3 = J_{макс}\cdot 0{,}40$	$J_4 = J_{макс}\cdot 0{,}30$	$J_5 = J_{макс}\cdot 0{,}16$

-1,5 ... 0 ... +12					

Значение J_4 обеспечить введением двух последовательных фильтров J_2 и J_3 ($J_4 = J_2 \cdot J_3 = 0{,}74 \cdot 0{,}40\ J_{макс} \approx 0{,}3\ J_{макс}$).

4. Построить отдельно графики для областей прямого и обратного напряжения.
5. Определить значения запирающего напряжения для каждой освещённости фотокатода и погрешности для него по методике, указанной на рис. 7.

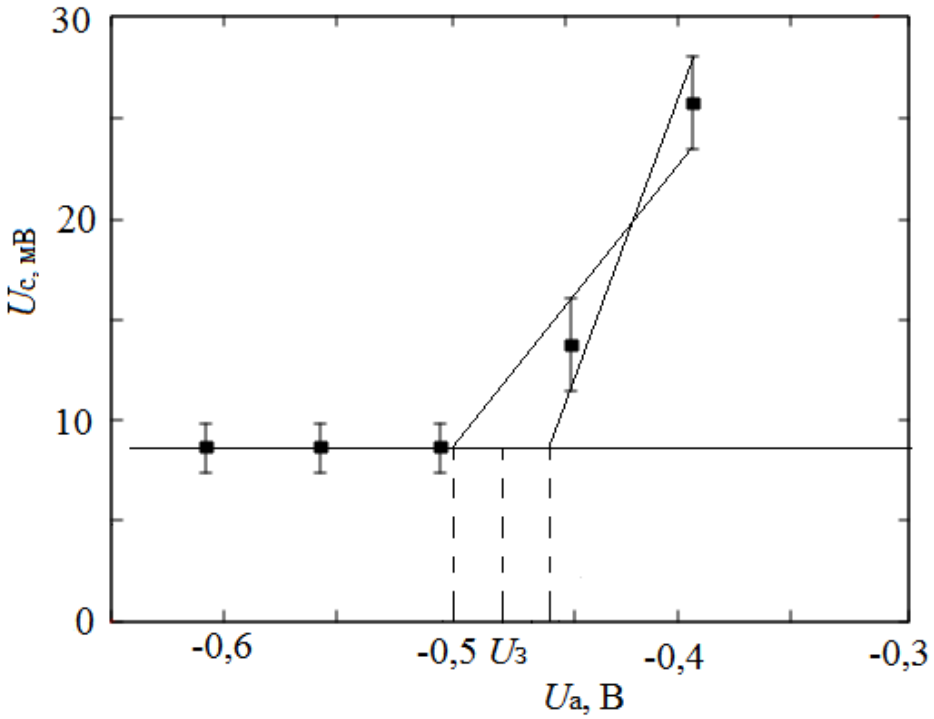

Рис.7. Методика определения запирающего напряжения и его погрешности.

6. По экспериментальным данным табл. 3 на одном графике построить пять ВАХ в области положительных анодных напряжений при интенсивностях освещения фотоэлемента: J_1, J_2, J_3, J_4, J_5. Сигнал насыщения измерять при одном для всех освещённостей анодном напряжении U^*, при котором с точностью до погрешности сигнал постоянен или имеет место линейный

рост сигнала с напряжением. Зафиксировать значения фотонапряжений $U_ф$ при пяти разных интенсивностях света. Данные занести в таблицу 5.

Таблица 5.

ВАХ в положительной области анодных напряжений U = ___В; λ = ____нм.

$U_а$, В	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
0 ... 12					

7. По данным табл. 5 построить световую характеристику фотоэлемента – график зависимости $U_ф$ от интенсивности J при фиксированном U*.

2.6. Обратная ветвь вольтамперной характеристики фотоэлемента для разных длин волн

1. Установить входную щель монохроматора, равную 3 мм.
2. Установить на монохроматоре длину волны λ = 440 нм. Измерить ВАХ $U_ф(U_a)$ в диапазоне от 0 до -1,0 В с шагом 0,1 В.
3. Установить на монохроматоре длину волны λ = 460 нм. Измерить ВАХ $U_ф(U_a)$ в диапазоне от 0 до -1,0 В с шагом 0,1 В. И так далее до длины волны 600 нм. Данные занести в таблицу 6.

Таблица 6

ВАХ при отрицательных анодных потенциалах для разных длин волн

U_a, В	$U_ф$, В								
	440, нм	460, нм	480, нм	500, нм	520, нм	540, нм	560, нм	580, нм	600, нм
0									
-0,1									
-0,2									
-0,3									
-0,4									
-0,5									
-0,6									
-0,7									
-0,8									
-0,9									
-1									

4. По данным табл. 6, найти запирающие напряжения и погрешности их определения. Данные занести в таблицу 7.

Таблица 7.

Зависимость $U_з$ от частоты

λ, нм	ν, 10^{14}Гц...	$U_з$, В	Δ $U_з$, В
440			
...	...	...	...
600			

2.7. Изучение зависимости $T_{макс}$ от частоты. Определение постоянной Планка

1. Построить график зависимости запирающего напряжения от частоты. Найти постоянную Планка из соотношения (5) теоретической части. Определить

погрешность полученного результата. Записать полученное значение постоянной Планка в виде:

$$h = \langle h \rangle \pm \Delta h.$$

2. Сравнить полученное значение с табличным.
3. Сравнить полученные результаты всех измерений с известными законами фотоэффекта. По каждому пункту сделать обоснованные физические выводы.

2.8. Оформление отчета

1. Отчет оформляется в соответствии с общими требованиями к отчетам по лабораторным работам по атомной физике.

Отчет выполняется от руки.

Отчет должен содержать:

а) цель работы

б) краткую теоретическую часть, с основными необходимыми в работе формулами и графиками

в) блок схему установки

г) протоколы экспериментальных результатов, подписанные преподавателем.

д) результаты обработки экспериментальных данных: таблицы, графики, построенные от руки на миллиметровке, расчеты физических величин в соответствии с целью работы

е) выводы по работе.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое физическое явление называется внешним фотоэффектом?
2. Нарисуйте принципиальную схему измерительной установки, расскажите принцип её действия.
3. Объясните особенности вольт-амперной характеристики ФЭ.
4. Сформулируйте законы ФЭ.

5. Можно ли объяснить законы ФЭ в рамках волновой природы света?
6. В какой спектральной области лежит «красная» граница ФЭ?
7. Каков физический смысл работы выхода?
8. Поясните методику определения максимальной кинетической энергии электронов.
9. Применением какого общего физического закона является уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
10. Выполняется ли закон сохранения импульса при ФЭ?
11. Чем отличаются возможные энергетические состояния электронов в металлах и полупроводниках?
12. Как сказывается наличие контактной разности потенциалов на определение постоянной Планка?
13. Что такое отсчётная погрешность?
14. Как вычисляется среднеквадратическое отклонение случайной величины от среднего арифметического?
15. Что является диспергирующим элементом в монохроматоре МУМ-01?
16. Какие светофильтры называются нейтральными?
17. Какие погрешности называются систематическим, с чем они могут быть связаны в Вашем эксперименте?
18. Чем отличаются внутренний и внешний фотоэффекты?
19. Как объясняется наличие тока насыщения при наблюдении внешнего фотоэффекта?
20. Почему в методическом пособии для максимальной кинетической энергия электронов используется обозначение $T_{\max}$, а не $m_0V^2/2$?
21. Как Вы понимаете термин «плотность мощности»?

4. ЛИТЕРАТУРА

1. **Child C. D.** Discharge From Hot CaO / C. D. Child. // Phys. Rev. (Series I). — 1911. — Vol. 32, №5. — pp. 492—511.
2. **Langmuir I**. The Effect of Space Charge and Residual Gases on Thermionic Currents in High Vacuum /I. Langmuir // Phys. Rev. — 1913. — Vol. 2, Iss. 6. — pp. 450—486.
3. **Van der Bijl, H.** The Thermionic Vacuum Tube-Physics and Electronics / H. Van der Bijl — McGraw-Hill, 1920.
4. **Reich, Herbert J.** Theory and applications of electron tubes / H.J. Reich — 2-nd ed. — McGraw-Hill Book Company, Inc, 1944. — 686 p.
5. **Nottingham, W.** Thermionic Emission / W. Nottingham — Massachussets Institute of Technology, 1956. — 178 p.
6. **Hertz H.** Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung / H. Hertz // Ann. Phys. —1887. — Vol. 267. — Iss. 8. — pp. 983-1000.
7. **Planck M.** On an Improvement of Wien's Equation for the Spectrum / M. Planck // Verh. D. Physik. Ges. — 1900. — Vol. 2. — pp. 202-205.
8. **Planck M.** On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum / M. Plank // Verhandl. Dtsch. Phys. Ges. — 1900. — Vol. 2. — pp. 237-245.
9. **Максвелл Дж. К.** Избранные сочинения по теории электромагнитного поля / Дж. К. Максвелл.— : ГИТТЛ, 1952. — С. 349. — 687 с.
10. **Максвелл Дж. К.** Избранные сочинения по теории электромагнитного поля./ Дж. К. Максвелл. — : ГИТТЛ, 1952. — С. 632. — 687 с.
11. **Максвелл Дж. К**. О фарадеевых силовых линиях / Дж. К. Максвелл // Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. — : ГИТТЛ, 1952. — С. 11—88. — 687 с.

12. **Einstein A.** Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt / A. Einstein // Ann. Phys. — 1905. — Vol. 17. — pp. 132-148.
13. **Милликэн Р. А.** Электрон и световой квант с экспериментальной точки зрения / Р.А. Милликэн // УФН. — 1926. — Vol. 6. —С. 7–20.
14. **Smith W.** Effect of Light on Selenium during the passage of an Electric Current / W. Smith // Nature — 1873. — Vol. 7. —pp. 303-315.
15. **Гамаюнов Ю.Г.** Контактная разность потенциалов / Ю.Г. Гамаюнов. Саратов: Изд. центр Наука, 2007. 1982. С.3-19.
16. Мир электроники. Датчики. Справочное пособие. Под общ. ред. Шарапова В. М., Полищука Е. С. Техносфера, М. 2012. – с.623.
17. **Хлебников Н. С.** Сурьмяно-цезиевые катоды и фотоэлементы / Н.С. Хлебников // УФН. — 1943. —Т. XXVI, вып.1. —С. 87–106.
18. **Блантер, С.Г.** Радиотехника и электроника / С.Г. Блантер. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 416 с.
19. **Grangier P.** Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences / P. Grangier, G. Roger, A. Aspect // Europhysics Letters. — 1986. — Vol. 1. —pp. 173-179.

Электронный текстовый ресурс

Скорняков Лев Геннадьевич
Демин Андрей Вячеславович
Денисова Ольга Владимировна

ЗАКОНЫ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Подготовка к публикации *Л.Г. Скорняков*
Компьютерный набор *О.В. Денисова*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ
Разрешено к публикации 22.06.2019
Электронный формат – pdf
Объем 1,0 уч.-изд. л.

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
Информационный портал УрФУ
www.study.urfu.ru