

## Лабораторная работа 3.2

В. Ф. Климкин

**Внешний фотоэлектрический эффект****Введение**

При взаимодействии электромагнитного излучения с материальной средой, состоящей из атомов, может происходить перераспределение электронов по энергетическим состояниям, в ряде случаев приводящее к возникновению свободных электронов с относительно высокой кинетической энергией.

Облучение вещества высокоэнергетическими гамма-квантами сопровождается образованием *пары позитрон–электрон*. Образование пары происходит преимущественно в поле ядер тяжелых элементов. Минимальная энергия фотона, способного образовать пару позитрон–электрон, определяется массами покоя  $m_0$  электрона и позитрона и энергией отдачи ядра (кинетической энергией, приобретаемой ядром) и равна  $E_{\text{пир}} \approx 2m_0c^2 + \frac{8M_\beta m_0^2}{(M_\beta + m_0)^2} c^2$ . Так как масса ядра

$M_\beta \gg m_0$ , то  $E_{\text{пир}} \approx 2m_0c^2$  ( $m_0c^2 \approx 0,51$  МэВ – энергия, соответствующая массе покоя электрона (позитрона)). Избыток энергии фотона идет на сообщение кинетической энергии позитрону и электрону. Если образование пары происходит в кулоновском поле электронов, то  $E_{\text{пир}} = 4m_0c^2$ . Вероятность этого процесса мала по сравнению с рождением пары в поле ядер.

В случае *эффекта Комптона* при упругом столкновении фотона со свободным электроном часть его энергии передается электрону и возникает рассеянный фотон с меньшей частотой. Наиболее быстрые электроны вылетают вперед, по направлению первичного фотона, и им соответствуют рассеянные назад фотоны с наибольшим изменением частоты. Практически наблюдение ведется при освещении мишеней жестким рентгеновским излучением ( $\lambda \sim 0,2$  Å, энергия фотона  $\sim 6 \cdot 10^4$  эВ). Для легких атомов и внешних электронов тяжелых атомов энергией связи электрона ( $\sim 4\text{--}25$  эВ) можно пренебречь по сравнению с энергией фотона рентгеновских лучей. Для не слишком жестких рентгеновских лучей электрон получает сравнительно малую часть всей энергии фотона.

*Фотоэлектрический эффект* возникает при столкновении фотона со связанным электроном (электроны в индивидуальных атомах, твердых телах и жидкостях). При этом фотон поглощается, и электрон приобретает энергию, близкую к энергии самого фотона. Энергия фотонов в видимой и примыкающей к ней ультрафиолетовой области спектра сравнима с работой выхода электронов проводимости из чистых металлов (несколько электрон-вольт). В зависимости от того, остаются ли эти электроны в данной среде или выходят из нее через границу раздела с другой средой, различают фотоэффект *внутренний* и *внешний*.

*Внутренний* фотоэффект хорошо заметен в конденсированных средах и газах, если в них присутствует мало электронов, обеспечивающих электропроводность. В случае с газами для обозначения данного явления используется термин *фотоионизация*. В качестве примера внутреннего фотоэффекта можно назвать понижение электрического сопротивления полупроводника при падении

на его поверхность светового потока. *Фоторезистивный эффект (фотопроводимость)* впервые, в 1873 г., наблюдал У. Смит (США) в селене. Внутренний фотоэффект положен в основу работы обширного класса полупроводниковых приемников светового излучения. К ним относятся фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.

*Внешний фотоэффект* представляет собой испускание электронов, которое происходит в вакуум или другую разреженную среду при падении светового потока на поверхность твердого тела или жидкости. Внешний фотоэффект был обнаружен в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем. Экспериментальные исследования этого процесса проведены А. Г. Столетовым, В. Гальваксом, П. Ленардом и др. Теоретическое объяснение законов фотоэффекта дал А. Эйнштейн (1905 г.). За работы в области теоретической физики и, в частности, за открытие закона фотоэлектрического эффекта А. Эйнштейну в 1921 г. была присуждена Нобелевская премия.

### **Закономерности внешнего фотоэлектрического эффекта**

При описании внешнего фотоэффекта используется следующая терминология. Свободные электроны, вышедшие под действием светового излучения из кристаллической решетки твердого тела в вакуум, называют *фотоэлектронами*, а электрод, из которого они выходят, – *фотокатодом*. Если рядом с фотокатодом в вакууме поместить электрод, к которому приложить положительный относительно фотокатода потенциал, то этот электрод будет собирать фотоэлектроны и во внешней цепи потечет электрический ток. Положительный электрод получил название *анода*, а вакуумный прибор, состоящий из двух электродов, – *вакуумного фотодиода*, или *фотоэлемента*. Существуют и более сложные вакуумные приборы, использующие фотокатод в качестве источника свободных электронов. К ним относятся фототриоды, фотоэлектронные коммутаторы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и др.

Экспериментальные исследования позволили установить основные закономерности, которым подчиняется внешний фотоэлектрический эффект в области слабых световых потоков [1].

1. При фиксированной частоте излучения ( $\omega = \text{const}$ ) величина тока фотоэлектронов на анод в режиме насыщения (т. е. когда все эмитируемые электроны достигают анода) прямо пропорциональна интенсивности падающего на поверхность катода света (закон Столетова).

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от плотности потока излучения, т. е. от амплитуды электрического вектора световой волны (П. Ленард, 1902) [2]. Она линейно зависит от частоты света.

3. Для каждого материала, из которого сделан фотокатод, существует длина волны излучения  $\lambda_0$ , при превышении которой фотоэмиссия электронов полностью прекращается. Эту длину волны называют *красной границей* фотоэффекта, а соответствующую ей частоту  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$  – *граничной частотой*.

### **Физический механизм внешнего фотоэлектрического эффекта**

Для объяснения явления внешнего фотоэффекта А. Эйнштейн предположил, что поток энергии в пучке монохроматического света состоит из дискретных порций, называемых *квантами*, или *фотонами* (корпускулярная теория света). Энергия фотона для света с частотой  $\omega$  равна  $\hbar\omega$ , где

$\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка. При столкновении фотона со связанным электроном последний может полностью поглотить всю энергию фотона. Если энергия электрона достаточно велика, то он может преодолеть силы связи, удерживающие его в металле, и выйти из вещества. Закон сохранения энергии для процесса столкновения двух частиц можно записать в виде

$$\hbar \omega = \frac{1}{2} m_0 V_{\max}^2 + \Phi. \quad (1)$$

Здесь  $V_{\max}$  – максимальная скорость электрона непосредственно после выхода его из металла,  $\Phi$  – работа выхода. Соотношение (1) называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*. Оно позволяет объяснить особенности внешнего фотоэлектрического эффекта.

Число фотонов, падающих в единицу времени на нормальную единичную площадку поверхности фотокатода ( $N_f$ ), линейно зависит от интенсивности света ( $I$ ):

$$N_f = I / \hbar \omega \quad (2)$$

Число вышедших в вакуум в единицу времени электронов  $N_e$  прямо пропорционально плотности потока фотонов:

$$N_e = \gamma N_f \quad (3)$$

из чего следует закон Столетова для фотоэффекта. Действительно, ток фотоэлектронов в режиме, когда они все собираются анодом фотоэлемента, выражается в следующем виде:  $I_n = e N_e$ . С учетом выражений (2) и (3) получаем

$$I_n = \frac{e}{\hbar \omega} \gamma I = (\text{const}) \cdot I.$$

Поглотившие кванты излучения электроны выходят из кристаллической решетки в вакуум с различными значениями кинетической энергии. Это связано с тем, что внутри твердого тела электроны находятся на различных энергетических уровнях в соответствии с квантовой статистикой Ферми–Дирака. Кроме того, возникающие фотоэлектроны случайным образом теряют энергию при различных взаимодействиях. Минимумом энергетических затрат при выходе фотоэлектрона из металла в вакуум является энергия, которая необходима электрону, находящемуся на самом верхнем уровне в зоне проводимости, для преодоления потенциального барьера на границе металл–вакуум (рис. 1, а). Из соотношения (1) непосредственно следует, что максимальная кинетическая энергия, с которой фотоэлектрон покидает твердое тело, линейно растет с частотой света (энергией фотонов) и не зависит от его интенсивности (числа фотонов).

Уравнение Эйнштейна позволяет определить красную границу фотоэффекта. Действительно, кинетическая энергия электрона лишь тогда будет больше нуля, когда энергия фотона  $\hbar \omega$  превышает работу выхода электрона из металла  $\Phi$ . Отсюда следует, что для каждого вещества существует граничная частота  $\omega_0 = \Phi / \hbar$ , такая, что при  $\omega < \omega_0$  фотон уже не сможет обеспечить выход электрона в свободное пространство.

Таким образом, внешний фотоэлектрический эффект можно объяснить в рамках электронной теории строения твердого тела и квантовой теории электромагнитного излучения. Это явление – результат трех последовательно протекающих процессов: 1) поглощение фотона с появлением электрона с относительно высокой энергией; 2) движение этого электрона к поверхности раздела

двух сред, в ходе которого часть энергии электрона может рассеяться; 3) выход электрона в другую среду через поверхность раздела (см. рис. 1).

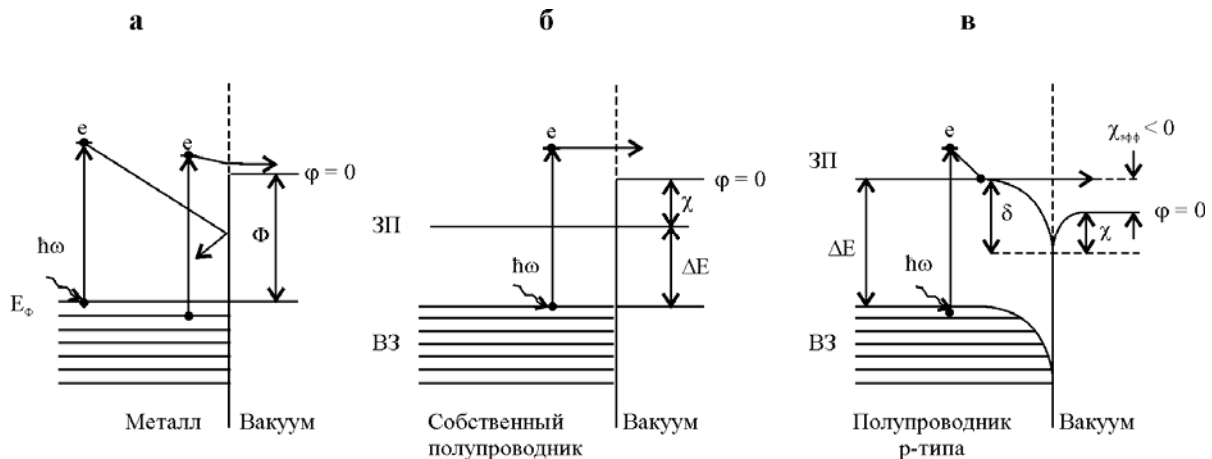


Рис. 1. Потенциальная энергия электронов на границе «твёрдое тело–вакуум» (относительно энергии электрона в вакууме в отсутствие внешних полей и при нулевой скорости движения): а – для металла  $E_F$  – энергия Ферми,  $\Phi$  – работа выхода электрона из металла; б – для собственного полупроводника ВЗ – валентная зона, ЗП – зона проводимости,  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны,  $\chi$  – энергия дна зоны проводимости относительно энергии электрона в вакууме; в – для полупроводника р-типа с отрицательным электронным средством ( $\chi_{эфф} < 0$ ).

Так как при температуре твёрдого тела, отличной от абсолютного нуля, энергетическое распределение электронов, находящихся в кристаллической решетке, не имеет строго заданной границы, то картина на рис. 1, а соответствует случаю нулевой температуры.

Следует отметить, что для комнатных температур размазывание распределения Ферми–Дирака мало (порядка  $kT = 0,025$  эВ, где  $k$  – постоянная Больцмана). Работа выхода  $\Phi$  сильно зависит от состояния поверхности фотокатода (ее чистоты и шероховатости, количества адсорбированного газа, наличия пленки посторонних веществ и химических соединений), его температуры, ориентации грани кристалла, напряженности приложенного электрического поля (эффект Шоттки [3]). Для большинства металлов работа выхода сравнительно велика  $\Phi \geq 2$  эВ). Поэтому фотоэффект для них может наблюдаться лишь в коротковолновой части видимой области либо только в ультрафиолетовой области. Напомним, что видимая область излучения, т. е. электромагнитное излучение, которое воспринимает глаз человека, занимает интервал длин волн от 400 до 760 нм, что соответствует частотам  $\omega \sim 4,7 \cdot 10^{15} - 2,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  и энергиям квантов от 3,1 до 1,6 эВ.

Количественной характеристикой эмиссионных свойств фотокатода является *квантовый выход*  $\gamma$  – число вылетевших из металла электронов в расчете на один падающий фотон. При энергии фотонов, слабо превышающей работу выхода (т. е. вблизи порога фотоэффекта), для большинства металлов квантовый выход не превышает  $10^{-4}$  электрон/фотон. Малость  $\gamma$  связана с тем, что свет проникает в металл на сравнительно большую глубину ( $\sim 10^{-5}$  см), где он в основном и поглощается. Возникающие на этой глубине фотоэлектроны при движении к поверхности тела интенсивно взаимодействуют с электронами проводимости, которых в металле достаточно много, и быстро рассеивают свою энергию. Энергия, достаточная для преодоления потенциального барьера, остается лишь у тех фотоэлектронов, которые были образованы в непосредственной близости от поверхности

(на глубине, не превышающей  $10^{-7}$  см). Кроме того, поверхность металлов сильно отражает видимое и ультрафиолетовое излучение.

В полупроводниках и диэлектриках порог фотоэлектрического эффекта выражается в следующем виде [4]:

$$\hbar\omega_0 = \Delta E + \chi,$$

где  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны;  $\chi$  – энергия дна зоны проводимости относительно энергии электрона в вакууме (энергия сродства к электрону), которая является высотой потенциального барьера для электронов, находящихся в зоне проводимости (см. рис. 1, б). Фотоэлектроны, образовавшиеся в полупроводнике, при движении к поверхности также теряют часть своей энергии, но в отличие от металлов это происходит не на электронах проводимости, а при выбивании новых электронов из валентной зоны (ударная ионизация) и на тепловых колебаниях кристаллической решетки (фононах).

Резкое увеличение квантового выхода и сдвиг порога фотоэффекта в видимую область спектра из ультрафиолетовой достигаются покрытием поверхности металлов и полупроводников слоями электроположительных атомов щелочных металлов с низкой энергией ионизации (Cs, Rb, K, Na) или молекул с большим дипольным моментом (BaO, CsF, Cs<sub>2</sub>O). Это приводит к образованию двойного электрического слоя, ускоряющего электроны, и снижению потенциального барьера.

В случае сильно легированного полупроводника р-типа уровень Ферми в объеме расположен вблизи верхней границы валентной зоны. Обрыв кристаллической решетки вблизи поверхности обуславливает появление в запрещенной зоне поверхностных уровней, заполненных электронами [4, 5]. Уровень Ферми на поверхности располагается вблизи середины запрещенной зоны (в центре зоны высокой плотности поверхностных уровней). Равновесие системы (установление единого уровня Ферми) обеспечивается переходом части электронов с поверхностных уровней на расположенные ниже объемные акцепторные уровни. Уход электронов с поверхности заряжает ее положительно и приводит к образованию отрицательного объемного заряда в приповерхностном слое полупроводника. Вследствие этого энергетические уровни электронов изгибаются вниз в узкой приповерхностной области (см. рис. 1, в). Адсорбция электроположительных атомов на поверхность сильно легированного дырочного полупроводника увеличивает изгиб зон. Нижняя граница зоны проводимости в объеме полупроводника может оказаться на уровне энергии электрона в вакууме или даже выше вакуумного уровня. Эффективное электронное сродство в объеме  $\chi_{\text{эфф}}$ , определяемое разностью между электронным сродством на поверхности  $\chi$  и величиной изгиба зон  $\delta$ , станет равным нулю или отрицательным (ОЭС) [6]. При этом порог фотоэффекта для электронов, возбуждаемых в объеме полупроводника, совпадает с шириной запрещенной зоны, т. е. барьер, препятствующий их выходу в вакуум, отсутствует. Электроны могут принимать участие в фотоэмиссии, если даже они рассеют всю избыточную энергию и опустятся на самые низкие уровни зоны проводимости (термализация). Это обеспечивает эмиссию в вакуум электронов с большой глубины ( $\sim 10^{-4}$  см), и квантовый выход может достигать нескольких десятков процентов. Фотокатод с нулевым электронным сродством был разработан в 1965 г.

Для фотокатодов из щелочных металлов и их сплавов наблюдается *спектральная селективность фотоэффекта* – повышенный квантовый выход в определенной, хотя и довольно широкой, порядка  $1000 \text{ \AA}$ , области спектра. Начиная с красной границы кривая спектральной чувствительности

(зависимость фототока насыщения от длины волны падающего света при постоянных значениях его интенсивности) быстро возрастает и достигает максимума при некоторой длине волны. С дальнейшим ростом частоты чувствительность фотокатода падает вблизи края области поглощения. Фототок становится значительно больше, а спектральная селективность – особенно существенной, когда имеется составляющая вектора напряженности электрического поля световой волны, перпендикулярная к поверхности фотокатода (поляризационная селективность фотоэффекта или векториальный эффект). Этот эффект отчетливо выражен в случае достаточно гладких поверхностей. Объяснение селективности фотоэффекта дают теории, построенные на основе волновых представлений о свете.

Следует отметить, что при больших интенсивностях излучения (лазерные источники) в элементарном акте взаимодействия света с веществом могут поглощаться два или более фотонов (многофотонное поглощение) [7]. В этом случае фотоэлектрический эффект удастся наблюдать при энергии квантов света в несколько раз меньшей, чем работа выхода. Поэтому не существует строго определенной красной границы. В области излучения с большой энергией фотонов ( $\sim 10\text{--}20$  эВ) в результате поглощения одного фотона может произойти выход нескольких электронов (вследствие столкновительного возбуждения фотоэлектроном вторичных электронов). Поэтому в области больших световых потоков и энергий фотонов отмеченные выше закономерности внешнего фотоэлектрического эффекта нуждаются в уточнениях.

### Методика измерений

Уравнение Эйнштейна было подтверждено Р. А. Милликенем (1916 г.) в результате тщательно выполненных опытов [8].

Электроны, вылетающие из фотокатода под действием падающего света, обладают кинетической энергией и, достигая анода, создают во внешней замкнутой цепи ток. Если в этот момент между анодом и катодом создать электрическое поле, которое тормозит фотоэлектроны, то ток будет уменьшаться. Такое тормозящее поле создается путем прикладывания к аноду отрицательного напряжения, и этот метод задерживающего потенциала обычно используется для измерения максимальной кинетической энергии фотоэлектронов. Действительно, при увеличении абсолютного значения отрицательного потенциала на аноде  $U$  ток фотоэлектронов падает. При некотором значении  $U = U_s$  (потенциал запираения) даже самые быстрые фотоэлектроны не смогут достигнуть анода и ток в цепи прекращается. Таким образом, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов  $\frac{1}{2}m_0 V_{\max}^2$  связана с потенциалом запираения  $U_s$  соотношением:

$$\frac{1}{2}m_0 V_{\max}^2 = eU_s. \quad (4)$$

Для экспериментальной проверки закона Эйнштейна в лабораторной работе измеряется зависимость электронного тока в фотоэлементе от величины отрицательного задерживающего потенциала  $U$  на аноде. Полученная в эксперименте зависимость фототока от задерживающего потенциала, как правило, представляет собой кривую, плавно подходящую к оси абсцисс (рис. 2). Это

обусловлено разбросом вылетающих из фотокатода электронов по скоростям, что в значительной степени затрудняет получение точного значения запирающего потенциала  $U_z$ .

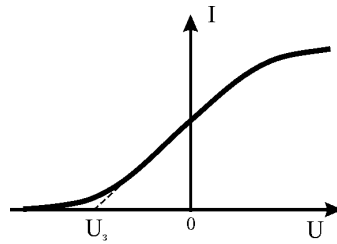


Рис. 2. Вольтамперная характеристика фотоэлемента

Для определения потенциала запираения  $U_z$  предлагается подход, заключающийся в экстраполяции линейного участка вольтамперной характеристики до пересечения с осью абсцисс, как это показано штриховой линией на рис. 2.

Из выражений (1) и (4) следует, что запирающий потенциал  $U_z$  находится в прямой пропорциональной зависимости от частоты света, падающего на фотоэлемент:

$$\hbar\omega = \Phi + eU_z, \text{ или } U_z = -\frac{\hbar\omega - \Phi}{|e|}.$$

Измеряя вольтамперную характеристику фотоэлемента при различных длинах волн падающего излучения и определяя по ним потенциал запираения  $U_z$ , можно проверить линейный характер зависимости потенциала запираения  $U_z$  от частоты излучения  $\omega$ .

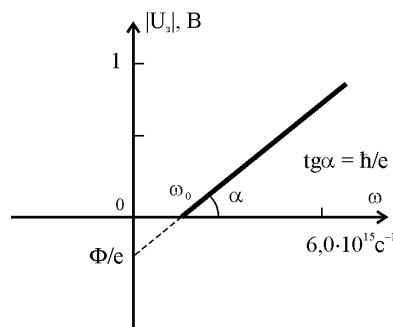


Рис. 3. Зависимость потенциала запираения  $U_z$  от частоты излучения

Если по результатам проведенных опытов построить график зависимости  $U_z$  от  $\omega$ , как показано на рис. 3, то тангенс угла наклона линейной зависимости  $U_z(\omega)$  к оси частот дает оценку постоянной Планка  $\hbar$ . Пересечение этой прямой с осью частот дает значение граничной частоты  $\omega_0$ , а отрезок, отсекаемый на оси  $U$ , определяет работу выхода электронов  $\Phi$  из данного материала.

### Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. Световой поток от источника (1) с помощью линзы (2) собирается на входной щели монохроматора (3), который выделяет из него узкий спектральный интервал. Полученное таким образом излучение падает на

катод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). В качестве источника света в работе используется в зависимости от задачи либо лампа накаливания, либо газоразрядная ртутная лампа. Поворачивая призму монохроматора путем вращения барабана, можно направлять на выходную щель излучение того или иного участка спектра источника света. Сопоставляя выделяемые монохроматором спектральные линии ртутной лампы с известным спектром ртути, можно произвести градуировку монохроматора, т. е. каждому делению барабана идентифицировать определенную длину волны. При получении вольтамперных характеристик фотоумножителя электронный ток регистрируется цифровым вольтметром с высоким входным сопротивлением, подключенным к аноду ФЭУ.

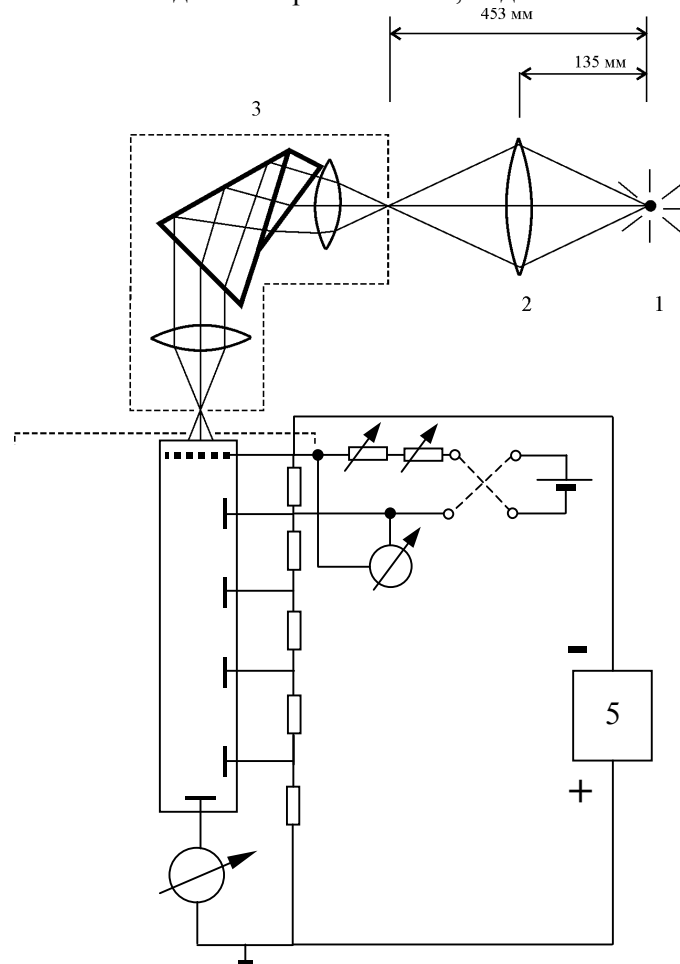


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – источник света; 2 – линза; 3 – монохроматор; 4-ФЭУ-84; 5 – блок питания ФЭУ

### Порядок выполнения работы

В данной работе используется фотоумножитель ФЭУ-84 с мультищелочным фотокатодом. Это химическое соединение ( $Na_2K Sb - Cs$ ), обладающее отчетливо выраженными полупроводниковыми свойствами [5]. Между фотокатодом ФЭУ и фокусирующим электродом (модулятором) подключен через делитель гальванический источник напряжения (батарейка). Это позволяет изменять напряжение между фотокатодом и модулятором в пределах  $\pm 9$  В. В зависимости от знака приложенного к фотокатоду напряжения, фотоэлектроны, выбитые квантами света из фотокатода, будут либо ускоряться и попадать на первый динод, либо тормозиться. При некотором



положительном потенциале на фотокатоде наблюдается полное запирающее ФЭУ, и прибор перестает реагировать на засветку.

Электроны, достигшие первого динода, выбивают из него вторичные электроны, ускоряющиеся в направлении следующего динода и т.д. У ФЭУ-84 таких динодов 14. Через резистивный делитель к ним приложено напряжение около 700 В, т.е. перепад потенциала между двумя соседними динодами составляет около 50 В. Коэффициент усиления тока за счет размножения электронов на динодах может достигать  $10^6$ .

### 1. Градуировка монохроматора «УМ-2» и снятие дисперсионной кривой

Убедитесь, что на ФЭУ не подано высокое напряжение. Осторожно снимите ФЭУ с оптического рельса. Уберите выходную щель монохроматора и вместо нее установите зрительную трубу. Схема устройства прибора показана на рис. 4. Вначале производится градуировка барабана монохроматора по известному спектру излучения ртутной лампы. Для этого необходимо:

- установить ртутную лампу перед входной щелью монохроматора;

**Внимание!** Нужно иметь в виду, что

- 1) переставлять лампу можно, только если она отключена от сети;
- 2) за кожух лампы нельзя брать руками, нужно переставлять лампу, держась за ее основание.

- зажечь ртутную лампу, включив последовательно тумблеры «Сеть» и «лампа ДРШ» на блоке питания лампы и нажав кнопку «Поджиг»;
- настроить изображение на резкость, добиваясь, чтобы в окуляре монохроматора были четко видны линии спектра и указатель (рис. 4);
- уменьшить ширину входной щели (рис. 4, 2) монохроматора так, чтобы получить изображения линий возможно более тонкими;
- вращая барабан поворота призмы (рис. 4, 6), последовательно совместите с указателем изображения красной, желтой, зеленой, темно-зеленой, голубой и фиолетовой линий спектра ртути (рис. 5) и запишите показания барабана  $m$  для каждой из этих линий. Отсчет читается против индекса, скользящего по спиральной канавке;

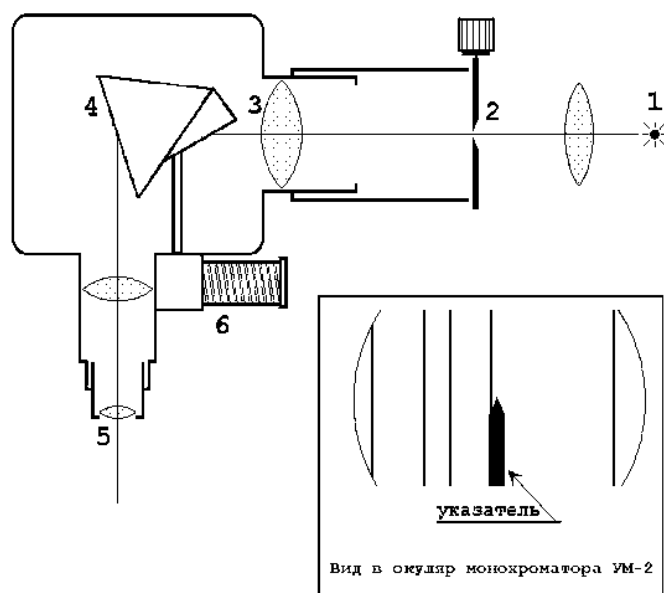


Рис. 4. Схема монохроматора УМ-2: 1 – источник света; 2 – входная щель; 3 – объектив коллиматора; 4 – дисперсионная призма; 5 – окуляр; 6 – барабан поворота призмы

В качестве реперных точек следует использовать спектральные линии со следующими длинами волн:

$\lambda = 6716 \text{ \AA}$  – темно-красная;

$\lambda = 6907 \text{ \AA}$  – темно-красная;

$\lambda = 6234,4 \text{ \AA}$  – ярко-красная;

$\lambda = 5790,6 \text{ \AA}$  } – желтый дублет;  
 $\lambda = 5769,6 \text{ \AA}$  }

$\lambda = 5460,7 \text{ \AA}$  – ярко-зеленая;

$\lambda = 4916,0 \text{ \AA}$  – темно-зеленая;

$\lambda = 4358,3 \text{ \AA}$  – ярко-синяя;

$\lambda = 4046,6 \text{ \AA}$  – ярко-фиолетовая.

Примерный вид спектра показан на рис. 5.

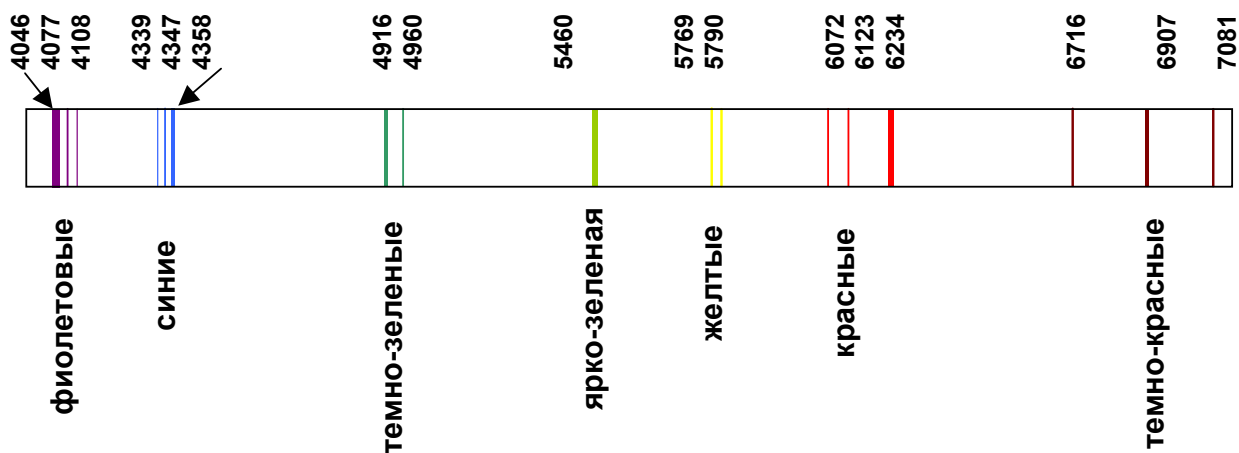


Рис. 5. Спектр ртути.

– Используя результаты измерений, постройте дисперсионную кривую  $\lambda(m)$ . Для построения кривой рекомендуем использовать файл Photoeffect.mcd, имеющийся на компьютерах в практикуме (C:\Спектры). Примерный вид дисперсионной кривой показан на рис. 6. Измеренные вами значения делений барабана могут значительно отличаться от показанных на рисунке, т.к. бегунок, скользящий в спиральной канавке барабана, переставляется.

*Следует иметь в виду, что если полученная вами дисперсионная кривая имеет заметные «горбы» или «впадины», то это означает, что измерения были проведены неаккуратно и их придется повторить.*

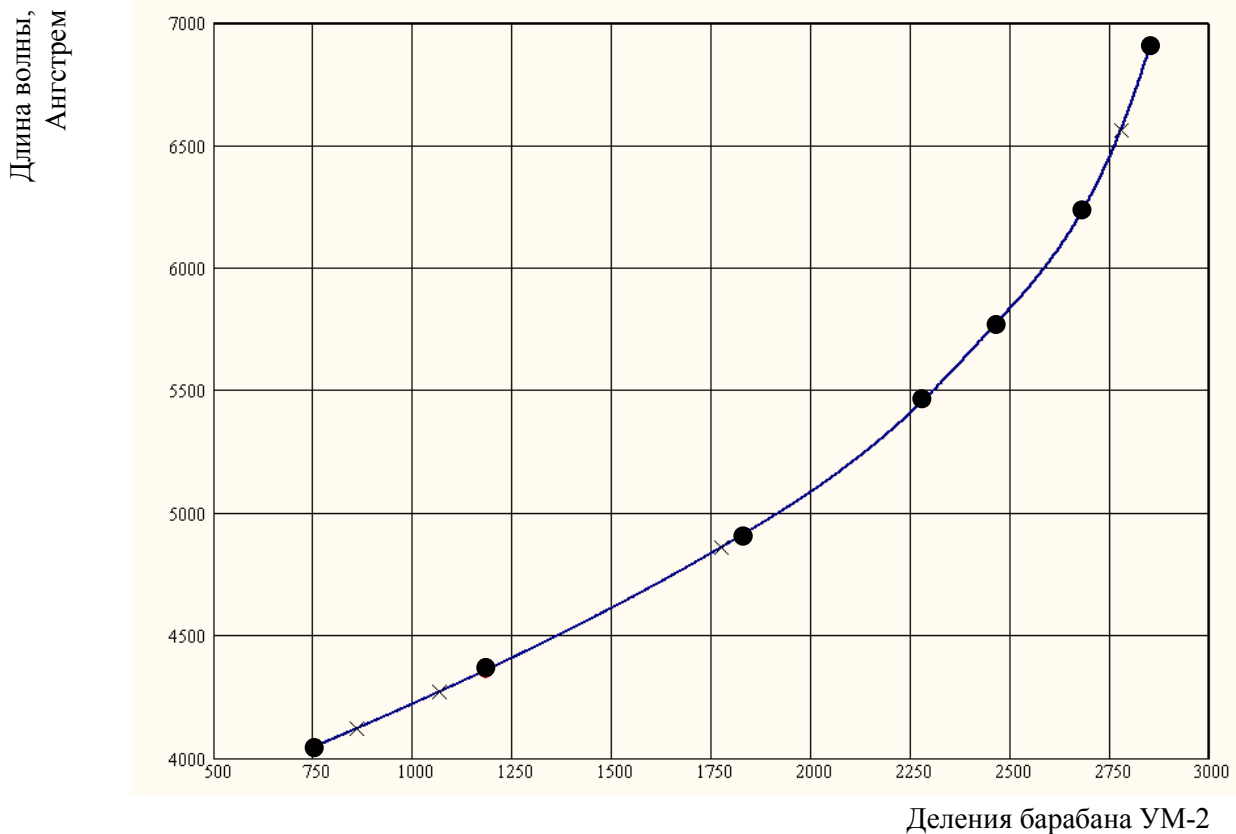


Рис. 6. Дисперсионная кривая спектрометра УМ-2. • - линии ртути

## 2. Регистрация вольтамперных характеристик фотоэлемента в режиме ускоряющего потенциала. Определение работы выхода катода методом запирающего потенциала и оценка постоянной Планка

Измерения вольтамперных характеристик фотоэлемента следует провести для нескольких различных участков спектра видимого излучения, используя лампу накаливания. В случае лампы накаливания обеспечивается высокая стабильность интенсивности излучения, но для нее характерна сравнительно большая ширина спектра излучения, поступающего на фотоэлемент.

Уберите с выхода монохроматора зрительную трубу. Выходную щель монохроматора закрепите в рабочем положении на прежнем месте. Измерения зависимости тока фотоэлемента от напряжения на аноде начинайте производить с длины волны, соответствующей фиолетовой линии ртути.

1. УБЕДИТЕСЬ, ЧТО ПИТАНИЕ НА ФЭУ НЕ ПОДАНО!
2. Включите тестер, измеряющий ускоряющий потенциал. УЧТИТЕ, ЧТО НА КЛЕММАХ ЭТОГО ПРИБОРА ПОТЕНЦИАЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНО «ЗЕМЛИ» – ОКОЛО 700 В! НИ В КОЕМ СЛУЧАЕ НЕ ОТСОЕДИНЯЙТЕ ОТ ТЕСТЕРА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КАБЕЛИ!!!
3. Включите блок питания ФЭУ. На нем должно быть выставлено напряжение в диапазоне 600 – 700 В, в чем можно убедиться, нажав кнопку на лицевой панели прибора. Если значение напряжения существенно отличается от упомянутого, то обратитесь к преподавателю.
4. Включите цифровой вольтметр, регистрирующий сигнал ФЭУ.

5. Установите на монохроматоре длину волны  $4050 \text{ \AA}$ , используя построенную дисперсионную кривую.
6. Запишите значение показаний вольтметра  $U_0$  при закрытом затворе монохроматора. Рукоятка, расположенная за входной щелью монохроматора, управляет движением затвора.
7. Ручками «Грубо» и «Точно» установите максимальное ускоряющее напряжение ( $\sim 9 \text{ В}$ ), измеряя его при помощи тестера.
8. Подберите интенсивность светового потока изменением ширины входной и выходной щелей монохроматора (цена деления отсчетных устройств  $0,01 \text{ мм}$ ) так, чтобы *максимальное значение сигнала с фотоумножителя не превышало  $10 \text{ В}$ . Этому ограничению следует придерживаться при измерениях на всех длинах волн!* Рекомендуем не раскрывать входную щель более  $0,5 \text{ мм}$ .
9. Измерьте величину сигнала, выставляя на источнике ускоряющее напряжение через  $1 \text{ В}$  от  $5 \text{ В}$  до  $2 \text{ В}$  и с шагом  $0,3 \text{ В}$  до  $-2 \text{ В}$ . Изменение полярности ускоряющего напряжения производится переключателем на лицевой панели блока. Всего вы должны произвести  $15$  измерений. *Шаг изменения напряжения в диапазоне  $-2..2 \text{ В}$  не должен превышать  $0,3 \text{ В}$ .*
10. Снимите вольтамперные характеристики для следующих длин волн:  $4050, 4400, 4900, 5500, 5800, 6200, 6900 \text{ \AA}$ . Для установки на монохроматоре нужной длины волны используйте построенную дисперсионную кривую. Записывайте показания барабана, при которых производите измерения.
11. По результатам измерений постройте графики зависимости тока от напряжения, используя файл Photoeffect.mcd. Следуйте инструкциям, имеющимся в файле.
12. Постройте график зависимости запирающего потенциала от частоты излучения  $U_s(\omega)$ .
13. По построенной зависимости  $U_s(\omega)$  определите работу выхода  $\Phi$  и граничную частоту  $\omega_0$ . С целью проверки надежности полученных результатов определите постоянную Планка.
14. Оцените погрешности измерений.

### 3. Проверка закона Столетова

Данное задание выполняется с лампой накаливания, так как ее спектральная плотность излучения относительно слабо изменяется в видимой области, и поэтому интенсивность светового потока, падающего на фотоэлемент, оказывается пропорциональной ширине выходной щели монохроматора. Ширину входной щели монохроматора установите примерно  $0,3\text{--}0,5 \text{ мм}$ , а выходную щель следует варьировать в пределах от  $0$  до  $2 \text{ мм}$ .

- 1) Выставьте на монохроматоре длину волны приблизительно  $5500 \text{ \AA}$ .
- 2) В режиме ускоряющего напряжения (на анод подается напряжение  $\sim 1 \text{ В}$ ), повышая интенсивность падающего на фотоэлемент света путем увеличения ширины *выходной* щели монохроматора  $D$ , проверьте выполнение закона Столетова. *Начните измерения с ширины выходной щели  $D = 2 \text{ мм}$ . Подберите ширину входной щели так, чтобы сигнал с ФЭУ не превышал  $10 \text{ В}$ .*

Заполните таблицу:

D, мм	0.3	0.6	0.8	1.2	1.6	2.0
$U_{\text{ФЭ}}, \text{ В}$						

4) Постройте график  $U_{\text{ФЭ}}(D)$ , используя файл Photoeffect. mcd

#### 4. Прямое определение красной границы фотоэффекта

В режиме ускоряющего потенциала просканируйте с помощью барабана длин волн монохроматора весь спектр лампы накаливания, начиная с фиолетовой области ( $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ ) и до длины волны  $7000 \text{ \AA}$ . Регистрируя сигнал ФЭУ, определите красную границу фотоэффекта, т. е. длину волны, начиная с которой фототок резко падает и принимает значения, близкие к нулю. Полученную в этих опытах граничную частоту сравните с частотой, определенной ранее. Заполните таблицу:

$m$ , дел.	850	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2800
$U_{\text{ФЭУ}}$										

Значения делений барабана в ваших измерениях могут отличаться от указанных в таблице! Вам нужно получить 10 экспериментальных точек, равномерно распределенных по длинам волн в интервале  $4100 - 7100 \text{ \AA}$ .

Постройте график  $U_{\text{ФЭУ}}(\lambda(m))$ , используя файл Photoeffect.mcd.

#### Библиографический список

1. Матвеев А. Н. Атомная физика. М.: Высш. шк., 1989.
2. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966.
3. Мирдель Г. Электрофизика: Пер. с нем. М.: Мир, 1972.
4. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
5. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высш. шк., 1974.
6. Белл Р. Л. Эмиттеры с отрицательным электронным сродством: Пер. с англ. М.: Энергия, 1978.
7. Бломберген Н. Нелинейная оптика: Пер. с англ. М.: Мир, 1966.
8. Вихман Э. Квантовая физика: Пер. с англ. М.: Наука, 1986. Т. 4: Берклевский курс физики.

Приложение. Текст файла Photoeffect.mcd

## Лабораторная работа 3.2 "Фотоэффект"

1. Построение дисперсионной кривой спектрометра. Заполните матрицу D. В первом столбце - деления барабана, во втором столбце - длина волны соответствующей спектральной линии ртути

$c := 3 \cdot 10^{10}$  Скорость света

$e := 4.8 \cdot 10^{-10}$  Заряд электрона

$j := 1..9$

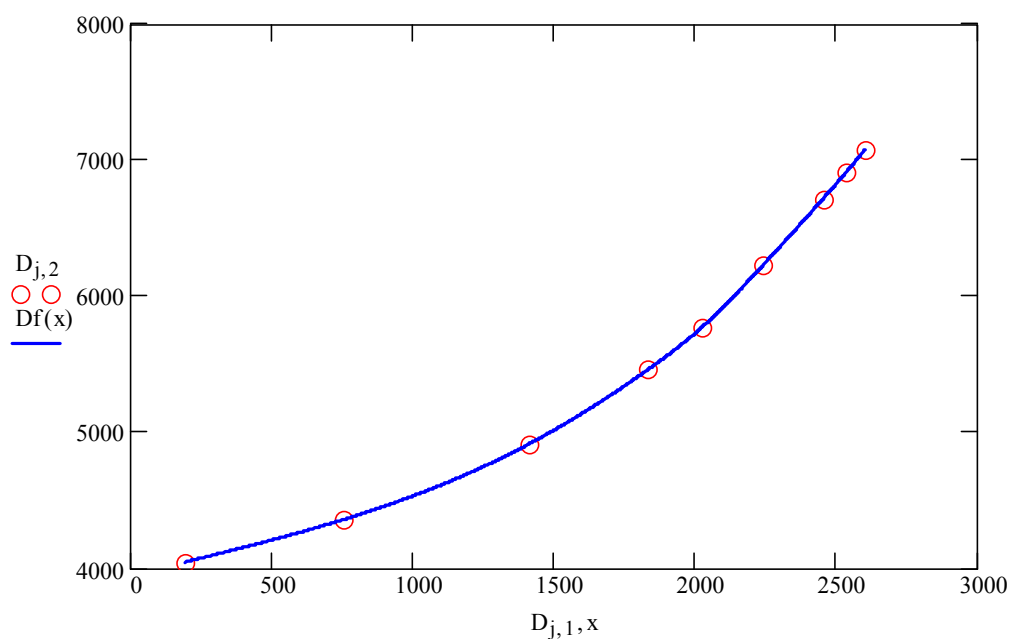
190	4046
750	4358
1410	4916
1830	5461
2020	5770
2240	6234
2450	6716
2530	6907
2600	7081

$D :=$

$Dvx_j := D_{j,1}$        $Dvy_j := D_{j,2}$        $x := D_{1,1}..D_{9,1}$

Интерполируем полученные данные кубическим сплайном (полиномом третьей степени)

$Dvs := cspline(Dvx, Dvy)$        $Df(x) := interp(Dvs, Dvx, Dvy, x)$



2. Определение задерживающего потенциала. Заполните матрицу  $U1$  столько раз, сколько требуется и определите для каждого случая задерживающий потенциал. Длина волны света должна меняться с шагом около 500 Ангстрем. Измерений должно быть 6!

$j := 1..15$

$N := 15$

$$U1 := \begin{pmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 & -0.1 & -0.2 & -0.3 & -0.4 & -0.5 \\ 2.03 & 2.00 & 1.96 & 1.90 & 1.81 & 1.66 & 1.47 & 1.23 & 0.92 & 0.56 & 0.16 & 0.00 & 0.00 & 0.0 & 0 \end{pmatrix}$$

Определите на графике ниже номера точек, через которые будет проводиться прямая, с помощью которой находится задерживающий потенциал и присвойте соответствующие значения переменным  $s1$  и  $f1$ . Номера точек растут справа налево!

$s1 := 9$        $f1 := 11$        $x1 := -1, -0.95..1$        $U1_{1,s1} = 0.1$        $U1_{2,s1} = 0.92$

$i1 := 1..(f1 - s1) + 1$

$U1_{1,f1} = -0.1$        $U1_{2,f1} = 0.16$

Определяем параметры прямой:

$vx_{i1} := U1_{1,s1+i1-1}$        $vy_{i1} := U1_{2,s1+i1-1}$        $SV := \text{slope}(vx, vy)$        $IV := \text{intercept}(vx, vy)$

$SV = 3.8$

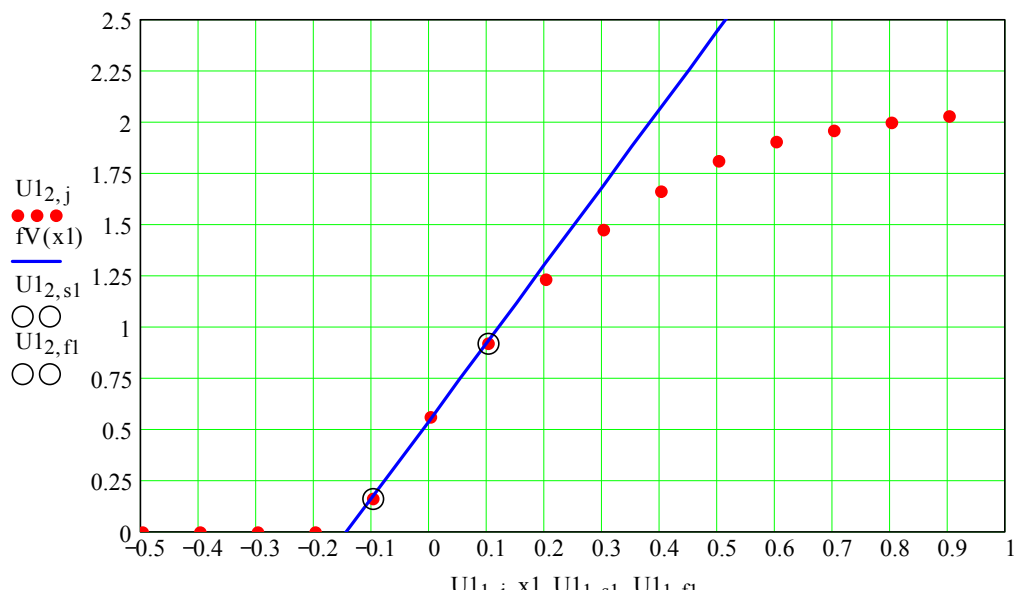
$IV = 0.547$

$fV(x1) := SV \cdot x1 + IV$        $UB := \frac{-IV}{SV}$

Задерживающий потенциал для данной длины волны:

$UB = -0.144$

Запишите в свой лабораторный журнал эту величину, а также значение делений барабана спектрометра, при которых она была получена. Определив задерживающие потенциалы для всех длин волн, для которых вы проводили измерения, переходите к следующему разделу.





3. Определение работы выхода и постоянной Планка. Заполните матрицу F. В первой строке - деления барабан монохроматора, при которых вы проводили измерения задерживающего потенциала, во второй строке - полученные значения задерживающего потенциала.

$$k := 1..6$$

$$F := \begin{pmatrix} 200 & 800 & 1400 & 1800 & 2000 & 2200 \\ 0.352 & 0.316 & 0.248 & 0.210 & 0.197 & 0.144 \end{pmatrix} \quad \omega_k := \frac{10^8 \cdot c}{Df(F_{1,k})}$$

Частота света, на которой проводились измерения задерживающего потенциала, Гц

$$UF_k := F_{2,k} \quad \text{Переобозначение, для удобства}$$

$$PC := \text{slope}(\omega, UF) \quad Fe := \text{intercept}(\omega, UF)$$

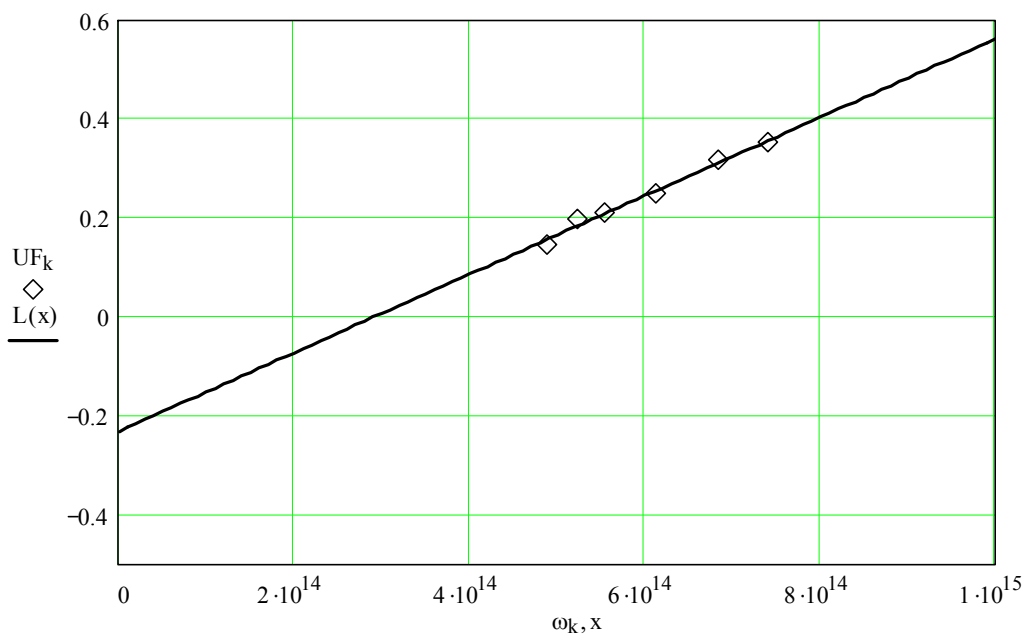
$$PC = 7.938 \times 10^{-16}$$

$$Fe = -0.232$$

Аппроксимируем точки прямой линией

$$x := 0, 10^{13} .. 10^{15}$$

$$L(x) := PC \cdot x + Fe$$



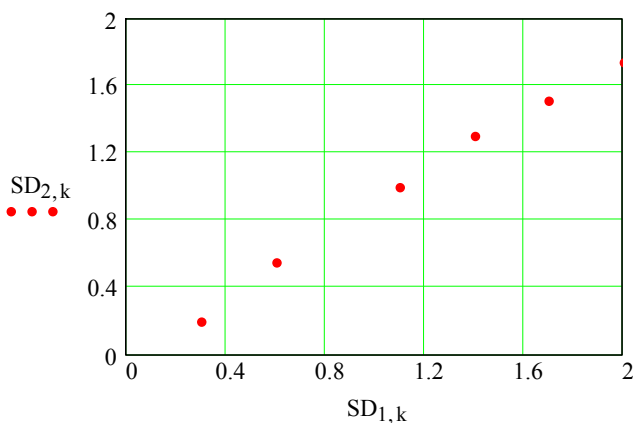
$$PC = 7.938 \times 10^{-16} \quad \text{Экспериментально определенная постоянная Планка.}$$

Размерность?

4. Проверка закона Столетова. Заполните матрицу SD. В первой строке - ширина щели, во второй строке - сигнал с фотозлемента. Всего измерений должно быть 6.

$$k := 1..6$$

$$SD := \begin{pmatrix} 0.3 & 0.6 & 1.1 & 1.4 & 1.7 & 2 \\ 0.2 & 0.55 & 1 & 1.3 & 1.51 & 1.74 \end{pmatrix}$$

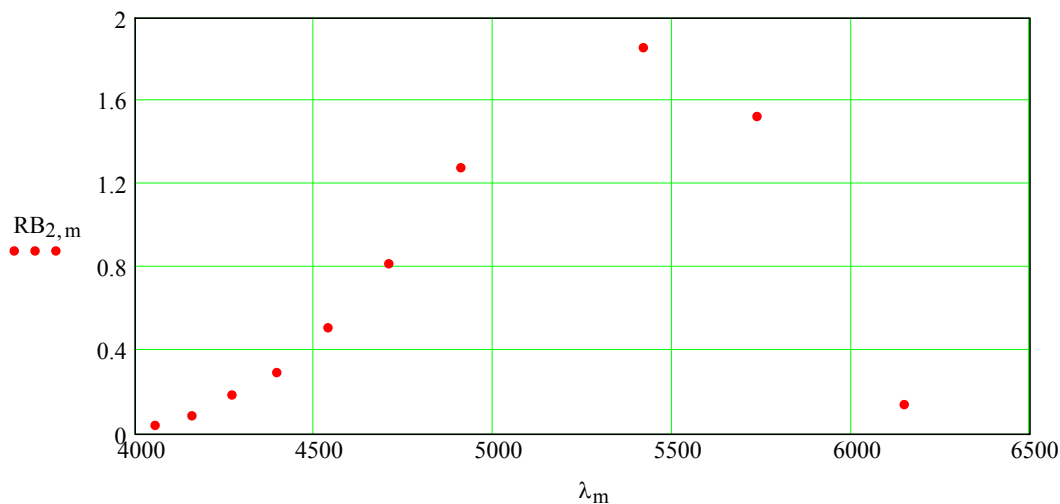


5. Измерение красной границы фотоэффекта. Заполните матрицу RB. В первой строке - деления барабана монохроматора, во второй строке - сигнал с фотозлемента. Всего измерений должно быть 10.

$$m := 1..10$$

$$RB := \begin{pmatrix} 200 & 400 & 600 & 800 & 1000 & 1200 & 1400 & 1800 & 2000 & 2200 \\ 0.04 & 0.09 & 0.19 & 0.30 & 0.51 & 0.82 & 1.28 & 1.86 & 1.53 & 0.14 \end{pmatrix}$$

$$\lambda_m := Df(RB_{1,m})$$



Скопируйте графики и необходимые данные из каждого пункта задания и вставьте их как "Рисунок" в файл Word. Используйте опции "Правка" и "Специальная вставка". Распечатайте картинку, вы будете использовать ее при сдаче работы.