

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»

Кафедра общей и технической физики

ФИЗИКА

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО
ФОТОЭФФЕКТА**

Методические указания к лабораторной работе

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2016**

УДК 535.41/42 + 535.5 (075.80)

Физика. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА: Методические указания к лабораторной работе /Сост.: А.С. Мустафаев, Е.С. Ломакина. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2016. 20 с.

В методических указаниях к лабораторной работе «ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА» сформулированы: теория, методические указания и алгоритм выполнения работы.

Лабораторная работа дает возможность студентам познакомиться с явлением внешнего фотоэффекта и экспериментально определить постоянную Планка. Основная задача - овладеть техникой и методикой проведения эксперимента, а также приемами обработки его результатов и оформления заключительного отчета.

В зачетной работе практикума студент должен продемонстрировать умение в устной и письменной форме, логически верно и аргументировано защищать результаты своих исследований.

Методические указания к лабораторной работе предназначены для студентов всех специальностей и направлений подготовки бакалавриата и магистратуры Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

Научный редактор профессор *Мустафаев А.С.*

© Национальный минерально-сырьевой университет
«Горный», 2016 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

1. Цель работы

Определение постоянной Планка h путем исследования зависимости задерживающего напряжения в фотоэлементе от частоты падающего света.

2. Теоретическое введение

Свет представляет собой колебания напряженностей электрического и магнитного полей, которые распространяются в пространстве, образуя электромагнитные волны с длиной λ и частотой v . При этом электромагнитные волны переносят с собой энергию не непрерывно, а порциями. Если частота электромагнитных колебаний v , то наименьшая порция энергии

$$\varepsilon = hv , \quad (1)$$

где $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка.

Постоянная Планка является фундаментальной физической постоянной. Согласно формуле Эйнштейна:

$$\varepsilon = mc^2 , \quad (2)$$

где c - скорость света.

Из соотношения (2) следует, что любой объект, обладающий энергией ε , обладает массой m и импульсом p . Поэтому порцию (квант) энергии hv электромагнитных волн назвали частицей и присвоили ей имя фотон. Свет можно себе представлять также как поток частиц - фотонов, летящих со скоростью света. Фотон либо движется со скоростью света, либо перестает существовать. Масса покоя фотона равна нулю.

Свет одновременно является и электромагнитными волнами и потоком частиц - фотонов. Поэтому говорят о корпускулярно-волновом дуализме света. Дискретная природа света проявляется как в моменты поглощения и испускания, так и во время свободного распространения. Корпускулярные характеристики фотона (e, p, m) дополняются волновыми характеристиками (v, λ), что подтверждает принцип дополнительности Н. Бора. Волновые и корпускулярные

свойства квантовых процессов следует рассматривать как равноправные, несводимые друг к другу и одинаково необходимые для понимания световых явлений.

Фотон как частица материи обладает полной энергией $\varepsilon=mc^2$ и импульсом $p = \frac{\varepsilon}{c}$, а как квант электромагнитного поля обладает энергией $\varepsilon = h\nu$ и импульсом $p = \frac{h}{\lambda}$.

При поглощении металлом электромагнитного излучения его поверхность при определенных условиях испускает электроны. Это явление получило название - внешний фотоэффект или фотоэлектронная эмиссия.

Прежде, чем говорить о явлении внешнего фотоэффекта, кратко рассмотрим строение металлов. Металлы образуют атомы, устроенные определенным образом. Атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов, которые располагаются на разных расстояниях от ядра, образуя так называемые оболочки. Ядро атома с внутренними оболочками из электронов называется катионом. Электроны, расположенные на внешней оболочке, называются валентными. Кристаллическую решетку металла и границу металла образуют катионы. Валентные электроны в металле слабо притягиваются к положительно заряженному ядру и могут покидать «свое» ядро, выходя за границу металла. Таким образом, снаружи границы металла образуется электронное облако, заряженное отрицательно (рис. 1), а атомы, потерявшие электроны, обладают положительным электрическим зарядом. На электрон, оказавшийся между металлом и электронным облаком, действует кулоновская сила \vec{F} , стремящаяся вернуть электрон обратно в металл. Таким образом, между границей металла и электронным облаком возникает приграничное электрическое поле, которое препятствует дальнейшему выходу электронов из металла.

Протяженность l приграничного электрического поля равна нескольким межатомным расстояниям. Кроме того, отметим, что покинувшие металл электроны под действие кулоновских сил воз-

вращаются обратно в металл. Однако из металла вылетают другие электроны. Таким образом, электронное облако у границы металла в среднем продолжает существовать в динамическом режиме.

Обратимся к внешнему фотоэффекту. Если освещать границу металла светом, то фотонами, столкнувшись с находящимися в металле электронами, передадут им всю свою энергию. Электроны с достаточно большой кинетической энергией окажутся способными преодолеть тормозящие их силы \vec{F} электрического поля и вылететь из металла за пределы приграничного электрического поля. Возникнет явление внешнего фотоэффекта.

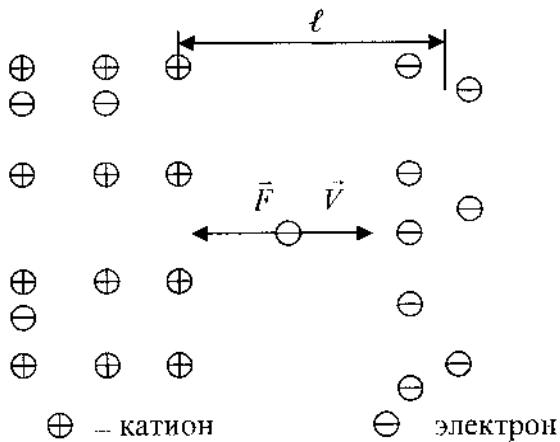


Рис. 1. Схема образования электронного облака и приграничного электрического поля у границы металла

Приведенное выше описание внешнего фотоэффекта является схематическим и сильно упрощенным. На самом деле объекты микромира подчиняются не законам классической физики, а законам квантовой механики.

Преодолевая узкое приграничное электрическое поле, валентные электроны резко увеличивают свою потенциальную энергию. Это означает, что внутри металла потенциальную энергию валентных электронов можно изобразить в виде потенциальной ямы

глубиной ε_0 с практически вертикальными краями (рис. 2). Дно ямы соответствует минимальному уровню энергии валентных электронов. Согласно зонной теории электроны внутри металла могут иметь только дискретные разрешенные уровни энергии. Максимальный уровень энергии, который могут иметь в металле валентные электроны при абсолютном нуле температуры, назван уровнем Ферми. Уровень Ферми превышает минимальный уровень энергии на величину ε_F . Чтобы удалить электроны из металла, необходимо совершить работу, во-первых, для поднятия его энергии до уровня Ферми и, во-вторых, для преодоления силы \vec{F} приграничного электрического поля. Говорят, что электрон, чтобы покинуть металл, должен преодолеть потенциальный барьер. Для определенности работы выхода A назвали наименьшую работу, которую должен совершить электрон, чтобы покинуть металл и попасть в вакуум. В данном случае под вакуумом понимается пространство без вещества и без электромагнитных полей.

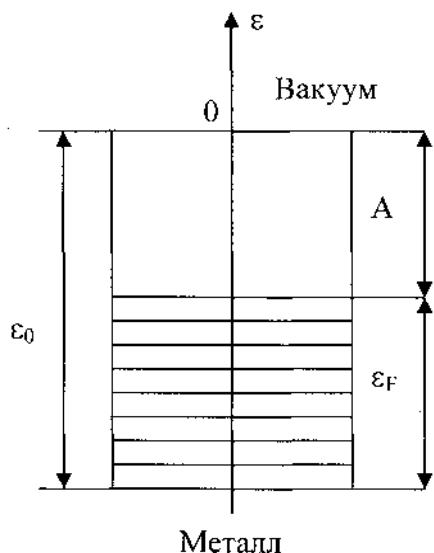


Рис 2. Энергетические уровни валентных электронов в металле.

Из рис. 2 следует, что для металла работа выхода A равна

$$A = \varepsilon_0 - \varepsilon_F.$$

Эйнштейн предложил простое уравнение, описывающее и объясняющее основные черты явления внешнего фотоэффекта:

$$hv = A + \frac{m_e V_m^2}{2}, \quad (3)$$

где hv - энергия фотона падающего на металл света; A - работа выхода, которую должен совершить электрон, чтобы преодолеть тормозящие силы приграничного электрического поля и покинуть металл; m_e - масса электрона; V_m - максимально возможная скорость вылетевшего из металла электрона.

Процесс взаимодействия фотона, обладающего энергией hv , с электроном можно представлять как неупругое столкновение. При этом фотон, отдав всю энергию электрону, исчезает, а электрон приобретает кинетическую энергию, равную hv . Если электрон получает энергию от фотона не у самой поверхности металла, а на некоторой глубине, то часть этой энергии может быть потеряна вследствие случайных столкновений в металле, т.е. перейдет в тепло. Для «приповерхностных» электронов вся, полученная от фотона энергия hv , участвует в фотоэффекте согласно уравнению (3). Часть этой энергии, равная работе выхода A , затрачивается на то чтобы электрон мог покинуть металл, а оставшаяся часть сохраняется у электрона в виде максимально возможной кинетической энергии (последний член уравнения (3)).

Работа выхода A в основном определяется структурой кристаллической решетки на границе металла, т.е. химическим составом металла и способом обработки поверхности металла, и практически не зависит от внешних факторов: температуры металла, частоты падающего излучения, внешних электрических полей и т.д. Слабую зависимость A от температуры учитывать не будем.

Если $hv > A$, то электрон покидает металл. Если $hv < A$, то энергии электрона будет недостаточно, чтобы преодолеть тормозящие

его электрические силы, и фотоэффект наблюдаться не будет. Из уравнений (1) и (3) следует, что для данной кристаллической решетки параметром, определяющим наличие или отсутствие фотоэффекта, является частота ν падающего на металл излучения. Поэтому удобно представить работу выхода A в виде:

$$A = h\nu_0, \quad (4)$$

откуда

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad (5)$$

где ν_0 — некоторая граничная частота, названная «красной границей» фотоэффекта.

При $\nu > \nu_0$ фотоэффект наблюдается, при $\nu < \nu_0$ фотоэффект не наблюдается.

Равенство (5) подчеркивает, что красная граница фотоэффекта ν_0 зависит от тех же обстоятельств, что и работа выхода A электрона из металла.

Фотоэффект является ярким проявлением квантовых свойств света. По классическим (волновым) понятиям кинетическая энергия вылетевших из металла электронов должна возрастать с ростом амплитуды падающей волны, а, следовательно, с ростом интенсивности волны, что полностью опровергается результатами экспериментов по фотоэффекту. Согласно уравнению (3) взаимодействие света с веществом происходит на уровне отдельных фотонов и электронов, причем энергия, получаемая электроном, определяется энергией фотона и не зависит от общего количества фотонов, т.е. от интенсивности света. Увеличение интенсивности света приводит лишь к увеличению числа вылетевших электронов, но не меняет энергию каждого вылетевшего электрона. Как показывает эксперимент, низкочастотная граница возникновения фотоэффекта носит четко выраженный пороговый характер, что может быть объяснено лишь квантовыми представлениями, на которых основывается теория Эйнштейна.

Внешний фотоэффект обычно наблюдают с помощью специальных устройств, называемых фотоэлементами (рис. 3).

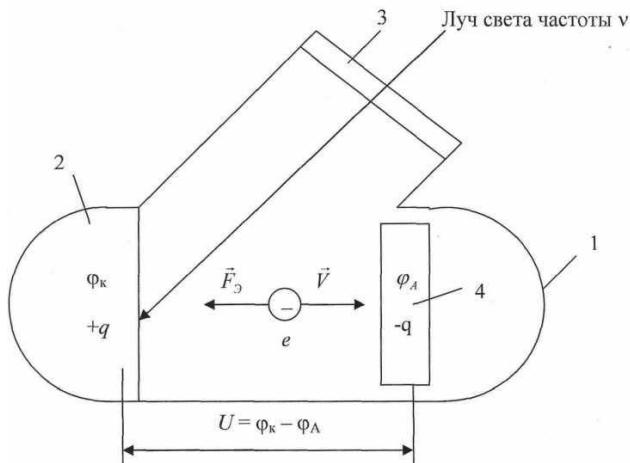


Рис. 3. Схема устройства фотоэлемента и особенности его работы в данном эксперименте

Фотоэлемент представляет собой герметичный баллон 1, из которого выкачен воздух, чтобы молекулы газов, составляющих воздух, не мешали движению электронов. На внутреннюю поверхность баллона нанесен слой металла, называемый катодом 2. В баллоне имеется прозрачное окно 3 из плавленого кварца, через которое катод освещается электромагнитным излучением частоты ν . Напротив катода внутри баллона находится анод 4. Оба электрода (анод и катод) имеют выводы в виде проволок, выходящих наружу баллона.

Обычно анод заряжен положительно, а катод отрицательно. В описываемой работе катод и анод практически разомкнуты. Поэтому при фотоэффекте электроны, вылетевшие из катода, накапливаются на аноде, заряжая его отрицательно. Катод, теряя электроны, заряжается положительно. В результате между катодом и анодом возникает электрическое поле. На летящие от катода к аноду электроны действуют электрические силы \vec{F}_3 , тормозящие их движение.

ние. Когда работа электрических сил на промежутке катод-анод становится равной кинетической энергии электронов, покинувших катод, вылетевшие из катода электроны уже не могут достигнуть анода, поскольку скорости движения \vec{V} электронов по направлению к аноду обращаются в ноль и электрические силы \vec{F}_e возвращают электроны на катод. Поэтому накопление электрических зарядов q на катоде и аноде прекращается.

Электрический заряд q связан с электрическим напряжением следующим соотношением:

$$q=CU,$$

где C - электроемкость системы «катод - анод». Поэтому в момент остановки роста q напряжение U достигает своего наибольшего значения, которое называют задерживающим напряжением. Далее под U будем понимать именно величину задерживающего напряжения. Для задерживающего напряжения U справедливо равенство

$$eU = \frac{m_e V_m^2}{2}, \quad (6)$$

где e - модуль заряда электрона. Используя равенство (6) в уравнении (3), приходим к соотношению:

$$hv = A + eU. \quad (7)$$

Из соотношения (7) находим линейную зависимость задерживающего напряжения U от частоты v падающего света:

$$U = -\frac{A}{e} + \frac{h}{e}v = av + b, \quad (8)$$

Измерив задерживающее напряжение U при разных частотах v падающего на фотоэлемент света, можно определить постоянную Планка h по формуле

$$h = \frac{e(U_{\max} - U_{\min})}{(v_{\max} - v_{\min})}, \quad (9)$$

где U_{\max} и U_{\min} - соответственно наибольшее и наименьшее значения задерживающих напряжений, найденных в процессе эксперимента для наибольшей v_{\max} и наименьшей v_{\min} частот падающего света.

В описываемом эксперименте волны электромагнитного излучения с разными частотами v направляются в разные области пространства с помощью дифракционной решетки согласно условию

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

где d - постоянная дифракционной решетки; φ – угол наблюдения; m – порядок спектра; λ -длина волны света, связанная с частотой v формулой

$$v = \frac{c}{\lambda}, \quad (11)$$

где c - скорость света.

Частотой v называют число колебаний в единицу времени. Размерность частоты в СИ равна s^{-1} и называется герц (Гц).

Условие (10), справедливое на достаточно больших расстояниях от дифракционной решетки, определяет положения так называемых главных максимумов интенсивности света с разными длинами волн λ . Кроме главных максимумов, за дифракционной решеткой имеются небольшие по интенсивности дополнительные максимумы и минимумы, которые располагаются в широком диапазоне углов φ . На главный максимум для длины волны λ (частоты v) могут накладываться дополнительные максимумы от более коротких волн λ_1 , несущих большие порции энергии hv_1 , что увеличит задерживающее напряжение U и внесет погрешность в зависимость (8) $U=U(v)$.

3. Описание экспериментальной установки

Общий вид установки показан на рис. 4.

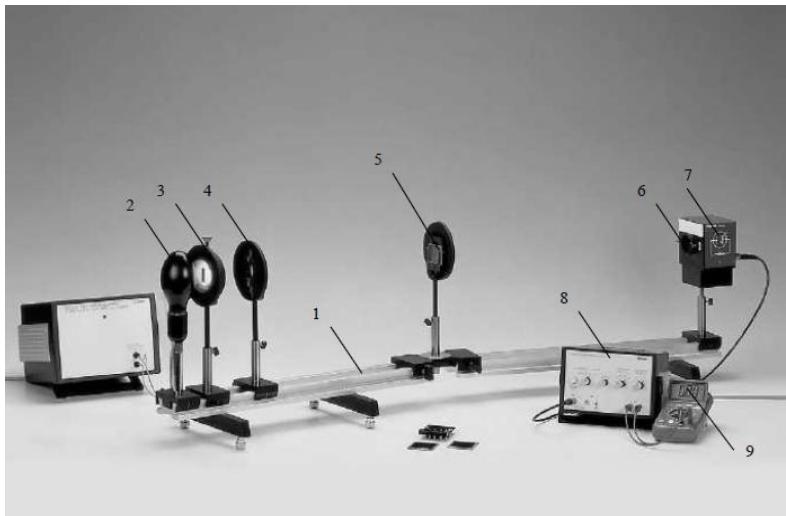


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

Оптическая схема установки показана на рис. 5. Цифры на рисунках 4 и 5 обозначают одни и те же элементы установки.

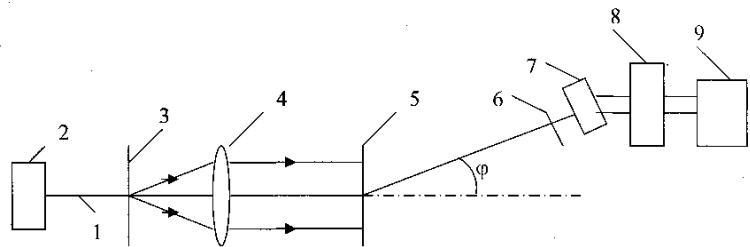


Рис. 5. Оптическая схема установки

На одном конце оптической скамьи 1 устанавливается ртутная лампа 2, которая излучает свет, содержащий несколько длин волн. Про такой свет говорят, что его спектр имеет дискретный (линейчатый) характер и состоит из конечного числа монохроматических составляющих. Монохроматический свет имеет практически

одну длину волны и воспринимается человеческим глазом как свет одного цвета. Монохроматическое электромагнитное излучение с корпускулярной точки зрения представляет собой поток фотонов с одинаковой энергией.

На расстоянии примерно 9 см от ртутной лампы располагается диафрагма со щелью 3. Далее примерно через 20 см устанавливается собирающая линза 4, причем так, что щель оказывается в фокусе линзы. При таком расположении щели и линзы за линзой лучи света идут параллельным пучком, который падает на дифракционную решетку 5. Оптическое устройство, образующее параллельный пучок лучей, называют конденсором. В месте расположения дифракционной решетки часть оптической скамьи может поворачиваться на угол φ , обеспечивая тем самым положение фотоэлемента 7 на разных углах наблюдения φ (см. условие (10)). Оптическая схема должна быть отрегулирована таким образом, чтобы изображение щели 3 на фотоэлементе 7 имело ширину примерно 1 см. Перед фотоэлементом устанавливаются сменные светофильтры 6, которые частично уменьшают влияние дополнительных максимумов от высокочастотной части излучения ртутной лампы.

В данной работе используется высоковакуумный фотоэлемент с катодом из металла калия. Для калия глубина выхода электронов из металла составляет величину порядка 100 нм. Термин «высоковакуумный» означает, что после откачки воздуха концентрация оставшихся в баллоне молекул газа настолько мала, что длина свободного пробега молекул оказывается больше размеров баллона.

К катоду и аноду фотоэлемента 7 (рис. 4 и 5) через универсальный измерительный усилитель 8 подключен цифровой вольтметр 9. Входное сопротивление R усилителя 8 очень большое ($R > 10^{13}$ Ом), поэтому можно полагать, что электрическая цепь, в которую включены катод и анод, практически разомкнута. Положение органов управления усилителя 8: коэффициент усиления (КУ) - 1, плавная регулировка КУ - 0, постоянная времени – 0 с.

Таблица 1

Пределы измерения, В	Постоянная времени, с	Класс точности	Оценка абсолютной приборной погрешности (ΔU) _{ин} , В
0-20	0	нет	

Если перед фотоэлементом при $\phi=0$ поместить белый лист бумаги, то в центре можно увидеть светлую полосу, где складывается свет всех длин волн, которые испускает ртутная лампа. По разные стороны от центра будут видны фиолетовые, сине-фиолетовые, зеленые и желтые полосы, соответствующие главным максимумам для разных длин волн с разными частотами v (в соответствии с формулами (10) и (11)). Поворачивая часть оптической скамьи с фотоэлементом на соответствующий угол ϕ , можно освещать фотоэлемент светом определенного цвета.

Важно отметить, что ширина главных максимумов заметно больше, чем дополнительных. Поэтому в пределах главных максимумов располагаются несколько дополнительных максимумов и минимумов от более высокочастотной части излучения. Благоприятная ситуация для измерений задерживающего напряжения U для излучения частоты v возникает, когда установленный угол ϕ настроен на главный максимум и одновременно попадает на дополнительный минимум от более высокочастотной части излучения ртутной лампы. Поскольку дополнительные максимумы и минимумы не видны, благоприятная ситуация возникает случайным образом. Чтобы во время измерений повысить вероятность возникновения благоприятной ситуации, установку фотоэлемента напротив цветных полос следует выполнять по несколько раз для каждого цвета. При этом угол ϕ при каждом измерении будет оказываться немного другим.

4. Порядок выполнения работ

При выполнении работы необходимо строго соблюдать требования по технике безопасности и охране труда, установленные на рабочем месте студента в лаборатории.

Внимание! После включения ртутной лампы первые 5 минут нельзя на нее смотреть и выполнять работу, это вредно для глаз. Нельзя часто включать и выключать ртутную лампу.

1. Закройте шторкой окно фотоэлемента. Угол ϕ (рис. 5) сделайте равным нулю.

2. Попросите лаборанта включить ртутную лампу и усилитель 8. Усилитель будет готов к работе через 10 минут.

3. Через 10 мин. после включения лампы и усилителя поместите перед фотоэлементом белый лист бумаги, убедитесь, что светлое изображение щели четкое, попадает в окно фотоэлемента и имеет ширину 1 см.

4. Медленно увеличивая угол ϕ , совместите центр желтой полосы с белой отметкой на корпусе фотоэлемента.

5. Перед фотоэлементом установите желтый светофильтр.

6. Включите цифровой вольтметр в диапазоне (0-20) В, нажмите светло-серую кнопку на передней панели усилителя 8, показания вольтметра должны занулиться.

7. Отпустите светло-серую кнопку, откройте окно фотоэлемента и подождите, пока показания вольтметра перестанут увеличиваться.

8. Запишите установившееся показание вольтметра U в таблицу 2 для желтого цвета.

9. Закройте окно фотоэлемента. Аналогичным образом, ставя соответствующие светофильтры, выполните измерения задерживающего напряжения U для зеленого, сине-фиолетового и фиолетового цветов.

10. Повторите измерения задерживающих напряжений U для всех цветов не менее, чем по три раза для каждого цвета. При этом перед каждым измерением U угол ϕ необходимо изменять! Результаты всех измерений U запишите в таблицу 2.

Таблица 2

Цвет	λ , нм	$v \cdot 10^{-14}$, Гц	U , В		
желтый	580				
зеленый	524				
сине-фиолетовый	436				
фиолетовый	405				

5. Обработка результатов эксперимента

1. По указанным в табл. 2 длинам волн λ рассчитайте соответствующие частоты v с тремя значащими цифрами.

2. Выберите из последнего раздела таблицы 2 наименьшие задерживающие напряжения U для каждого цвета. Используя наименьшие значения U , постройте график зависимости задерживающего напряжения U от частоты света v . По вертикальной оси отложите U в вольтах в масштабе $M_U=2 \cdot 10^{-2}$ В/мм, по горизонтальной – величины $v \cdot 10^{-14}$ в герцах в масштабе $M_v=2 \cdot 10^{-2}$ Гц/мм.

3. Следует сгладить результаты измерений на графике прямой линией (рис. 6). Из графика получите сглаженные значения $(U_{\min})_{\text{сгл}}$ и $(U_{\max})_{\text{сгл}}$.

4. Вычислите среднее значение \bar{h} постоянной Планка по формуле

$$\bar{h} = \frac{e[(U_{\max})_{\text{сгл}} - (U_{\min})_{\text{сгл}}]}{(v_{\max} - v_{\min})},$$

где $e=1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд.

5. Оцените абсолютную суммарную погрешность $(\Delta h)_{\Sigma}$ измерения постоянной Планка по формулам

$$(\Delta h)_{\Sigma} = \frac{e(\Delta U)_{\Sigma} \sqrt{2}}{(v_{\max} - v_{\min})}, \quad (\Delta U)_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta U)_{uh}^2 + (\Delta U)_{cl}^2},$$

в качестве оценки случайной погрешности $(\Delta U)_{cl}$ возьмите на графике $U=U(v)$ наибольшее отклонение в вольтах экспериментальной точки от сглаживающей прямой.

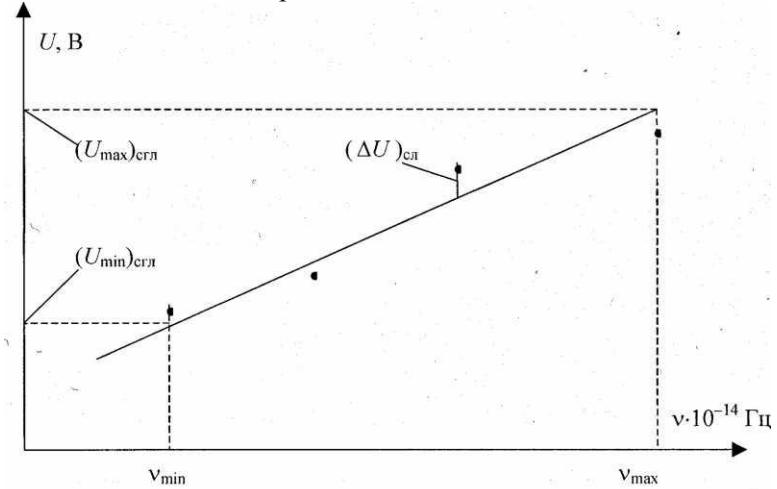


Рис. 6. Графическая обработка результатов измерений

6. Оцените относительную погрешность δ_h измерений постоянной Планка по формуле

$$\delta_h = \frac{(\Delta h)_{\Sigma}}{\bar{h}} \cdot 100\% .$$

7. Запишите результат измерений в виде

$$h = \bar{h} \pm (\Delta h)_{\Sigma}, \delta_h =$$

6. Индивидуальные задания

Задание 1

- На основании линейной зависимости (8) получите расчетную формулу (9) для определения постоянной Планка.
- Выполните измерения задерживающих напряжений U в зависимости от частоты дискретных составляющих излучения ртутной

лампы (т.е. линий излучения ртути).

3. Оцените погрешность измерений.

Задание 2

1. Выведите формулу (12) для оценки абсолютной погрешности измерений постоянной Планка, считая, что заряд электрона и частоты излучения известны точно.
2. Выполните измерения задерживающих напряжений U в зависимости от частоты дискретных составляющих излучения ртутной лампы (т.е. линий излучения ртути).
3. Оцените погрешность измерений.

Задание 3

- 1 Выведите равенство (6) для задерживающего напряжения U .
- 2 Выполните измерения задерживающих напряжений U в зависимости от частоты дискретных составляющих излучения ртутной лампы (т.е. линий излучения ртути).
3. Оцените погрешность измерений.

Задание 4

1. Почему при выводе формулы (12) для оценки абсолютной погрешности измерений постоянной Планка можно не учитывать погрешности определения частот излучения?
2. Выполните измерения задерживающих напряжений U в зависимости от частоты дискретных составляющих излучения ртутной лампы (т.е. линий излучения ртути).
3. Оцените погрешность измерений.

7. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой свет как волновой процесс и как поток частиц? Что называют фотоном и чему равна энергия фотона?
2. Что называют внешним фотоэффектом? Опишите явление внешнего фотоэффекта.
3. Какое уравнение описывает внешний фотоэффект? Какой физический смысл имеют все входящие в него величины?
4. От чего зависит работа выхода электронов из металла?

5. Как определяется красная граница фотоэффекта, что она означает и от чего зависит?
6. Из каких физических соображений следует равенство (6) для задерживающего напряжения?
7. Какое свойство дифракционной решетки направляет световые волны с разными частотами в разные области пространства? От каких величин зависит это явление?
8. Как устроен фотоэлемент?
9. Что называют точностью измерений?
10. Какие масштабы для построения графиков являются удобными?
- 11.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

a) основная:

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Квантовая оптика Книга 5. М.: Астрель. АСТ, 2007, 368 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 2. Электричество и магнетизм. М.: Астрель. АСТ, 2006, 336 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Книга 4 Волны. Оптика. М.: Астрель. АСТ, 2006, 256 с.
4. Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. Учебно-методическое пособие №805. М.: МИ-СиС. «Учеба», 2007, 108 с.

б) дополнительная:

5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.В. Атомная и ядерная физика М.: Физматлит, 2002, 782 с.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып.3. Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир, 1965, 238 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы	3
2. Теоретическое введение	3
3. Описание экспериментальной установки	11
4. Порядок выполнения работ	15
5. Обработка результатов эксперимента	16
6. Индивидуальные задания	17
7. Контрольные вопросы	18
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	19