

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Физика»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Пособие для студентов специальностей
1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного
бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана
водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели
и метрополитены»

В 2 частях

Часть 2

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2021

УДК 535.015(075.8)

ББК 22.34я7

В40

С о с т а в и т е л и:

*А. К. Есман, Н. П. Юркевич, Г. К. Савчук, Г. Л. Зыков,
В. А. Потачиц, А. И. Бибик, С. В. Попко*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Общая физика» БГУ, зав. кафедрой *А. И. Слободянюк*;
доцент кафедры медицинской и биологической физики БГМУ
И. Ф. Медведева

Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом: пособие для студентов специальностей 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели и метрополитень»: в 2 ч. / сост.: А. К. Есман [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – Ч. 2. – 48 с.
ISBN 978-985-583-639-2 (Ч. 2).

В пособии представлены материалы для проведения лабораторного практикума по изучению спектров излучения и явления внешнего фотоэффекта. Рассмотрены основные элементы спектрального анализа, принципы получения спектров излучения, особенности работы спектральных приборов, монохроматоров. Предложена методика анализа спектров излучения ртутной и энергосберегающей ламп и определения источника излучения неизвестного состава. Описаны основные закономерности внешнего фотоэффекта, приведено объяснение внешнего фотоэффекта на основе уравнения Эйнштейна, представлены данные по его практическому использованию. Приведена методика изучения внешнего фотоэффекта.

УДК 535.015(075.8)

ББК 22.34я7

ISBN 978-985-583-639-2 (Ч. 2)
2ISBN 978-985-583-987-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1 (№ 42)

1. Элементы спектрального анализа	4
1.1. Виды энергетических переходов атомной системы.....	4
1.2. Монохроматическое излучение. Спектр. Спектральный анализ.....	5
1.3. Спектры поглощения и излучения	8
1.4. Полуэмпирическая теория спектра атома водорода и водородоподобных атомов.....	9
1.5. Квантовые числа. Принцип Паули	12
1.6. Молекулярные спектры	15
1.7. Ширина и интенсивность спектральной линии.....	16
1.8. Спектральные приборы. Монохроматоры	17
1.9. Явление дисперсии.....	20
1.10. Порядок выполнения лабораторной работы.....	21
1.11. Контрольные вопросы	25

Лабораторная работа № 2 (№ 12)

2. Изучение внешнего фотоэффекта	27
2.1. Экспериментальное исследование явления внешнего фотоэффекта.....	27
2.2. Объяснение явления фотоэффекта на основе квантовой теории света. Уравнение Эйнштейна.....	32
2.3. Применение явления фотоэффекта.....	35
2.4. Экспериментальное определение величин постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода	40
2.5. Общий вид установки и методика выполнения лабораторной работы	42
2.6. Порядок выполнения лабораторной работы.....	43
2.7. Контрольные вопросы	46

Список литературы.....	48
------------------------	----

Лабораторная работа № 1 (№ 42)

1. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Цель работы: изучить элементы теории образования спектров атомов и молекул, произвести градуировку монохроматора, по спектру излучения установить неизвестный источник излучения, провести сравнительный анализ спектров излучения ртутной и энергосберегающей ламп.

Приборы и принадлежности: спектрометр, ртутная лампа ДРШ, блок питания для ртутной лампы, лампа с неизвестным газом, энергосберегающая лампа, таблица спектров.

1.1. Виды энергетических переходов атомной системы

Все вещества состоят из атомов и молекул. Структура атома была экспериментально установлена Резерфордом в 1911 г. По Резерфорду в центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена основная масса атома, а вокруг ядра «вращаются» отрицательно заряженные электроны. В целом атом электрически нейтрален.

Ядра химических элементов состоят из положительно заряженных протонов и не имеющих электрического заряда нейтронов (В. Гейзенберг и Д. Д. Иваненко, 1932 г.). Число электронов в электрически нейтральном атоме равно числу протонов в ядре, поэтому общий заряд атома равен нулю.

Электроны в атоме имеют различную энергию и распределяются по энергетическим уровням.

Энергетическим состоянием атома или **энергетическим состоянием атомной системы** называется совокупность энергетических уровней всех электронов атома.

Атом может переходить из одного энергетического состояния в другое посредством энергообмена с окружающей средой в соответствии с законом сохранения энергии. В зависимости

от характера энергообмена энергетические переходы атомной системы делятся на *оптические* и *неоптические*.

Оптические переходы – это переходы электронов в атомах из одного энергетического состояния в другое путем поглощения или излучения электромагнитного излучения в виде фотонов.

Фотон – электрически нейтральная частица, квант энергии электромагнитного поля.

Основные свойства фотона – существует только в движении; масса покоя равна нулю; движется со скоростью света; обладает энергией и импульсом.

Поглощение или излучение фотонов электронами в атоме приводит к изменению энергетического состояния атома.

Неоптические или **безызлучательные** переходы – это переходы электронов в атоме с одного энергетического уровня на другой без поглощения фотонов. Примером неоптических переходов электронов может служить возбуждение атомов и молекул электронным ударом. Безызлучательные переходы электронов в молекулах газов могут наблюдаться в результате столкновений молекул с другими молекулами, а в жидкости или кристалле – при взаимодействии атомов с ближайшими окружающими его атомами.

В данной работе будут рассмотрены основные закономерности оптических переходов атомных систем.

1.2. Монохроматическое излучение. Спектр. Спектральный анализ

Электромагнитное излучение имеет двойственную природу. С одной стороны, электромагнитное излучение может проявлять корпускулярные свойства и рассматриваться как поток фотонов. С другой стороны, электромагнитное излучение – это волна, характеризующаяся интенсивностью излучения (I) и частотой (ν) (длиной волны λ).

Интенсивностью излучения (I) называется энергия, излучаемая единицей объема вещества за единицу времени.

Оптический спектр электромагнитного излучения – это зависимость интенсивности излучения (I) от частоты (ν): $I = I(\nu)$.

Монохроматическим излучением называется электромагнитное излучение, у которого не изменяется его частота: $\nu = \text{const}$.

Излучение может быть сложным и состоять из набора волн различных частот. Так, например, белый свет содержит семь основных частот, которые можно визуально наблюдать в явлении радуги. В сложном электромагнитном излучении частоты различных излучений не смешиваются между собой и могут быть определены с помощью спектрального анализа.

Спектральный анализ электромагнитного излучения – это метод определения монохроматических компонент, составляющих электромагнитное излучение.

Переходы атомной системы с низких на более высокие энергетические уровни приводят к возникновению **линий поглощения**, которые в совокупности образуют **спектр поглощения** (рис. 1.1, *a*). Спектры поглощения можно наблюдать, поместив исследуемый газ между источником, излучающим в широком диапазоне частот (например, Солнце), и спектральным прибором. При этом на светлом однородном фоне будут видны темные линии или темные полосы, которые и представляют собой спектр поглощения.

Спектральные линии излучения (рис. 1.1, *б*) возникают при переходах атомной системы с более высоких энергетических уровней на более низкие. Так, например, спектры излучения газов можно получить освещением светом определенной частоты, при помощи электрического разряда, бомбардировкой атомов газа электронами, нагреванием газа.

Частоты линий спектров поглощения и излучения совпадают, так как атомная система излучает и поглощает всегда на определенных частотах.

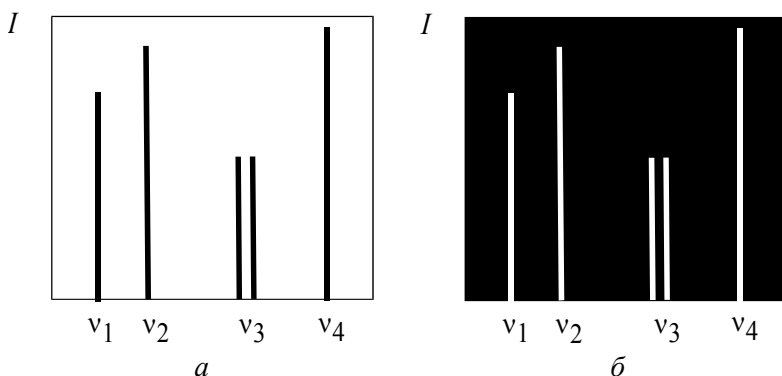


Рис. 1.1. Схемы спектральных линий:
a – поглощения; *б* – излучения

Каждый атом химического элемента таблицы Менделеева имеет уникальный, только ему присущий оптический спектр поглощения или излучения.

Поэтому под **спектральным анализом** в широком смысле понимается физический метод определения качественного и количественного состава вещества, основанный на анализе спектров излучения и поглощения. Данный метод позволяет определять содержание элементов в веществе в количестве до 10^{-5} – 10^{-6} %.

Исследования спектров вещества позволяют судить о свойствах вещества, его химическом составе и характере физических процессов, связанных с излучением или поглощением.

Спектральный анализ применяется в астрофизике для анализа спектров излучения и поглощения звезд и звездных скоплений. В результате исследований спектра Солнца был открыт ранее неизвестный элемент – гелий. Спектральные наблюдения планет позволили обнаружить метан на Юпитере. Было установлено сходство спектров многих звезд со спектром Солнца. По смещению спектральных линий были определены скорости движения звезд и галактик. Так, скорость приближения Сириуса к Земле составила 8 км/с.

Спектральный анализ волос, используемый в медицине, позволяет провести диагностику нарушений минерального обмена и определить многие внутренние заболевания организма.

Спектральный анализ широко применяется в металлургии для анализа элементного состава входного сырья, в том числе лома и отходов производства любой степени засоренности, анализа химического состава полупродуктов на различных стадиях технологического процесса, шлаков, шламов, отработанных катализаторов, отходов гальванического производства; в строительстве, стекольной и цементной промышленности – для входного контроля металлических и неметаллических строительных материалов, анализа состава песка, доломита, стеклянного боя, стекольной продукции, известняков, глин, сырьевых смесей, цемента на содержание добавок.

Спектры определяются свойствами электронных оболочек атомов и молекул, колебаниями атомных ядер, вращением молекул, а также воздействием массы и структуры атомных ядер на положение энергетических уровней. Кроме этого, вид спектра зависит от взаимодействия атомов и молекул вещества с окружающей средой. Поэтому анализ спектров реальных веществ являются сложной и до конца нерешенной задачей.

1.3. Спектры поглощения и излучения

Спектры поглощения и излучения делятся на *сплошные, полосатые, линейчатые*.

Сплошным спектром называется непрерывная зависимость интенсивности излучения от частоты. Сплошные спектры излучения дают нагретые твердые тела и жидкости, а также пары и газы под высоким давлением. Спектр излучения Солнца также представляет собой сплошной спектр.

Полосатые спектры представляют собой совокупности очень близко расположенных линий, сгруппированных в полосы. Полосатые спектры дают вещества в молекулярном состоянии.

Линейчатым называется спектр, состоящий из дискретного набора частот электромагнитного излучения. Линейчатые спектры дают нагретые вещества в атомарном состоянии.

1.4. Полуэмпирическая теория спектра атома водорода и водородоподобных атомов

На примере самого простого атома – атома водорода – рассмотрим элементы теории спектров излучения.

Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. Из квантовой механики следует, что энергия электрона в атоме водорода принимает определенные дискретные значения или **квантуется**:

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер энергетического уровня;

m – масса электрона;

e – заряд электрона;

ε_0 – электрическая постоянная;

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

Число n называется **главным квантовым числом**, которое определяет номер энергетического уровня и значение энергии электрона на данном уровне. **Основным состоянием** электрона в атоме водорода называется наименьшее значение его энергии, равное $E_1 = -13,55$ эВ при $n = 1$ (рис. 1.2). Состояния электрона с $n = 2, 3, \dots$ называются **возбужденными**.

При переходе электрона с более высокого k -го энергетического уровня на n -й энергетический уровень с меньшей энергией атом излучает квант энергии частоты ν в соответствии с правилом частот Н. Бора:

$$h\nu = E_k - E_n, \quad k > n. \quad (1.1)$$

Соотношение (1.1) позволяет получить серии излучения атома водорода (рис. 1.2).

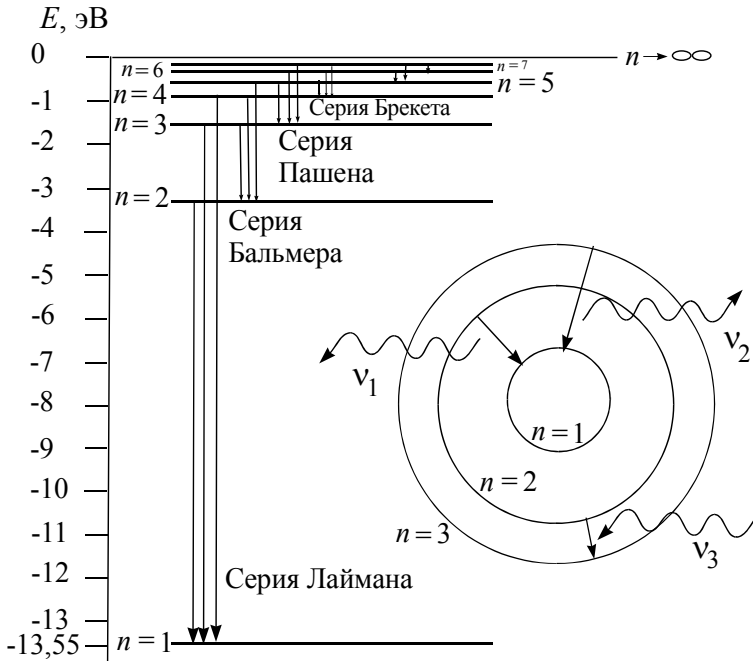


Рис. 1.2. Уровни энергии стационарных состояний электрона в атоме водорода и схема боровских круговых орбит и переходов между ними с излучением и поглощением фотонов

Серией называется совокупность линий излучения с частотами ν_k при переходе электрона атома с более высоких энергетических уровней на общий более низкий энергетический уровень.

Серия Лаймана соответствует переходам с более высоких на основной ($n = 1$) энергетический уровень:

$$\nu_k = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где $k = 2, 3, 4, \dots$ – порядковые номера энергетических уровней, лежащих выше основного;

$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Серия Лаймана находится в ультрафиолетовой области.

Серия Бальмера, лежащая в видимом диапазоне, соответствует переходам электрона с более высоких уровней на второй энергетический уровень:

$$\nu_k = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где $k = 3, 4, 5, \dots$ – порядковые номера энергетических уровней, лежащих выше второго энергетического уровня.

Затем следуют серии, лежащие в инфракрасной области:

серия Пашена: $\nu_k = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{k^2} \right), k = 4, 5, 6, \dots ;$

серия Брекета: $\nu_k = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{k^2} \right), k = 5, 6, 7, \dots ;$

серия Пфунда: $\nu_k = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{k^2} \right), k = 6, 7, 8, \dots ;$

серия Хэмфри: $\nu_k = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{k^2} \right), k = 7, 8, 9, \dots .$

Графически некоторые из представленных серий изображены на диаграмме Гротриана (рис. 1.2). Здесь горизонтальные линии в определенном масштабе изображают уровни энергии. Линии, соединяющие отдельные уровни энергии, дают представление о спектральных линиях, излучаемых атомом при изменении его энергии.

Ридберг показал, что спектральные серии наблюдаются не только для атома водорода, но и для атомов других элементов. Причем частоты всех линий данной серии могут быть описаны выражением

$$\nu_{nk} = T(n) - T(k),$$

где $T(n)$, $T(k)$ – спектральные термы;

n , k – целые числа, определяющие номера энергетических уровней, между которыми происходят переходы электрона в атоме.

Спектральным термом называется функция вида

$$T(n) = \frac{R}{n^2},$$

которая характеризует энергетическое состояние атома.

Водородоподобными атомами называются атомы, имеющие один внешний электрон и полностью заполненные внутренние оболочки.

Для водородоподобных атомов выполняется правило частот Бора (1.1), а также **комбинационный принцип Ритца**: частоты спектральных линий излучения атома могут быть представлены в виде разности двух термов; составляя различные комбинации термов, можно найти все возможные частоты спектральных линий данного атома.

1.5. Квантовые числа. Принцип Паули

Из теории квантовой механики следует, что энергетическое состояние отдельного электрона в атоме описывается четырьмя квантовыми числами:

1) **главное квантовое число** ($n = 1, 2, 3, \dots$) указывает на квантованность (дискретность) энергии электрона в атоме и определяет среднее расстояние от электрона до ядра атома, т. е. размеры электронного облака;

2) **орбитальное квантовое число** ($l = 0, 1, 2, 3 \dots (n - 1)$) указывает на квантованность механического орбитального момента импульса электрона L_l в атоме:

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ (Дж·с).

Орбитальное квантовое число характеризует форму электронной орбиты. Для каждой электронной оболочки с номером n возможно $(n - 1)$ энергетических состояний, определяемых значениями орбитального квантового числа, которые обозначаются следующим образом: $l = 0$ – s -состояние, $l = 1$ – p -состояние, $l = 2$ – d -состояние, $l = 3$ – f -состояние и т. д.

3) **магнитное квантовое число** (m) определяет состояния электрона, различающиеся целочисленными значениями проекций орбитальных моментов L_z на направление z магнитного поля:

$$L_z = \hbar m,$$

где $m = -l, -(l - 1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l - 1), l$.

Для каждого значения l возможно $(2l + 1)$ различных состояний электрона в атоме.

Магнитное квантовое число показывает число возможных ориентаций орбитального момента (рис. 1.3), т. е. возможные ориентации электронной орбиты в пространстве относительно направления магнитного поля. **Пространственным квантованием** называется дискретное изменение ориентации орбитального момента относительно магнитного поля;

4) **спиновое квантовое число** (m_s) характеризует квантованность проекции собственного механического момента импульса электрона (L_{sz}) на направление магнитного поля:

$$L_{sz} = m_s \hbar.$$

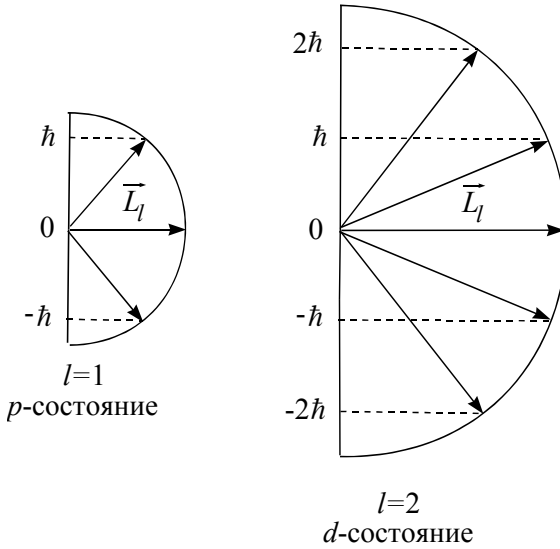


Рис. 1.3. Пространственное квантование орбитального момента импульса в магнитном поле

Собственный механический момент импульса электрона (L_s) называется **спином** и принимает значение, равное $L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}$, где $s = \frac{1}{2}$. Спиновое квантовое число (m_s) принимает два значения: $+\frac{1}{2}$ – при ориентации проекции спина по направлению поля и $-\frac{1}{2}$ – при ориентации проекции спина против поля.

Спиновое квантовое число определяет число возможных ориентаций спина в пространстве относительно направления магнитного поля.

Согласно **принципу запрета Паули** в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в одинаковых стационарных состояниях, все квантовые числа которых совпадают.

Принцип Паули позволяет определить число электронов, обладающих в атоме заданными значениями квантовых чисел.

Число электронов, находящихся в состояниях, определяемых главным квантовым числом n , равно $2n^2$.

Число электронов, определяемых двумя квантовыми числами n и l , равно $2(2l + 1)$. В состоянии, заданном тремя квантовыми числами (n, l, m) , может находиться только два электрона. Поэтому при $l = 0$ может быть только два s -электрона с противоположной ориентацией спинов, при $l = 1$ – только шесть p -электронов, при $l = 2$ – десять d -электронов и т. д.

1.6. Молекулярные спектры

Спектральная линия молекулы должна возникать в результате изменения ее энергии. Полная энергия молекулы состоит из следующих частей: энергии поступательного движения центра масс молекулы ($E_{\text{пост}}$), энергии движения электронов в атомах молекулы ($E_{\text{эл}}$), энергии колебательного движения атомов молекулы относительно друг друга ($E_{\text{кол}}$), энергии вращательного движения молекулы ($E_{\text{вр}}$):

$$E = E_{\text{пост}} + E_{\text{эл}} + E_{\text{кол}} + E_{\text{вр}}.$$

Энергия поступательного движения молекулы ($E_{\text{пост}}$) не квантуется. Поэтому изменение ($E_{\text{пост}}$) не может привести к появлению молекулярного спектра. Тогда энергия молекулы, определяющая ее оптические свойства, будет равна

$$E = E_{\text{эл}} + E_{\text{кол}} + E_{\text{вр}}. \quad (1.2)$$

Согласно правилу частот Бора (1.1), частота ν фотона, испускаемого молекулой при изменении энергии на величину ΔE , определяется формулой

$$\nu = \frac{\Delta E_{\text{эл}}}{h} + \frac{\Delta E_{\text{кол}}}{h} + \frac{\Delta E_{\text{вр}}}{h}.$$

Так как каждое из слагаемых выражения (1.2) принимает ряд дискретных значений, то и их изменения также имеют

дискретные значения. Поэтому спектр молекулы состоит из густо расположенных линий, образующих полосы.

Поскольку $\Delta E_{\text{вр}} \ll \Delta E_{\text{кол}} \ll \Delta E_{\text{эл}}$, то частоты молекулярных спектров могут лежать в различных диапазонах электромагнитных волн. При низких частотах в дальней инфракрасной области возбуждаются вращательные уровни энергии молекулы, в более близкой инфракрасной области возбуждаются колебательные уровни энергии, а также вращательные, что приводит к появлению вращательно-колебательного спектра. В видимой и ультрафиолетовой областях энергии фотонов достаточно, чтобы изменить пространственное расположение электронов в молекуле, т. е. осуществить переходы между различными электронными энергетическими уровнями с изменением электронной конфигурации. В данном случае возникают электронно-колебательные молекулярные спектры.

1.7. Ширина и интенсивность спектральной линии

Естественную ширину спектральной линии можно оценить на основе соотношения неопределенностей Гейзенберга:

$$\Delta E \Delta \tau \geq \hbar, \quad (1.3)$$

где ΔE – неопределенность энергии, которая задает ширину энергетического уровня;

$\Delta \tau \sim 10^{-8}$ с – среднее время существования атома в возбужденном состоянии.

Из выражения (1.3) имеем

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{\Delta \tau}.$$

Учитывая, что

$$\Delta E = \hbar \Delta \nu, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi},$$

$$\Delta E = 2\pi\hbar\Delta\nu, \quad 2\pi\hbar\Delta\nu \geq \frac{\hbar}{\Delta\tau},$$

то изменение частоты спектральной линии составляет

$$\Delta\nu \geq \frac{1}{2\pi\Delta\tau}.$$

Из связи частоты с длиной волны получаем величину **естественной ширины спектральной линии** $\Delta\lambda \approx 10^{-5}$ нм.

На ширину спектральной линии влияют такие факторы, как движение излучающих атомов (эффект Доплера), приводящее к изменению длины волны; соударение возбужденных атомов, которое сокращает время жизни атома в возбужденном состоянии.

Интенсивность спектральной линии зависит от концентрации атомов на возбужденных уровнях и условий, в которых находится излучающая среда. Вероятности переходов атомов, определяющие интенсивности линий, вычисляются в квантовой механике.

1.8. Спектральные приборы. Монохроматоры

Исследование спектров производится оптическими спектральными приборами.

Спектральными называются оптические приборы, в которых производится разложение электромагнитного излучения оптического диапазона на монохроматические составляющие, т. е. сложное излучение прибор должен разложить на составляющие по частотам или по длинам волн. К *оптическому* диапазону относятся инфракрасный, видимый и ультрафиолетовый диапазоны.

Для разложения электромагнитного излучения могут быть использованы такие физические явления, как дисперсия, многолучевая интерференция и др.

В зависимости от назначения, спектральные приборы разделяются:

1. **Монохроматоры**, выделяющие узкую спектральную область или спектральную линию;

2. **Полихроматоры**, выделяющие широкую или одновременно несколько узких областей спектра или несколько спектральных линий;

3. **Спектрографы и спектроскопы**, позволяющие получать или наблюдать одновременно широкие области спектра;

4. **Спектрометры**, позволяющие сканировать спектры при помощи фотоэлектрического, теплового приемника и регистрирующего устройства (компьютера).

Монохроматор – основная часть спектрометра, включающая входную щель, коллиматорный и фокусирующий объективы, диспергирующее устройство (призма) и выходную спектральную щель.

Принцип работы монохроматора основан на *явлении дисперсии света*. Оптическая схема монохроматора показана на рис. 1.4.

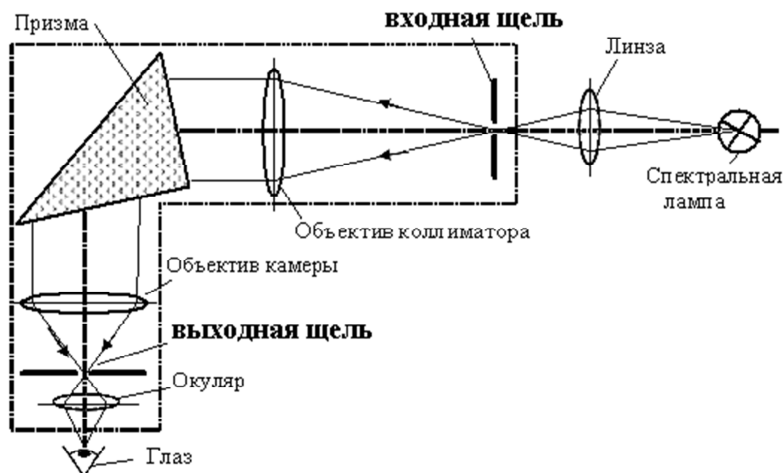


Рис. 1.4. Принципиальная схема монохроматора УМ-2

Если монохроматор используется в качестве спектроскопа, то выходная щель заменяется насадкой со сменными окулярами, в которые рассматривается изображение входной щели. В этом случае объектив с окуляром насадки превращается в зрительную трубу, а монохроматор – в спектроскоп постоянного отклонения (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Внешний вид спектрометра

С помощью монохроматора можно выделять участки спектра в видимой и ближней инфракрасной областях с длинами волн от 380 нм до 1000 нм. Входная щель расположена в фокальной плоскости объектива коллиматора. В качестве входной щели коллиматора применяется стандартная симметричная щель, ширина которой регулируется микрометрическим винтом. Когда щель выставлена, трогать микрометрический винт не рекомендуется.

Свет, прошедший через входную щель, после объектива выходит параллельным пучком и попадает на призму (рис. 1.4), при помощи которой разлагается на спектральные линии. Лучи света, пройдя диспергирующую призму, попадают в объектив выходной трубы монохроматора, который собирает их в плоскости выходной щели.

Объектив камеры дает изображение щели в своей фокальной плоскости в виде ряда спектральных линий, наблюдение

которых производится глазом через окуляр. Монохроматор закрепляется на оптической скамье (рис. 1.5), на которой устанавливаются также спектральные лампы.

Объектив коллиматора, диспергирующая призма, объектив камеры и окуляр размещены внутри корпуса прибора. Ширина входной щели регулируется микрометрическим винтом, а ее длина устанавливается выдвижной диафрагмой. В фокальной плоскости объектива камеры имеется индекс в виде треугольника, который подсвечивается лампочкой на тубусе окуляра. Индекс виден через окуляр и служит для определения положения спектральных линий. Вращая окуляр, можно получить резкое изображение индекса. На корпусе монохроматора расположен винт коллиматора, который служит для фокусировки коллиматора, обеспечивая резкое изображение спектральных линий.

Вращением барабана осуществляется поворот диспергирующей призмы. Барабан имеет спиральную шкалу с цифровыми делениями от 0 до 3500 град. При повороте барабана указатель скользит по размеченной в градусах спиральной канавке. Шкала оцифрована: 0, 50, 100, 150 град и т. д. Цена малого деления шкалы составляет 2 град. При повороте барабана на одно деление (2 град) призма поворачивается на угол 20 секунд. При повороте барабана призма поворачивается и происходит перемещение спектра таким образом, что можно установить в поле зрения окуляра любую спектральную линию и, совместив ее с индексом, произвести ее измерение в делениях на барабане.

1.9. Явление дисперсии

В основе принципа работы монохроматора лежит явление дисперсии.

Дисперсия – это явление зависимости абсолютного показателя преломления вещества от длины волны (или частоты) све-

та, или, что то же самое, зависимость фазовой скорости распространения света в веществе от его длины волны (или частоты).

Для оптически прозрачных сред лучи красного цвета имеют минимальный показатель преломления (максимальную скорость распространения волн), а фиолетового – максимальный показатель преломления (минимальную скорость распространения волн). Такую дисперсию света называют **нормальной**.

Если излучение состоит из множества монохроматических лучей, то каждому лучу определенного цвета в дисперсионной среде (в призме) соответствует своя величина показателя преломления n . Так как угол отклонения лучей призмой зависит от показателя преломления n , который, в свою очередь, в дисперсионной среде является функцией длины волны λ , то лучи разных длин волн после прохождения призмы будут отклоненными на разные углы. Вследствие этого призма разлагает излучение на составляющие его монохроматические лучи, т. е. в спектр.

1.10. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Зарисуйте в рабочую тетрадь табл. 1.1.

Таблица 1.1

Спектр излучения ртутной лампы

№ п/п	Цвет линии спектра	Интенсивность	Длина волны, нм	Деления на барабане
1	Фиолетовый	яркая	405,0	
2	Фиолетовый	средняя	407,8	
3	Синий	яркая	435,8	
4	Зеленый	яркая	546,1	
5	Желтый	яркая	576,9	
6	Желтый	яркая	579,1	
7	Красный	яркая	623,0	
8	Красный	яркая	691,0	

2. Изучите экспериментальную установку (рис. 1.6).

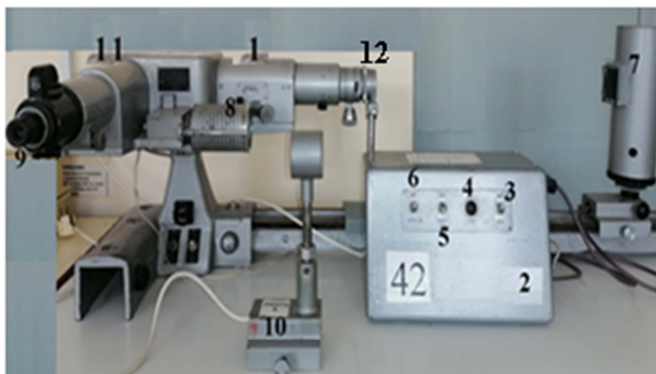


Рис. 1.6. Внешний вид установки:

1 – монохроматор; 2 – блок питания спектральной лампы с ртутью;
3 – тумблер «Сеть»; 4 – кнопка «Пуск»; 5 – тумблер «Вкл» ртутной лампы ДРШ; 6 – тумблер «Вкл» лампы К12; 7 – ртутная лампа ДШР;
8 – барабан; 9 – окуляр; 10 – лампа неизвестного излучателя X;
11 – зрительная труба; 12 – входная щель монохроматора

Задание 1. Определить зависимость между длинами волн монохроматических пучков, проходящих через выходную щель, и соответствующими делениями шкалы барабана (градуировка монохроматора).

1. Включите монохроматор в сеть. Для этого на блоке питания 2 включите тумблер 3 «Сеть» и нажмите кнопку 4 «Пуск».

2. Для градуировки прибора используется ртутная лампа 7 ДРШ, установленная под кожухом. Эта лампа – мощный источник света. Во время работы в лампе развивается давление до 30 атмосфер, поэтому обращаться с ней следует осторожно. Лампа дает линейчатый спектр.

3. Включите ртутную лампу тумблером 5 «Вкл» ртутной лампы ДРШ в сеть.

4. Градуировку рекомендуется начать с фиолетовой линии. Для этого поворотом барабана 8 совместите указатель в поле

зрения окуляра 9 с фиолетовой линией, определите соответствующее ей деление барабана 8 и занести его значение в табл. 1.1.

5. Сделайте пробный отсчет и покажите его преподавателю. Если отсчет сделан правильно, можно приступить к измерениям.

6. Определите показания барабана поворотного механизма, соответствующие всем спектральным линиям ртутной лампы ДРШ, представленным в табл. 1.1.

7. По полученным данным табл. 1.1 постройте градуировочный график: по оси X отложите измеренные показания барабана поворотного механизма спектрометра, по оси Y – соответствующие длины волн λ в нм спектральных линий ртути.

Задание 2. Определить по спектру излучения неизвестный источник излучения.

1. Лампу 10 с неизвестным газом X установите вплотную к входной щели 12 монохроматора спектрометра и включите ее вилку в сеть.

2. Определите показания барабана поворотного механизма монохроматора, соответствующие всем спектральным линиям из табл. 1.2 неизвестного газа.

Таблица 1.2

Спектр излучения неизвестной лампы X

Цвет линии спектра	Длины волн в делениях на барабане	Длины волн λ , нм
Красный		
Красный		
Красный		
Красный		
Оранжевый		
Оранжевый		
Желтый		
Желтый		
Зеленый		
Зеленый		

3. Используя градуировочный график, переведите длины волн в табл. 1.2 в делениях на барабане наблюдаемых линий спектра неизвестного источника в длины волн в нм. Полученные значения занесите в табл. 1.2.

4. Сравните полученный набор длин волн со значениями длин волн в спектрах различных газов, приведенных в прилагаемых к порядку выполнения таблиц, и определите, какой газ является источником излучения в лампе.

5. Сделайте вывод.

Задание 3. Провести сравнительный анализ спектров излучения ртутной лампы и энергосберегающей лампы.

1. Снимите со скамьи лампу *X* и на ее место, у входной щели *I2* монохроматора, установите энергосберегающую лампу и включите ее в сеть.

2. Определите показания барабана поворотного механизма монохроматора, соответствующие 10 спектральным линиям, которые вы увидите в окуляре для данной лампы. Цвет линий и показания барабана занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Спектр излучения энергосберегающей лампы

Цвет линии спектра	Длины волн в делениях на барабане	Длины волн λ , нм

3. Используя градуировочный график, определите длины волн в нм для линий спектра из табл. 1.3.

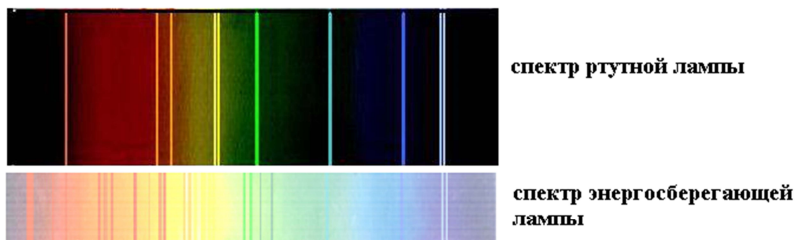


Рис. 1.7. Спектры излучения ртути и энергосберегающей лампы

4. Сравните полученный набор длин волн со значениями длин волн в спектре ртутной лампы (рис. 1.7 и табл. 1.1).

5. Сделайте вывод о наличии паров ртути в энергосберегающей лампе.

1.11. Контрольные вопросы

1. Что называется энергетическим состоянием атома?
2. Дайте определение оптических и неоптических переходов электронов в атоме.
3. Дайте определения интенсивности излучения, оптического спектра излучения, спектрального анализа электромагнитного излучения.
4. Какое излучение называется монохроматическим?
5. Как возникают спектры излучения и поглощения?
6. Что понимается под спектральным анализом в широком смысле?
7. Перечислите виды спектров. Охарактеризуйте каждый вид спектра.
8. Из каких основных частей состоит спектральный прибор?
9. Как образуется спектр атома водорода и водородоподобных атомов? Что такое серия? Какие серии может излучать

атом водорода? Приведите формулу, описывающую частоты линий серии.

10. Что называется спектральным термом? Сформулируйте комбинационный принцип Ритца.

11. Какими квантовыми числами описывается энергетическое состояние электрона в атоме? Охарактеризуйте их.

12. Каков механизм возникновения молекулярных спектров?

13. Как можно оценить ширину спектральной линии?

14. Какие бывают спектральные приборы?

15. Опишите работу спектрометра.

16. Дайте определение явления дисперсии. Для чего используется данное явление в монохроматоре?

17. Из чего состоит экспериментальная установка и каков принцип ее работы?

Лабораторная работа № 2 (№ 12)

2. ИЗУЧЕНИЕ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: изучить основные закономерности внешнего, однофотонного (линейного) фотоэффекта, экспериментально исследовать зависимости фототока от величины анодного напряжения, фототока насыщения от светового потока, проанализировать зависимость задерживающего напряжения от частоты света, падающего на катод фотоэлемента.

Приборы и принадлежности: монохроматор, источник тока, микроамперметр, вольтметр, источник света.

2.1. Экспериментальное исследование явления внешнего фотоэффекта

Внешним фотоэффектом называется явление испускания или явление эмиссии электронов с поверхности вещества под действием света.

Внешний фотоэффект наблюдается в твердых телах (металлах, полупроводниках, диэлектриках), а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Электроны, вылетающие с поверхности вещества при внешнем фотоэффекте, называются **фотоэлектронами**, а возникающий при этом электрический ток – **фототоком**.

Исследование этого явления привело к появлению термина **квант света**, что сыграло чрезвычайно важную роль в развитии квантовой физики. Вместе с тем фотоэлектрический эффект получил широкое применение в различных областях науки и техники.

Впервые явление внешнего фотоэффекта было открыто в 1887 г. Г. Герцем, который обнаружил, что освещение ультрафиолетовым светом электродов искрового промежутка, находящихся под напряжением, облегчает проскакивание искры между ними.

В 1888–1889 гг. явление было изучено А. Г. Столетовым, а в 1905 году А. Эйнштейн объяснил закономерности внешнего фотоэффекта, показав, что фотоэффект вызывается поглощением электронами световых квантов. Согласно А. Эйнштейну световой поток нужно рассматривать как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов.

На рис. 2.1 представлена схема экспериментальной установки для исследования внешнего фотоэффекта.

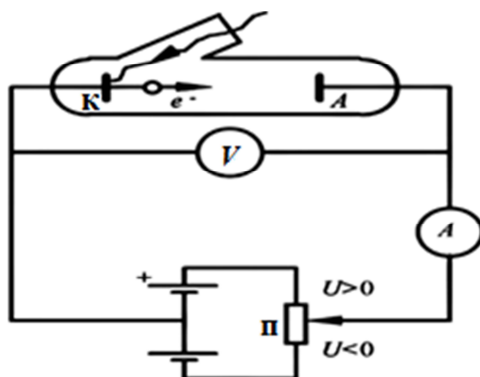


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки для исследования внешнего фотоэффекта

Электроды (катод К и анод А) помещены в запаянную вакуумную трубку и находятся под напряжением. При попадании света на катод электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду. В результате в цепи возникает фототок, измеряемый амперметром (А). Напряжение (U) между катодом и анодом можно изменять с помощью потенциометра (П).

Вольт-амперной характеристикой фотоэффекта называется зависимость силы тока от величины приложенного между катодом и анодом напряжения.

Зависимость фототока (I) от напряжения (U), приложенного между катодом (К) и анодом (А), при освещении катода

постоянным потоком монохроматического света изображена на рис. 2.2.

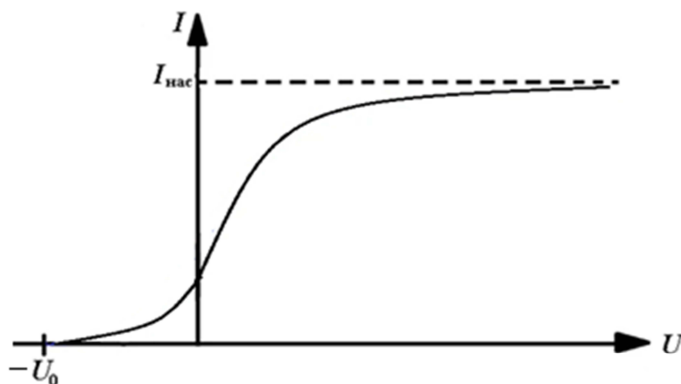


Рис. 2.2. Зависимость фототока от напряжения при постоянном световом потоке

Световой поток – энергия света, падающая на поверхность вещества за единицу времени.

Из рис. 2.2 видно, что при некотором напряжении между анодом и катодом фототок достигает насыщения, то есть все электроны, испущенные катодом, под действием света достигают анода.

Сила фототока насыщения ($I_{\text{нас}}$) определяется количеством электронов, испускаемых катодом под действием света, в единицу времени.

Тогда число фотоэлектронов (n), покидающих катод за одну секунду, можно определить следующим образом:

$$n = I_{\text{нас}} / e,$$

где e – заряд электрона.

Фотоэлектроны, испускаемые катодом, имеют различные начальные скорости и, соответственно, различные кинетические энергии. При $U = 0$ некоторое количество фотоэлект-

ронов, кинетической энергии которых достаточно, чтобы достичь анода, преодолевает поле, созданное облаком фотоэлектронов у поверхности катода, тем самым создается слабый фототок. При уменьшении напряжения от 0 до $-U_0$ фототок постепенно снижается и при $U = -U_0$ полностью прекращается. Величину напряжения U_0 называют задерживающим напряжением.

Задерживающим напряжением или задерживающей разностью потенциалов называется значение отрицательного напряжения U_0 , при котором величина силы фототока I равна нулю.

Причина разнообразия скоростей фотоэлектронов, испускаемых с поверхности катода, заключается в том, что свет может освободить электроны не только с поверхности вещества, но и из глубины. Последние теряют часть сообщенной им энергии раньше, чем выйдут на поверхность, вследствие случайных столкновений внутри вещества. Поэтому физический интерес представляет *максимальная скорость*. Ибо она характеризует энергию, сообщаемую электрону поверхности вещества при освобождении его светом.

Для того чтобы полностью задержать все электроны, обладающие максимальной кинетической энергией, электростатическое поле должно совершить работу, равную eU_0 . При этом выполняется соотношение

$$eU_0 = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (2.1)$$

где m – масса электрона;

v_{\max} – максимальная скорость фотоэлектронов.

Экспериментально установлены **три закона внешнего фотоэффекта (законы А. Г. Столетова)**:

1. При неизменном спектральном составе света, падающего на катод, фототок насыщения пропорционален световому потоку.

2. Для данного вещества максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница внешнего фотоэффекта, то есть минимальная частота света $\nu_{кр}$ (максимальная длина волны $\lambda_{кр}$), при которой еще возможен фотоэффект.

Второй и третий законы внешнего фотоэффекта не могут быть объяснены с точки зрения классической электромагнитной теории света.

Действительно, согласно волновой теории электроны в металле, из которого сделан катод, под действием падающей электромагнитной волны должны совершать вынужденные колебания с амплитудой, пропорциональной амплитуде этой волны. При резонансе собственных колебаний электрона с колебаниями вектора напряженности электрического поля (E) падающей волны амплитуда колебаний электрона резко возрастает. Это может привести к разрыву связи электрона с атомами металла и выходу его на поверхность металла с некоторой скоростью. Следовательно, кинетическая энергия электрона находится в прямой зависимости от величины интенсивности падающей на поверхность металла волны. Но это противоречит эксперименту, поскольку от интенсивности падающей волны зависит только число выбиваемых фотоэлектронов (первый закон фотоэффекта), а кинетическая энергия электронов от интенсивности света не зависит (второй закон фотоэффекта).

Кроме того, волновая теория не смогла объяснить безынерционность фотоэффекта, установленную опытным путем. Безынерционность фотоэффекта заключается в том, что испускание фотоэлектронов начинается сразу же, как только на катод попадает свет с частотой $\nu \geq \nu_{кр}$. Согласно классической физике для передачи энергии электромагнитной волной электрону требуется значительное время.

2.2. Объяснение явления фотоэффекта на основе квантовой теории света. Уравнение Эйнштейна

Развивая идеи Планка о квантовании энергии, Эйнштейн предположил, что свет не только излучается в виде квантов, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом также в виде квантов энергии – фотонов. При внешнем фотоэффекте в металлах фотон передает свою энергию электронам проводимости металла.

Фотон – квант электромагнитного излучения. Фотон представляет собой частицу, обладающую энергией E , массой и импульсом. Энергия фотона:

$$E = h\nu = ch/\lambda,$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота света;

c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны.

Фотон движется со скоростью света, масса покоя фотона равна нулю.

Для того чтобы выйти на поверхность металла, электрон должен получить от фотона энергию, равную работе выхода $A_{\text{вых}}$.

Работа выхода электрона $A_{\text{вых}}$ – это работа, которую нужно совершить, чтобы вырвать электрон из поверхности вещества. Величина работы выхода зависит от химического состава вещества и состояния его поверхности, в частности, от ее чистоты. Работа выхода электронов из металлов составляет порядка нескольких электрон-вольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Наличие работы выхода связано с тем, что для электронов проводимости на поверхности, например металла, существует потенциальный барьер, препятствующий их вылету из вещества. Этот барьер возникает по двум основным причинам. Одна из них связана с тем, что электрон, вылетевший из металла, индуцирует на его поверхности положительный электричес-

кий заряд. Между электроном и поверхностью возникает сила притяжения, стремящаяся вернуть электрон в металл. Другая причина связана с тем, что электроны за счет теплового движения могут выходить на поверхность металла, создавая над ней отрицательно заряженный слой. В этом случае в металле формируется положительно заряженный слой ионов. В результате образуется двойной электрический слой, для преодоления которого требуется совершить работу.

Если энергия фотона ($h\nu$) больше работы выхода ($A_{\text{вых}}$), то электрон вырывается из металла, а оставшаяся часть энергии фотона идет на приращение кинетической энергии электрона. В соответствии с законом сохранения энергии имеем

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2.2)$$

где v_{max} – максимальная скорость электрона;

m – масса покоя электрона.

Уравнение (2.2) представляет собой *уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта*.

Даже при использовании света строго определенной частоты электронам, выходящим из металла, соответствуют разные кинетические энергии, значения которых изменяются от нуля до E_{max} . Это происходит из-за частичной потери энергии при столкновениях в процессе движения электронов к поверхности металла. Часть электронов, потеряв энергию при столкновениях, так и не выходит из металла, поэтому число выходящих электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов.

Первый закон фотоэффекта может быть объяснен в рамках квантовой теории света. При малых интенсивностях света каждый электрон поглощает один фотон, поэтому число фотоэлектронов должно быть пропорционально числу падающих фотонов. Вместе с тем световой поток (Φ) определяется коли-

чеством фотонов, падающих на поверхность за единицу времени. Следовательно, фототок насыщения должен быть пропорционален световому потоку:

$$I_{\text{нас}} \sim \Phi.$$

Второй закон фотоэффекта непосредственно следует из уравнения Эйнштейна:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m v_{\text{max}}^2}{2},$$

$$E_{\text{кин}} = h\nu - A_{\text{вых}}.$$

Из последнего уравнения видно, что кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.

Третий закон фотоэффекта объясняется следующим образом. Так как красная граница фотоэффекта – это минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ падающего света, при которой начинается фотоэффект, то $h\nu_{\text{кр}}$ – минимальная энергия фотона, передаваемая электрону и идущая на совершение работы выхода $A_{\text{вых}}$ электрона из вещества. Тогда

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Если $h\nu < A_{\text{вых}}$, то электроны не могут покинуть металл.

В рассмотренных выше явлениях фотоэффекта электрон получает энергию лишь от одного фотона. Такие процессы называются **однофотонными**. С изобретением лазеров было получено излучение с большой плотностью фотонов, поэтому электрон может поглотить сразу несколько фотонов. При этом электрон может приобрести энергию, необходимую для выхо-

да из вещества, даже под действием света с частотой, меньше красной границы.

2.3. Применение явления фотоэффекта

Фотоэлементами (рис. 2.3) называются приборы, в основе принципа действия которых лежит фотоэффект. Так как эффективность преобразования света у них небольшая, то в качестве источников электроэнергии фотоэлементы не используются, а применяются в различных схемах автоматики для управления электрическими цепями с помощью световых пучков.

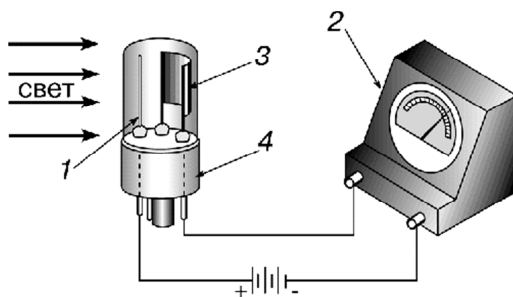


Рис. 2.3. Схема фотоэлемента:
1 – анод; 2 – микроамперметр;
3 – фотокатод; 4 – корпус фотоэлемента

На основе внешнего фотоэффекта эффективно работают вакуумные и газонаполненные фотоэлементы.

Вакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянный сосуд, в котором создан глубокий вакуум. Часть внутренней поверхности баллона покрывают тонким слоем серебра (подложка), на который напыляют светочувствительный слой из металла или оксида бария, или соединения сурьмы с цезием и т. п. Этот электрод служит катодом. Выбор материала фотокатода определяется рабочей областью спектра, например, для регистрации видимого света и инфракрасного излучения

используется кислородно-цезиевый катод, для ультрафиолетового излучения и коротковолновой части видимого света – сурьмяно-цезиевый. Вакуумные фотоэлементы безынерционны и для них наблюдается строгая пропорциональность величины фототока от интенсивности излучения. Эти свойства позволяют использовать вакуумные фотоэлементы в качестве фотометрических приборов, таких как фотоэлектрический экспонометр, люксметр (измеритель освещенности), а также в схемах световой сигнализации.

Для регистрации очень слабого излучения, вплоть до отдельных квантов, используются фотоэлектронные умножители.

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) – вакуумный прибор, в котором поток электронов, излучаемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии. ФЭУ состоит из фотокатода и нескольких (до 15–20) электродов (динодов) с высоким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (рис. 2.4).

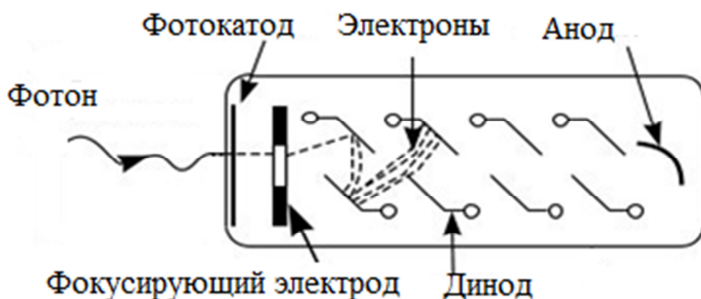


Рис. 2.4. Схема фотоэлектронного умножителя

Между динодами прикладывается разность потенциалов. Свет, падающий на фотокатод, вырывает электроны, которые в процессе пролета к динодам приобретают значительную скорость. Их число по мере движения к аноду за счет вторичной электронной эмиссии значительно возрастает. В результате си-

ла тока на выходе ФЭУ будет пропорциональна интенсивности падающего излучения. А энергия электрического тока умножителя будет во много раз превосходить энергию света, попадающего на вход ФЭУ. Усиление достигается за счет совершения работы диодами по ускорению потока электронов.

Коэффициент усиления электронного тока достигает 10^9 – 10^{11} , так что даже отдельные фотоэлектроны создают на выходе ФЭУ импульсы тока большой амплитуды, а интегральная чувствительность ФЭУ достигает тысяч ампер на люмен, что свидетельствует о возможности измерения малых световых потоков. Темновой ток умножителя (это ток в анодной цепи при отсутствии светового потока) может достигать $\sim 10^{-10}$ А.

Большим преимуществом всех приемников света, использующих внешний фотоэффект, является то обстоятельство, что их фототок не изменяется при изменении нагрузки. Это означает, что при малых значениях фототока можно применять практически сколько угодно большие сопротивления нагрузки и тем самым достичь высокого падения напряжения на них, достаточно удобного для регистрации или усиления.

Фотоэлектронные умножители обладают малой инерционностью и могут работать на весьма высоких частотах. Их применяют для регистрации световых импульсов, следующих через наносекундные промежутки времени. Кроме того, ФЭУ применяются во многих областях науки и техники – в астрономии, в ядерной физике, фототелеграфии и телевидении, для измерения малых световых потоков и для спектрального анализа.

Среди недостатков следует отметить необходимость использовать высоковольтные блоки питания (до 2,5 кВ), а также большие габариты ФЭУ.

Анализ энергий и углов вылета фотоэлектронов при внешнем фотоэффекте позволяет исследовать поверхности материалов, из которых происходит эмиссия электронов.

На внешнем фотоэффекте основана работа *электронно-оптического преобразователя* (ЭОП), предназначенного для

преобразования изображения из одной области спектра в другую, а также для усиления яркости изображений.

Схема действия простейшего ЭОП заключается в следующем. Световое изображение объекта, проецированное на полупрозрачный фотокатод, преобразуется в электронное изображение. Ускоренные и сфокусированные электрическим полем электроны попадают на люминесцентный экран. Здесь электронное изображение благодаря катодолюминесценции вновь преобразуется в световое.

В медицине ЭОП применяют для усиления яркости рентгеновского изображения, это позволяет значительно уменьшить дозу облучения человека. Если сигнал с ЭОП подать в виде развертки на телевизионную систему, то на экране телевизора можно получить «тепловое» изображение предметов. Части тела, имеющие разные температуры, различаются на экране либо цветом при цветном изображении, либо освещенностью, если изображение черно-белое. Такая техническая система, называемая **тепловизором**, используется для нахождения утечек тепла, например, в жилых зданиях.

Кроме рассмотренных выше приборов, использующих внешний фотоэффект, существуют устройства, основанные на внутреннем фотоэффекте. На внутреннем фотоэффекте основана работа фотосопротивлений, если энергия кванта света превышает ширину запрещенной зоны полупроводника или диэлектрика, то электрон, поглотивший квант света, перейдет из валентной зоны в зону проводимости, что приведет к увеличению электропроводности вещества. При этом количество образующихся носителей тока пропорционально падающему световому потоку. Поэтому фотосопротивления нашли широкое использование для целей фотометрии. Применение фотосопротивлений позволяет производить измерения в далекой инфракрасной области спектра (до ~ 4 мкм), а также в областях рентгеновского и гамма-излучений. Кроме того, они малогабаритны, имеют низкое напряжение питания и высокую ин-

тегральную чувствительность. При освещении полупроводника не только изменяется его электропроводность, но возникает также электродвижущая сила (ЭДС). Наиболее важным типом фотоЭДС является так называемая вентильная фотоЭДС. Она возникает в том случае, когда свет генерирует носители заряда (электроны и дырки) в p -области полупроводника вблизи потенциального барьера, т. е. при освещении, например, p - n перехода.

Электронно-дырочные пары диффундируют к p - n переходу под действием поля потенциального барьера перехода. Электроны переходят в n -область, а дырки остаются в p -области. В результате возникает фотоЭДС.

Кремниевые и другие вентильные фотоэлементы применяются для создания солнечных батарей, непосредственно преобразующих световую энергию в электрическую. Солнечные батареи наибольшее применение получили на космических аппаратах в качестве источников ЭДС. Однако коэффициент полезного действия таких батарей составляет только около 10 %.

В настоящее время интенсивно ведутся исследования по непосредственному преобразованию солнечной энергии в электрический ток, используя наноантенны. Наноантенна способна эффективно поглотить электромагнитное излучение любой длины. Единственным условием ее эффективной работы является размер, пропорциональный длине поглощаемой волны. Падающий на антенну свет вызывает колебания электронов в антенне с той же частотой, что и поглощаемый свет. Движение электронов в антенне вызывает переменный ток в цепи антенны. Частота солнечного излучения в видимом спектре находится в пределах от 400 до 790 ТГц. Выпрямить сразу такой переменный ток в настоящее время технически невозможно. Поэтому этот переменный ток преобразуется в тепло. Следующий слой наноантенн поглощает тепловое излучение в допустимом диапазоне частот. Электрические импульсы этого слоя выпрямляются в постоянный ток.

Самым важным достоинством наноантенн как устройств для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию является их высокий КПД, достигающий более 80 %.

Кроме этого наноантенны намного дешевле существующих фотоэлементов. Например, стоимость материалов, необходимая для создания наноантенного массива площадью в 1 м², не превышает 10 долларов США. Высокий КПД и низкая стоимость открывают широкие возможности для использования наноантенн в энергетике.

2.4. Экспериментальное определение величин постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта (2.2) с учетом выражения (2.1) запишем в виде

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + eU_0. \quad (2.3)$$

Отсюда найдем задерживающее напряжение

$$U_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{e}. \quad (2.4)$$

График зависимости $U_0 = f(\nu)$, определяемой выражением (2.4), представляет собой прямую линию (рис. 2.5).

Точка пересечения прямой с осью абсцисс дает величину красной границы фотоэффекта ($\nu_{\text{кр}}$). Экстраполируя прямую до пересечения с осью ординат, получим значение отношения $A_{\text{ВЫХ}} / e$, откуда легко определить работу выхода электронов с поверхности катода $A_{\text{ВЫХ}}$.

Так как $A_{\text{ВЫХ}} = h\nu_{\text{кр}}$, то уравнение (2.3) запишем в виде

$$h\nu = h\nu_{\text{кр}} + eU_0. \quad (2.5)$$

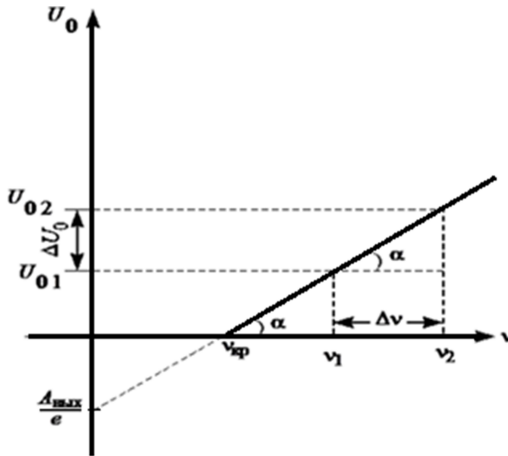


Рис. 2.5. Зависимость задерживающего напряжения от частоты света

Уравнение (2.5) для частот света ν_1 и ν_2 будет иметь вид

$$h\nu_1 = h\nu_{\text{кр}} + eU_{01}, \quad h\nu_2 = h\nu_{\text{кр}} + eU_{02}.$$

Вычтем из второго уравнения первое:

$$h\nu_2 - h\nu_1 = eU_{02} - eU_{01},$$

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1, \quad \Delta U_0 = U_{02} - U_{01},$$

тогда

$$h\Delta\nu = e\Delta U_0.$$

Из последнего выражения получаем формулу для определения значения постоянной Планка h :

$$h = e \frac{\Delta U_0}{\Delta\nu}.$$

Из рис. 2.5 видно, что

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} = \text{tg}\alpha.$$

Следовательно, постоянная Планка:

$$h = etg\alpha.$$

Совпадение значения постоянной Планка ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), полученного в экспериментах по фотоэффекту, с результатами других методов ее определения подтвердило правильность предположения Эйнштейна о квантовом характере взаимодействия света с веществом.

2.5. Общий вид установки и методика выполнения лабораторной работы

Установка для изучения явления внешнего фотоэффекта показана на рис. 2.6. Свет от источника *1* через входную щель, ширина которой регулируется винтом *2*, попадает в монохроматор. При попадании света на поворотную призму монохроматора, происходит выделение определенного спектрального участка излучения.

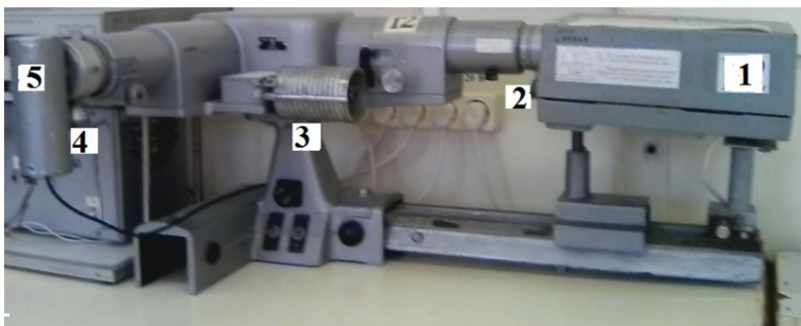


Рис. 2.6. Общий вид оптической части установки для изучения явления внешнего фотоэффекта:

- 1* – источник света; *2* – винт установки ширины входной щели;
- 3* – барабан для выделения нужного участка спектра;
- 4* – винт установки ширины выходной щели; *5* – фотоэлемент

Поворот призмы производится с помощью барабана *3*. Затем выделенный спектральный участок излучения через вы-

ходную щель монохроматора, ширина которой регулируется винтом 4, попадает на фотоэлемент 5.

При проведении экспериментов высота входной щели и ее освещенность остаются постоянными. Поэтому величина светового потока, проходящего через входную щель, может быть изменена при помощи уменьшения или увеличения ширины входной щели.

Величина анодного напряжения фотоэлемента регулируется при помощи ручки потенциометра 5 и регистрируется вольтметром 6, величина фототока измеряется микроамперметром 7 (рис. 2.7).

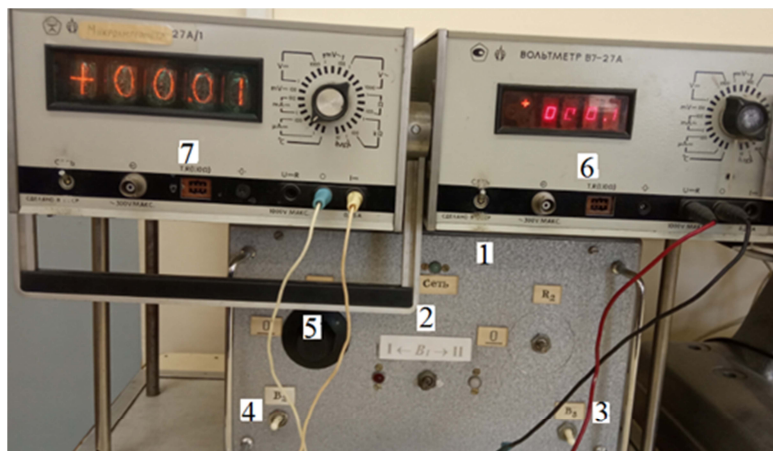


Рис. 2.7. Блок управления фотоэлемента:

- 1 – источник тока; 2 – тумблер B_1 ;
3 – тумблер B_3 ; 4 – тумблер B_2 ; 5 – ручка потенциометра

2.6. Порядок выполнения лабораторной работы

I. Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного фотоэлемента

1. Подготовка к измерениям

1.1. Изучите экспериментальную установку (рис. 2.6 и рис. 2.7).

1.2. Зарисуйте в рабочую тетрадь табл. 2.1 и табл. 2.2.

1.3. Перед включением установки проверьте, что тумблеры 4 (B_2), 3 (B_3) (рис. 2.7) на блоке управления и тумблеры «Сеть» на измерительных приборах находятся в выключенном состоянии.

1.4. Проверьте, чтобы были установлены пределы измерения на вольтметре 6 – «100» вольт, на микроамперметре 7 – «10» мкА.

1.5. Ручку потенциометра 5 (рис. 2.7) вращением против хода часовой стрелки переведите в крайнее левое положение.

1.6. Включите тумблеры «Сеть» измерительных приборов. Установите переключатель 2 (B_1) в положение 1 (рис. 2.7).

1.7. Включите тумблер 4 блока управления (при исправной работе загорается сигнальная лампа).

1.8. Проверьте на барабане монохроматора 3 установлено ли 2250° ($\lambda = 700$ нм).

2. Проведение измерений зависимости величины фототока от анодного напряжения фотоэлемента

2.1. Проверьте, что ширина выходной щели составляет 3 мм. **Выходную щель не изменяйте во время проведения эксперимента.**

2.2. Установите ширину входной щели $\Delta x = 2$ мм. Для установки ширины входной щели необходимо ноль на подвижной

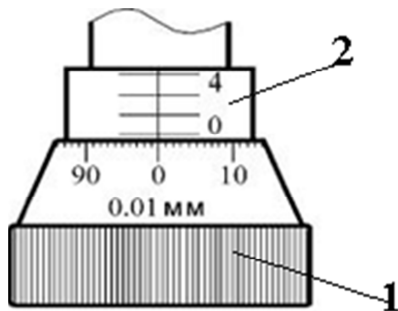


Рис. 2.8. Вид метрического винта входной щели

головке 1 метрического винта (рис. 2.8) совместить с нулем на корпусе 2 микрометра. Затем сделайте от себя 2 полных оборота на подвижной головке и откройте два полных деления.

2.2. Для включения источника света нажмите кнопку красного цвета на верхней панели источника.

2.3. Ручкой потенциометра 5 (рис. 2.7) устанавливайте значения анодного напряжения на фотоэлементе от 0 до 90 В с шагом (5 ± 1) В и по микроамперметру определяйте величину фототока, соответствующую этим значениям напряжения.

2.4. Результаты измерений запишите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$U, \text{В}$	0	5	10	15	и	т.	д.			80	85	90
$I, \mu\text{А}$ $\Delta x = 2 \text{ мм}$												
$I, \mu\text{А}$ $\Delta x = 3 \text{ мм}$												

2.5. Повторите пункты 2.3 и 2.4, установив ширину входной щели $\Delta x = 3$ мм.

2.6. После окончания измерений ручку потенциометра 5 (рис. 2.7) установите в крайнее левое положение.

3. Обработка результатов измерений

3.1. Постройте графики зависимости величины фототока от анодного напряжения для двух значений светового потока, падающего на фотокатод. Значения фототока откладывайте по оси OY , значение напряжения – по OX .

3.2. Из построенных графиков определите величину тока насыщения ($I_{\text{нас}}$).

3.3. По формуле $n = I_{\text{нас}}/e$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, рассчитайте число фотоэлектронов n_1 и n_2 , вырываемых светом с фотокатода в единицу времени при двух значениях падающего светового потока (при ширине щели 2 мм и 3 мм соответственно).

3.4. Сделайте выводы.

II. Исследование световой характеристики фотоэлемента

1. Проведение измерений зависимости фототока насыщения от величины светового потока (первый закон фотоэффекта)

1.1. Вращая ручку потенциометра 5, установите на фотоэлементе напряжение (100 ± 5) В.

1.2. Устанавливая значения ширины Δx входной щели 2, приведенные в табл. 2.2, по микроамперметру измеряйте соответствующие значения фототока и заносите в табл. 2.2.

Для установки ширины щели (например, 0,5 мм) вращайте подвижную головку винта (рис. 2.8) и установите 0 делений на корпусе микрометра. Затем поверните подвижную головку так, чтобы 50 делений на микрометре совместились с вертикальным индексом на корпусе.

Таблица 2.2

Φ , Лм	0,074	0,144	0,216	0,285	0,348
Δx , мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
$I_{\text{нз}}$, μA					

1.3. После окончания измерений ручку 5 (рис. 2.7) установите в крайнее левое положение. Выключите тумблер 4 (рис. 2.7), тумблеры «Сеть» измерительных приборов.

1.4. Выключите источник света 1 (рис. 2.6).

2. Обработка результатов измерений

2.1. Постройте график зависимости фототока насыщения ($I_{\text{нас}}$) от величины светового потока Φ , значения фототока насыщения откладывайте по оси OY , значения светового потока – по оси OX .

2.2. Сделайте выводы о выполнении первого закона фотоэффекта.

2.7. Контрольные вопросы

1. Дайте определение внешнего и внутреннего фотоэффекта.
2. Что такое задерживающая разность потенциалов и как она определяется?

3. Сформулируйте основные законы внешнего фотоэффекта.
4. Можно ли объяснить явление внешнего фотоэффекта с точки зрения классической электродинамики?
5. Объясните законы фотоэффекта с точки зрения квантовой теории.
6. Что собой представляет вольт-амперная характеристика фотоэлемента?
7. Дайте определение работы выхода электрона из металла. От чего зависит ее величина?
8. С чем связано наличие работы выхода электрона?
9. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
10. Каким образом можно экспериментально определить величины постоянной Планка, красной границы фотоэффекта и работы выхода фотоэлектронов с поверхности катода?
11. Как устроен фотоэлемент? Принцип его работы.
12. Где применяется внешний фотоэффект?

ЛИТЕРАТУРА

1. Есман, А. К. Квантовая оптика и физика атомного ядра. Часть 6 [Электронный ресурс]: учебно-методический комплекс по учебной дисциплине физика для студентов инженерно-технических специальностей / сост. А. К. Есман, Г. К. Савчук, Н. П. Юркевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Рег. № БНТУ/ФЭС 57–434. 2019.
2. Матвеев, А. Н. Курс общей физика / А. Н. Матвеев. – М.: ОНИКС 21 век, 2003. – Т. 3. – 430 с.
3. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М.: Академия, 2008. – 720 с.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – М.: Лань, 2018. – Т. 3. – 436 с.
5. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2019. – Т.4. – 544 с.
6. Иродов, И. Е. Волновые процессы. Основные законы: учебное пособие для вузов / И. Е. Иродов. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 256 с.

Учебное издание

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Пособие для студентов специальностей

1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство»,
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного
бассейна», 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана
водных ресурсов», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные тоннели
и метрополитены»

В 2 частях

Часть 2

Составители:

ЕСМАН Александр Константинович
ЮРКЕВИЧ Наталья Петровна
САВЧУК Галина Казимировна и др.

Редактор *Е. О. Германович*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 16.06.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,85. Уч.-изд. л. 2,23. Тираж 100. Заказ 241.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.