

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
Кафедра общей физики

ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

*Методические указания к лабораторному практикуму
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»*

Часть 2. Молекулярная и квантовая оптика

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2017

Составители: *Д.В.Баяндин, В.Г.Беспрозванных, Г.Н. Вотинков,
О.М.Зверев, В.С.Кирчанов*

При составлении описаний к лабораторным работам №№ 12–16 использованы материалы кафедры общей физики НГТУ и ООО "Владис" (МИФИ) – разработчиков учебного оборудования МУК–ОВ и ЛКК–3.

УДК 53(07):378
О60

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, доцент *В.В. Бурдин*
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

Оптическая физика. Часть 2. Молекулярная и квантовая оптика :
метод. указания к лабораторному практикуму / *Д.В.Баяндин,
В.Г.Беспрозванных, Г.Н. Вотинков* [и др.]. – Пермь : Изд-во Перм. нац.
исслед. политехн. ун-та, 2017. – 51 с.

Практикум включает в себя 7 лабораторных работ. В начале каждой работы даны краткие теоретические сведения, а в конце – вопросы для самоконтроля. Указан порядок выполнения работ. Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

УДК 53(07):378

Печатается по решению кафедры общей физики протокол № 1 от 01.09.2017

© ПНИПУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ЛР № 10. Определение концентрации раствора сахара поляриметром. | 4 |
| ЛР № 11. Исследование спектров поглощения твердых тел. | 11 |
| ЛР № 12. Законы теплового излучения..... | 19 |
| ЛР № 13. Измерение температуры и интегрального коэффициента излучения тела методом спектральных отношений | 28 |
| ЛР № 14. Определение постоянной Планка с помощью светодиода и монохроматора | 34 |
| ЛР № 15. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника по его спектру фотопроводимости..... | 39 |
| ЛР № 16. Внешний фотоэффект. Определение постоянной Планка | 43 |
| <i>Приложение.</i> Краткое описание модульного лабораторного учебного комплекса МУК-О | 47 |
| Литература | 50 |

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА САХАРА ПОЛЯРИМЕТРОМ

Цель работы: изучить естественное вращение плоскости поляризации.

Приборы и принадлежности: поляриметр, трубка для растворов, растворы.

Сведения из теории

Свет естественный и поляризованный

С точки зрения волновой теории свет представляет собой электромагнитные волны, которые являются поперечными, т.е. векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей колеблются в направлениях, перпендикулярных направлению распространения луча (угол между направлениями колебаний \vec{E} и \vec{H} также равен $\pi/2$, рис. 10.1). Так как при взаимодействии света с веществом основную роль играет вектор напряженности электрического поля \vec{E} , то часто его называют световым вектором, и когда говорят о световых колебаниях, то имеют в виду, прежде всего, колебания именно вектора \vec{E} .

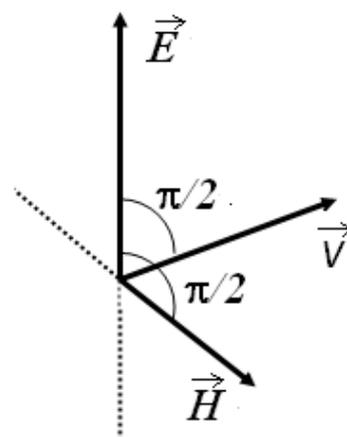


Рис. 10.1

У естественного света колебания вектора \vec{E} (а следовательно, и \vec{H}) по всем направлениям (в плоскости, перпендикулярной направлению распространения луча) происходят с равной вероятностью, быстро и беспорядочно сменяя друг друга (рис. 10.2,а). Свет, у которого направления колебаний упорядочены каким либо образом, называется поляризованным. Различают несколько видов поляризованного света: линейно-поляризованный; частично-поляризованный; поляризованный по эллипсу; поляризованный по кругу. Если колебания светового вектора происходят только в одной плоскости, свет называется плоскополяризованным (рис. 10.2,б). В случае плоскополяризованного света плоскость, в которой колеблется электрический вектор \vec{E} и которая проходит через луч, называют плоскостью поляризации.

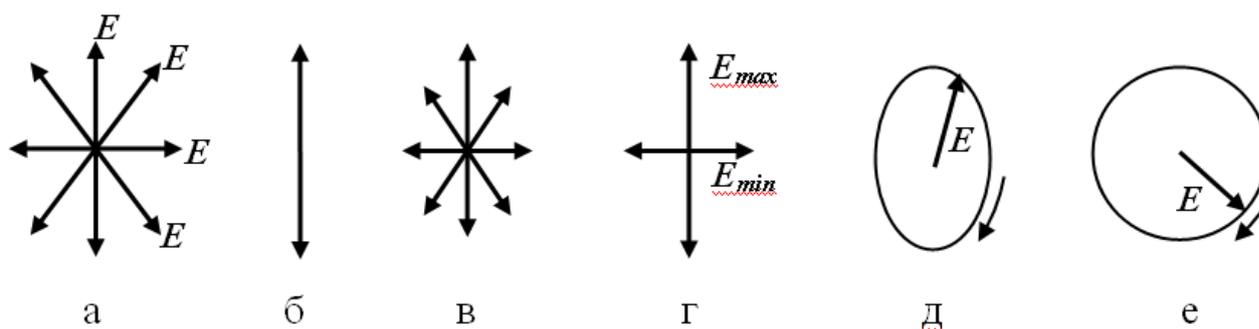


Рис. 10.2

Плоскополяризованный свет можно получить из естественного с помощью приборов – поляризаторов, которые свободно пропускают колебания только одного направления. Плоскость поляризатора, параллельная тем колебаниям, которые проходят через него, называется главной плоскостью. Если на поляризатор попадает плоскополяризованный свет, то интенсивность прошедшего через него света I связана с интенсивностью падающего света I_0 законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha ,$$

где α – угол между плоскостью поляризации падающего света и главной плоскостью поляризатора.

Свет, в котором колебания одного направления преобладают над колебаниями других направлений, называется частично поляризованным (рис. 10.2,в). Такой свет можно рассматривать как смесь естественного и плоскополяризованного. Он может быть разложен на две плоскополяризованные волны с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний и разными амплитудами E_{min} и E_{max} (рис. 10.2,г). Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, то при вращении последнего вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться в пределах от I_{max} до I_{min} , причем переход от одного из этих значений к другому будет совершаться при повороте на угол $\varphi = \pi/2$ (за один полный оборот два раза будет достигаться максимальное и два раза минимальное значение интенсивности). Степень поляризации частично поляризованного света определяется выражением

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{E_{max}^2 - E_{min}^2}{E_{max}^2 + E_{min}^2} . \quad (10.1)$$

Для плоскополяризованного света $I_{min} = 0$ и $P = 1$. Для естественного света $I_{max} = I_{min}$ и $P = 0$. Свет, в котором световой вектор меняется со временем так, что конец его описывает эллипс, называется эллиптически поляризованным (рис. 10.2,д). Эллиптически поляризованный свет можно получить при сложении двух когерентных плоскополяризованных световых волн, имеющих некоторый сдвиг фаз и перпендикулярные плоскости колебаний. Частным случаем эллиптической поляризации является ситуация, когда конец светового вектора описывает окружность (рис. 10.2,е). Свет, поляризованный по кругу, можно получить при наложении двух волн с взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний, одинаковыми амплитудами и сдвигом фаз, равным $\pi/2$.

Естественное вращение плоскости поляризации

При прохождении плоскополяризованного света через некоторые вещества наблюдается вращение плоскости колебаний светового вектора или, как принято говорить, вращение плоскости поляризации. Вещества, обладающие такой способностью, называются оптически активными. К их числу принадлежат кристаллические тела (например, кварц, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин) и растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (водные растворы сахара, винной кислоты и др.). В случае твердых тел

угол поворота φ плоскости поляризации пропорционален пути l , пройденному лучом в кристалле:

$$\varphi = \alpha l. \quad (10.2)$$

Коэффициент α называют постоянной вращения. Его принято выражать в угловых градусах на миллиметр. Постоянная вращения зависит от длины волны. В растворах угол поворота плоскости поляризации пропорционален пути луча в растворе l и концентрации активного вещества C :

$$\varphi = [\alpha] Cl, \quad (10.3)$$

где $[\alpha]$ – величина, называемая удельной постоянной вращения.

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации оптически активные вещества подразделяют на право- и левовращающие. Для объяснения вращения плоскости поляризации Френель предположил, что в оптически активных веществах лучи, поляризованные по кругу вправо и влево, распространяются с неодинаковой скоростью. Плоскополяризованный свет можно представить как суперпозицию двух поляризованных по кругу волн, правой и левой, с одинаковыми частотами и амплитудами. Действительно, геометрическая сумма \vec{E} световых векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 , поляризованных по кругу волн, в каждый момент времени будет лежать в одной и той же плоскости P (рис. 10.3).

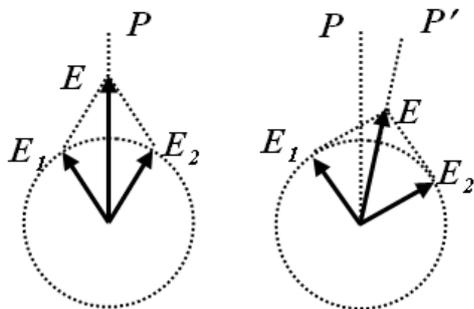


Рис. 10.3

Если скорости распространения обеих волн окажутся неодинаковыми, то по мере прохождения через вещество один из векторов \vec{E}_1 или \vec{E}_2 будет отставать в своем вращении от другого вектора, в результате чего плоскость P' , в которой лежит результирующий вектор \vec{E} , будет поворачиваться относительно первоначальной плоскости P . Измерив угол вращения плоскости поляризации, при известных $[\alpha]$

и l можно по формуле (10.3) вычислить концентрацию C растворенного вещества. Это обстоятельство и используется в данной работе. При этом можно не знать $[\alpha]$ и l , если воспользоваться раствором известной концентрации (эталонным раствором). Действительно, в этом случае

$$\varphi_{эт} = [\alpha] C_{эт} l, \quad \varphi_{иссл} = [\alpha] C_{иссл} l,$$

следовательно,

$$C_{иссл} = \frac{C_{эт} \varphi_{иссл}}{\varphi_{эт}}. \quad (10.4)$$

Полутеневое поле зрения

Угол вращения плоскости поляризации можно измерить, поместив оптически активное вещество между поляризатором и анализатором. Если их главные плоскости взаимно перпендикулярны, то плоскополяризованный свет, вышед-

ший из поляризатора, в отсутствие оптически активного вещества будет целиком задержан анализатором, и поле зрения будет темным. Введение оптически активного вещества приводит к повороту плоскости поляризации, благодаря чему поле зрения светлеет. Повернув анализатор вокруг светового пучка так, чтобы поле зрения стало опять темным, можно тем самым найти и угол поворота плоскости поляризации в исследуемом веществе.

Однако определение угла поворота таким способом сопряжено со значительными погрешностями, ибо визуально трудно найти с достаточной точностью положение анализатора, соответствующее максимальному затемнению поля зрения. Поэтому при измерениях обычно применяют полутеневого метод, в котором установка производится не на темноту поля зрения, а на равную яркость полей сравнения.

Получить полутеневое поле поляриметра можно различными способами, основанными, однако, на одной и той же идее своеобразного “разделения” пучка, вышедшего из поляризатора, на две части.

Пусть поляризатор **П** (рис. 10.4,а) состоит из двух поляроидов 1 и 2, главные плоскости которых образуют между собой угол α . Тогда свет, прошедший через поляризатор, расчленился на два одинаковых по интенсивности плоскополяризованных пучка, плоскости поляризации которых повернуты относительно друг друга на тот же угол α (рис. 10.4,б).

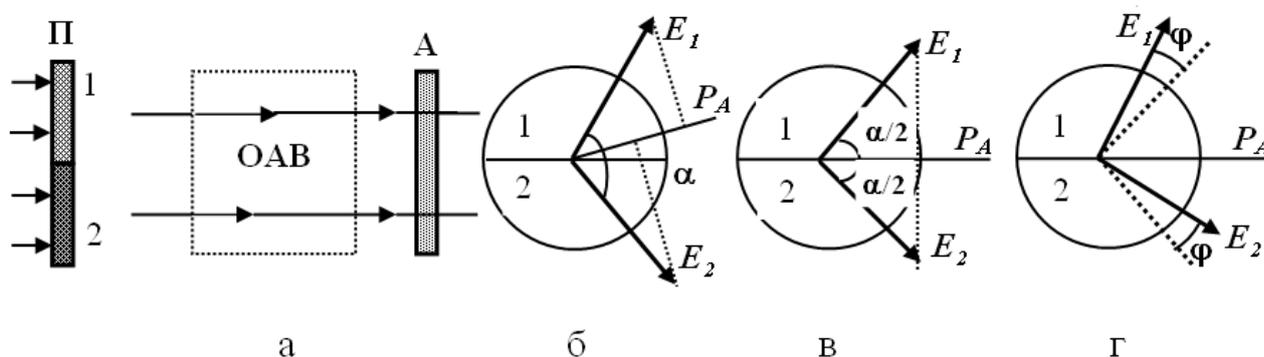


Рис. 10.4

При прохождении через анализатор **А** интенсивности обоих пучков будут зависеть от положения главной плоскости анализатора относительно направлений колебания светового вектора в этих пучках (рис. 10.4, б, где \vec{E}_1 и \vec{E}_2 – световые векторы обоих пучков; P_A – главная плоскость поляризатора). Амплитуды колебаний света в пучках, прошедших через анализатор, равны проекциям векторов \vec{E}_1 и \vec{E}_2 на направление P_A . В общем случае эти проекции различны, поэтому и интенсивности обоих пучков будут отличаться друг от друга. Для уравнивания интенсивностей пучков, а следовательно и яркостей полей сравнения анализатор **А** достаточно повернуть в положение, при котором его главная плоскость совпадает с биссектрисой угла α (рис. 10.4,в). При введении между поляризатором и анализатором оптически активного вещества плоскости

поляризации обоих пучков повернутся на некоторый угол φ и яркости полей сравнения изменятся.

Угол φ легко определить: он равен углу, на который следует повернуть анализатор, чтобы опять уравнять яркости обоих полей (рис. 10.4, г).

Описание прибора

Используемый в работе прибор называется круговым поляриметром. Схема этого поляриметра показана на рисунке 10.5.

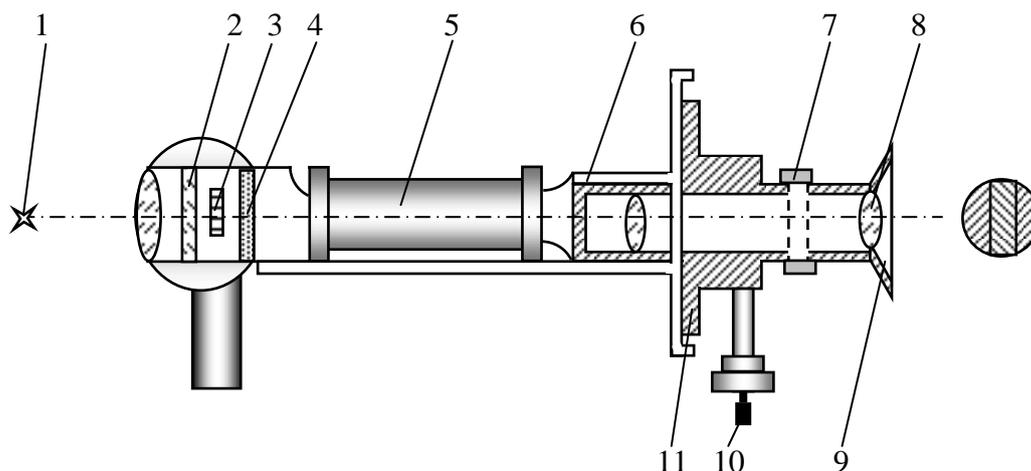


Рис. 10.5

Свет от лампы 1 проходит через поляририд 2. Средняя часть светового пучка проходит затем через кварцевую пластинку 3, которая поворачивает плоскость поляризации на небольшой угол – порядка нескольких градусов. Далее свет проходит через оранжевый светофильтр 4, трубку 5 с исследуемым веществом, анализатор 6 и зрительную трубу. Через окуляр 8 наблюдается световое поле, разделенное на три участка (на рисунке справа), причем плоскость поляризации среднего участка поля составляет угол α с плоскостью поляризации крайних участков. Поступательным перемещением муфты 7 производится фокусировка зрительной трубы на отчетливое видение границ тройного поля. Поворот анализатора 6 осуществляется вращением маховика 10. При этом яркости всех трех участков поля будут изменяться: при уменьшении яркости среднего участка яркость крайних увеличивается и наоборот. Угол поворота анализатора отсчитывается по шкале лимба 11 через лупы 9 с помощью двух нониусов, жестко связанных с анализатором и отстоящих друг от друга на 180° . Исследуемый раствор наливают в металлическую (или стеклянную) трубку, на концы которой навинчивают муфты, прижимающие круглые стеклянные оконца к торцам трубки. Специальные резиновые прокладки предохраняют оконца от образования напряжений и вытекания раствора. Вырез в корпусе прибора, куда вставляется трубка с раствором, закрывается откидной шторкой во избежание проникновения постороннего света при измерениях.

Порядок выполнения работы

Измерения на приборе сводятся к установлению анализатора (путем вращения маховичка 10) в такое положение, когда все три части поля зрения имеют одинаковую яркость. Это положение характеризуется еще и тем, что незначительные отклонения анализатора от него в ту или иную сторону вызывают резкое изменение яркости отдельных частей. Отсчет положения анализатора производится поочередно по обоим нониусам, т.е. после отсчета по одному нониусу анализатор поворачивается на пол-оборота, вновь производится настройка равенства освещенностей частей поля зрения и снимается отсчет по другому нониусу.

Такие измерения исключают систематическую ошибку, вызванную неодинаковой освещенностью частей поля зрения по причинам, не связанным с поворотом плоскости поляризации.

Работа выполняется в следующем порядке:

1. Вынуть из прибора трубку для растворов, закрыть шторкой вырез корпуса и включить лампу-осветитель.

2. Перемещением муфты 7 вдоль оси прибора сфокусировать зрительную трубу на отчетливое видение границ тройного поля.

3. Определить “нулевое” положение анализатора $\varphi_0^{ан}$, т.е. то его положение, при котором при отсутствии оптически активного вещества освещенность всех трех частей поля зрения одинакова. Измерения произвести не менее 6 (3×2) раз. Результаты занести в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

| Вещество | Показания нониуса | | | | | | ⟨ ⟩ | φ | C, % |
|--------------|-------------------|--|--|--|--|--|-----|---|------|
| Без раствора | | | | | | | | | |
| Эталонный | | | | | | | | | |
| Исследуемый | | | | | | | | | |

4. Определить эталонное положение анализатора $\varphi_{эт}^{ан}$, при котором освещенность всех трех частей поля зрения одинакова при наличии в трубке эталонного оптически активного раствора. Для этого налить в трубку раствор сахара известной концентрации. Установить трубку в прибор и повторить п.3.

5. Сделать то же самое, что и в п. 4, но для раствора с неизвестной концентрацией.

6. Вычислить угол поворота плоскости поляризации эталонным раствором $\varphi_{эт}$ (по средним значениям):

$$\varphi_{эт} = \varphi_{эт}^{ан} - \varphi_0^{ан}.$$

7. Вычислить угол поворота плоскости поляризации исследуемым раствором:

$$\varphi_{иссл} = \varphi_{иссл}^{ан} - \varphi_0^{ан}.$$

8. По формуле (10.4) найти концентрацию сахара в исследуемом растворе.

9. Зная длину трубки l и $\varphi_{эм}$, по формуле (10.3) определить удельное вращение плоскости поляризации раствора сахара

$$[\alpha] = \frac{\varphi_{эм}}{C_{эм} l}$$

Контрольные вопросы

1. Свет естественный и поляризованный.
2. Виды поляризованного света.
3. Плоскополяризованный свет.
4. Поляризаторы и анализаторы.
5. Вращение плоскости поляризации. Удельное вращение.
6. Сахариметры. Полутеневое поле зрения.
7. Ход выполнения лабораторной работы. Результаты.

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Цель работы: ознакомиться с линейчатыми спектрами испускания, исследовать спектры поглощения твердых тел.

Приборы и принадлежности: монохроматор УМ-2, укомплектованный зрительной трубой; ртутная лампа с источником питания; вентиляльный фотоэлемент; исследуемые на поглощение среды.

Сведения из теории

В данной работе помимо основной задачи – получения спектров поглощения, – необходимо предварительно решить вспомогательную задачу: проградуировать барабан монохроматора в длинах волны. Это делается с использованием линейчатого спектра излучения, поэтому вопросы теории рассматриваются в двух подразделах.

Излучение света веществом

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, светятся. Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется тепловым. Тепловое излучение, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества. Но свечение вещества, в частности газа, может быть вызвано и другим способом, например электрическим разрядом газов низкого давления, когда взаимодействия атомов нет, а излучение происходит за счет подводимой электрической энергии.

Пропуская излучение какого-либо тела через прибор, осуществляющий его разложение в спектр, можно судить о присутствии в излучении волн той или иной частоты, а также оценивать распределение энергии по участкам спектра. Такие спектры называются спектрами испускания. Пары и газы, находясь в атмосферном состоянии, при нагревании или электрическом разряде дают так называемые линейчатые спектры испускания, состоящие из относительно узких "линий", т.е. узких частотных интервалов, где интенсивность излучения значительна. Так, водород дает в видимой части спектра пять линий, натрий одну и т.д., но каждое вещество (газ) имеет свой только ему присущий спектр. Жидкости дают, как правило, так называемый *полосатый* спектр: линии излучения представляют собой широкие полосы сложного строения.

Наконец, твердые тела при нагревании дают *сплошной* спектр с разным распределением интенсивности по спектру у разных тел.

Положение линий в *атомных* спектрах может быть объяснено на основе квантовых представлений, базирующихся на постулатах Бора.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергию.

Этим стационарным состояниям соответствуют вполне определенные (стационарные) орбиты, по которым движутся электроны. При движении по

стационарным орбитам электроны, несмотря на наличие у них ускорения, не излучают электромагнитных волн. В этом утверждении заключается отказ от следствия из электродинамики, что ускоренно движущийся электрический заряд всегда излучает электромагнитные волны.

Правило квантования орбит Бора утверждает, что в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные (квантованные) значения момента импульса:

$$L_n = m v_n r_n = n \eta, \quad (11.1)$$

где $\eta = h/2\pi$; $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $n = 1, 2, 3, \dots$; m, v_n, r_n – масса, скорость и радиус n -й орбиты электрона.

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон. Его энергия равна разности энергий атома в двух его стационарных состояниях:

$$h \nu_{mn} = E_m - E_n, \quad (11.2)$$

где ν_{mn} – частота излучения, E_m и E_n – энергии атома в рассматриваемых состояниях.

Наиболее просто по теории Бора описываются спектры водородоподобных атомов (*формула Бальмера – Ридберга*):

$$\nu_{mn} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (11.3)$$

где $R = \frac{m e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^3} = 3,293 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ называется постоянной Ридберга. Целые числа m

и n называются главными квантовыми числами, причем $m = n+1, n+2, \text{ и т. д.}$

Группа спектральных линий с одинаковым значением n называется *серией спектральных линий*. При $n = 1$ получается серия линий, расположенная в далекой ультрафиолетовой части спектра (*серия Лаймана*), при $n = 2$ наблюдается *серия Бальмера*, расположенная в видимой части спектра, и т. д.

Наибольшая частота для каждой серии с главным квантовым числом n соответствует значению $m = \infty$ и называется *границей серии* или *спектральным термом* $T_n = R/n^2$.

Поглощение света веществом

Световая волна, как, впрочем, и всякая другая, несет с собой энергию (в данном случае – энергию электромагнитного поля).

При прохождении света через вещество энергия световой волны (интенсивность света) уменьшается. В этом случае говорят, что имеет место поглощение света веществом. (Кроме того свет отражается рассеивается.) Поглощение света сопровождается преобразованием энергии электромагнитного поля в другие виды, в частности в тепло, поскольку она затрачивается на возбуждение атомов и молекул вещества, на увеличение интенсивности их хаотического теплового движения.

Опишем явление поглощения света в общих чертах с энергетической точки зрения. Пусть через однородное вещество толщиной ℓ распространяется пучок параллельных монохроматических лучей с длиной волны λ . Выделим на расстоянии x от левой границы тела бесконечно тонкий слой dx (рис. 11.1).

Естественно предположить, что ослабление интенсивности света в слое толщиной dx пропорционально интенсивности J_x , дошедшего до этого слоя света и толщине dx самого слоя (потерями света при отражении на границах пренебрегаем):

$$-dJ_x = k_\lambda J_x dx . \quad (11.4)$$

Знак "минус" означает уменьшение интенсивности. Коэффициент пропорциональности k_λ определяется свойствами поглощающего вещества и длиной волны света. Эта величина, следовательно, характеризует поглощательную способность вещества по отношению к той или иной длине волны; k_λ называется *показателем поглощения света*.

Разделив переменные в (11.4), получим

$$\frac{dJ_x}{J_x} = -k_\lambda dx . \quad (11.5)$$

Интегрируя уравнение (11.5) в соответствующих пределах:

$$\int_{J_0}^J \frac{dJ_x}{J_x} = -\int_0^\ell k_\lambda dx ,$$

получаем

$$\ln \frac{J}{J_0} = -k_\lambda \ell . \quad (11.6)$$

Здесь J – интенсивность света, вышедшего из слоя вещества, J_0 – интенсивность света, падающего на вещество, ℓ – толщина слоя.

Из выражения (11.6), потенцируя, получаем

$$J = J_0 e^{-k_\lambda \ell} . \quad (11.7)$$

Формула (11.7) представляет собой закон Ламберта–Бугера. Согласно этому закону интенсивность света убывает по экспоненциальному закону. При толщине слоя $\ell = 1/k_\lambda$ интенсивность J оказывается в e раз меньше, чем J_0 .

Таким образом, коэффициент поглощения света есть величина, обратная толщине слоя, при прохождении которого интенсивность света убывает в e раз, то есть

$$k_\lambda = 1/\ell_e .$$

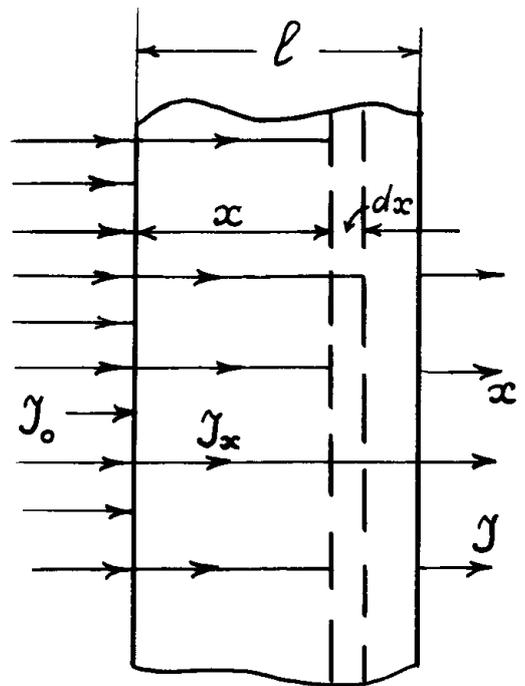


Рис. 11.1. Расчетная схема

Если поглотителем является растворенное вещество, то поглощение будет тем больше, чем больше молекул поглощающего вещества свет встречает на своем пути, то есть коэффициент k_λ зависит от концентрации растворенного вещества. В случае слабых растворов коэффициент поглощения пропорционален концентрации C :

$$k_\lambda = \alpha C. \quad (11.8)$$

Это соотношение называется законом Бера. Зависимость показателя поглощения от длины волны указывает на селективный характер поглощения, который и определяет окраску прозрачных тел в случае их освещения белым светом. Кривую зависимости $k_\lambda = f(\lambda)$ называют спектром поглощения (рис. 11.2). Очень часто, кроме коэффициента поглощения, поглощательная способность вещества характеризуется двумя другими величинами: коэффициентом светопропускания

$$\tau = \frac{J}{J_0} \quad (11.9)$$

и оптической плотностью D , которая по определению представляет собой

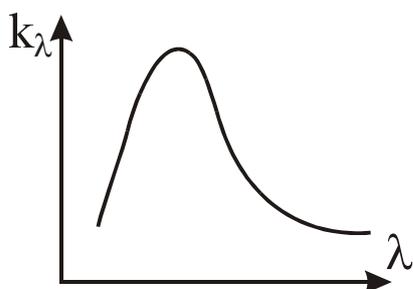


Рис. 11.2. Спектр поглощения

$$D = \lg \frac{1}{\tau} \quad (11.10)$$

или

$$D = \lg \frac{J_0}{J}.$$

Равенство (11.7) можно представить в виде

$$k_\lambda = \frac{D \ln 10}{\ell}. \quad (11.11)$$

Из (11.9)–(11.11) видно, что величины τ , D и k_λ связаны между собой определенным образом. Поскольку в случае растворов k_λ зависит от концентрации раствора C , следовательно, τ и D зависят от C .

Следует обратить внимание на принципиальное различие между k_λ , с одной стороны, и τ и D , с другой стороны: k_λ – характеризует только вещество, в то время как τ и D зависят еще от размеров – толщины поглощающего тела.

Описание установки и метода измерений

В данной работе основной частью установки является универсальный монохроматор УМ-2. Монохроматор УМ-2 предназначен для различных спектральных исследований в диапазоне длин волн от 380 до 1000 нм и решения ряда задач.

Оптическая схема прибора изображена на рис. 11.3, а. Свет из источника 1, пройдя конденсор 2, падает на входную щель 3 монохроматора. Объектив 4 делает пучок параллельным. Этот пучок падает на переднюю грань призмы 5. Так как лучи разной длины волны отклоняются призмой на разные углы (дисперсия), то из призмы выходят лучи различных направлений. С помощью объектива 6 лучи, направленные вдоль его оси, сообщаются в фокальной плоскости

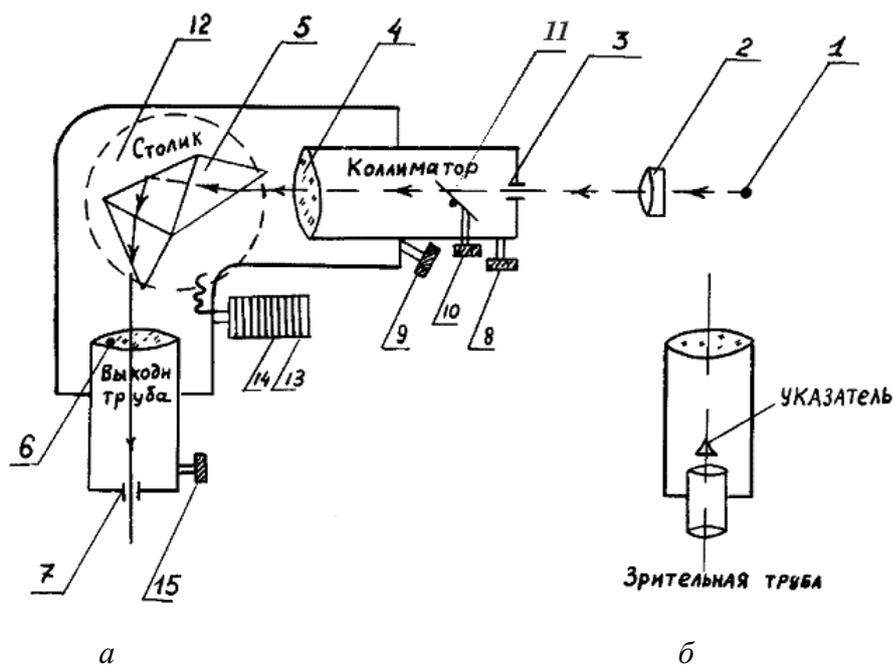


Рис. 11.3. Оптические схемы: *а* – монохроматора; *б* – зрительной трубы

объектива, в которой находится выходная щель 7. При вращении призмы 5 вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка, отдельные части спектра будут смещаться относительно щели и таким образом через нее будет выходить свет разной длины волны.

Монохроматор конструктивно делится на три части: коллиматор, призмный столик 12 с поворотным механизмом и выходную трубу монохроматора.

Коллиматор. В него входят: входная щель 3, в качестве входной щели коллиматора применена стандартная симметричная щель. Ширина щели может меняться от 0 до 4 мм посредством барабанчика 8. Внутри коллиматора находится объектив 4, снабженный микрометрическим винтом для фокусировки спектральных линий. В трубе коллиматора между щелью и объективом помещен затвор 11, с помощью которого можно прекращать доступ света в прибор. Рукоятка 10 управляет движением затвора.

Призмный столик с поворотным механизмом. Столик 12 с диспергирующей призмой 5 получает движение от микрометрического винта поворотного механизма. На измерительный барабан 13 нанесена винтовая дорожка с градусными делениями. Вдоль дорожки скользит указатель поворота барабана. Отсчет читается при помощи ползунка 14, скользящего по спиральной канавке.

Выходная труба. Лучи света, пройдя через диспергирующую призму, попадают в объектив 6 выходной трубы монохроматора, который собирает их в плоскости выходной щели 7. При помощи барабанчика 15 можно менять ширину щели.

При изучении спектров испускания газов патрубков со щелью выходной трубы заменяют на патрубок зрительной трубы, снабженной сменными окулярами и указателем (рис. 11.3, б), с которым совмещают ту или иную спектральную линию при оценке ее положения. Монохроматор превращается как бы в спектроскоп.

Коллиматор и выходная труба крепятся в обоймах на плато, которое соединено болтами с основанием прибора, установленным на оптической скамье.

Массивный корпус монохроматора предохраняет прибор от повреждений и загрязнения.

Источники света, фотоэлементы и другие необходимые детали устанавливаются на оптическую скамью.

Для питания источников света прибор имеет специальный пульт питания, снабженный гнездами для питания ртутной лампы ДРШ-4, неоновой лампы, лампы накаливания, осветительных ламп. Питание водородной лампы осуществляется от одного источника. Прибор относится, к числу точных приборов. Он требует бережного и аккуратного обращения.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Градуировка монохроматора

Для градуировки применяется ртутная лампа ДРШ-4. Величина длин волн спектральных линий ртути и их цвет приведены в таблицу 11.1. При подготовке к работе необходимо проверить, все ли необходимые приборы установлены на оптической скамье. Если установлена выходная щель, то заменить ее на зрительную трубу. Подключить пульт питания к сети, включить ртутную лампу кнопкой "пуск", сфокусировать свет лампы на входную щель, открыть щель, установить ее ширину и, вращая барабан 13, просмотреть весь спектр ртути.

Градуировку начните с фиолетовых линий, подводя каждую из указанных в таблице 11.1 линий против указателя. Соответствующие показания φ_{\leftarrow} со шкалы барабана запишите в таблицу. Ту же работу проведите начиная с красного конца спектра (показания φ_{\rightarrow} со шкалы барабана запишите в таблицу).

Таблица 11.1

| Деления барабана | Цвет и длина волны (в нм) линий | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | фиолетовый, 404,7 | фиолетовый, 407,8 | синевфиол., 435,8 | голуб.-зелёный, 491,6 | зелёный, 546,0 | желтый, 576,9 | желтый, 579,0 | красный, 623,4 | красный, 690,7 |
| φ_{\leftarrow} | | | | | | | | | |
| φ_{\rightarrow} | | | | | | | | | |
| $\langle\varphi\rangle$ | | | | | | | | | |

Здесь φ_{\rightarrow} и φ_{\leftarrow} – прямой и обратный ходы барабана.

Вычислите среднее значение $\langle\varphi\rangle$ и по данным таблицы 11.1 постройте график зависимости φ (λ) на миллиметровой бумаге.

Используя полученный график, заполните второй столбец таблицы 11.2 показаний барабана φ в зависимости от λ через каждые 20 нм в пределах от 400 до 700 нм.

Упражнение 2. Получение спектра поглощения светофильтра

При подготовке к этому упражнению зрительную трубу замените выходной щелью, в качестве источника света используйте лампу накаливания. Перед выходной щелью установите вентиляльный фотоэлемент, подключив к нему микроамперметр. Ширина входной и выходной щелей должна быть отрегулирована на максимум фототока.

Примечание. Сила фототока I в цепи фотоэлемент–микроамперметр пропорциональна интенсивности J падающего на фотоэлемент света. Поэтому коэффициент светопропускания, равный J/J_0 , может быть вычислен как $\tau = I/I_0$, где I и I_0 – токи, соответствующие интенсивностям J и J_0 .

Задание. Определить τ и D исследуемого вещества для длин волн от $\lambda=440$ нм до $\lambda=700$ нм. Измерения для каждой длины волны провести следующим образом:

- а) с помощью барабана установить нужную длину волны;
- б) измерить и записать значение фототока I_0 в таблицу 11.2;
- в) поместить между выходной щелью и фотоэлементом поглощающее вещество (светофильтр);
- г) записать показания миллиамперметра в таблицу;
- д) повторить пункты в) и г) для остальных светофильтров;
- е) пользуясь данными таблицы 11.2, вычислить значения величин

$$\tau = \frac{I}{I_0}, \quad D = \lg \frac{1}{\tau},$$

$$k_\lambda = \frac{D \ln 10}{\ell}$$

(толщину λ пластинки измерить микрометром). Результаты записать в таблицу.

Таблица 11.2

| λ , м | φ , дел. | I_0 , мкА | I , мкА | | $\tau = \frac{I}{I_0}$ | | $D = \lg \frac{1}{\tau}$ | | $k_\lambda = \frac{\ln(1/\tau)}{\ell}$ | |
|------------------|---------------------|----------------|--------------|-----|------------------------|-----|--------------------------|-----|--|-----|
| | | | Светофильтр | | | | | | | |
| | | | № 1 | № 2 | № 1 | № 2 | № 1 | № 2 | № 1 | № 2 |
| 400 | | | | | | | | | | |
| 420 | | | | | | | | | | |
| 440 | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | |
| 700 | | | | | | | | | | |

Построить по данным таблицы для всех исследуемых веществ графики зависимости $\tau = f(\lambda)$ и $k_\lambda = f(\lambda)$.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постулаты боровской теории.
2. Для каких атомных систем применимы выводы теории Бора.
3. Продемонстрируйте выводы выражений для ν , R в рамках теории Бора.
4. Напишите сериальные закономерности для серий атома водорода (серия Лаймана, Бальмера, Пашена и т.д.).
5. Объясните устройство монохроматора.
6. Ход выполнения работы.
7. Сформулируйте основные недостатки элементарной теории Бора.
8. Механизм поглощения света.
9. Закон поглощения света.
10. Величины, характеризующие поглощение света, и связь между ними.
11. Связь между цветом прозрачных тел и их спектром поглощения.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб.: В 3-х т. – М.: Наука. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – 1987. 317 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для втузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 718 с.

Лабораторная работа № 12

ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное подтверждение формулы Планка и закона Стефана-Больцмана.

Оборудование: лабораторный комплекс ЛКК-3.

Теоретические сведения

Тепловое излучение. Закон Кирхгофа

Электромагнитное излучение, испускаемое веществом и возникающее за счет его внутренней энергии, называется *тепловым излучением*.

Теплообменом излучением (радиационным теплообменом) называется самопроизвольный процесс передачи энергии в форме теплоты от более нагретого тела к менее нагретому, осуществляющийся путем теплового излучения и поглощения электромагнитных волн этими телами.

Тепловое излучение – единственное, которое может находиться в термодинамическом равновесии с веществом. При равновесии расход энергии тела на тепловое излучение компенсируется за счет поглощения телом такого же количества энергии падающего на него излучения. *Равновесное излучение* устанавливается в адиабатически замкнутой системе (то есть такой, которая не обменивается теплотой с внешней средой), все тела которой находятся при одной и той же температуре.

Из второго начала термодинамики следует, что равновесное излучение не зависит от материала тел, образующих замкнутую термодинамически равновесную систему. Объемная плотность энергии равновесного излучения w и ее распределение по частотам являются универсальными функциями температуры.

Спектральной характеристикой равновесного излучения служит *спектральная плотность объемной плотности энергии* этого излучения:

$$\rho(\nu, T) = \frac{dw}{d\nu}, \quad (12.1)$$

где dw — энергия равновесного излучения с частотами от ν до $\nu + d\nu$ заключенная в единице объема поля излучения. Объемная плотность энергии этого поля

$$w = \int_0^{\infty} \rho(\nu, T) d\nu.$$

Равновесное излучение *изотропно*, т.е. оно не поляризовано и все направления его распространения равновероятны. Энергия dW равновесного излучения в вакууме с частотами от ν до $\nu + d\nu$, падающего за единицу времени на единицу площади поверхности каждого из тел термодинамически равновесной системы, равна:

$$dW = \frac{c}{4} \rho(\nu, T) d\nu, \quad (12.2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Энергетической светимостью (интегральной испускательной способностью) тела называется физическая величина $R_{\mathcal{E}}$, численно равная энергии электромагнитных волн всевозможных частот (или длин волн) от 0 до ∞ , излучаемых за единицу времени с единицы площади поверхности тела.

Испускательной способностью или спектральной плотностью энергетической светимости, тела называется физическая величина, численно равная отношению энергии dW , излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела посредством электромагнитных волн в узком интервале частот от ν до $\nu+d\nu$, (или длин волн в вакууме от λ до $\lambda+d\lambda$), к ширине этого интервала:

$$r_{\nu} = \frac{dW}{d\nu}, \text{ и } r_{\lambda} = \frac{dW}{d\lambda}, r_{\lambda} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu}, \quad (12.3)$$

где c — скорость света в вакууме. Значения r_{ν} (r_{λ}) зависят от частоты (длины волны), температуры, химического состава тела и состояния его поверхности.

Энергетическая светимость тела связана с r_{ν} и r_{λ} соотношениями:

$$R_{\mathcal{E}} = \int_0^{\infty} r_{\nu} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda. \quad (12.4)$$

Поглощательной способностью (монохроматическим коэффициентом поглощения) тела называется безразмерная величина a_{ν} , показывающая, какая доля энергии электромагнитных волн с частотами от ν до $\nu+d\nu$, падающих на поверхность тела, поглощается им:

$$a_{\nu} = \frac{dW_{\text{ПОГЛ}}}{dW_{\text{ПАД}}} \leq 1. \quad (12.5)$$

Значение a_{ν} зависит от частоты, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности.

Абсолютно черным телом называется тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение независимо от направления падающего излучения, его спектрального состава и поляризации, ничего не отражая и не пропуская: $a_{\nu}^* \equiv 1$. Испускательная способность абсолютно черного тела обозначается далее r_{ν}^* (или r_{λ}^*), а его энергетическая светимость $R_{\mathcal{E}}^*$.

Серым телом называется тело, поглощательная способность которого меньше единицы и не зависит от частоты (длины волны) света, направления его распространения и поляризации:

$$\frac{\partial a_{\nu}^{\text{сер}}}{\partial \nu} \equiv 0, a_{\nu}^{\text{сер}} = a^{\text{сер}}$$

Согласно *принципу детального равновесия*, любой микроскопический процесс в равновесной системе должен протекать с такой же скоростью, что и обратный ему. Этот принцип статистической физики позволяет найти связь между испускательной r_{ν} и поглощательной a_{ν} способностями любого непрозрачного тела.

Пусть тело входит в состав термодинамически равновесной системы, находящейся при температуре T . Энергия, излучаемая за единицу времени с еди-

ницы площади поверхности рассматриваемого тела в интервале частот волн от ν до $\nu + d\nu$, $dW_{\text{изл}} = r_\nu d\nu$. За то же время на том же участке поверхности тела поглощается часть энергии падающего на эту поверхность равновесного излучения, равная $dW_{\text{погл}} = a_\nu \frac{c}{4} \rho(\nu, T) d\nu$. Так как по принципу детального равновесия $dW_{\text{изл}} = dW_{\text{погл}}$, то

$$\frac{r_\nu}{a_\nu} = r_\nu^* = \frac{c}{4} \rho(\nu, T). \quad (12.6)$$

Это уравнение выражает *закон Кирхгофа*, согласно которому отношение испускательной способности тела к его поглотительной способности не зависит от природы тела и равно испускательной способности абсолютно черного тела r_ν^* при тех же значениях температуры и частоты.

Зависимость r_ν^* от ν и T называется *функцией Кирхгофа*:

$$r_\nu^* = f(\nu, T) = \frac{c}{4} \rho(\nu, T). \quad (12.7)$$

Из закона Кирхгофа следует, что энергетическая светимость тела равна

$$R_\nu = \int_0^\infty a_\nu r_\nu^* d\nu.$$

В частности энергетическая светимость серого тела

$$R_\nu^{\text{СЕР}} = a^{\text{СЕР}} R_\nu^*, \text{ где } R_\nu^* = \int_0^\infty r_\nu^* d\nu$$

— энергетическая светимость абсолютно черного тела при той же температуре. Для не серого тела

$$R_\nu = \alpha R_\nu^*,$$

где α — интегральная степень черноты тела, которая зависит от материала тела, состояния его поверхности и температуры. Для всех тел, кроме абсолютно чёрного, $\alpha < 1$.

Равновесное излучение при температуре T тождественно тепловому излучению абсолютно черного тела при той же температуре. Поэтому равновесное излучение часто называют *черным излучением*. Связь между энергетической светимостью абсолютно черного тела и объемной плотностью энергии черного излучения имеет вид:

$$R_\nu^* = \frac{c}{4} w = \frac{c}{4} \int_0^\infty \rho(\nu, T) d\nu. \quad (12.8)$$

Законы Стефана–Больцмана и Вина

Закон Стефана — Больцмана утверждает, что энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_\nu^* = \sigma T^4, \quad (12.9)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — *постоянная Стефана — Больцмана*. Этот закон можно вывести теоретически, рассматривая методами термодинамики равновесное излучение в замкнутой полости.

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела r_v^* от частоты ν при нескольких постоянных значениях температуры показана на рисунке 12.1. В области малых частот $r_v^* \sim \nu^2 T$, а в области больших частот (правые ветви кривых вдали от максимумов) $r_v^* \sim \nu^3 \exp[1 - a_1 \nu/T]$, где a_1 — постоянный коэффициент.

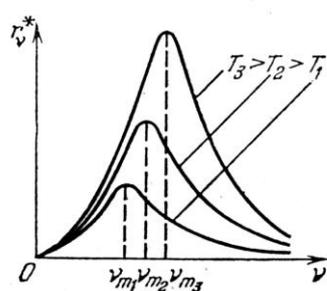


Рис. 12.1.

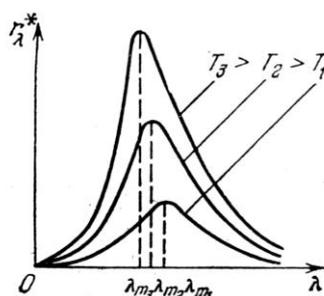


Рис. 12.2.

Энергия излучения абсолютно черного тела распределена неравномерно по его спектру. Абсолютно черное тело почти не излучает в области очень малых и очень больших частот. По мере повышения температуры тела максимум r_v^* смещается в сторону больших частот в соответствии с законом: $\nu_m = b_1 T$, где ν_m — частота, соответствующая максимуму r_v^* при температуре T , а b_1 — постоянный коэффициент.

Зависимость испускательной способности абсолютно черного тела $r_\lambda^* = \frac{c}{\lambda^2} r_\nu^*$ от длины волны λ показана на рисунке 12.2. При повышении температуры тела максимум r_λ^* смещается в сторону меньших длин волн в соответствии с *законом смещения Вина*:

$$\lambda_m = b/T, \quad (12.10)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot \text{К}$ — *постоянная Вина*.

Все попытки теоретического обоснования в рамках классической физики экспериментально найденного вида функции Кирхгофа $r_\nu^* = f(\nu, T)$, изображенного на рисунке 12.1, оказались безуспешными. Однако методами термодинамики *Вине* удалось получить формулу:

$$r_\nu^* = \nu^3 \varphi\left(\frac{\nu}{T}\right), \quad (12.11)$$

где $\varphi\left(\frac{\nu}{T}\right)$ — неизвестная функция отношения ν/T .

Формула Планка

Объемная плотность энергии равновесного (черного) излучения, в замкнутой полости, а также распределение энергии этого излучения по частотам не зависят

от материала стенок, полости и полностью определяются температурой. Поэтому в качестве теоретической модели абсолютно черного тела можно взять бесконечную систему гармонических осцилляторов со всевозможными собственными частотами. Каждый из таких осцилляторов соответствует монохроматической компоненте черного излучения. Пусть $\langle \varepsilon_\nu \rangle$ – среднее значение энергии осциллятора с собственной частотой ν , тогда, как показывают расчеты, испускательная способность абсолютно черного тела

$$r_\nu^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \varepsilon_\nu \rangle. \quad (12.12)$$

Правильное выражение для средней энергии осциллятора $\langle \varepsilon_\nu \rangle$ и функции Кирхгофа удалось найти Планку путем введения *квантовой гипотезы*, совершенно чуждой классической физике. В классической физике предполагается, что энергия любой системы изменяется *непрерывно*, т. е. может принимать любые сколь угодно близкие значения. Согласно квантовой гипотезе Планка энергия осциллятора ε_ν может принимать лишь определенные *дискретные* значения, равные целому числу элементарных порций энергии – *квантов энергии* $\varepsilon_{\nu 0}$:

$$\varepsilon_\nu = n \varepsilon_{\nu 0}, \quad \text{где } n = 0, 1, 2, \dots \quad (12.13)$$

Среднее значение энергии осциллятора

$$\langle \varepsilon_\nu \rangle = \frac{\varepsilon_{\nu 0}}{\exp(\varepsilon_{\nu 0}/kT) - 1} \quad \text{и} \quad r_\nu^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{\varepsilon_{\nu 0}}{\exp(\varepsilon_{\nu 0}/kT) - 1}. \quad (12.14)$$

Из сопоставления этого выражения для r_ν^* с формулой Вина (12.11) следует, что *квант энергии* равен

$$\varepsilon_{\nu 0} = h\nu,$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – универсальная постоянная, называемая постоянной Планка. *Формула Планка* для испускательной способности абсолютно черного тела r_ν^* :

$$r_\nu^* = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}. \quad (12.15)$$

Соответственно, *спектральная плотность энергии равновесного излучения* (12.1) равна:

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}. \quad (12.16)$$

Методика эксперимента №1. Формула Планка

В комплексе ЛКК-3 (рис. 12.3) реализуется исследование зависимости интенсивности излучения от температуры на фиксированной частоте. Для изучаемого диапазона частот и температур выполняется соотношение $h\nu \gg kT$, поэтому зависимость фототока от температуры имеет вид

$$I_\Phi = \frac{const}{\exp(h\nu/kT)}.$$

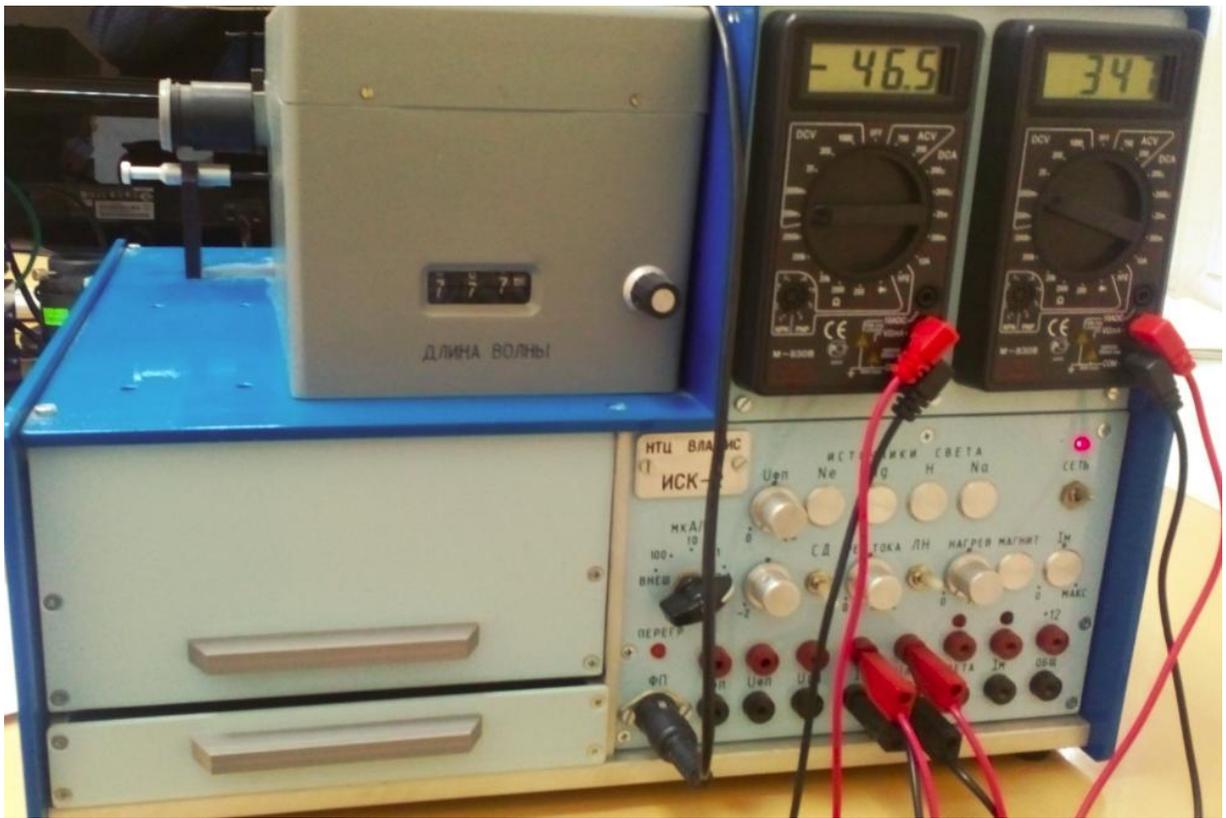


Рис. 12.3. Общий вид лицевой панели комплекса ЛКК–3

Таким образом, график зависимости логарифма фототока $\ln I_{\Phi}$ от ν/T линейен, причем его угловой коэффициент равен h/k . Рекомендуется построить график зависимости $\ln I_{\Phi}$ от $1/(\lambda T)$ с угловым коэффициентом $q = hc/k$ и определить

$$h/k = q/c.$$

Табличные значения $h/k = 4,80 \cdot 10^{-11}$ К·с, то есть $q = 14,4 \cdot 10^{-3}$ К·м.

Источник излучения – нить лампы накаливания. Для определения ее температуры определяют сопротивление нити R_0 при комнатной температуре T_0 и сопротивление R при рабочей температуре T . Зависимость сопротивления от температуры линейна в диапазоне 300 – 2500 К, что позволяет определить температуру:

$$T = B + \frac{R(T_0 - B)}{R_0}, \quad (12.17)$$

где B – константа. Для вольфрама $B = 114$ К. Нить лампы содержит добавки к вольфраму. По предварительным измерениям для нити $B = 50$ К.

Сопротивление лампы определяется по ее вольтамперным характеристикам. Напряжение на лампе выведено на гнезда “ $U_{\text{ЛН}}$ ”. Для измерения тока лампы нужно измерить напряжение U_I на гнездах “ I ”, подключенных к эталонному сопротивлению $R_{\text{ЭТ}} = 1,00$ Ом, включенному последовательно с лампой. Сопротивление лампы

$$R = R_{\text{ЭТ}} \frac{U_{\text{ЛН}}}{U_I}. \quad (12.18)$$

Измерение сопротивления при комнатной температуре проводите при токах не более 50 мА (напряжение U_I не более 50 мВ). Если лампа была включена, ей нужно дать остыть в течение 5 минут.

Фототок измеряется следующим образом. На выход усилителя фототока – гнезда “ $I_{ФП}$ ” – выведено напряжение $U_{ВЫХ}$. Ток фотоприемника пропорционален напряжению на выходе с коэффициентом k от 0,1 мкА/В до 100 мкА/В, указанным на шкале переключателя “мкА/В”. Формула для расчета фототока:

$$I_{\Phi} = k \cdot (U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ТЕМН}}) , \quad (12.19)$$

где $U_{\text{ТЕМН}}$ – напряжение на выходе усилителя фототока при перекрытом световом потоке (установленной на входе монохроматора заглушке).

Замечание. При токах более 500 мкА переключатель устанавливается в положение “ВНЕШ.” (при этом усилитель фототока отключен, $k = 1$), на гнезда “ $I_{ФП}$ ” выводится сила тока (мультиметр переводится в режим амперметра).

Порядок проведения эксперимента №1

А. Измерение начального сопротивления лампы

1. С помощью проводов подключить мультиметры к гнездам на панели “ИСТОЧНИКИ СВЕТА” (рис. 12.3): к “Г” – левый прибор, к гнездам “ $U_{ЛН}$ ” – правый.

2. Переключатели диапазонов вольтметров установить на “200m” (DCV).

3. Установить ручку “РЕГ. ТОКА” на “0”.

4. Включить блок “ИСТОЧНИКИ СВЕТА” (тумблер “СЕТЬ” вверх) и лампу накаливания (тумблер “ЛН” вверх).

5. Плавно поворачивая ручку “РЕГ. ТОКА”, изменять напряжение на лампе “ $U_{ЛН}$ ” от 15 до 45 мВ с интервалом ~5 мВ и снять соответствующие значения U_I . Результаты измерений записать в таблицу 12.1.

Таблица 12.1

| | | | | | | |
|---------------|--|--|--|--|--|--|
| $U_{ЛН}$, мВ | | | | | | |
| U_I , мВ | | | | | | |
| R_0 , Ом | | | | | | |

6. По формуле (12.18) рассчитать R_{0i} для каждой пары значений $U_{ЛН}$ и U_I , а затем R_0 как среднее арифметическое R_{0i} . Зафиксировать в отчете:

$$R_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом при } T_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ К.}$$

Б. Исследование теплового излучения

1. Переключить диапазоны мультиметров: левого – на 2000m (DCV), правого – на 20 (DCV).

2. С помощью ручки “РЕГ. ТОКА” плавно менять напряжение на лампе “ $U_{\text{ЛН}}$ ” от 4 до 14 В с интервалом 1,5 В и снять зависимость “ $I_{\text{Ф}}$ ” от “ $U_{\text{ЛН}}$ ”. Результаты измерений записать в таблицу 2.

3. Установить фотоприемник с маркировкой “ФД” (фотодиод) на задний выход монохроматора (корпус приемника надевается на выступающую из монохроматора короткую трубу). Подключить фотоприемник к входу усилителя (гнездо “ФП”).

4. Установив напряжение на лампе накаливания 5–10 В сфокусировать излучение на входной щели монохроматора. Направить поток излучения на задний выход монохроматора (шток подвижного зеркала монохроматора выдвинуть до упора). Шток находится под левым выходом монохроматора. Поворачивая фотоприемник на трубе-креплении, получить максимальное значение сигнала, после чего закрепить приемник винтом.

5. Установить на шкале монохроматора длину волны излучения (указывается преподавателем).

6. Переключить провода левого вольтметра на гнезда “ $I_{\text{ФП}}$ ”, а его переключатель диапазонов на 200m или 2000m (DCV), k от 0,1 мкА/В. Снять напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе усилителя тока фотодиода при тех же напряжениях “ $U_{\text{ЛН}}$ ”, что и в пункте 2, вычислить по формуле (12.19) ток фотоприемника $I_{\text{Ф}}$ и занести их в таблицу 2.

7. Установить переключатели диапазонов мультиметров в положение “OFF”, выключить тумблеры “ЛН” и “СЕТЬ”.

8. По формуле (12.18) рассчитать сопротивления лампы R и по (12.17) ее температуру T . Также рассчитать $1/(\lambda T)$ и $\ln I_{\text{Ф}}$. Результаты занести в таблицу.

9. Построить график зависимости $\ln I_{\text{Ф}}$ от $1/(\lambda T)$.

10. Определить по графику угловой коэффициент $q = \frac{\Delta \ln I_{\text{Ф}}}{\Delta(1/\lambda T)}$.

11. Сравнить полученный результат с теоретическим. Сделать вывод.

Методика эксперимента №2.

Закон Стефана-Больцмана

На рисунке 12.4 показана нить лампы накаливания, примененной в ЛКТТ-7. Отношение длины нити к ее диаметру порядка 50:1, что позволяет при расчетах мощности излучения считать ее бесконечно длинным цилиндром. Как следует из приведенных на рисунке 12.4 размеров, проекция нити на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, имеет “видимую” площадь

$$S_0 = 1,4 \text{ мм}^2 = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

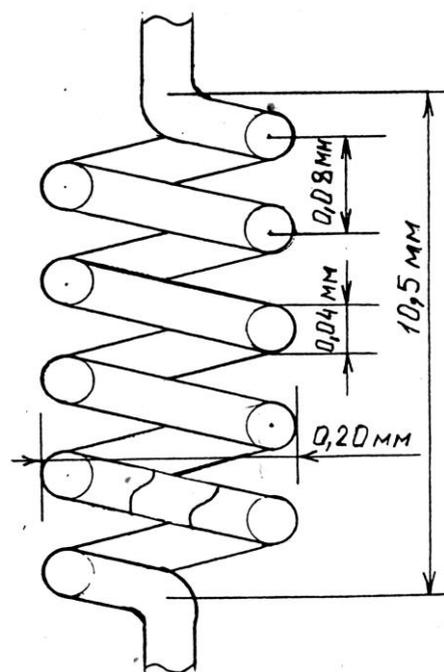


Рис. 12. 4

Абсолютно черное тело при температуре T , значительно превышающей температуру окружающих тел, теряет вследствие излучения мощность

$$P_0 = \sigma T^4 \cdot \pi S_0, \quad (12.20)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплового излучения реального тела определим как

$$\varepsilon = P/P_0, \quad (12.21)$$

где P мощность излучения тела, в качестве которой принимаем мощность электрического нагрева:

$$P = U_{\text{лн}} \cdot I = U_{\text{лн}} \cdot U_I / R_{\text{ЭТ}} \quad (12.22)$$

Справедливость закона Стефана-Больцмана проверяем по графику зависимости мощности от температуры: величина $\Delta \ln P / \Delta \ln T$ должна быть близка к 4.

Порядок проведения эксперимента №2

Для проведения расчетов следует воспользоваться результатами эксперимента № 1 ($U_{\text{лн}}$ и U_I).

1. Рассчитать по формуле $I = U_I / R_{\text{ЭТ}}$ ток в лампе и по формуле (12.22) мощность электрического нагрева P . Результаты занести в таблицу 2.

2. Рассчитать мощность, теряемую вследствие излучения (12.20), и коэффициент теплового излучения (12.21). С повышением температуры от 1000 до 2000 К коэффициент ε должен понижаться от $\sim 0,30$ до $\sim 0,26$.

3. Рассчитать $\ln P$ и $\ln T$, на миллиметровой бумаге построить график зависимости $\ln P$ от $\ln T$.

4. Определить по графику угловой коэффициент $\Delta \ln P / \Delta \ln T$.

5. Сравнить полученный результат с теоретическим. Сделать вывод.

Таблица 12.2

| № п/п | $U_{\text{лн}}$, В | U_I , В | R , Ом | T , К | $1/\lambda T$, $10^3 \text{ м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ | I_{Φ} , мкА | $\ln I_{\Phi}$ | I , А | P , Вт | P_0 , Вт | ε | $\ln T$ | $\ln P$ |
|----------|------------------------|--------------|-------------|------------|--|---------------------|----------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------|---------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | |

$$\lambda = \text{_____ нм}; R_0 = \text{_____ Ом}; T_0 = \text{_____ К};$$

Контрольные вопросы

1. Что такое тепловое излучение (ТИ) и радиационный теплообмен?
2. Что такое равновесное ТИ?
3. Спектральные характеристики теплового излучения.
4. Энергетическая светимость, ее связь со спектральными характеристиками ТИ.
5. Что называется монохроматическим коэффициентом поглощения тела?
6. Какие тела называют *абсолютно черным* и *серым*?
7. Закон Кирхгофа и функция Кирхгофа.
8. Законы Стефана-Больцмана и Вина.
9. Теория Планка и формула Планка.
10. Объяснить методику проведения экспериментов.

Лабораторная работа № 13

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕЛА МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Цель работы: ознакомиться с методом спектральных соотношений для измерения температуры и интегрального коэффициента излучения твердых тел.

Оборудование: модульный учебный комплекс МУК-ОВ (см. Приложение).

Описание метода измерений

1. Измерение температуры источника излучения

Испускательная способность абсолютно черного тела может быть определена для различных длин волн и температур по формуле Планка. Следовательно, для узкого диапазона длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, в котором испускательную способность $r^*(\lambda, T)$ можно считать постоянной, энергетическая светимость абсолютно черного тела равна

$$dR^* = r^*(\lambda, T)d\lambda .$$

Если тело не является абсолютно черным, то его испускательная способность выражается формулой

$$r(\lambda, T) = A(\lambda, T)r^*(\lambda, T),$$

где $A(\lambda, T) < 1$ - спектральный коэффициент излучения тела.

Следовательно, энергетическую светимость тела для диапазона длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ найдем по формуле

$$dR = A(\lambda, T)r^*(\lambda, T)d\lambda .$$

Рассмотрим излучение тела с температурой T для двух различных длин волн λ_1 и λ_2 при различных значениях диапазонов $d\lambda_1$ и $d\lambda_2$ соответственно (рис. 13.1).

$$\text{— для } \lambda_1 \text{ и } d\lambda_1 \quad dR_1 = A_1 r_1^* d\lambda_1 ,$$

$$\text{— для } \lambda_2 \text{ и } d\lambda_2 \quad dR_2 = A_2 r_2^* d\lambda_2 .$$

Здесь A_1 и A_2 – спектральные коэффициенты излучения тела при длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно.

Излучение, дошедшее до приемника (фотодиод, фотосопротивление), составляет некоторую часть от общего излучения источника. Оно определяется размерами приемника, расстоянием от источника до приемника и наличием на пути излучения поглощающих сред, т.е. определяется такими параметрами измерительной системы, которые не изменяются в процессе опыта. Для двух раз-

личных приемников, воспринимающих поток падающего на них излучения в различных узких диапазонах длин волн, величины этих потоков будут равны:

$$P_1 = K_1 A_1 r_1^* \cdot d\lambda_1,$$

$$P_2 = K_2 A_2 r_2^* \cdot d\lambda_2,$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты использования потока излучения первым и вторым приемником соответственно, которые не изменяются в процессе опыта.

Следовательно, отношение потоков излучения для двух приемников

$$\frac{P_1}{P_2} = Z \cdot \left(\frac{r_1^* d\lambda_1}{r_2^* d\lambda_2} \right),$$

где величину $Z = (K_1 A_1 / K_2 A_2)$ можно считать постоянной при условии, что зависимость отношения спектральных коэффициентов излучения от температуры можно пренебречь для выбранных λ_1 и λ_2 .

Величины r_1^* и r_2^* определяются с помощью формулы Планка. Следовательно,

$$\frac{P_1}{P_2} = Z \cdot \frac{C_1 \lambda_2^5 (\exp(C_2 / \lambda_2 T) - 1) d\lambda_1}{C_1 \lambda_1^5 (\exp(C_2 / \lambda_1 T) - 1) d\lambda_2},$$

где

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2,$$

$$C_2 = h c / k = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Оценим величину $\exp(C_2 / \lambda T)$ и сравним ее с единицей.

Пусть $T = 3000 \text{ К}$, $\lambda = 1 \text{ мкм}$.

Тогда, $\exp(C_2 / \lambda T) = \exp(1,439 \cdot 10^{-2} / 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3000) \approx 121$, причем понижение температуры и уменьшение длины волны изменит эту оценку в большую сторону. Это означает, что для используемых в опытах температур и длин волн единиц в скобках в формуле Планка можно пренебречь (выполняется приближенная формула Вина).

$$\frac{P_1}{P_2} = Z \cdot \frac{\lambda_2^5 d\lambda_1}{\lambda_1^5 d\lambda_2} \cdot \exp \left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right].$$

Прологарифмируем это выражение и найдем из полученной формулы температуру T .

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{P_1}{P_2} - \ln Z - 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}}.$$

Учтем, что в процессе опытов сохраняются значения $\lambda_1, \lambda_2, d\lambda_1, d\lambda_2$. Поэтому объединим члены, содержащие постоянные величины, в две новые константы L и Z_0 :

$$L = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right).$$

$$Z_o = \ln Z + 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{d\lambda_1}{d\lambda_2}.$$

Тогда формула для определения температуры примет вид

$$T = \frac{L}{\ln \frac{P_1}{P_2} - Z_o} \quad (13.1)$$

Из формулы (13.1) видно что, определив из тарировочных опытов величину Z_o и рассчитав значения L , путем измерения отношения P_1/P_2 можно определить соответствующую температуру излучающего тела.

2. Измерение интегрального коэффициента излучения тела

Интегральный коэффициент излучения (коэффициент черноты) тела A_T определяется отношением

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*}, \quad (13.2)$$

где R_T – энергетическая светимость тела при температуре T , R_T^* – энергетическая светимость абсолютно черного тела при этой же температуре.

Как показано в [3] для вольфрама, который используется в этой лабораторной работе в качестве источника излучения (нить накала электролампы), интегральный коэффициент излучения для температуры $T = 2000K$ надежно измерен. Он оказался равным $A_{2000} = 0,249$.

Это позволяет применить относительный метод исследования зависимости интегрального коэффициента излучения от температуры излучающего тела.

Выразим интегральный коэффициент излучения при некоторой температуре T через измеряемые величины и A_{2000} .

Согласно определению (13.2)

$$A_T = \frac{R_T}{R_T^*}, \quad A_{2000} = \frac{R_{2000}}{R_{2000}^*}.$$

Учтем, что по закону Стефана-Больцмана энергетические светимости абсолютно черного тела в этих выражениях равны

$$R_T^* = \sigma \cdot T^4, \quad R_{2000}^* = \sigma \cdot (2000)^4.$$

Если считать, что потери энергии за счет теплопроводности и конвекции малы, т.е. вся подводимая к вольфрамовой нити лампы энергия электрического тока превращается в энергию излучения, то энергетическую светимость источника можно выразить через мощность $P_{ИСТ}$, которая рассеивается на нем:

$$R_T = \frac{P_{ИСТ}}{S},$$

где S – площадь излучающей поверхности.

Найдем отношение коэффициентов излучения

$$\frac{A_T}{A_{2000}} = \frac{R_T R_{2000}^*}{R_T^* R_{2000}} = \frac{P_{ИСТ} \sigma (2000)^4 S}{S \sigma T^4 P_{ИСТ.2000}} = \frac{(2000)^4}{P_{ИСТ.2000}} \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4} = K \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4}.$$

Величину K в последней формуле можно определить из выше описанных опытов по определению температуры, если в процессе измерений снимать дополнительно значения мощности, рассеиваемой источником. Это несложно сделать, так как источник излучения нагревается электрическим током, мощность которого при высоких температурах равна

$$P_{ИСТ} = \frac{U}{I}, \quad (13.3)$$

где U - напряжение на вольфрамовой спирали источника теплового излучения, а I - сила тока в спирали. При этом предполагается, как уже отмечалось выше, что подводимая энергия рассеивается только за счет излучения, а ее потери за счет теплопроводности пренебрежимо малы.

Следовательно, для интегрального коэффициента излучения получаем формулу

$$A_T = A_{2000} \cdot K \cdot \frac{P_{ИСТ}}{T^4}, \quad (13.4)$$

здесь коэффициенты равны: $K = \frac{(2000)^4}{P_{ИСТ.2000}}$, $A_{2000} = 0,249$.

Описание установки

В качестве экспериментальной установки используется модульный учебный комплекс МУК-ОВ (см. Приложение).

Источником теплового излучения, является вольфрамовая спираль электрической лампы.

Излучение от источника, пройдя окно, расположенное в верхней крышке электронного блока, достигает двух фотоприемников, которые находятся внутри блока. Фотоприемники воспринимают излучение в узком диапазоне длин волн, причем середины этих диапазонов лежат в различных частях спектра излучения: λ_1 - в видимой области, λ_2 - в инфракрасной. Численные значения λ_1 и λ_2 указаны на передней стенке электронного блока.

Подключение нужных фотоприемников производится нажатием кнопки на лицевой стороне блока, при этом факт подключения отображается индикатором.

Усиленный сигнал, пропорциональный мощности принятого фотоприемником излучения, через усилители подается на регистрирующий цифровой прибор.

Следует отметить, что согласно исследованиям [3], для выбранных длин волн фотоприемников отношение спектральных коэффициентов излучения вольфрама можно считать постоянным в пределах измеряемого диапазона температур, что является условием применимости рабочей формулы (13.1).

Задание к работе

1. На рабочем месте ознакомьтесь с лабораторной установкой.
2. Заготовьте таблицу измерений следующих величин:
 - силы тока I , протекающего через источник теплового излучения,
 - соответствующего напряжения U на вольфрамовой спирали источника,
 - величины сигнала первого и второго фотоприемника P_1 и P_2 , которые будут сниматься с регистрирующего прибора.Кроме того, в таблице нужно заготовить столбцы для
 - вычисленных значений мощности, выделяемой источником $P_{\text{ист}}$,
 - отношения сигналов с фотоприемников P_1/P_2 ,
 - температуры нагретого тела T ,
 - интегрального коэффициента излучения A_T .
3. Запишите параметры и константы, необходимые для расчетов.
4. Включите установку. Проверьте, включены ли нужные фотоприемники.
5. Увеличьте напряжение источника до предельного значения ($\sim 14 \div 15$ В).
6. Снимите показания P_1 и P_2 с цифрового индикатора измерителя относительной интенсивности теплового излучения. Снимите показания амперметра и вольтметра. Внесите показания в таблицу измерений.
7. Постепенно уменьшая напряжение генератора, снимите такие же показания (п. 6) при 8-ми \div 10-ти различных температурах источника излучения.
8. Пользуясь рабочей формулой (13.1), вычислите температуры источника излучения при различных значениях мощности, выделяемой на источнике. Полученную при тарировочных опытах величину Z_o возьмите равной
$$Z_o = 1,784.$$
9. Вычислите по формуле (6) мощность, выделяющуюся на спирали источника излучения для каждого значения температуры. Обратите особое внимание на мощность при $T = 2000\text{K}$.
10. Пользуясь рабочей формулой (13.4), вычислите значения интегрального коэффициента излучения A_T источника в исследованном диапазоне температур и постройте график $A_T = f(T)$.

Контрольные вопросы

1. Объясните особенности теплового излучения, его спектр.
2. Абсолютно черное тело, его свойства и его роль в теории теплового излучения.
3. Испускательная и поглощательная способности тел, энергетическая светимость.
4. Закон Кирхгофа.
5. Закон Стефана-Больцмана и законы Вина.
6. Формула Планка и ее значение в теории теплового излучения.
7. Тепловое излучение реальных тел, спектральный и интегральный коэффициенты излучения.

8. Преимущества метода спектральных отношений для бесконтактного измерения температуры тела.
9. Методика определения интегрального коэффициента излучения.

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.:Наука,1979. Т.3
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. М.: Высшая школа, 1972. Т.3.
3. Теплообмен излучением: Справочник/А.Г.Блох, Ю.А.Журавлев, Н.Л.Рыжков. М.: Энергоиздат, 1991.

Лабораторная работа № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА С ПОМОЩЬЮ СВЕТОДИОДА И МОНОХРОМАТОРА

Цель работы: ознакомиться с одним из экспериментальных методов определения постоянной Планка..

Оборудование: лабораторный комплекс ЛКК-3.

Метод определения постоянной Планка и описание установки

Свет обладает не только волновыми, но квантовыми свойствами. Последние, в частности, проявляются в процессах излучения света, взаимодействия света с веществом.

Немецкий физик М. Планк впервые высказал гипотезу о том, что нагретые тела излучают свет не непрерывно, а отдельными порциями – квантами. Энергия одного светового кванта вычисляется по формуле

$$\varepsilon = h\nu, \quad (14.1)$$

где ν – частота света, являющаяся его волновой характеристикой, h – коэффициент пропорциональности, который был назван постоянной Планка.

Постоянная Планка в системе СИ имеет размерность Дж·с и относится к числу фундаментальных физических констант.

С учетом зависимости $\nu = c/\lambda$, где $c=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, λ – длина волны света, можно представить формулу (14.1) в следующем виде:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}. \quad (14.2)$$

В процессе работы светодиода (СД) при каждом акте рекомбинации электрона и дырки получается один квант света с энергией ε . При этом внешнее электрическое поле совершает работу по переводу электрона через n - p -переход, равную

$$A = eU_0 = \Delta E, \quad (14.3)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд, U_0 – напряжение на СД, при котором он начинает светиться, ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Приравнявая, в соответствии с законом сохранения энергии, (14.2) и (14.3), находим

$$h = \frac{eU_0\lambda}{c}. \quad (14.4)$$

Таким образом, для определения постоянной Планка h нужно измерить U_0 и λ . Формула (14.4) является рабочей.

В состав лабораторного комплекса ЛКК-3 (см. рис. 12.3) конструктивно входит блок источника света, содержащий и исследуемый СД. Для включения СД следует поднять рукоятку тумблера “СД”, расположенного на панели управления ИСК-2. Ручка “РЕГ.ТОКА”, расположенная справа от тумблера “СД”, устанавливает ток СД. На гнезда “ $U_{СД}$ ” выведено напряжение на СД.

Следовательно, величину U_0 , соответствующую началу свечения СД, находим по показанию вольтметра, непосредственно подключенного к гнездам “ $U_{СД}$ ”.

Для нахождения волны света, излучаемого СД, используется монохроматор МУМ–1, входящий в состав комплекса ЛКК–3.

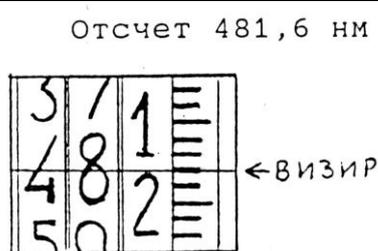


Рис. 14.1

Световое излучение от СД направляется на входную щель монохроматора. Длина волны излучения отсчитывается по шкале отсчетного устройства на передней стенке монохроматора (см. рис. 14.1). Шкала имеет три барабана, показывающих значение длины волны в нанометрах. Первый барабан имеет дополнительную шкалу с ценой деления 0,2 нм, отсчет по которой производится по горизонтальной визирной линии.

Для визуального наблюдения спектра излучения используется боковой выход монохроматора, снабженный окуляром. Для поступления излучения от СД на боковой выход необходимо вдвинуть шток на боковой стенке монохроматора внутрь до упора. Окуляр может перемещаться вдоль своей оси. Критерием настройки окуляра является резкое изображение спектральной линии. Положение линий фиксируется относительно нити визира.

Спектральная линия, даваемая светодиодом и наблюдаемая через окуляр бокового выхода монохроматора, имеет конечную ширину. Если λ_1 и λ_2 – соответственно максимальная и минимальная длины волн видимого в монохроматор излучения, то в качестве длины волны λ , входящей в формулу (14.4), следует принять величину

$$\lambda = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2). \quad (14.5)$$

Величины λ_1 и λ_2 определяются в эксперименте по погасанию (исчезновению) спектральной линии в окуляре монохроматора.

Порядок проведения эксперимента №1: определение постоянной Планка

1. Ознакомиться с лабораторным комплексом ЛКК–3 и расположением соответствующих тумблеров и ручек на панели управления.

2. Установить на входную щель монохроматора (справа около зеркала) ограничитель “3 мм”, а на боковой выход монохроматора (с левой стороны комплекса) – сменный визир.

Подключить правый мультиметр к гнездам “ $U_{СД}$ ”, для чего короткий красный штекер провода вставить в среднее гнездо мультиметра “ $V\Omega mA$ ”, а длинный красный штекер – в красное окно “ $U_{СД}$ ”. Короткий черный штекер провода вставить в нижнее гнездо “com” мультиметра, а длинный черный штекер – в черное гнездо “ $U_{СД}$ ”. Переключатель мультиметра поставить в положение “20 V”.

3. Включить тумблер “Сеть” на панели управления. Включить светодиод тумблером “СД”. Убедиться, что при повышении тока (напряжения) светодиода за счет вращения вправо ручки “РЕГ.ТОКА” реализуется значение напряжения,

при котором светодиод начинает светиться. Направить излучение светодиода на входную щель монохроматора с помощью поворотного зеркала. Вдвинуть штوك на левой боковой стенке монохроматора внутрь до упора. Путем настройки окуляра добиться резкого изображения спектральной линии.

4. Установить ручку “РЕГ.ТОКА” в крайнее левое положение. Вращая ручку вправо и повторяя операцию и измерения не менее 5 раз, зафиксировать значения напряжения U_{0i} в момент зажигания светодиода по показанию мультиметра и занести результаты в таблицу. Часть измерений U_{0i} можно выполнить для моментов погасания светодиода (при вращении ручки “РЕГ.ТОКА” влево). Результаты занести в таблицу 14.1.

Таблица 14.1

| № | $U_{0i}, \text{В}$ | $(U_{0i} - \langle U_0 \rangle)^2, \text{В}^2$ | $\lambda_{1i}, \text{нм}$ | $\lambda_{2i}, \text{нм}$ | $\lambda_i, \text{нм}$ | $(\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2, \text{нм}^2$ |
|-------------------------|--------------------|--|-----------------------------|---------------------------|--|--|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| $\langle U_0 \rangle =$ | | $\Sigma (U_{0i} - \langle U_0 \rangle)^2 =$ | $\langle \lambda \rangle =$ | | $\Sigma (\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2 =$ | |

5. Установить ручку отсчетного устройства монохроматора в положение “650 нм”. Вращая эту ручку в сторону увеличения длин волн и повторяя операцию и измерения не менее 5 раз, зафиксировать значения λ_1 по моменту погасания спектральной линии с помощью отсчетного устройства. Результаты занести в таблицу. Аналогично определить величину λ_2 и по формуле (14.5) – значение длины волны спектральной линии.

6. Оценить ширину запрещенной зоны ΔE по формуле

$$\Delta E = e \langle U_0 \rangle \quad (14.6)$$

7. Вычислить средние значения $\langle U_0 \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$:

$$\langle U_0 \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{0i}; \quad \langle \lambda \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (14.7)$$

8. Вычислить среднее значение $\langle h \rangle$, постоянной Планка, по результатам измерений

$$\langle h \rangle = \frac{e}{c} \langle U_0 \rangle \cdot \langle \lambda \rangle, \quad (14.8)$$

выражая все физические величины в формуле (14.9) в единицах СИ.

9. Полученный результат сравнить с табличным значением $h_{\text{табл}}$ постоянной Планка. Вычислить в процентах относительное расхождение между вычисленным $\langle h \rangle$ и $h_{\text{табл}}$:

$$\frac{|\langle h \rangle - h_{\text{табл}}|}{h_{\text{табл}}} 100\%$$

и выразить данную величину в эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

Нижеследующие пункты 10–12 выполняются только в том случае, если полученная величина расхождения не превышает 10%.

10. Рассчитать значения квадратов отклонений $(U_{0i} - \langle U_0 \rangle)^2$ и $(\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2$ для каждого измерения и суммарные значения этих величин для серии опытов. Результаты занести в таблицу.

11. Задавшись значением доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, вычислить абсолютные погрешности в определении U_0 и λ :

$$\Delta U_0 = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_{0i} - \langle U_0 \rangle)^2}, \quad (14.9)$$

$$\Delta \lambda = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2}. \quad (14.10)$$

Здесь $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, определяемый из таблицы.

12. Вычислить абсолютную погрешность в определении постоянной Планка

$$\Delta h = \langle h \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0}{\langle U \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\langle \lambda \rangle}\right)^2} \quad (14.11)$$

и записать окончательный результат в виде доверительного интервала с указанием доверительной вероятности и относительной погрешности

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle}. \quad (14.12)$$

Порядок проведения эксперимента №2: спектральная характеристика светодиода

1. Установите на заднем выходе монохроматора фотоприемник – фотодиод и подключите его к измерительной системе ИСК–2. Подключите мультиметры в режиме вольтметров: левый – к гнездам “ U_{CD} ” (чтобы измерить напряжение на светодиоде), правый – к гнездам “ I ” (чтобы измерить напряжение U_I на эталонном сопротивлении $R_{эТ}=100$ Ом и вычислить ток фотодиода по формуле $I=U_I/R_{эТ}$). Установите ручкой “РЕГ.ТОКА” ток светодиода I_{CD} 10 мА.

2. Переподключите левый мультиметр к гнездам “ $I_{ФП}$ ”, чтобы измерить напряжение на выходе усилителя фототока. Ток фотоприемника пропорционален напряжению на выходе с коэффициентом k от 0,1 мкА/В до 100 мкА/В, указанным на шкале переключателя “мкА/В”. Формула для расчета фототока:

$$I_{\Phi} = k \cdot (U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ТЕМН}}),$$

где $U_{\text{ТЕМН}}$ – напряжение на выходе усилителя фототока при перекрытом световом потоке (установленной на входе монохроматора заглушке).

Замечание. При токах более 500 мкА переключатель устанавливается в положение “ВНЕШ.” (при этом усилитель фототока отключен, $k = 1$), на гнезда “ $I_{ФП}$ ” выводится сила тока (мультиметр переводится в режим амперметра).

3. Снимите зависимость тока фотоприемника от длины волны излучения.

Таблица 14.2

$$I_{\text{СД}} = \text{ мА}; U_{\text{ФП}} = \text{ В}; k = 0,1 \text{ мкА/В}; U_{\text{ТЕМН}} = \text{ мВ}$$

| | | | | | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| λ , нм | | | | | | | | | |
| $U_{\text{ВЫХ}}$ | | | | | | | | | |
| $I_{\text{ф}}$, мА | | | | | | | | | |

Постройте график зависимости $I_{\text{ф}}(\lambda)$. Сопоставьте его с полученными в эксперименте 1 значениями λ_1 и λ_2 .

Контрольные вопросы

1. Какие физические явления подтверждают квантовую природу света?
2. Принцип работы светодиода как источника излучения.
3. В чем различие между полупроводниками n и p – типа?
4. Почему n – p (или p – n) переход обладает односторонней (вентильной) проводимостью?
5. В чем состоит метод определения постоянной Планка?
6. Чем определяется точность нахождения постоянной Планка?
7. Какие измерения проводятся в данной работе?
8. Пояснить, как строится доверительный интервал.
9. Как определяется в работе длина волны излучения светодиода?
10. Какой физический смысл имеет ширина запрещенной зоны полупроводника?
11. Пояснить принцип работы отсчетного устройства монохроматора.
12. Единицы измерения постоянной Планка, ширины запрещенной зоны и частоты излучения светодиода.

Лабораторная работа № 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА ПО ЕГО СПЕКТРУ ФОТОПРОВОДИМОСТИ

Цель работы: познакомиться с методом определения ширины запрещенной зоны полупроводника.

Оборудование: лабораторный комплекс ЛКК-3.

Теоретические сведения

К полупроводникам относится широкий класс веществ (кремний, германий и др.), занимающих, в смысле электропроводности, промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Электропроводность полупроводников объясняется так называемой зонной теорией, которая основана на элементах квантовой физики. По этой теории электрон в атоме (следовательно и атом в целом) может иметь не любую энергию, а только некоторые ее значения (дискретный ряд E_1, E_2, E_3, \dots). Низший уровень энергии E_1 называется основным, остальные возбужденными. При образовании твердого тела, когда атомы сближаются между собой, разрешенные энергетические уровни расщепляются, превращаясь в широкие полосы называемые *зонами* (рис. 15.1).

Нас интересует только две зоны: *валентная* (соответствует основному уровню) и зона *проводимости* (соответствующая первому возбужденному уровню). Между указанными зонами находится зона, которая называется *запрещенной* – электроны не могут иметь энергию, соответствующую уровням этой зоны.

Цель данной работы и состоит в том, чтобы определить (в энергетических единицах) ширину запрещенной зоны. Решение этой задачи будем искать путем исследования одного из видов внутреннего фотоэффекта – явления *фотопроводимости*. Фотопроводимость – это увеличение электропроводности полупроводника при облучении его светом.

Для наблюдения этого явления достаточно собрать простую электрическую цепь (рис. 15.2). При освещении полупроводника светом подходящих длин волн сила тока идущего по образцу резко возрастает (до этого мог быть слабый “темновой” ток). Объясняется это тем, что падающие фотоны “вырывают” электроны из валентной зоны и “забрасывают” их в зону проводимости (рис.15.1). Сила фототока в общем случае сложным образом зависит и от длины волны света, и от его интенсивности, и от поглощательной способности образца.

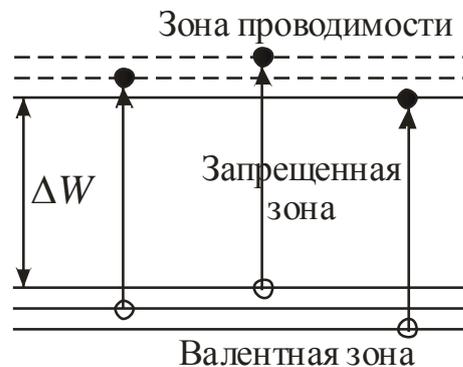


Рис. 15.1

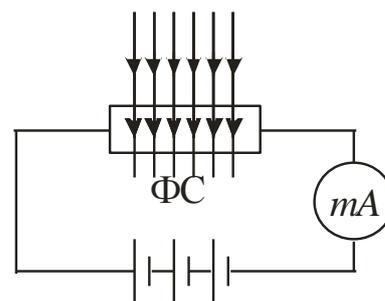


Рис. 15.2

На рисунке 15.3 изображен характерный вид спектра фотопроводимости $I_{\phi} = f(\lambda)$. Из него видно, что по мере увеличения длины волны падающего света фототок сначала незначительно возрастает (это, как правило, связано с изменением коэффициента поглощения), достигает максимума, а затем довольно резко падает. Очевидно, падение I_{ϕ} связано с достижением по длинам волн “красной границы” λ_{κ} фотоэффекта, когда энергия кванта света равна, приблизительно, ширине запрещенной зоны ΔW . На равенстве $\Delta W = hc/\lambda_{\kappa}$ и основано определение ΔW в данной работе.

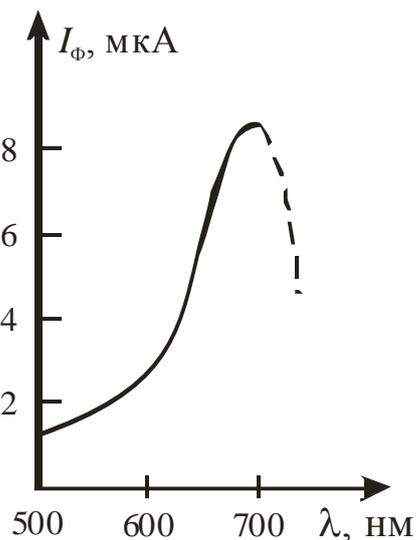


Рис. 15.3

Описание установки

Лицевая сторона установки показана на рисунке 12.3. Корпус установки является и ее основанием. На лицевой стороне установлены ручки управления и контактные гнезда. Внутри корпуса размещены: блок питания, измерительная система ИСК-2, ящики для хранения различного рода приспособлений. На крышке корпуса установлены основные узлы установки: монохроматор, источник света – лампа накаливания (закрывается кожухом), два одинаковых измерительных прибора – мультиметры. Один из них используется как вольтметр, другой как амперметр. Мультиметры подключены к блоку питания и включаются в измерительную систему вместе с включением установки.

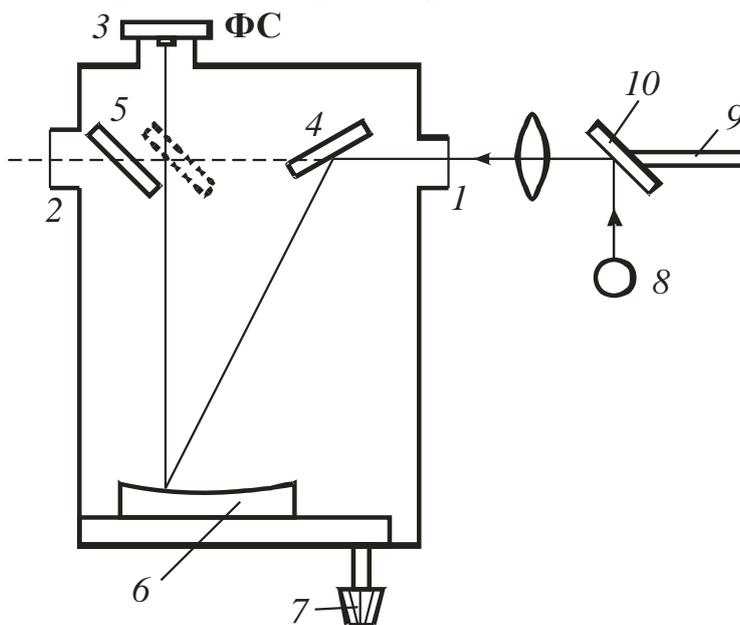


Рис. 15.4. Схема

Важной частью установки является монохроматор, схема которого изображена на рисунке 15.4. Корпус монохроматора имеет три окна: входное 1 и два выходных – заднее 2 и боковое 3, два плоских зеркала 4 и 5, дифракционную отражательную решетку 6. Поворот решетки, за счет чего изменяется длина волны света идущего в направлении выходного окна, осуществляется вращением ручки 7.

Отсчет 481,6 нм

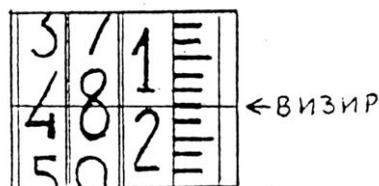


Рис. 15.5

Выделенная длина волны отсчитывается по шкале отсчетного устройства (рис. 15.5), размещенного на передней стенке монохроматора. Шкала имеет три барабана, показывающих значение длины волны в нанометрах. Из рисунка 15.4 видно, что свет от источника δ попадает на зеркало 10 , которое направляет его на входную щель монохроматора. Зеркало 4 направляет свет на дифракционную решетку 6 . Отраженный от решетки пучок, пройдя через выходное окно, падает на исследуемый объект – фотосопротивление (ФС).

Порядок выполнения работы

1. Путем внешнего осмотра ознакомиться с основными узлами установки ЛКК-3.

2. Исследуемый объект – ФС установить за задним выходным окном монохроматора и подключить его к измерительной системе (штуцер с концами проводников, идущих от фотосопротивления, вставить в гнездо, размещенное на панели слева внизу).

3. Установить щели: на входное окно шириной 1 мм, на выходное – 3 мм.

4. Установку подключить к внешней сети 220 В, включить тумблер "сеть".

5. Подключите мультиметры в режиме вольтметров: правый – к гнездам "U_{ЛН}" (чтобы измерить напряжение на лампе накаливания), левый – к гнездам "Г" (чтобы измерить напряжение U_1 на эталонном сопротивлении $R_{эт}=1$ Ом и определить ток лампы, численно равный напряжению на ней). Включите лампу накаливания и установите ручкой "РЕГ. ТОКА" ток 0,4 мА.

6. Переключите левый мультиметр к гнездам "I_{ФП}", чтобы измерить напряжение на выходе усилителя фототока. Ток фотоприемника пропорционален напряжению на выходе с коэффициентом k от 0,1 мкА/В до 100 мкА/В, указанным на шкале переключателя "мкА/В". Формула для расчета фототока:

$$I_{\Phi} = k \cdot (U_{\text{вых}} - U_{\text{темн}}) ,$$

где $U_{\text{темн}}$ – напряжение на выходе усилителя фототока при перекрытом световом потоке (установленной на входе монохроматора заглушке).

Замечание. При токах более 500 мкА переключатель устанавливается в положение "ВНЕШ." (при этом усилитель фототока отключен, $k = 1$), на гнезда "I_{ФП}" выводится сила тока (мультиметр переводится в режим амперметра).

В данной работе обычно используется значение k от 1 до 100 мкА/В.

Правый мультиметр подключите к гнездам $U_{\text{ФП}}$ и установите на фотоприемнике напряжение 10 В.

7. Измерить силу тока I_{Φ} фотопроводимости ФС для разных длин волн падающего света. Измерения провести в пределах от 550 нм до 840 нм. Результаты измерений занести в таблицу 15.1.

Примечание: в области 550–700 нм измерения можно вести с шагом 50 нм, для остальной части спектра – с шагом 20 нм.

Таблица 15.1

$$I_{\text{ЛН}} = \text{мА}; U_{\text{ФП}} = \text{В}; k = \text{мкА/В}; U_{\text{ТЕМН}} = \text{мВ}$$

| | | | | | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| λ , нм | | | | | | | | | |
| $U_{\text{ВЫХ}}$ | | | | | | | | | |
| $I_{\text{Ф}}$, мА | | | | | | | | | |

8. Построить график зависимости $I_{\text{Ф}} = f(\lambda)$ и по нему оценить длину волны $\lambda_{\text{к}}$ соответствующую «красной границе» фотоэффекта (максимум на кривой). По формуле $W = h\nu_{\text{к}} = hc/\lambda_{\text{к}}$ вычислить ширину запрещенной зоны исследуемого полупроводника (ответ дать в Дж и эВ). Принять $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Контрольные вопросы

1. Особенности строения и свойств полупроводников.
2. Сформулировать 1-й и 2-й постулаты Бора.
3. Назвать энергетические зоны полупроводников, указать их физическое содержание.
4. Что понимают под шириной запрещенной зоны ?
5. В чем состоит внутренний фотоэффект. Каковы его особенности и закономерности.
6. Что такое фотопроводимость ?
7. Теоретические основы определения ширины запрещенной зоны в данной работе.
8. Порядок выполнения работы.
9. Полученный результат

Лабораторная работа №16

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

Цель работы: определение постоянной Планка и красной границы фотоэффекта путем исследования зависимости фототока *a)* от задерживающего напряжения при фиксированной длине волны; *б)* от длины волны при фиксированном задерживающем напряжении.

Оборудование: модульный учебный комплекс ЛКК-3.

Теоретические сведения

Внешним фотоэффектом называется явление испускания электронов металлами под действием света. Для внешнего фотоэффекта характерны следующие закономерности.

1. Число электронов, испускаемых веществом в единицу времени, пропорционально интенсивности падающего света.

2. Начальная скорость вылетевших электронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности. С увеличением частоты падающего света скорость электронов увеличивается.

3. Для каждого вещества существует так называемая красная граница фотоэффекта, то есть минимальная частота света $\nu_{кр}$, при которой еще имеет место фотоэффект. Величина $\nu_{кр}$ зависит от химической природы вещества и состояния его поверхности, но не зависит от интенсивности излучения. Величина $\nu_{кр}$ определяется энергией, которую отдает электрон при выходе из металла: $A_{вых} = h\nu_{кр}$, работой выхода.

4. Связь частоты падающего излучения, работы выхода и скорости вылета электронов (и кинетической энергии) дается уравнением Эйнштейна:

$$h\nu = A_{вых} + mv^2/2 .$$

5. Фотоэффект практически безынерционен, то есть между началом освещения и возникновения фотоэффекта нет заметного промежутка времени.

Порядок выполнения работы

1. Установите на монохроматоре входную щель 1,0 мм, выходные щели на задний и боковой выходы 3,0 мм. Подключите модульный учебный комплекс ЛКК-3 к сети переменного напряжения 220 В.
2. Включите установку тумблером "Сеть". Подключите правый мультиметр в режиме вольтметра к клеммам *I* (вольтметр измеряет напряжение на резисторе с сопротивлением 1 Ом). Включите источник света – лампу накаливания. Установите ток лампы около 0,3 А (напряжение 0,3 В). Сфокусируйте излучение лампы на входной щели монохроматора с помощью зеркала входной оптики. Используйте боковой выход монохроматора для наблюдения изображения источника через зрительную трубу (шток зеркала утоплен), добейтесь максимальной его яркости. Убедитесь в изменении цвета выходящего излучения при вращении ручки настройки моно-

хроматора. Определите минимальную и максимальную длину волны излучения, воспринимаемого визуально; зафиксируйте значения λ_{\min} и λ_{\max} в протоколе эксперимента.

- Установите на задний выход монохроматора фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Вытяните штوك зеркала, чтобы переключить на него поток излучения. Подключите ФЭУ к измерительной системе (вход ФП – фотоприемник). Подключите правый мультиметр в режиме вольтметра к клеммам $U_{\text{ФП}}$ для измерения напряжения, подаваемого на фотоприемник, а левый мультиметр (также в режиме вольтметра) к клеммам $I_{\text{ФП}}$ (выход усилителя фототока) для измерения напряжения на выходе усилителя тока фотоприемника $U_{\text{вых}}$. Ток фотоприемника пропорционален напряжению на выходе $I_{\text{ФП}}$ с коэффициентом k от 0,1 мкА/В до 100 мкА/В, указанным на шкале переключателя "мкА/В". При токах более 500 мкА переключатель устанавливается в положение "ВНЕС." (при этом усилитель фототока отключен, $k = 1$), и левый мультиметр переводится в режим амперметра. Формула для расчета фототока:

$$I_{\text{ФП}} = k \cdot (U_{\text{вых}} - U_{\text{темн}}) ,$$

где $U_{\text{темн}}$ – напряжение на выходе усилителя тока фотоприемника при перекрытом световом потоке.

- Проведите измерения и обработку их результатов одним из двух методов (по заданию преподавателя).

Метод 1

Установите на монохроматоре длину волны излучения на выходе 400 нм, переключатель "мкА/В" – в положение 0,1 мкА/В.

Снимите зависимость $I_{\text{ФП}}(U_{\text{ФП}})$ – фототока от напряжения на фотоприемнике для задерживающих напряжений в пределах от 0 до –2 В с шагом 50÷100 мВ (до исчезновения фототока, то есть до $U_{\text{вых}} = U_{\text{темн}}$).

$\lambda = 400 \text{ нм}$

| | | | | | | |
|--|---|------|------|------|-----|-----|
| $U_{\text{ФП}}$, мВ | 0 | –100 | –200 | –300 | ... | ... |
| $U_{\text{вых}}$, мВ | | | | | | |
| $U_{\text{темн}}$, мВ | | | | | | |
| $I_{\text{ФП}}$, 10^{-11} А | | | | | | |
| $(I_{\text{ФП}}/I_{\text{ФП}}(0))^{1/2}$ | | | | | | |

Аналогичные измерения проделайте для $\lambda = 450, 500, 550, 600 \text{ нм}$.

Очень плавный выход зависимости $I_{\text{ФП}}(U_{\text{ФП}})$ на нулевое значение затрудняет определение напряжения, при котором фототок обращается в ноль. Поэтому график следует строить для $\sqrt{I_{\text{ФП}}}$, нормированного на свое значение при нулевом $U_{\text{ФП}}$; эта зависимость близка к линейной и удобна для анализа.

Постройте все пять (для разных λ) зависимостей $I_{\text{ФП}}(U_{\text{ФП}})$ на одном графике. Для каждого случая определите запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$ (когда $I_{\text{ФП}}=0$) и построьте обобщающий график $U_{\text{зап}}(\nu)$.

По наклону графика $U_{\text{зап}}(\nu)$ определите постоянную Планка, а по точке пересечения с осью абсцисс – красную границу фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$ и работу выхода фотокатода $A_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{зап}} = (h/e) \cdot \nu - A_{\text{вых}}/e .$$

Метод 2

Установите переключатель "мкА/В" в положение 0,1 мкА/В.

Подайте на фотоприемник задерживающее напряжение $U_{\text{ФП}} = -200$ мВ.

Снимите зависимость $I_{\text{ФП}}(\lambda)$ фототока от длины волны излучения на выходе монохроматора с шагом 10 нм (до исчезновения фототока, то есть до $U_{\text{вых}} = U_{\text{темн}}$).

Желательно как можно более точно определить и занести в отдельный столбец таблицы длину волны, при которой величина $U_{\text{вых}}$ имеет максимум, и само максимальное значение $U_{\text{вых}}$, с тем чтобы правильно найти $I_{\text{ФПmax}}$, на которое нормируются значения силы фототока.

$U_{\text{ФП}} = -200$ мВ

| | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|
| λ , нм | 480 | 490 | 500 | ... | ... | <i>max: ...</i> |
| $U_{\text{вых}}$, мВ | | | | | | |
| $U_{\text{темн}}$, мВ | | | | | | |
| $I_{\text{ФП}}$, 10^{-11} А | | | | | | |
| $(I_{\text{ФП}}/I_{\text{ФПmax}})^{1/2}$ | | | | | | |

Аналогичные измерения проделайте для задерживающих напряжений $U_{\text{ФП}} = -100, -150, -250, -300, -350, -400, -450, -500$ мВ.

Очень плавный выход зависимости $I_{\text{ФП}}(\lambda)$ на нулевое значение затрудняет определение напряжения, при котором фототок обращается в ноль. Поэтому график следует строить для $\sqrt{I_{\text{ФП}}}$, нормированного на свое *максимальное* значение; эта зависимость близка к линейной и удобна для анализа.

Постройте все (для разных $U_{\text{ФП}}$) зависимости $I_{\text{ФП}}(\lambda)$ на одном графике. Для каждого случая определите запирающие напряжения $U_{\text{зап}}$ (когда $I_{\text{ФП}} = 0$) и постройте обобщающий график $U_{\text{зап}}(\nu)$.

По наклону графика $U_{\text{зап}}(\nu)$ определите постоянную Планка, а по точке пересечения с осью абсцисс – красную границу фотоэффекта $\nu_{\text{кр}}$ и работу выхода фотокатода $A_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{зап}} = (h/e) \cdot \nu - A_{\text{вых}}/e .$$

Контрольные вопросы

1. Понятие о квантовых свойствах света. Энергия кванта света.
2. Явление внешнего фотоэффекта и его закономерности.
3. Внутренний фотоэффект и его объяснение на основе зонной теории строения вещества.
4. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, его физический смысл.
5. "Красная граница" фотоэффекта.

6. Объяснение закономерностей фотоэффекта на основе квантовой природы света.
7. Вольт-амперные и люкс-амперные характеристики вакуумного фотоэлемента.
8. Зависимость тока насыщения фотоэлементов от освещенности.
9. Задерживающая разность потенциалов и ее связь с кинетической энергией электрона, вылетевшего из катода в результате фотоэффекта.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 2011. – Т.3.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.

**Приложение. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДУЛЬНОГО
ЛАБОРАТОРНОГО УЧЕБНОГО КОМПЛЕКСА МУК-ОВ
(ВОЛНОВАЯ ОПТИКА)**



1. Назначение

1.1. Модульный учебный комплекс МУК-О или микролаборатория (в дальнейшем по тексту “комплекс”) предназначен для проведения физического практикума в высших учебных заведениях по разделу волновая и квантовая оптика курса общей физики.

Комплекс позволяет: проводить лабораторные работы по темам:

- интерференция света;
- дифракция света;
- закон Малюса;
- определение угла Брюстера;
- интерференция поляризованного света;
- тепловое излучение.

2. Технические данные

- 2.1. Длина волны лазерного излучателя 0,65 мкм.
- 2.2. Требуемое напряжение питания белого осветителя $0 \div 15\text{В}$ при токе до 1А.
- 2.3. Комплекс снабжен механическими отсчетными устройствами углов поворота.

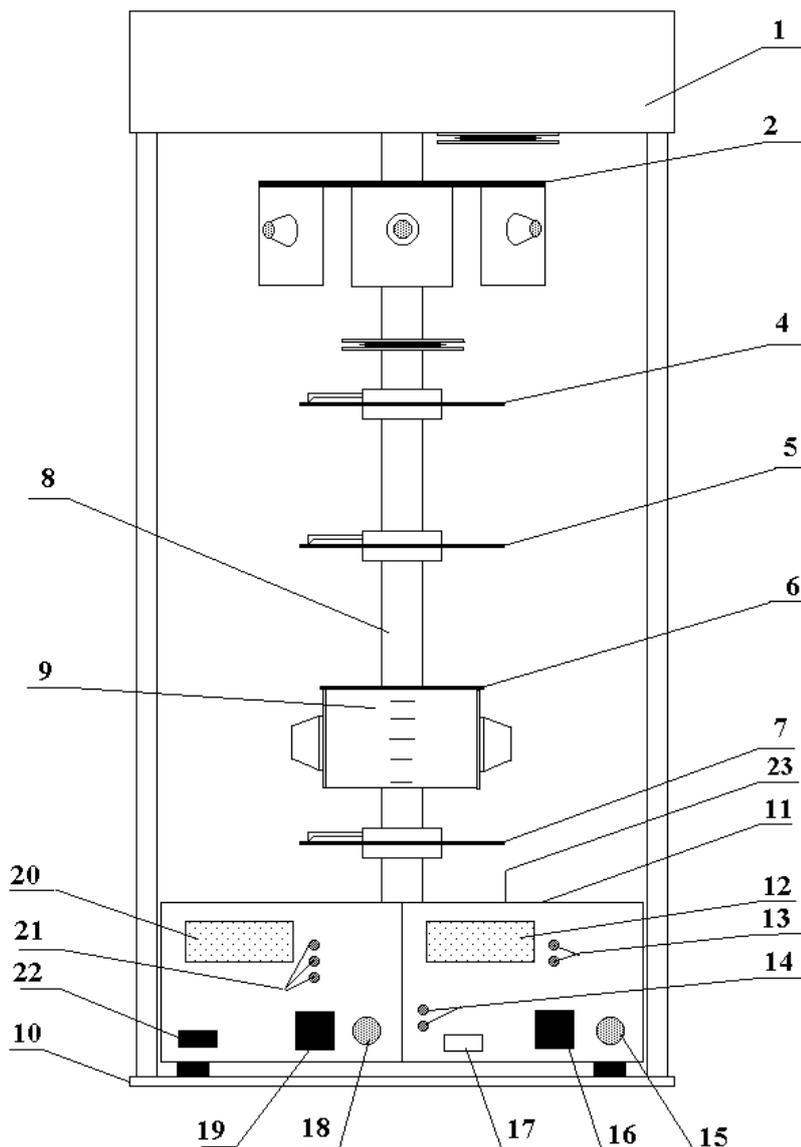


Рис. П.1

3. Устройство и принцип работы блоков комплекса

3.1. Принцип работы оптического блока

Оптический блок (рис. П.1) состоит из основания 10, на котором установлены и закреплены электронный блок 11 и стойка 8, служащая вертикальной оптической скамьей. На стойке смонтированы следующие оптические узлы:

Устройство 1 с полупроводниковым лазерным и белым осветителями. Белый осветитель представляет собой зеркальный отражатель, в котором смонтирована лампа накаливания, свет от которой, отразившись от плоского зеркала и, пройдя конденсорную систему, выводится вертикально вниз.

Турель 2, на которой смонтированы объекты исследования для лабораторных работ по интерференции и дифракции. Каждый из объектов закреплен на вращающейся втулке, горизонтальная ось которой совпадает с серединой объ-

екта. Втулка снабжена стрелкой, а основание – угломерной шкалой и пиктограммой объекта исследования.

Поляризатор 4 закреплен на турели во вращающейся обойме со стрелкой-указателем и транспортиром. При выполнении работ, в которых не требуется поляризатор, турель поляризатора поворачивается на 90° и выводится из рабочей зоны.

Турель 5 с объектом исследования, используемым в работах по поляризации света.

Устройство 6 с матовой полупрозрачной шкалой 9, содержащее поворотную стеклянную пластинку, использующуюся в опытах по изучению закона Брюстера.

Турель с анализатором 7, выполненным аналогично 4.

3.2. Электронный блок 11 содержит:

- блоки электропитания лазерного и белого источников света с цифровым индикатором регулируемого напряжения и силы тока белого источника;
- блок фотоприемников с цифровым индикатором относительной интенсивности принимаемого света.

4. Подготовка комплекса к работе

4.1. Установка комплекса на рабочее место

Снимите защитный чехол, установите прибор так, чтобы он занял удобное положение на рабочем столе. Важно, чтобы на это место не попадал слишком сильный посторонний свет.

4.2. Описание органов управления

4.2.1. Оптический блок

При включении электропитания комплекса кнопкой 22 включается либо лазерный, либо белый источник света. Выбор нужного источника производится кнопкой 17 и подтверждается индикаторами 14.

Для проведения работ по дифракции и интерференции поворотом турели 2, на пути лазерного луча устанавливается соответствующий объект исследования, при этом все расположенные ниже турели поворачиваются в сторону, и выводятся из рабочей зоны.

При проведении работ по поляризации верхняя турель 2 устанавливается так, чтобы луч света проходил через свободное отверстие предусмотренное в этой турели. При работе с источником белого света необходимо учитывать, что его пучок выходит правее лазерного пучка. Ниже по ходу распространения света в пучок вводятся предусмотренные заданием объекты исследования.

4.2.2. Электронный блок

Электронный блок содержит следующие органы управления, коммутации и индикации:

- кнопка включения «сеть» 22;

- кнопка переключения фотоприемников 19 с индикаторами факта подключения данного фотоприемника 21;
- окно 23 в верхней крышке электронного блока, под которым расположены фотоприемники с узкой и широкой полосой принимаемого излучения;
- ручку установки « J_{\max} » 18;
- цифровой индикатор величины относительной интенсивности принимаемого излучения 20;
- кнопка переключения лазерного и белого источника света 17 с подтверждающими индикаторами 14;
- цифровой индикатор величины напряжения и силы тока электролампы белого источника света 12;
- кнопка 16 переключения цифрового индикатора с индикации напряжения на индикацию силы тока и наоборот с подтверждающими сигнализаторами 13;
- ручка управления напряжением питания электролампы белого источника 15.

Порядок выключения комплекса

Если работа с измерительным прибором закончена, нажать кнопку «Сеть» и отключить электронный блок.

Вынуть вилку электронного блока из розетки сети 220В.

Литература

1. Бутиков Е.И. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
2. Годжаев Н.М. Оптика. М.: Высшая школа, 1977.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 718 с.
4. Дитчберн Р. Физическая оптика. М.: Наука. 1965. 632 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
6. Матвеев А.Н. Оптика. М.: Высшая школа, 1985.
7. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 2011. Т.2.
8. Савенко С.В. Измерительная техника. М.: Высшая школа, 1974.
9. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1985.
10. Теплообмен излучением: Справочник/А.Г.Блох, Ю.А.Журавлев, Н.Л.Рыжков. М.: Энергоиздат, 1991.

Учебное издание

ОПТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

*Методические указания к лабораторному практикуму
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика»*

Часть 2. Молекулярная и квантовая оптика

Составители:

Д.В.Баяндин, В.Г.Беспрозванных, Г.Н. Воинов,
О.М.Зверев, В.С.Кирчанов

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 4.09.2017. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 3,1. Тираж 50 экз. Заказ № 113а/2017.

Отпечатано в Издательстве
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614000, г. Пермь, Комсомольский пр.,29, к. 115.
Тел. (342) 219-80-33