

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени  
Франциска Скорины»

**В. Г. ПИНЧУК, А. А. КОВАЛЕВ, А. Е. ШЕРШНЕВ**

# **ОБЩАЯ ФИЗИКА ОПТИКА**

Практическое пособие

для студентов специальности

1-31 01 01 02 «Биология (научно-педагогическая деятельность)»

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2017

УДК 535(076)  
ББК 22.34я73  
ПЗ26

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук М. В. Буй,  
кандидат технических наук А. С. Руденков

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Пинчук, В. Г.**

ПЗ26      Общая физика. Оптика : практическое пособие /  
В. Г. Пинчук, А. А. Ковалев, А. Е. Шершнев ; М-во  
образования Республики Беларусь, Гомельский гос.  
ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины,  
2017. – 42 с.

ISBN 978-985-577-289-8

Издание включает подробное описание лабораторных работ по  
разделу «Оптика». Даются рекомендации по исследованию явлений  
дифракции, интерференции, поляризации света и других.

Практическое пособие предназначено для выполнения лаборатор-  
ных работ студентами специальности 1-31 01 01-02 «Биология (науч-  
но-педагогическая деятельность)» по дисциплине.

**УДК 535(076)**  
**ББК 22.34я73**

**ISBN 978-985-577-289-8**

© Пинчук В. Г., Ковалев А. А.,  
Шершнев А. Е., 2017

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Тема 1. Фотометрия.....	5
Тема 2. Геометрическая оптика.....	9
Тема 3. Интерференция света.....	16
Тема 4. Дифракция света.....	21
Тема 5. Поляризация света.....	26
Тема 6. Изучение внешнего фотоэффекта.....	31
Тема 7. Спектры атомов.....	36
Литература.....	42

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЬКА

## Предисловие

Практическое пособие написано в целях более глубокого изучения физической сущности законов разделов общей физики «Оптика», «Атомная и ядерная физика». Оно включает в себя материалы по исследованию новых физических явлений – дифракции, интерференции, спектральных закономерностей атома водорода, вращения плоскости поляризации.

На освоение данного раздела физики существенно влияет содержание лабораторного практикума и методика его проведения. Практическое пособие включает подробные описания лабораторных работ по темам: «Фотометрия», «Геометрическая оптика», «Интерференция света», «Дифракция света», «Поляризация света», «Внешний фотоэффект», «Спектры атомов».

При составлении описаний лабораторных работ предусмотрено использование современного оборудования и приборов. Каждая работа составлена по общему плану: основные теоретические сведения, контрольные вопросы, цель работы, приборы и принадлежности, порядок выполнения работы.

На выполнение каждой лабораторной работы отводится два академических часа.

Предлагаемые в настоящем пособии разработки лабораторных работ в течении ряда лет используются на кафедре общей физики УО «ГГУ им. Ф. Скорины».

Данное издание предназначено в первую очередь для студентов младших курсов специальности биология, научно-педагогическая деятельность. Может быть полезно студентам технических вузов, а также учащимся средних специальных учебных заведений и старшеклассникам.

# Тема 1. Фотометрия

## Основные понятия по теме

**Световым потоком**  $\Phi$  называют мощность светового (видимого) излучения, оцениваемого по его воздействию на нормальный глаз. Световой поток (поток фотонов) измеряется в люменах (лм).

**Точечным источником** света называется источник, излучающий сферические волны. Электромагнитная волна называется сферической, если её интенсивность зависит только от расстояния  $r$  до центра волны. За точечный источник на практике можно принять источник, размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

**Телесным углом** называется часть пространства, ограниченная конической поверхностью. За единицу телесного угла принят стерадиан (ср).

**Силой света  $I$  точечного источника** называется световой поток, излучаемый точечным источником в единичный телесный угол. Если точечный источник излучает равномерно во всех направлениях, то

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (1.1)$$

Сила света измеряется в **канделах** (кд).

**Освещённостью  $E$**  называется световой поток, падающий на единицу освещаемой поверхности (в случае точечного источника света, расположенного не слишком близко к освещаемой поверхности, настолько, чтобы при этом световой поток на каждый элемент освещаемой площади был практически одинаков):

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (1.2)$$

Освещённость измеряется в **люксах** (лк).

Если освещённость создаётся точечным источником света, то её величина прямо пропорциональна силе света  $I$ , косинусу угла падения света на поверхность и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r^2$  между источником света и освещаемой поверхностью:

$$E = \frac{I \cdot \cos \varphi}{r^2}. \quad (1.3)$$

**Светимостью**  $R$  называется световой поток, излучаемый единицей светящейся или отражающей поверхности:

$$R = \frac{\Phi}{S} . \quad (1.4)$$

Светимость выражается в люксах (лк).

**Яркостью**  $B$  называется сила света, испускаемого с единицы светящейся поверхности

$$B = \frac{I}{S \cdot \cos \varphi} , \quad (1.5)$$

где  $S$  – величина видимой светящейся поверхности;

$\varphi$  – угол между направлением излучаемого света и нормалью к излучающей поверхности.

## **Лабораторная работа 1. Проверка законов освещённости**

**Цель работы:** изучить основные фотометрические понятия; экспериментально проверить выполнение законов освещённости.

**Приборы и принадлежности:** фотометрический прибор на основе селенового фотоэлемента для измерения освещённости; регулируемый источник постоянного тока; источник света (электрическая лампочка); линза в оправе; матовое стекло; набор диафрагм; вольтметр; микроамперметр; соединительные провода.

### **Описание установки**

Фотометрический прибор (рисунок 1.1) состоит из камеры 1 и разъёмного корпуса прямоугольной формы 2. Внутри камеры вмонтирован селеновый фотоэлемент, провода от которого выведены на торцевую часть прибора. Фотоэлемент закреплён в специальной оправе, которая может поворачиваться вокруг горизонтальной оси в пределах угла  $\varphi = 90^\circ$ . Поворот фотоэлемента осуществляется рукояткой 3, расположенной на передней стороне камеры.

Отсчёт угла поворота осуществляется по угловой шкале 4. Селеновый фотоэлемент состоит из металлической подложки, на одной стороне которой нанесён слой селена толщиной около 0,1 мм. Сверху этот слой покрыт прозрачным электродом. Внутри прямоугольного корпуса помещается лампочка, которая может перемещаться вдоль продольной оси прибора. Величина перемещения отсчитывается по линейке 5, закреплённой на лицевой стороне корпуса. В набор также

входят линза в оправе 6, матовое стекло 7, набор диафрагм 8 и осветитель (электрическая лампочка). Питание осветителя от выпрямителя 9. Напряжение на лампочке регулируется вращением рукоятки 10. Величину фототока измеряют с помощью микроамперметра 11.

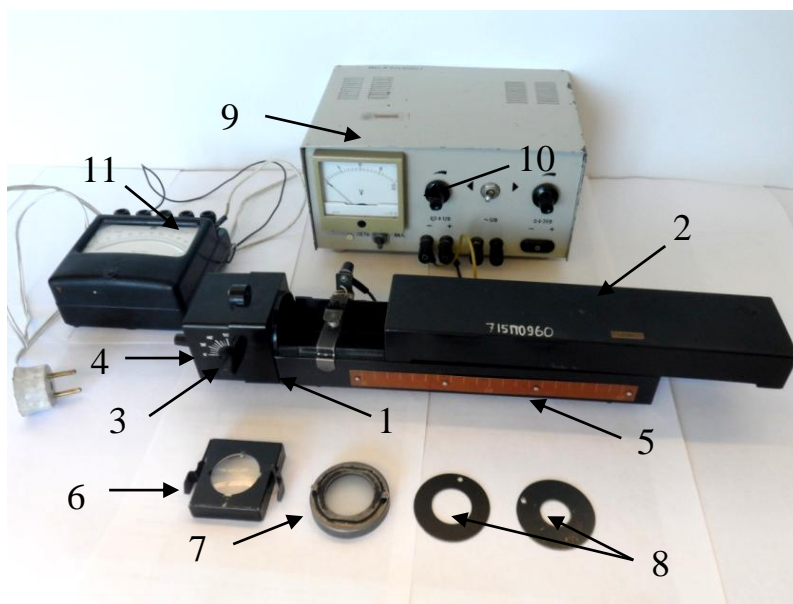


Рисунок 1.1 – Установка для проверки законов фотометрии

### **Упражнение 1. Исследование зависимости освещённости поверхности фотоэлемента от расстояния его между лампочкой и фотоэлементом**

1. Для получения параллельного пучка света между фотоэлементом и лампочкой поместите линзу в оправе.

2. Установите фотоэлемент перпендикулярно оси прибора (ручка поворота фотоэлемента должна находиться на нулевой отметке шкалы).

3. Поместите лампочку на десятом делении (10 см) измерительной шкалы корпуса установки.

4. С помощью ручки для регулировки напряжения, расположенной на лицевой панели источника питания подайте на лампочку такое напряжение, при котором микроамперметр покажет значение силы тока  $i = 10\mu\text{A}$ .

5. При постоянном напряжении для каждого расстояния между лампочкой и фотоэлементом (изменяя его через каждые два сантиметра) измерьте соответствующие показания микроамперметра и занесите полученные значения силы фототока  $i$  в таблицу 1.1.

6. Постройте график зависимости силы тока  $i$  от расстояния  $r$ ,  $i = f(r)$ .

7. На основании построенного графика сделайте вывод о характере зависимости освещённости от расстояния, учитывая, что сила фототока пропорциональна освещённости.

Таблица 1.1 – Зависимость силы фототока от расстояния между фотоэлементом и источником света

$r$ , см	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$i$ , $\mu\text{A}$											

### Упражнение 2. Исследование зависимости освещённости поверхности от угла падения света

1. Перед фотоэлементом внутри корпуса поместите линзу в оправе.  
2. Установите лампочку на десятом делении измерительной шкалы (10 см).

3. Ручкой регулировки напряжения добейтесь значения фототока ( $i = 10 \mu\text{A}$ ) и запишите показание микроамперметра в таблицу 1.2.

4. Не меняя напряжения на лампочке и расстояние  $r$  между лампочкой и фотоэлементом ( $r = 10 \text{ см}$ ), при помощи рукоятки (3), расположенной на лицевой панели прибора, изменяйте угол наклона плоскости фотоэлемента через каждые 10 градусов. Данные измерений занесите в таблицу 1.2.

5. Постройте график зависимости силы фототока от угла падения света на поверхность фотоэлемента  $i = f(\varphi)$ .

6. В той же системе координат (учитывая масштаб), постройте график зависимости  $\cos\varphi = f(i)$ . Сравните оба графика. На основании результатов сравнения графиков сделайте вывод о характере зависимости освещённости от угла падения  $\varphi$  света, учитывая прямо пропорциональную зависимость силы тока от освещённости. Проанализируйте, подтверждает ли полученный вывод зависимость от угла падения света на поверхность фотоэлемента, заданную формулой (1.3).

Таблица 1.2 – Зависимость силы фототока от угла падения света

$\varphi^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$i$ , $\mu\text{A}$									
$\cos \varphi$									



### Упражнение 3. Исследование зависимости светового потока от площади освещаемой поверхности

1. Уберите линзу и поверните фотоэлемент перпендикулярно падающему свету (ручку поворота фотоэлемента установите на нулевое деление угловой шкалы 4).

2. Поместите между фотоэлементом и лампочкой матовое стекло в оправе. При этом площадь открытой поверхности фотоэлемента равна  $9 \text{ см}^2$ .

3. Установите лампочку на десятом делении измерительной шкалы (10 см).

4. Ручкой регулировки напряжения установите на микроамперметре силу тока равную  $10 \text{ мкА}$ . Запишите показание микроамперметра.

5. Установите перед фотоэлементом последовательно диафрагмы с площадями  $6 \text{ см}^2$  и  $3 \text{ см}^2$ . Снимите соответствующие показания микроамперметра.

6. Постройте график зависимости силы фототока от площади освещаемой поверхности  $i = f(S)$ .

7. Учитывая прямо пропорциональную зависимость силы фототока от величины светового потока (один фотон выбивает один электрон), сделайте вывод о характере зависимости светового потока от площади освещаемой поверхности.

### Контрольные вопросы

1. Что изучает фотометрия?

2. Дайте определения фотометрическим параметрам (световой поток, сила света; освещённость; яркость; светимость). Назовите их единицы измерения.

3. От чего и как зависит освещённость? Запишите эту зависимость математически.

4. Сравните определения и формулы для вычисления освещённости и яркости.

## Тема 2. Геометрическая оптика

### Основные понятия по теме

**Закон отражения:** при падении света на границу раздела двух сред луч падающий, луч отражённый и перпендикуляр к границе раздела в точке падения луча лежат в одной плоскости (при этом лучи

располагаются по разные стороны перпендикуляра); угол падения  $\alpha$  равен углу отражения  $\beta$ .

**Углом падения** называют угол между направлением падающего луча и перпендикуляром к границе раздела сред, восстановленном в точке падения света. Угол между этим перпендикуляром и направлением отраженного луча называется **углом отражения**. Угол между этим перпендикуляром и направлением преломлённого луча называется **углом преломления**.

**Закон преломления:** при падении света на границу раздела однородных изотропных прозрачных (не поглощающих) сред с показателями  $n_1$  и  $n_2$ , лучи (падающий и преломлённый) и перпендикуляр к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости (рисунок 2.1).

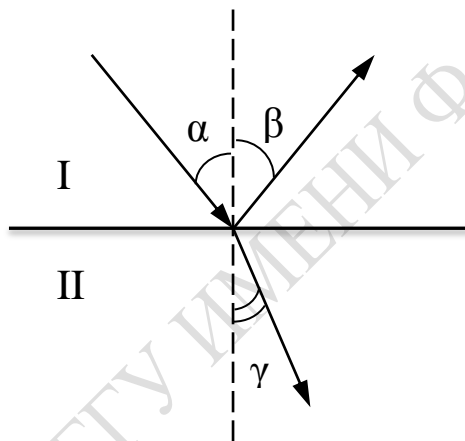


Рисунок 2.1 – Законы отражения и преломления

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

**Относительный показатель преломления двух сред**  $n$  показывает – во сколько раз изменяется скорость света во второй среде по отношению к первой:

$$n_{2-1} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (2.2)$$

Изменение скорости света в среде по отношению к вакууму называется **абсолютным показателем преломления**.

$$n_1 = \frac{c}{v_2}. \quad (2.3)$$

Относительный показатель равен отношению абсолютных показателей преломления сред:

$$n_{2-1} = \frac{n_1}{n_2} . \quad (2.4)$$

Поместим прозрачную стеклянную плоскопараллельную пластинку на предметный столик микроскопа. Направим свет с помощью зеркальца микроскопа на нижнюю грань пластинки. Луч света, отразившись от некоторой точки нижней грани пластинки, пройдя через пластинку почти перпендикулярно к её поверхности, упадёт на верхнюю грань под углом падения  $\alpha$  и выйдет из пластинки в воздушную среду под некоторым углом преломления (рисунок 2.2). Выйдя из пластинки, луч света, преломившись на границе раздела в точке, попадёт в микроскоп, а следовательно, в глаз наблюдателя.

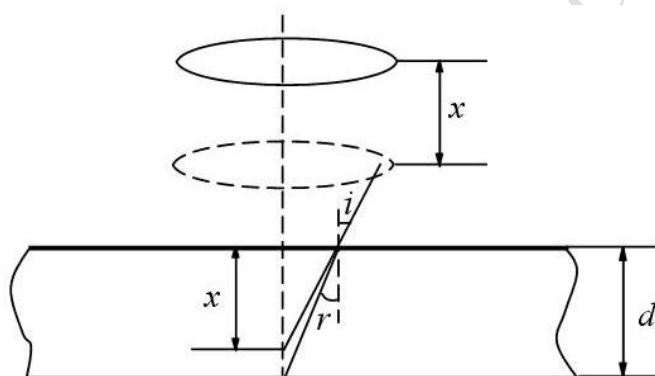


Рисунок 2.2 – Ход лучей света в стеклянной пластинке

Применим закон преломления к лучу который преломился:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_{\text{возд.}}}{n_{\text{стекла}}} . \quad (2.5)$$

Так как свет падает почти перпендикулярно пластине, угол падения света  $\alpha$  на её верхнюю поверхность достаточно мал. Из курса математики известно, что при малых углах синус угла приблизительно равен его тангенсу. В этом случае можно записать:

$$\frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg} \gamma} = \frac{n_{\text{возд.}}}{n_{\text{стекла}}} . \quad (2.6)$$

Из рисунка (2.2) следует, что угол  $\phi$  равен углу преломления  $\gamma$ . Мнимую (оптическую) толщину пластинки, обозначим через  $d'$ . Тогда из выражения (2.6) получим

$$\frac{n_{\text{возд.}}}{n_{\text{ст.}}} = \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\gamma} = \frac{d'}{d}.$$

Так как показатель преломления воздуха близок к единице, то показатель преломления стекла равен отношению действительной и мнимой толщин стеклянной пластины:

$$n_{\text{ст.}} = \frac{d}{d'}. \quad (2.7)$$

## Лабораторная работа 2. Определение показателя преломления стекла микроскопом и жидкости рефрактометром

**Цель работы:** определить показатель преломления стекла с помощью микроскопа, показатель преломления жидкости и концентрации раствора рефрактометром.

**Прибора и принадлежности:** микроскоп с микрометрическим винтом, прозрачная стеклянная пластинка, рефрактометр, набор жидкостей, пипетка.

### Описание установок

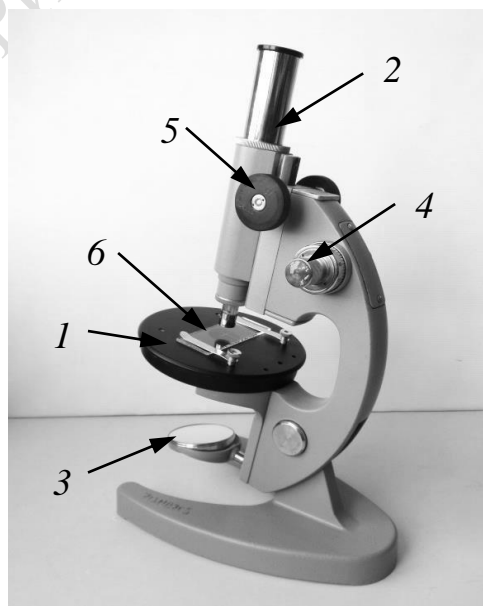


Рисунок 2.3 – Установка для определения показателя преломления стекла

Для определения показателя преломления стекла в данной работе используют плоскопараллельную пластинку с нанесёнными на обеих её сторонах царапинами. Для того чтобы легче было распознать, какая именно поверхность пластинки наблюдается в микроскоп, удобно на одной стороне пластинки провести царапину или линию фломастером вдоль большей стороны пластинки, а на другой – поперёк её. Истинная толщина пластинки измеряется микрометром или штангенциркулем. Оптическая (кажущаяся) толщина пластинки численно равна перемещению тубуса микроскопа. Перемещение тубуса микроскопа осуществляется с помощью двух винтов: для «грубой» фокусировки – черным и для точной фокусировки – микрометрическим (белым). Микрометрический винт снабжён измерительной шкалой, цена деления которой указана сбоку винта и равна 0,002 мм. Один оборот винта включает в себя 50 делений. Перемещение тубуса микроскопа при одном полном обороте микрометрического винта называется «шагом винта». Шаг микрометрического винта данного микроскопа:  $S = 50 \cdot 0,002 = 0,1$  (мм).

Рефрактометр представлен на рисунке 2.4. Он состоит из корпуса; двух прямоугольных призм, сложенных гипотенузами и вмонтированных в полые кожухи, выполненные в виде полуцилиндров; окуляра; компенсатора, вращающегося с помощью рукоятки, призмы.



Рисунок 2.4 – Внешний вид рефрактометра

Нижний из них неподвижно прикреплен к корпусу, а верхний откидывается на шарнире. Это пространство при измерении заполняется исследуемой жидкостью.

Рефрактометр служит для быстрого определения показателя преломления жидкостей.

Принцип работы рефрактометра основан на явлении полного внутреннего отражения. Свет от источника света направляется на грань призмы. Преломившись в призме, свет проходит в слой жидкости через матовую грань *cd*. На матовой грани свет рассеивается и попадает в жидкость под различными углами падения. Так как луч падает из более плотной среды в менее плотную, то угол преломления больше угла падения на границе раздела стекло – жидкость. Тогда все лучи, падающие на границу раздела под углами меньшими угла полного внутреннего отражения, пройдут через слой жидкости во вторую призму *P2* и создадут освещённую часть поля зрения. Лучи, падающие под углами большими критического угла, полностью отразятся в первую среду призмы *P1* и не попадут в призму *P2*. Следовательно, часть поля зрения в окуляре будет затемнена. При этом положение границы раздела света и тени зависит от показателя преломления жидкости и концентрации раствора, так как угол полного внутреннего отражения для разных жидкостей различный.

Через окуляр наблюдаются две проградуированные шкалы: для отсчёта показателя преломления (справа) и для определения концентрации раствора (слева).

При освещении призмы белым светом наблюдаемая в поле зрения граница раздела света и тени может оказаться окрашенной. Окрашенность снимается поворотом рукоятки.

### **Упражнение 1. Определение показателя преломления стекла с помощью микроскопа**

Поместите на предметный столик (1) микроскопа стеклянную пластинку с нанесёнными с обеих её сторон взаимно перпендикулярными царапинами. При вращении микрометрического винта в направлении увеличения показаний винта, тубус микроскопа (2) перемещается вверх. В связи с этим логично сначала сфокусировать нижнюю поверхность стеклянной пластинки, а затем верхнюю.

Вращая зеркало (3), получите наилучшее освещение поля зрения. Выкрутите микрометрический винт (4) микроскопа против часовой стрелки до упора и установите на нулевое деление. Изменяя положение стеклянной пластинки (6), чёрным винтом (5), служащим для «грубого» перемещения тубуса микроскопа, сфокусируйте нижнюю её грань, получив чёткое изображение царапины нанесённой на нижней стороне пластинки.

Не изменяя положения чёрного винта, вращением микрометрического винта добейтесь максимально чёткого изображения царапины,

расположенной на верхней грани пластинки, считая при этом число полных оборотов  $m$  микрометрического винта. Запишите полное число оборотов винта  $m$  и число делений  $k$  против указателя на его ободе. Подсчитайте перемещение тубуса микроскопа  $d'$  по формуле:

$$d' = 50 \cdot m \cdot 0,002 + k \cdot 0,002.$$

Определите показатель преломления стекла по формуле (2.7).

Сравните полученное значение показателя преломления стекла со справочным его значением и сделайте вывод о справедливости предложенного метода.

## **Упражнение 2. Определение показателя преломления жидкости и концентрации раствора рефрактометром**

1. С помощью пипетки поместите между двумя призмами рефрактометра несколько капель исследуемой жидкости (сахарного раствора).

2. Включите осветитель. Поворотом держателя лампочки добейтесь хорошей освещённости поля зрения. Вращением рукоятки найдите два поля: свет и тень, и получите их чёткую границу раздела. В случае окрашенности границы раздела полей зрения, уберите окрашенность с помощью рукоятки.

3. Рукояткой установите перекрестие на границу раздела полей. По левой шкале снимите отсчёт показателя преломления исследуемой жидкости; по правой шкале определите концентрацию данного раствора. Сравните полученное значение концентрации исследуемого раствора со значением заданным лаборантом.

4. Тщательно протрите грани призм ватой. Капните несколько капель другой исследуемой жидкости (глицерина). Определите показатель преломления данного вещества.

5. Сравните измеренные значения показателей преломления глицерина с табличным значением. По результатам сравнения сделайте вывод о справедливости используемого метода измерений.

## **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте законы отражения и преломления.
2. Дайте определение угла падения, отражения и угла преломления.
3. Что называется абсолютным коэффициентом преломления; относительным коэффициентом преломления?
4. Как определить показатель преломления стекла с помощью микроскопа?

5. Поясните явление полного внутреннего отражения.

6. Какой угол называется предельным углом полного внутреннего отражения?

7. Как используется явление полного внутреннего отражения для определения коэффициента преломления жидкости с помощью рефрактометра?

## Тема 3. Интерференция света

### Основные понятия по теме

Наложение волн, в результате которого появляются чередующиеся полосы максимальной и минимальной освещённости (интерференционные полосы), называется *интерференцией света*. Две волны называются *когерентными*, если разность их фаз не меняется во времени. Этому условию удовлетворяют монохроматические волны, частоты которых одинаковы. Лазеры дают когерентное излучение.

Результат наложения когерентных волн, представляющие собой чередование темных и светлых полос наблюдаемых на экране, называется интерференционной картиной.

Для получения когерентных волн и наблюдения их интерференции с помощью обычных источников света применяют метод расщепления пучка (света) волн, излучаемого одним источником света с помощью зеркал, призм на две или большее число систем волн, которые после прохождения различных путей накладываются друг на друга, образуя на экране интерференционную картину.

Пучок параллельных лучей, направленных сверху на линзу, частично отражается от нижней границы линзы, частично проходит в воздушный клин (из-за малой кривизны линзы практически вертикально). В данном случае луч указывает направление распространения световой волны. Один из лучей (луч 1), отразившись от пластинки в точке А, возвращается обратно и интерферирует с лучом 2, отражённым от нижней поверхности линзы в некоторой точке В (рисунок 3.1).

В общем случае оптическая разность хода интерферирующих отражённых лучей определяется оптической разностью хода лучей и углом падения света на линзу. При отражении от более плотной среды теряется половина волны:

$$\Delta = L \cdot n \cdot \cos \alpha + \frac{\lambda}{2}, \quad (3.1)$$



где  $L$  – оптическая разность хода лучей;  
 $n$  – показатель преломления среды;  
 $\alpha$  – угол падения света.

Произведение геометрической длины пути на абсолютный показатель преломления этой среды  $n$  называется оптической длиной пути. При малой толщине клина

$$BC \approx AB \approx d.$$

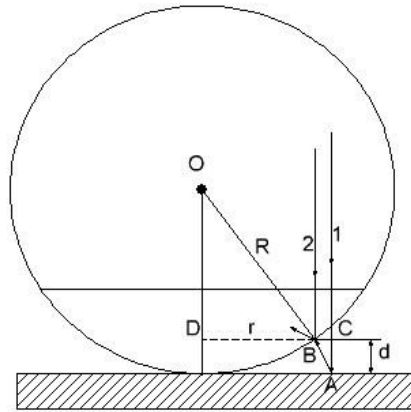


Рисунок 3.1 – Прохождение светового луча через линзу

Свет проходит в воздушной среде, у которой показатель преломления равен единице. Так как свет падает перпендикулярно поверхности тонкой линзы, то косинус угла падения равен единице. Таким образом, оптическая разность хода будет равна

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}. \quad (3.2)$$

Толщину воздушного клина  $d$  в данной точке можно определить из прямоугольного треугольника  $OBD$ , образованного радиусом сферы, частью которой является данная линза  $OB$  и радиусом кольца Ньютона  $DB = r$ .

Используя теорему Пифагора, из данного треугольника выразим радиус кольца:

$$(DB)^2 = (OB)^2 - (OD)^2.$$

Так как  $d^2$  во много раз меньше  $R$ , то этой очень малой величиной можно пренебречь, тогда

$$r^2 \approx 2Rd.$$

Отсюда выразим:

$$d = \frac{r^2}{2R} \quad (3.3)$$

и подставим полученное выражение для  $d$  (3.3) в формулу (3.2), получим

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (3.4)$$

Для волн, у которых разность хода в точке  $B$  равна нечётному числу полуволен

$$\Delta = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.5)$$

в точке их наложения будет наблюдаться минимум освещённости (тёмная полоса); в точках, в которых разность хода равна чётному числу полуволен, будет наблюдаться максимум (светлая полоса).

$$\Delta = 2m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.6)$$

Если применить условие минимумов, т.е. приравнять выражения (3.2) и (3.6), получим соотношение связывающее радиус линзы, радиус

ус кольца и длину волны падающего света:  $\frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ .

Из этого равенства следует выражение для кольца Ньютона:

$$r^2 = m\lambda R. \quad (3.7)$$

Аналогичный вид будет иметь выражение для радиуса любого кольца.

Таким образом, для  $m$ -го кольца

$$r_m^2 = m\lambda R \quad (3.8)$$

и для  $k$ -го кольца

$$r_k^2 = k\lambda R. \quad (3.9)$$

Вычтем равенство (3.9) из равенства (3.8):

$$r_m^2 - r_k^2 = R \cdot \lambda \cdot (m - k), \quad (3.10)$$

где  $k$  и  $m$  – порядковые номера колец.

Преобразуя в формуле (3.10) радиусы колец через их измеренные диаметры, зная длину волны света, можно определить радиус кривизны линзы  $R$ .

Измеряя радиусы колец и зная радиус кривизны линзы  $R$ , можно используя формулу (3.10), определить длину волны света  $\lambda$  освещавшего прибор, и, наоборот, зная длину волны света  $\lambda$ , можно определить радиус кривизны линзы  $R$  по формуле:

$$R = \frac{d_m^2 - d_k^2}{4\lambda \cdot m - k}. \quad (3.11)$$

### **Лабораторная работа 3. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона**

**Цель работы:** определить радиус кривизны линзы с помощью колец Ньютона, длину волны света светофильтра.

**Приборы и принадлежности:** микроскоп с окулярным микрометром; плоскопараллельная пластинка; линза в оправе; осветитель; набор светофильтров.

#### **Описание установки**

Установка состоит из микроскопа с окулярным микрометром; осветителя; плоскопараллельной пластинки и линзы в оправе; набора светофильтров. Свет от осветителя через тубус попадает на зеркало расположенное в тубусе микроскопа под углом 45 градусов к направлению падающего на него света и, отражаясь от зеркала, падает на линзу перпендикулярно поверхности линзы. Пройдя через линзу, свет частично отражается от нижней поверхности линзы, частично от верхней поверхности пластинки образуя кольца Ньютона. Измеряя диаметры колец наблюдаемых в окуляр микроскопа можно определить радиус линзы используя соотношение (3.11).

#### **Упражнение 1. Определение радиуса кривизны линзы с помощью колец Ньютона**

1. Положите на столик микроскопа лист чёрной бумаги. На бумагу поместите собранную систему, состоящую из: плоскопараллельной пластинки и помещённой на неё плоско-выпуклой линзы. (Линза должна лежать на пластинке выпуклой стороной).

2. Включите осветитель и поместите его относительно микроскопа так, чтобы световой поток был направлен в иллюминатор микроскопа.

3. Плавно передвигая пластинку с линзой и перемещая тубус микроскопа вращением винта, служащего для перемещения тубуса, найдите такое их положение, при котором наблюдается чёткое изображение чередующихся тёмных и светлых колец. При этом шкала окулярного микрометра должна проходить как можно точнее через центры колец.

4. В держатель на осветителе закрепите красный светофильтр и получите интерференционную картину колец Ньютона в красном свете.

5. Выбрав наиболее чёткое тёмное кольцо, посчитайте количество клеточек окулярного микрометра, помещающихся в диаметре  $k$ -го кольца по горизонтали  $d_1$ , и по вертикали –  $d_2$ . Средний диаметр  $k$ -го кольца будет равен:  $d_{\text{ср.}} = \frac{d_1 + d_2}{4}$  клеток или  $d_{\text{ср.}} = \frac{d_1 + d_2}{4} \cdot c$  мм,

где  $c = 0,8$  мм – цена деления шкалы окулярного микрометра.

6. Таким же образом определите диаметр  $m$ -го кольца.

7. По формуле (3.11) определите радиус кривизны линзы  $R$ .

## Упражнение 2. Определение длины волны света при помощи колец Ньютона

1. Замените красный светофильтр зелёным. Измерьте радиусы двух тёмных колец в соответствии с пунктом 5 упражнения 1.

2. Зная радиус кривизны  $R$ , рассчитанный по формуле (3.11) в пункте 7 упражнения 1, определите длины волн зелёного и жёлтого света по формуле:

$$\lambda = \frac{d_m^2 - d_k^2}{4R \cdot m - k}. \quad (3.12)$$

3. Те же действия выполните с жёлтым светофильтром.

4. Сравните полученные результаты со справочными значениями искомым длин волн, и сделайте вывод о справедливости изучаемого метода.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите условия возникновения интерференционной картины.

2. Запишите условие минимума и максимума интенсивности света при интерференции света.

3. Поясните схему получения колец Ньютона.
4. Какой вид будут иметь кольца, если падающий свет не монохроматический?
5. Получите «рабочую» формулу.

## Тема 4. Дифракция света

### Основные понятия по теме

Огибание волнами препятствия и проникновение их в область геометрической тени называется дифракцией. Вид дифракционной картины зависит от формы и размеров огибаемого препятствия (край экрана; узкая щель; решётка; тонкая нить; круглое отверстие и т. д.); от расстояния между препятствием и экраном; длины волны света; угла падения света на препятствие; размеров источника.

Условие минимума на щели:

$$b \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad (4.1)$$

где  $b$  – ширина щели;

$\varphi$  – угол дифракции (угол между направлением отклонённого луча и нормалью к плоскости щели);

$m$  – порядок максимума;

$\lambda$  – длина волны излучения.

Условие максимума на щели:

$$b \cdot \sin \varphi = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (4.2)$$

Центральный максимум расположен в точке  $O$  напротив центра щели. На экране будут наблюдаться светлые и тёмные полосы. Ширина и число этих полос будет зависеть от отношения длины волны  $\lambda$  к ширине щели  $b$ .

Система из  $N$  одинаковых параллельных щелей в плоском непрозрачном экране, расположенных на равных расстояниях друг от друга, называется одномерной дифракционной решёткой. Величина  $d = a + b$ , называется постоянной дифракционной решётки или её периодом, где  $a$  – ширина щели, а  $b$  – ширина непрозрачного промежутка между соседними щелями.

Если свет падает на решётку нормально к её плоскости, то максимумы наблюдаются при условии:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda, \quad (4.3)$$

где  $m$  – целое число, указывающее порядок максимума дифракционной картины ( $m = 1, 2, 3 \dots$ ).

Минимумы на решётке наблюдаются при условии, что разность хода двух параллельных лучей, отстоящих друг от друга на расстоянии одного периода, составляет нечётное число полуволин:

$$d \cdot \sin \varphi = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (4.4)$$

Положение максимумов на экране связано с длиной волны света  $\lambda$ , постоянной решётки  $d$  и расстоянием от решётки до экрана  $L$ .

Пусть свет от решётки попадает в точку  $B$  экрана, а экран расположен на расстоянии  $L$  от решётки (рисунок 4.1). Свет, падая на решётку перпендикулярно, огибает её под углом дифракции  $\varphi$ . Точка  $B$ , в которой будет наблюдаться максимум света, отстоит от центрального максимума на расстоянии  $X_{max}$ . Тогда из треугольника  $SOA$  видно, что  $\sin \varphi = \frac{X_{max}}{L}$ .

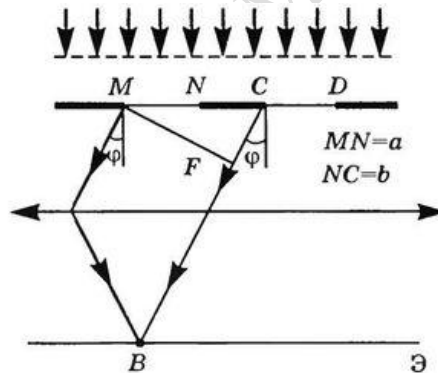


Рисунок 4.1 – Прохождение лазерного излучения через дифракционную решетку

Если расстояние  $L$  значительно больше размеров решётки, то угол  $\varphi$  мал, а при малых углах синус приблизительно равен тангенсу того же угла, т. е.  $\sin \varphi \approx \text{tg} \varphi$  и, следовательно,

$$X_{max} = L \cdot \text{tg} \varphi.$$

Из рисунка (4.1) следует, что

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_{max}}{L}. \quad (4.5)$$

Подставив выражение тангенса угла в условие максимума (4.3), получим из него выражение для  $X_{max}$ , определяющего координату  $m$  – максимума:

$$X_{max} = \frac{m\lambda L}{d} \quad (4.6)$$

Соотношение (4.6) характеризует положение максимумов на экране, которое связано с длиной волны света  $\lambda$ , постоянной решётки  $d$  и расстоянием до экрана  $L$ .

Из данного соотношения можно определить период дифракционной решётки, если известна длина волны света, которым освещают дифракционную решётку, или по известному периоду определить неизвестную длину волны света, падающего на дифракционную решётку.

$$d = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{x_{max}}, \quad (4.7)$$

$$\lambda = \frac{x_{max} \cdot d}{m \cdot L}. \quad (4.8)$$

## Лабораторная работа 4. Изучение дифракции света

**Цель работы:** получение и наблюдение дифракционной картины на различных препятствиях; определение периода одномерной дифракционной решётки.

**Приборы и принадлежности:** оптический квантовый генератор (лазер); дифракционная решётка; набор препятствий для наблюдения дифракции; экран с измерительной шкалой; измерительная линейка.

### Описание установки

Лабораторная установка состоит из источника монохроматического света – лазера (оптического квантового генератора); набора препятствий и экрана, установленных на оптической скамье (рисунок 4.2). При помощи лазера удаётся получить узкий направленный пучок строго монохроматического света большой интенсивности. Узконаправленный пучок света лазера попадает на какое-либо препятствие,

за которым расположен экран. Заменяя препятствия (щель, бесконечная плоскость, круглое отверстие), можно наблюдать получаемые дифракционные картины.

Если на пути лазерного луча поместить дифракционную решётку, то можно не только наблюдать полученную дифракционную картину, состоящую из чередующихся тёмных и светлых полос, но и определить период дифракционной решётки на основании соотношения (4.6), измерив расстояние дифракционной решётки от экрана, координаты дифракционных максимумов и зная длину волны излучаемого лазером света.

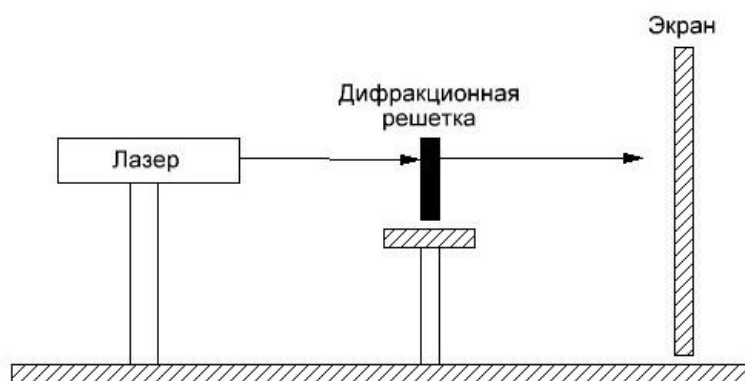


Рисунок 4.2 – Схематичное представление лабораторной установки

### **Упражнение 1. Наблюдение дифракционной картины на различных препятствиях**

1. Включите лазер.
2. Установите на оптической скамье между лазером и экраном поочерёдно исследуемые препятствия. Проанализируйте и опишите полученные на экране дифракционные картины.

3. Проведите наблюдение, как они изменяются в зависимости от перемещения препятствия (изменения расстояния между препятствием и экраном; между лазером и препятствием). Сделайте вывод и запишите в отчёт.

### **Упражнение 2. Определение периода одномерной дифракционной решётки**

1. Поместите на оптической скамье исследуемую одномерную дифракционную решётку, закреплённую в штативе на расстоянии  $L_1 = 30$  см от экрана.

2. Установите лазер и решётку так, чтобы центральный максимум располагался на нулевой отметке шкалы экрана, а остальные



максимумы были расположены симметрично относительно центрального максимума.

4. Определите положения первых трёх максимумов, отсчитав их координаты в обе стороны от нулевого (центрального) максимума  $x_{max}$ .

5. По формуле (5.5) вычислите  $\text{tg}\varphi$ .

6. Определите период дифракционной решётки по формуле:

$$d = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{x_{max}}, \quad (4.7)$$

где  $d$  – период решётки;

$x_{max}$  – координата,

$m$  – порядок максимума;

$L$  – расстояние от решётки до экрана.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты наблюдения дифракции на одномерной решётке

Порядок максимума $m$	Координата максимума $x_{max}$ , мм		$X_{max} = \frac{X_1 + X_2}{2}$ мм	$L$ , мм	$\text{tg } \varphi$	$d$ , мм
	слева $x_1$	справа $x_2$				

Повторите пункты 4–7 для другого расстояния  $L_2$ , указанного преподавателем. Данные измерений и вычислений занесите в таблицу. Сравните полученные результаты между собой и с паспортным значением периода одномерной дифракционной решётки. На основании результатов сравнения сделайте вывод о справедливости применяемых формул и теории явления дифракции.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение явлению дифракции, дифракционной картины, дифракционной решётки.
2. Перечислите условия возникновения дифракционной картины.
3. От чего и как зависит вид дифракционной картины?
4. Что представляет собой дифракционная решётка?
5. Что называется периодом дифракционной решётки?

6. Запишите условие максимума и минимума для щели и для дифракционной решётки.

7. Запишите соотношение, определяющее положение максимумов дифракционной картины, полученной с помощью дифракционной решётки.

## Тема 5. Поляризация света

### Основные понятия по теме

Свет представляет собой электромагнитные волны в интервале частот, воспринимаемых человеческим глазом, что соответствует длинам волн в вакууме от  $\sim 400$  до  $\sim 760$  нанометров (нм). Совокупное спонтанное излучение множества атомов представляет собой *естественный свет*.

Если амплитуды колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  неодинаковы по всем направлениям, то свет называется частично поляризованным. В случае колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в одной плоскости, волна называется плоско поляризованной. Плоскость поляризации имеет преимущественную ориентацию. Поляризация света происходит при отражении и преломлении света на границе раздела двух изотропных прозрачных диэлектриков, либо в анизотропных средах. Среди разнообразных явлений, возникающих при взаимодействии света и вещества, важное место занимает вращение плоскости поляризации.

Некоторые вещества обладают свойством вращения плоскости поляризации. Такие вещества получили название естественно оптически активных веществ. Известно, что если параллельный пучок монохроматического света, поляризованный при помощи поляризатора  $P_1$ , пропустить через второй поляризатор  $P_2$ , скрещенный с  $P_1$ , то  $P_2$  не должен пропускать свет. Если между поляризаторами поместить кювету с оптически активным веществом, то свет при скрещенных поляризаторах все же проходит, хотя его интенсивность при этом уменьшается. При этом интенсивность света прошедшего через систему поляризаторов, зависит от угла между направлением распространения света и плоскостью поляризатора. Поворачивая поляризатор  $P_2$ , можно добиться полного затемнения. Это свидетельствует о том, что свет, проходящий через раствор остался линейно поляризованным, но плоскость поляризации повернулась на некоторый угол, измеряемый углом поворота поляризатора  $P_2$ . Угол поворота плоскости поляризации различен для разных длин волн.

Французский физик Био Жан Батист в 1815 г. экспериментально установил, что для растворов угол поворота плоскости поляризации  $\varphi$  прямо пропорционален толщине  $d$  раствора и концентрации  $c$  активного вещества.

$$\varphi = b \cdot d \cdot c. \quad (5.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $b$  характеризует природу вещества и носит название постоянной вращения. Она сильно зависит от длины волны  $\left(b \propto \frac{1}{\lambda^2}\right)$  и слабо от температуры. Постоянная вращения  $b$  практически не зависит от агрегатного состояния исследуемого вещества. Определив значение  $b$  для данного растворителя, длины волны и температуры, можно использовать соотношение (5.1) для определения концентрации растворимого активного вещества. Согласно выражению (5.1) угол поворота плоскости поляризации света  $\varphi$  для конкретного раствора при неизменных условиях его измерения зависит от концентрации раствора. График данной зависимости называется градуировочным графиком и используется при работе с поляриметрами и сахариметрами. Построив градуировочный график для серии растворов различной концентрации, по нему можно впоследствии определять концентрацию неизвестного раствора.

## **Лабораторная работа 5. Определение угла поворота плоскости поляризации света**

**Цель работы:** ознакомиться с принципом работы сахариметра; провести измерение углов поворота плоскости поляризации света; определить концентрацию неизвестного раствора сахара сахариметром.

**Приборы и принадлежности:** сахариметр; набор растворов сахара различной концентрации.

### **Описание установки**

Для наблюдения вращения плоскости поляризации света и измерения концентрации сахарного раствора используется круговой поляриметр СУ-3, называемый сахариметром, изображённый на рисунке 5.1.

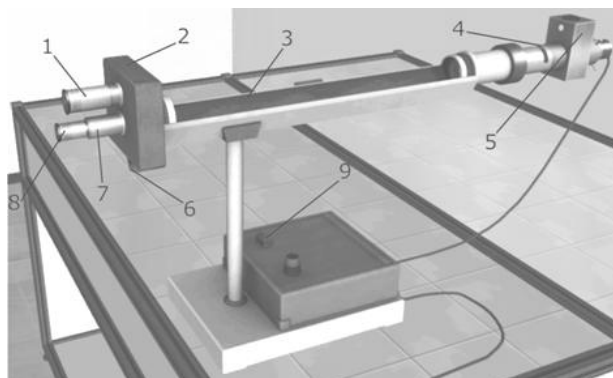


Рисунок 5.1 – Внешний вид поляриметра СУ-3

Основными частями прибора являются измерительная головка (2), осветительный узел (5), камера (3) для поляриметрических кювет, поляризатор (4) (с оправой), который преобразует световой поток в поляризованный поток света и разделяет его на две половины линией раздела.

Для работы поляризатор устанавливают таким образом, чтобы плоскости поляризации обеих половин светового потока составляли одинаковые углы с плоскостью поляризации анализатора, в этом случае анализатор пропускает равные по светосиле половины светового потока, поэтому в установленной за анализатором зрительной трубе наблюдаются две равноосвещенные половины поля, разделенные тонкой линией (нуль прибора). При помещении в камеру (3) кюветы с исследуемым раствором в результате оптической активности раствора, происходит поворот плоскости поляризации, нарушается равенство освещенности половин поля зрения. Уравнение освещенности половин поля зрения сахариметра осуществляется с помощью клинового компенсатора.

На лицевой стороне измерительной головки прибора имеется лупа (1) в оправе для отсчета показаний по шкале и зрительная труба (8), в которой находится гильза (7) с анализатором. В нижней части измерительной головки расположена рукоятка кремальерной передачи (6) для перемещения подвижного кварцевого клина и связанной с ним шкалы. Прибор включается в сеть кнопкой (9).

Световой поток от лампочки накаливания (1) проходит через светофильтр (2) или матовое стекло (3), конденсор (4) и полутеневую призму-поляризатор (5), которая преобразует его в поляризованный поток света и разделяет на две половины линией раздела. Поляризатор устанавливают таким образом, чтобы плоскости поляризации обеих половин светового потока составляли одинаковые углы с плоскостью поляризации анализатора (8). Если кювета с раствором

отсутствует, а толщина право- и левовращающих пластин кварцевого компенсатора (7) – одинакова, в окуляре (10) зрительной трубы наблюдаются две равноосвещенные половины поля, разделенные тонкой линией.

Оптически активный раствор (6) нарушает равенство освещенностей. Равенство освещенностей восстанавливается компенсатором, при изменении толщины  $\Pi_1$ – $\Pi_2$  с помощью рукоятки Р, которая перемещает подвижный кварцевый клин и связанную с ним шкалу (13).

Шкала сахариметра градуирована в градусах  $^{\circ}S$  международной сахарной шкалы.  $100^{\circ}S$  соответствует  $34,62^{\circ}$  угловым. Сахариметр показывает  $100^{\circ}S$ , когда при  $20^{\circ}C$  в 200 – миллиметровой кювете находится водный раствор, содержащий в  $100\text{ см}^3$  26 грамм химически чистой сухой сахарозы (взвешенный в воздухе латунными гирями).

Перед началом измерений (при отсутствии в камере кюветы), вращая рукоятку кремальерной передачи (6) необходимо установить однородность поля зрения. При этом нулевые деления шкалы и нониуса должны совпадать (рисунок 5.3) (если не совпадают, то вводят поправку на нуль прибора.) Затем в камеру помещают поляризметрическую кювету с испытуемым раствором, который нарушает однородность половинок поля зрения. Вращая рукоятку кремальерной передачи (6), снова уравнивают однородность поля зрения и при помощи нониуса производят отсчет показаний шкалы (значение угла  $\alpha$ ) с точностью до  $0,1^{\circ}S$ .



Рисунок 5.3 – Деления шкалы сахариметра и нониуса

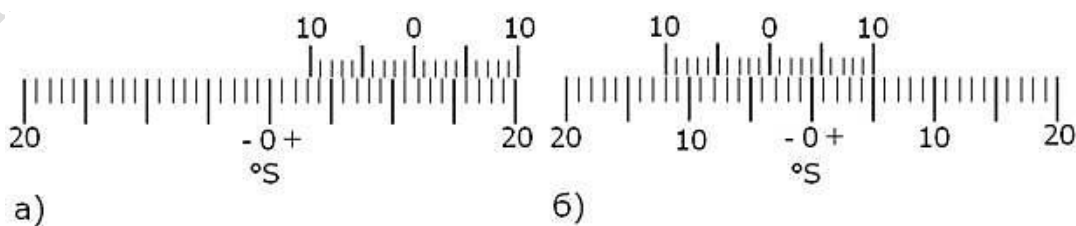


Рисунок 5.4 – Примеры показания шкалы и нониуса

Примеры показаний шкалы и нониуса приведены на рисунке 5.4. На рисунке 5.4(а) оно равно  $+11,5^{\circ}S$  (нуль нониуса расположен правее нуля шкалы на 11 полных делений, и в правой части нониуса с одним из делений шкалы совмещается пятое деление нониуса). На рисунке 5.4 (б) оно равно  $-3,2^{\circ}S$  (нуль нониуса расположен левее нуля шкалы на три полных деления, и в левой части нониуса с одним из делений шкалы совмещается второе деление нониуса). Следует иметь в виду, что  $100^{\circ}$  международной сахарной шкалы соответствуют  $34,62^{\circ}$  – угловых. Чтобы перевести градусы сахарной  $^{\circ}S$  шкалы в угловые градусы необходимо  $^{\circ}S$  умножить на 0,35.

### **Упражнение 1. Определение угла поворота плоскости поляризации света**

1. Поместите кювету с раствором в кюветное отделение. При этом равновесие яркости полей сравнения нарушится. Вращением рукоятки клинового компенсатора снова уравняйте яркость полей сравнения. Произведите отсчёт угла поворота плоскости поляризации по нижней шкале и нониусу.

Измеренное значение  $\varphi$  будет равно углу вращения плоскости поляризации света при его прохождении через раствор. Отняв от полученного значения  $\varphi$  значение первоначального угла  $\varphi_0$  получится значение угла поворота плоскости.

2. Повторите измерения 3 раза для остальных заданных концентраций растворов и определите для них углы поворота плоскости поляризации света. Данные измерений занесите в таблицу 5.1. Вычислите среднее арифметическое значение полученных отсчётов углов поворота плоскости поляризации света для растворов каждой концентрации.

3. Постройте график зависимости угла поворота плоскости поляризации света от концентрации сахара  $c$  % в растворе:  $\varphi = f(c \%)$  (так называемый градуировочный график).

4. По построенному градуировочному графику определите концентрацию неизвестного раствора сахара  $C_x$  % .

5. Сравните найденное значение неизвестной концентрации раствора сахара с его значением, заданным лаборантом. Сделайте вывод о достоверности полученного результата и справедливости предложенного метода.

Таблица 5.1 – Зависимость угла вращения плоскости поляризации от концентрации раствора сахара с %

№	Концентрация сахара с %	Угол поворота плоскости поляризации $\alpha$
1	$C_1 = 5 \%$	
2	$C_2 = 10 \%$	
3	$C_3 = 20 \%$	
4	$C_4 = x \%$	

### Контрольные вопросы

1. Поясните сущность явления поляризации света.
2. Какой свет называется естественным (неполяризованным), поляризованным, частично поляризованным?
3. В чём состоит физический смысл явления вращения плоскости поляризации света?
4. От чего и как зависит угол вращения плоскости поляризации?
5. Объясните принцип работы сахариметра.
6. Приведите примеры практического применения явления вращения плоскости поляризации света.

## Тема 6. Изучение внешнего фотоэффекта

### Основные понятия по теме

Энергия электромагнитного излучения состоит из отдельных порций (по латыни – квантов). Квант электромагнитного излучения оптического диапазона называется **фотоном**. Таким образом, свет – это поток фотонов. Энергия каждого фотона равна  $\varepsilon = h \cdot \nu$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота света. При взаимодействии света с веществом излучение поглощается электронами проводимости (в металлах) или валентными электронами (в полупроводниках и диэлектриках). При падении потока фотонов на поверхность металла происходит соударение фотонов с электронами, в результате чего каждый фотон при взаимодействии с электроном отдаёт ему свою энергию равную  $h\nu$ . Если энергия достаточна для того, чтобы освободить электрон от удерживающих его связей, то он выйдет за пределы металла. Это явление называется **внешним фотоэффектом** или **фотоэлектронной эмиссией**. Число освобождённых электронов должно быть равно числу поглощённых фотонов, то есть пропорционально

интенсивности света. Энергия фотоэлектрона определяется энергией поглощённого фотона  $h\nu$ , следовательно, энергия фотоэлектрона линейно зависит от частоты и не зависит от интенсивности света, то есть числа фотонов.

Для вырывания электрона из металла ему необходимо совершить **работу выхода  $A$** , затратив **энергию** на отрыв электрона от атома, **называемую энергией ионизации**. Оставшаяся часть, полученной от фотона энергии, пойдёт на кинетическую энергию освобождённого электрона. Согласно закону сохранения энергии для фотоэлектрона:

$$h\nu = A + \frac{m\nu^2}{2} \quad (6.1)$$

Данное уравнение называется **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**.

Если энергия фотона меньше работы выхода электрона  $h\nu < A$ , то электрон не сможет выйти за пределы поверхности металла. Это означает, что существует некоторая минимальная частота  $\nu_{\text{кр.}} = \frac{A}{h}$ , которая ещё способна вызвать фотоэффект. Впервые это явление было обнаружено именно для частоты красного света  $\nu_{\text{кр.}}$ , поэтому она исторически носит название **«красная» граница фотоэффекта**. Работа выхода  $A$  зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота  $\nu_{\text{кр.}}$  фотоэффекта для разных веществ различна.

$$\nu_{\text{кр.}} = \frac{A}{h}. \quad (6.2)$$

**Вакуумный фотоэлемент** представляет собой стеклянный баллон, в котором создан вакуум. На часть внутренней поверхности наносится тонкий слой щелочного металла, служащего катодом. Анод может быть изготовлен в виде кольца, решётки или цилиндра. Свет через прозрачное кварцевое окошко попадает на фотокатод. При этом фотоны выбивают из катода электроны, которые образуют вблизи катода электронное облако, то есть происходит **внешний фотоэффект** (или иначе это явление носит название **фотоэлектронной эмиссии**). Если создать на аноде положительный потенциал, то электроны, испущенные вследствие фотоэффекта (так называемые фотоэлектроны) начнут перемещаться от катода к аноду. Возникает направленное движение электронов, то есть электрический ток (фототок). Силу фототока измеряют с помощью чувствительного микроамперметра. Напряжение между фотокатодом и анодом изменяется реостатом  $R$ , а измеряется вольтметром. Сила возникающего в цепи фототока  $i$



зависит при неизменном составе и мощности падающего светового потока  $\Phi$  от напряжения  $U$  между электродами. Эта зависимость носит название **вольтамперной характеристики**  $i = f(U)$ . Математически зависимость силы тока от напряжения выражается **законом Лэнгмюра – Богуславского**:

$$I = B \cdot U^{3/2}, \quad (6.3)$$

где  $B$  – постоянный коэффициент, зависящий от материала катода, размеров и формы анода, расстояния между катодом и анодом. Данный закон носит также название **закона трёх вторых**.

При некотором напряжении  $U > 0$  сила фототока достигает насыщения, то есть все электроны, испущенные фотокатодом, за какой-то промежуток времени попадают на анод. Следовательно, сила фототока насыщения  $I_{\text{насыщ.}}$  определяется количеством электронов, испускаемых фотокатодом в единицу времени под действием света, и является мерой фотоэлектрического действия данного светового потока. Столетов установил закон, носящий его имя: сила фототока насыщения прямо пропорциональна световому потоку:

$$I_n = \gamma \cdot \Phi.$$

При этом спектральный состав падающего светового потока должен оставаться неизменным. Закон Столетова является основным законом фотоэффекта. Для немонахроматического излучения коэффициент  $\gamma$  называется **интегральной чувствительностью фотоэлемента**. Для монохроматического света коэффициент  $\gamma$  называется **спектральной чувствительностью** фотоэлемента. Чувствительность современных фотоэлементов достигает 50–150 мкА/лм.

При отсутствии напряжения между электродами сила фототока не равна нулю, что свидетельствует о том, что электроны, вырванные светом из фотокатода, могут достигать анода без содействия внешнего поля, образуя начальный фототок.

**Световой характеристикой** называется зависимость силы фототока от светового потока, падающего на поверхность катода фотоэлемента  $i = f(\Phi)$ . Так как количество фотонов попавших на катод зависит, в свою очередь, от расстояния до фотоэлемента, то световая характеристика будет иметь такой же вид, как и зависимость силы фототока от расстояния между источником света и фотоэлементом.

**Под спектральной характеристикой** понимают зависимость силы фотона от длины падающего света:  $i = f(\lambda)$ .

## Лабораторная работа 6. Изучение основных характеристик вакуумного фотоэлемента

**Цель работы:** ознакомиться с принципом работы вакуумного фотоэлемента; определить основные характеристики и параметры фотоэлемента.

**Приборы и принадлежности:** оптическая скамья; осветитель; фотоэлемент, источник постоянного напряжения; реостат; вольтметр; микроамперметр; соединительные провода.

### Описание установки

Схема установки приведена на рисунке 6.1.

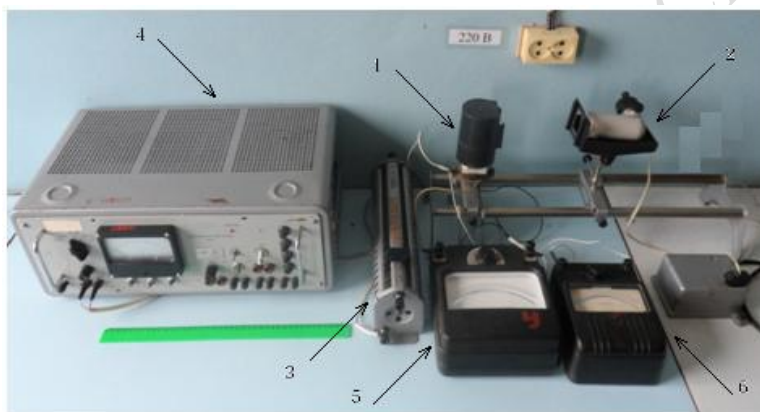


Рисунок 6.1 – Внешний вид установки для изучения законов внешнего фотоэффекта

Установка для изучения законов внешнего фотоэффекта состоит из вакуумного фотоэлемента 1, источника света 2, установленных на оптическом рельсе; реостата 3; источника напряжения 4; вольтметра 5; микроамперметра 6. Для определения спектральной характеристики фотоэлемента служит набор светофильтров, которые крепятся в специальном держателе.

### Упражнение 1. Получение вольт-амперной характеристики фотоэлемента $i = f(U)$

1. Установите осветитель на расстоянии 15 см от фотоэлемента.
2. Включите источник питания в сеть, тумблером «сеть».
3. Установите с помощью реостата на вольтметре напряжение  $U = 30$  В учитывая цену деления вольтметра.

4. Включите осветитель, откройте окно фотоэлемента и по микроамперметру измерьте значение силы фототока. Занесите полученный результат в таблицу 6.1.

5. Изменяя напряжение с помощью реостата через каждые 10 вольт, снимите 7–10 значений фототока. Результаты измерений занесите в таблицу 6.1.

6. По полученным данным постройте вольт-амперную характеристику (зависимость силы фототока  $i$  от напряжения  $U$ ). Сделайте вывод о соответствии характера полученной вольт-амперной характеристики теоретической зависимости.

Таблица 6.1 – Зависимость силы фототока от напряжения

№ п/п	$l_1 = 15$ см				$l_2 = 20$ см			
	$U$		$i$		$U$		$i$	
	дел.	В	дел.	$\mu$ А	дел.	В	дел.	$\mu$ А
1								
2								
3								
4								
...								

## Упражнение 2. Получение световой характеристики

1. Установите осветитель на расстоянии 15 см от фотоэлемента.

2. Включите осветитель и подайте напряжение на фотоэлемент с помощью реостата  $U = 70$  В.

3. Откройте окно фотоэлемента и измерьте силу фототока. Результаты измерения занесите в таблицу 6.2.

4. При постоянном напряжении на фотоэлементе  $U = 70$  В, передвигая осветитель вдоль рельса через каждые 2 см до расстояния от фотоэлемента, равного 35 см, запишите по микроамперметру значение фототока и занесите результаты измерений в таблицу 6.2.

5. По данным измерений постройте график зависимости силы фототока от расстояния между источником света и фотоэлементом  $i = f(r)$ .

6. Сделайте вывод о характере зависимости силы фототока  $i$  от светового потока  $\Phi$ .

Таблица 6.2 – Зависимость силы фототока от расстояния между источником света и фотоэлементом

$r$ , см	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$i$ , $\mu$ А											

### Упражнение 3. Получение спектральной характеристики фотоэлемента

1. Поместите осветитель на расстояние 15 см от фотоэлемента.
2. Перед фотоэлементом в специальный держатель установите светофильтр.
3. Включите осветитель и подайте с помощью реостата напряжение на фотоэлемент  $U = 70$  В.
4. Откройте фотоэлемент и измерьте по микроамперметру силу фототока  $i, \mu\text{A}$ .
5. Заменяя светофильтры, для тех же значений напряжения и расстояния измерить силу фототока. Результаты измерений занести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Зависимость силы фототока от длины волны падающего света

$\lambda$ , нм	красный	оранжевый	жёлтый	зелёный	синий	фиолетовый
$i$ , $\mu\text{A}$						

### Контрольные вопросы

1. Объясните суть явления фотоэффекта.
2. Какие виды фотоэффекта вы знаете.
3. Сформулируйте основные законы фотоэффекта.
4. Поясните уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
5. Что такое «красная» граница фотоэффекта? От чего она зависит.
6. Объясните принцип работы вакуумного фотоэлемента.
7. Что представляет собой вольт-амперная характеристика; спектральная характеристика, световая характеристика.
8. Как зависит сила фототока от величины приложенного к аноду напряжения.

## Тема 7. Спектры атомов

### Основные понятия

Атомом называется наименьшая частица химического элемента, обладающая его химическими свойствами. Однако известно, что атомы устойчивы и излучают линейчатые спектры. Нильс Бор сформулировал следующие постулаты:

**Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний):** существуют некоторые стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии. В этих состояниях энергия электрона не изменяется со временем. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. При движении по стационарным орбитам электроны, не излучают электромагнитных волн. Стационарное состояние с наименьшей энергией ( $n = 1$ ) называется нормальным или невозбуждённым.

**Второй постулат Бора (правило квантования орбит):** в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения момента импульса, удовлетворяющие условию:

$$mV_k r_k = n \left( \frac{h}{2\pi} \right),$$

где  $m$  – масса электрона;

$V_k$  – его скорость на  $k$ -й орбите;

$r_k$  – радиус этой орбиты;

$h$  – постоянная Планка;

$n$  – целое число не равное нулю ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ), называемое квантовым числом.

**Третий постулат Бора (условие частот Бора):** Под действием внешних причин, электрон, поглотив квант энергии, может перейти на другой уровень, более удалённый от ядра ( $n > 1$ ). При этом атом переходит в состояние с большей энергией. Такое состояние называется возбуждённым.

В возбуждённом состоянии атом может оставаться очень короткое время, называемое «временем жизни», равное  $10^{-8}$ – $10^7$  секунд. Затем атом самопроизвольно переходит в состояние с меньшей энергией или в невозбуждённое (основное) состояние. При этом электрон возвращается на более близкий к ядру уровень постепенно или сразу на основной. Электрон возвращается на нижний уровень, создавая излучение. Переход атома из одного стационарного состояния в другое происходит скачкообразно. Таким образом, энергия атома оказывается дискретной (квантованной). Энергия одного кванта пропорциональна частоте света:

$$\varepsilon = h \cdot \nu \tag{7.1}$$

Энергия испускаемого (поглощаемого) кванта (фотона) равна разности энергий электрона на орбитах до и после перехода:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1, \tag{7.2}$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$\nu$  – частота испускаемого (поглощаемого) фотона;

$E_2$  и  $E_1$  – соответственно энергия электрона на  $n$ -й или  $k$ -й орбите.

Для того, чтобы электрон перешёл на энергетический уровень, удалённый от ядра, электрону требуется дополнительная энергия, которую он может получить при облучении светом, при нагревании, наличии полей и т. д. Атом при этом переходит в возбуждённое состояние. Атом не может находиться долго в возбуждённом состоянии. «Время жизни» атома в возбуждённом состоянии незначительно. Если электрон переходит с более удалённой от ядра орбиты на более близкую орбиту, то при этом излучается фотон; обратный переход может произойти при поглощении фотона.

Пусть  $k$  – номер орбиты, на которую перешел электрон,  $m$  – номер орбиты, с которой он перешел. При переходе электрона с  $m$ -ой орбиты на  $k$ -ю орбиту, излучается фотон с энергией  $E_{k,n}$  и частотой  $\nu$ , где частоты или длины волн, соответствующие линиям водородного спектра могут быть определены по формуле

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = Rc \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7.3)$$

где  $k$  и  $m$  – номера орбит;

$c$  – скорость света в вакууме;

$R$  – постоянная Ридберга ( $R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ ).

Из формулы (7.3) получим:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right) \lambda. \quad (7.4)$$

Из выражения (7.3) следует, что частоты всех линий в спектре атома водорода могут быть представлены в виде разности двух функций от целых чисел  $T(k)$  и  $T(m)$ . Эти функции носят название спектральных термов:

$$\nu = T(k) - T(m).$$

Для водородоподобных атомов:

$$\nu = Rc z^2 \cdot \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7.5)$$

где  $z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

В спектроскопии обычно вместо частоты  $\nu$  рассматривают величину  $N = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$  называемую волновым числом. Это число показывает, сколько длин волн укладывается в одном сантиметре.

На каждую орбиту может перейти электрон с верхних уровней. Для конкретного фиксированного значения  $k$  и переменного значения  $m$  получают набор частот, носящий название «спектральной серии» или спектральных термов.

При переходе электрона с вышестоящей орбиты на первую  $k = 1$ , атом водорода испускает спектральную серию, которая называется *серией Лаймана*. Эта серия лежит в ультрафиолетовой области спектра.

Для  $k = 2$ , то есть при переходе электрона с верхних уровней на второй, наблюдается *серия Бальмера*. Она находится в видимой области спектра и близкой ультрафиолетовой части спектра. Переходы на третий, четвертый и пятый уровни соответствуют испусканию спектральных *серий Пашена, Бреккета и Пфунда*.

Они находятся в инфракрасной и далекой красной областях спектра. Из формулы (7.3), измерив длину волны видимой части спектра водорода, можно вычислить «*постоянную*» *Ридберга R*.

Спектры паров и молекул представляют собой набор окрашенных полос, отделённых друг от друга темными промежутками (полосатый спектр). В спектрах твердых тел и жидкостей присутствуют электромагнитные волны практически всех длин (*сплошной спектр*). Спектры газов состоят из отдельных линий (*линейчатый спектр*).

## Лабораторная работа 7. Определение «постоянной» Ридберга

**Цель работы:** ознакомиться со структурой спектра водорода; определить «постоянную» Ридберга.

**Приборы и принадлежности:** выпрямитель напряжения ИПД-1 на 12 вольт; ртутная лампа типа ДРК-12 с источником питания; высоковольтный индуктор; водородная трубка; спектроскоп.

### Упражнение 1. Градуировка спектроскопа

1. Зажгите ртутную лампу под наблюдением преподавателя или лаборанта.

2. Установите коллиматорную трубку спектроскопа напротив ртутной лампы так, чтобы в поле зрения окуляра спектроскопа наблюдались яркие цветные линии.



3. Вращая микрометрический винт, совместите перекрестие с одной из наблюдаемых в окуляре линий. Запишите отсчёт по шкале микрометра (количество целых делений отсчитываются по краю барабана; число десятых и сотых – по шкале самого барабана).

4. Повторите измерения для всех линий спектра ртути. Результаты измерений занесите в таблицу 7.2.

5. Постройте градуировочный график для микрометрического винта (график зависимости числа делений микрометрического винта  $n$  от длины волны  $\lambda$ ). Длины волн для соответствующих линий ртути приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Зависимость порядкового номера делений микрометрического винта от длины волны спектра ртути (градуировочная кривая)

$\lambda$ , нм											
$n$ , дел											

## Упражнение 2. Определение «постоянной» Ридберга

1. Включите в сеть выпрямитель и с помощью высоковольтного индуктора зажгите водородную лампу под руководством преподавателя или лаборанта.

2. Установите спектроскоп напротив водородной трубки так, чтобы в поле зрения окуляра наблюдался спектр водорода. Он представляет собой набор разноцветных полос.

3. Установите перекрестие спектроскопа на красной линии. Запишите показания микрометра в таблицу 7.2.

4. Аналогичные измерения выполните для зелено-голубой, синей и фиолетовой линий спектра водорода.

5. Используя построенный ранее градуировочный график, определите длины волн линий спектра водорода. Данные запишите в таблицу 7.2.

6. Из формулы (7.4) выразите постоянную Ридберга и определите её значение. Квантовые числа для основных линий спектра водорода приведены в таблице 7.3.

7. Вычислите среднее значение для «постоянной» Ридберга  $R$  и сравните его со справочным значением. Сделайте вывод о справедливости изучаемой теории строения атомов и молекул.



Таблица 7.2 – Измерение спектра водородной лампы

Цвет полосы	Красный	Зелёно-синий	Синий	Фиолетовый
Отсчёт по микрометрическому винту $n$				

Таблица 7.3 – Квантовые числа для линий водорода

Цвет спектральных линий водорода	Квантовые числа	
	$k$	$m$
Ярко-красный	2	3
Зелено-голубой	2	4
Синий	2	5
Слабо-фиолетовый	2	6

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте постулаты Бора теории спектра водорода.
2. Приведите формулы спектральных серий атома водорода.
3. Каким образом возникают спектральные серии Лаймана, Бальмера, Бреккета, Пашена, Пфунда в спектре водорода?
4. Охарактеризуйте виды спектров (линейчатые, полосатые, сплошные).
5. Какой вид спектра имеет газы; спектры паров и молекул; жидкости и твёрдые вещества?
6. Как определяется «постоянная» Ридберга в данной работе?

## Литература

1. Яворский, Б. М. Курс общей физики / Б. М. Яворский. – М. : Высшая школа, 2009. – 330 с.
2. Матвеев А. Н. Курс физики / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1976. – 360 с.
3. Рейф Ф. Берклеевский курс физики / Ф. Рейф. – М. : Наука, 2007. – 530 с.
4. Савельев И. В. Курс физики / И. В. Савельев. – М. : Наука, 2007. – 410 с.
5. Яворский Б. М. Основы физики / Б. М. Яворский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 360 с.

Производственно-практическое издание

**Пинчук Вячеслав Григорьевич,  
Ковалев Андрей Александрович,  
Шершнев Алексей Евгеньевич**

## **ОБЩАЯ ФИЗИКА ОПТИКА**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*  
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 21.04.2017. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ.л. 2,6.  
Уч.-изд. л. 2,8. Тираж 25 экз. Заказ 416.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.  
Специальное разрешение (лицензия) №02330 / 450 от 18.12.2013  
Ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель.

