

**Государственный университет по землеустройству**

---

---

**Физика**

**ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ  
ОПТИКА**

*Практикум  
для выполнения лабораторных работ*

Специальности и направления подготовки:  
21.03.02 – Землеустройство и кадастры  
21.03.03 – Геодезия и дистанционное зондирование  
21.05.01 – Прикладная геодезия

Москва 2019



**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПО ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВУ»**

Кафедра высшей математики и физики

**Физика**

# **ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА**

*Практикум*

*для выполнения лабораторных работ*

Специальности и направления подготовки:

21.03.02 – Землеустройство и кадастры

21.03.03 – Геодезия и дистанционное зондирование

21.05.01 – Прикладная геодезия

Москва 2019

**УДК 535**  
**ББК 22.343**

Подготовлено и рекомендовано к печати  
кафедрой высшей математики и физики  
Государственного университета по землеустройству  
(протокол № 5 от 13 марта 2019 г.)

Утверждено к изданию ученым советом  
факультета землеустройства  
Государственного университета по землеустройству  
(протокол № 7 от 20 марта 2019 г.)

Рецензенты:

д.э.н., кандидат сельскохозяйственных наук,  
доцент, декан ГУЗ, **Папаскири Т.В.**,  
д.т.н., профессор ГУЗ, **Лыков А.М.**,  
к.т.н., профессор ГУЗ, **Раклов В.П.**

**Волновая и квантовая оптика. Методические указания для выполнения лабораторных работ:** Антошкин А.А., Иванов В.П., Хафизов Р.С., Окунев А.Ю. / Практикум для выполнения лабораторных работ. – М.: ГУЗ, 2019. – 64 с.

Учебное пособие содержит описания лабораторных работ по геометрической, волновой и квантовой оптике. В каждой работе имеется теоретическая часть, описание экспериментальной установки и методики проведения измерений.

УДК 535,  
ББК 22.343

© Государственный университет по землеустройству, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Лабораторная работа № 1.</b> Определение фокусных расстояний собирающей, рассеивающей линз.....	6
<b>Лабораторная работа №2.</b> Сферическая аберрация.....	18
<b>Лабораторная работа №3.</b> Определение радиуса кривизны линзы при помощи колец Ньютона.....	24
<b>Лабораторная работа №4.</b> Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки.....	31
<b>Лабораторная работа №5.</b> Проверка закона Малюса.....	39
<b>Лабораторная работа №6.</b> Изучение явления естественного вращения плоскости поляризации света.....	45
<b>Лабораторная работа №7.</b> Фотоэлектрический эффект.....	53

## Лабораторная работа № 1

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ СОБИРАЮЩЕЙ И РАССЕЙВАЮЩЕЙ ЛИНЗ

### *Теоретическое введение*

Для описания распространения и взаимодействия электромагнитного излучения с веществом используют различные приближения: геометрической оптики, физической (волновой) оптики и квантовой оптики.

Приближение геометрической оптики используется в тех случаях, когда длиной волны электромагнитного излучения можно пренебречь по сравнению с размерами приборов, с помощью которых изучается это излучение. В рамках этого приближения рассматриваются законы распространения в прозрачных средах электромагнитного излучения видимой части спектра, т.е. света с длинами волн в диапазоне 0,4-0,76 мкм. Это рассмотрение проводится на основе представлений о свете как о совокупности световых лучей–линий, вдоль которых распространяется энергия световых электромагнитных волн. Пучки световых лучей, пересекаясь, не взаимодействуют и распространяются после пересечения независимо друг от друга.

Отношение скорости света в вакууме  $c$  к скорости света  $v$  в данной среде  $n = c/v = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$  называется (абсолютным) показателем преломления этой среды, здесь  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды,  $\mu \approx 1$  – для неферромагнитных сред. Среда называется оптически однородной, если показатель преломления ее везде одинаков. В оптически однородной среде лучи прямолинейны.

#### ***Закон отражения света (рис. 1):***

- 1) Падающий ( $AO$ ) луч, отраженный ( $OC$ ) луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча ( $BO$ ), лежат в одной плоскости;
- 2) угол отражения равен углу падения  $\beta = \alpha$ .

### Закон преломления света (рис. 1).

Лучи падающий ( $AO$ ), преломленный ( $OD$ ) и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча ( $BO$ ), лежат в одной плоскости. Отношение синусов углов падения и преломления есть величина постоянная, равная отношению показателю преломления данных двух сред

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Световые лучи обладают свойством обратимости хода. Если световой луч, испущенный из точки  $A$  (рис. 2), двигаясь в прозрачной среде, попадет в точку  $B$ , в которой его направление распространения изменят на противоположное, то он вновь попадет в исходную точку  $A$ , пройдя по той же самой траектории.

Каждая точка  $S$  источника света (монохроматического) в геометрической оптике считается центром расходящегося пучка лучей, который называется гомоцентрическим. Если после отражений и преломлений в различных средах пучок остается гомоцентрическим, то его центр  $S'$  называется изображением точки  $S$  в оптической системе. Изображение  $S'$  называется действительным, если в точке  $S'$  пересекаются сами лучи пучка, и мнимым, если в ней пересекаются продолжения этих лучей (в направлении, противоположном направлению распространения лучей).

Простейшая оптическая система – плоское зеркало. Для того чтобы найти изображение точки ( $S$ ) в плоском зеркале, достаточно на продолжении перпендикуляра ( $OS$ ), опущенного из точки на зеркало, отложить за зеркалом такой же отрезок прямой ( $OS'$ ) (рис. 3). Геометрические размеры протяженного источника света и его мнимого изображения в плоском зеркале одинаковы.

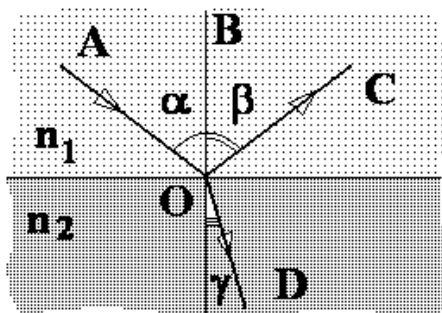


Рис. 1

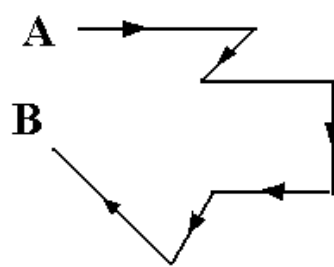


Рис. 2

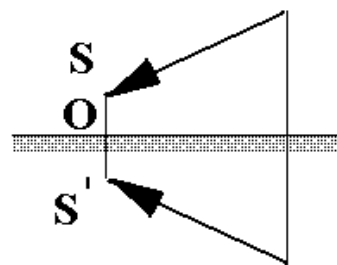


Рис. 3

*Линза* – прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Прямую, проходящую через центры сферических поверхностей, называют главной оптической осью.

Линза считается тонкой (тонкая линза), если ее толщина много меньше, чем радиус ее поверхностей. Можно считать, что главная оптическая ось пересекает тонкую линзу в одной точке, называемой оптическим центром линзы. Оси, проходящие через центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью, называются побочными осями. Во всех оптических инструментах используются тонкие пучки (т.е. пучки с малым углом раствора), идущие вблизи оптической оси системы. Такие пучки называются *параксиальными*.

Лучи параксиального светового пучка, распространяющегося параллельно главной оптической оси, пересекаются в точке, лежащей на этой оси и называемой главным фокусом линзы (слово «главный» часто опускают в тексте). У всякой тонкой линзы имеются два фокуса по обе стороны от нее на равных расстояниях от центра линзы.

Плоскость, проведенная через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называется *фокальной*.

Расстояние от оптического центра линзы до ее главного фокуса называется *фокусным расстоянием линзы*  $F$ .

Величина, обратная фокусному расстоянию  $D = 1/F$ , называется *оптической силой линзы*. Она измеряется в диоптриях [дптр] (дптр= $\text{м}^{-1}$ ). Лучи, падающие на линзу параллельно какой-либо побочной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в точке, лежащей на фокальной плоскости (побочный фокус).

Тонкие линзы по своим свойствам делятся на собирающие (рисунки 4а) и рассеивающие (рисунки 4б).

Особенности прохождения лучей в собирающих линзах показаны на рисунках 4а).

Луч  $1-1'$ , проходящий через оптический центр тонкой линзы, не преломляется. Луч  $2-2'$ , падающий параллельно главной оптической оси  $OO'$ , после преломления пересекает главную оптическую ось в фокусе  $F$ . Если падающий луч  $3-3'$  проходит через оптическую ось в фокусе, то после преломления

он распространяется параллельно главной оптической оси. Параллельные лучи  $1-1'$  и  $4-4'$  после преломления пересекаются в точке  $A$ , лежащей на фокальной плоскости  $MN$  за линзой.

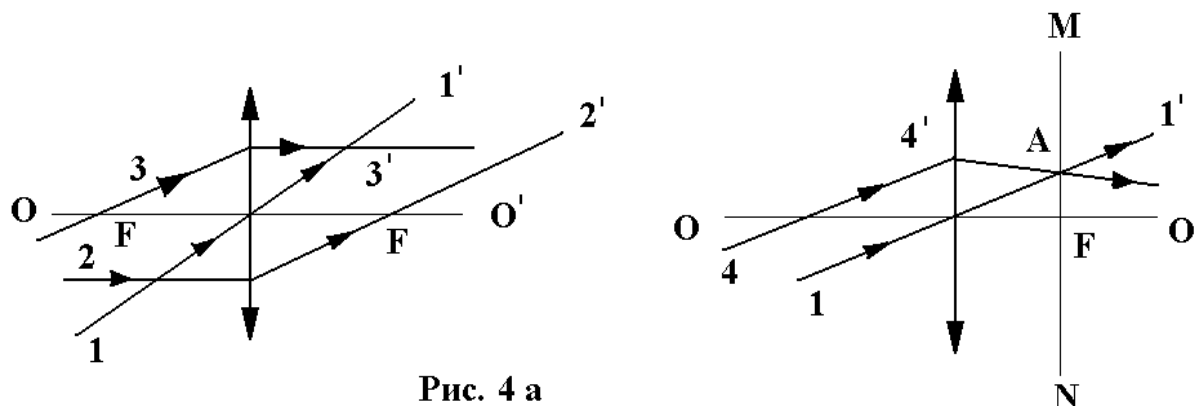


Рис. 4 а

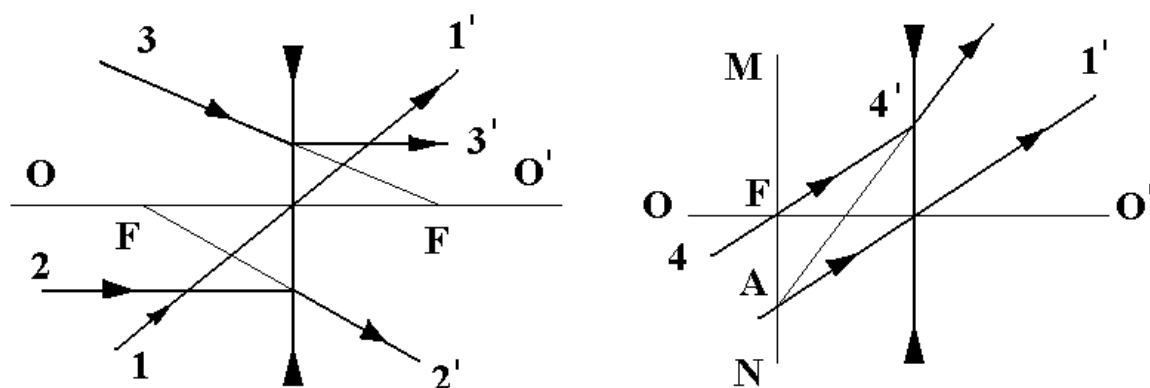


Рис. 4 б

Особенности прохождения лучей в рассеивающих линзах показаны на рисунках 4 б.

Луч  $1-1'$ , проходящий через оптический центр тонкой линзы, не преломляется.

Луч  $2-2'$ , падающий параллельно главной оптической оси  $OO'$ , после преломления распространяется таким образом, что его продолжение в противоположном направлении распространения пересекает фокус, лежащий перед линзой.

Если продолжение падающего луча  $3-3'$  в направлении распространения пересекает фокус, лежащий за линзой, то после преломления луч распространяется параллельно главной оптической оси. Параллельные лучи  $1-1'$  и  $4-4'$  после преломления распространяются таким образом, что их продолжение в противоположном направлении распространения пересекаются в точке  $A$  на фокальной плоскости  $MN$  перед линзой.

Изображение  $S'$  источника света  $S$ , получаемое с помощью тонкой рассеивающей линзы, – всегда мнимое (рис. 5 а). Изображение, получаемое с помощью тонкой собирающей линзы, может быть как мнимым (рис. 5 б), так и действительным (рис. 5 в).

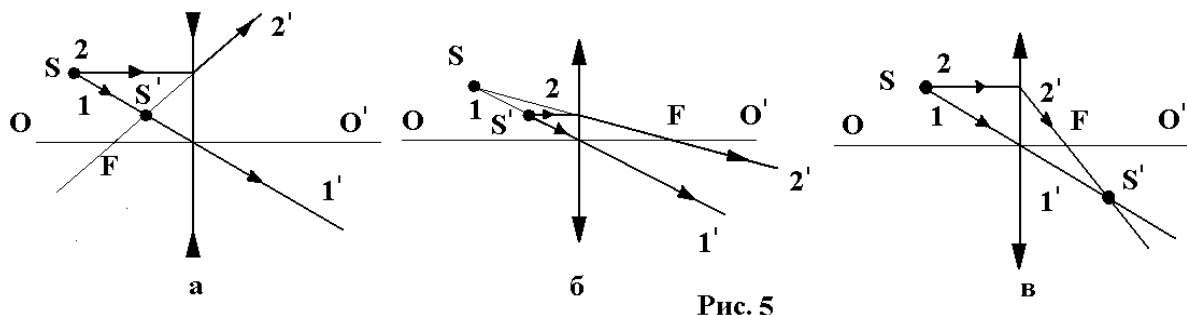


Рис. 5

Важное свойство тонкой линзы: изображением отрезка прямой линии является также отрезок прямой; отрезок прямой линии, ортогональный главной оптической оси, имеет в качестве изображения отрезок прямой, также ортогональный главной оптической оси (рис. 6).

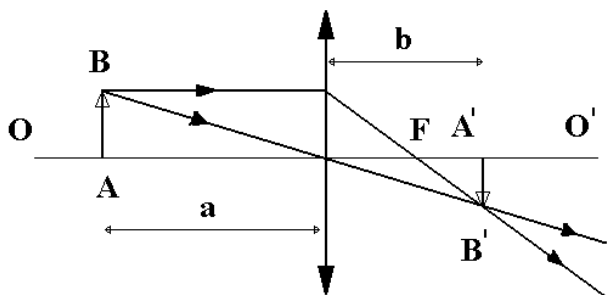


Рис. 6

*Линейным (поперечным) увеличением тонкой линзы  $\Gamma$*  называется отношение:

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB}$$

где  $A'B'$  – изображение отрезка  $AB$ .

По построению  $\Gamma = b/a$ , где  $a$  и  $b$  – расстояние от линзы до предмета ( $AB$ ) и до его изображения ( $A'B'$ ) соответственно (рис. 6).

*Формула тонкой линзы:*

$$\pm \frac{1}{F} = \pm \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b}, \quad (1)$$

где  $F$  – фокальное расстояние линзы.

В левой части знак «+» берется для собирающей линзы и знак «-» – для рассеивающей.

Первое слагаемое в правой части берется со знаком «+» для реального предмета (источника расходящегося пучка световых лучей) и знак «-» – для мнимого, т.е. сходящего пучка (сформированного в некоторой оптической системе), лучи которого (точнее их продолжения) пересекаются за линзой на расстоянии  $a$  от нее.

Второе слагаемое в правой части берется со знаком «+», если изображение, формируемое линзой, – действительное и знак «-», если изображение мнимое.

### **Способы определения фокусного расстояния собирающей линзы**

*Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы.*

Для вычисления фокусного расстояния собирающей линзы достаточно опытным путем измерить расстояние  $a$  от предмета до линзы и расстояние  $b$  от его изображения до линзы (рис. 6) и воспользоваться формулой (1), которую в рассматриваемом случае можно переписать в виде

$$F = \frac{ab}{a+b} \quad (2)$$

*Способ 2. Определение фокусного расстояния по величине перемещения линзы.*

Если расстояние  $L$  от предмета (рис. 7) до изображения больше четырех фокусных расстояний линзы, то, как следует из принципа оптической обратимости лучей, всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получится отчетливое изображение предмета, в одном случае уменьшенное, в другом – увеличенное.

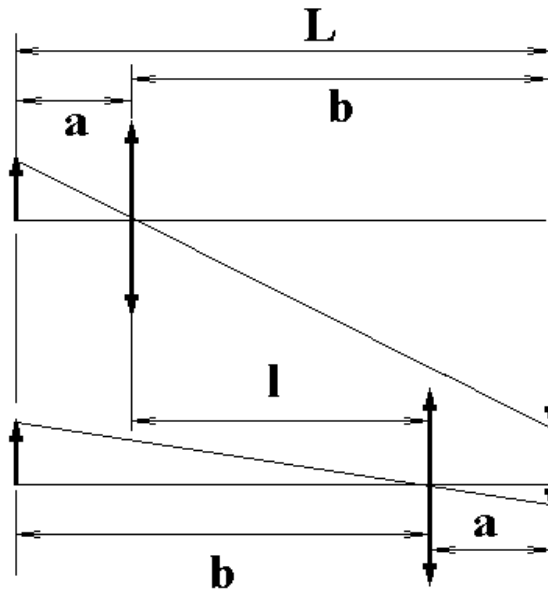


Рис. 7

Как видно из рисунка, достаточно передвинуть линзу на расстояние  $l$  так, чтобы  $a$  и  $b$  поменялись местами. Измерив, расстояние  $l$  и расстояние между предметом и экраном  $L$  и решив систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} + \frac{1}{b} &= \frac{1}{F}, \\ b &= a + l, \\ a + b &= L, \end{aligned}$$

нетрудно получить, что

$$F = \frac{L^2 - l^2}{4L}. \quad (3)$$

### **Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы**

Разместим на оптической скамье осветитель  $S$ , собирающую линзу  $L_1$  и экран  $\mathcal{E}$  (рис. 8). Если на пути лучей, выходящих из точки  $S$  и сходящихся в точке  $D$  после преломления в собирающей линзе  $L_1$ , поставить рассеивающую линзу  $L_2$  так, чтобы расстояние  $O_2D$  было меньше фокусного расстояния рассеивающей линзы, то изображение источника  $S$  переместится из точки  $D$  в точку  $B$ . Вследствие обратимости лучей можно, рассматривать лучи света как распространяющиеся из точки  $B$ .

Тогда точка  $D$  будет мнимым изображением точки  $B$  после преломления лучей в рассеивающей линзе  $L_2$ .

Обозначим  $BO_2$  через  $a$ ,  $O_2D$  через  $b$  и учитывая, что  $F$  и  $b$  имеют отрицательный знак для рассеивающей линзы, согласно формуле (1) получим

$$F = \frac{ab}{a+b}. \quad (4)$$

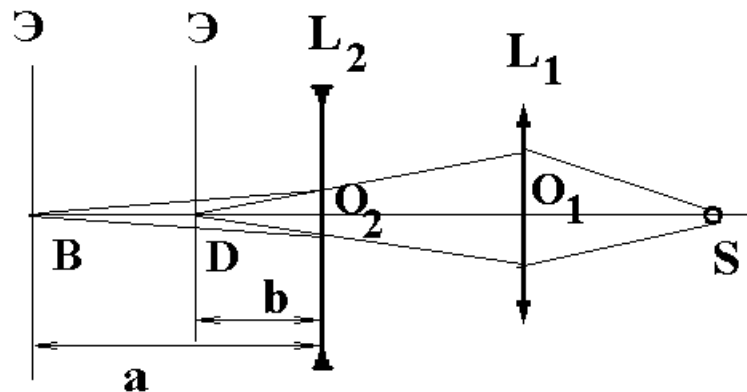


Рис. 8

### Описание лабораторной установки

На расположенной горизонтально оптической скамье (MN) могут перемещаться на рейтерах следующие приборы: собирающая ( $L_1$ ) и рассеивающая ( $L_2$ ) линзы, экран (Э), электрическая лампочка в специальном кожухе П (рис. 9). Последний имеет вырез, в виде стрелочки, который, будучи освещен помещенной внутри него лампочкой, рассматривается как предмет.

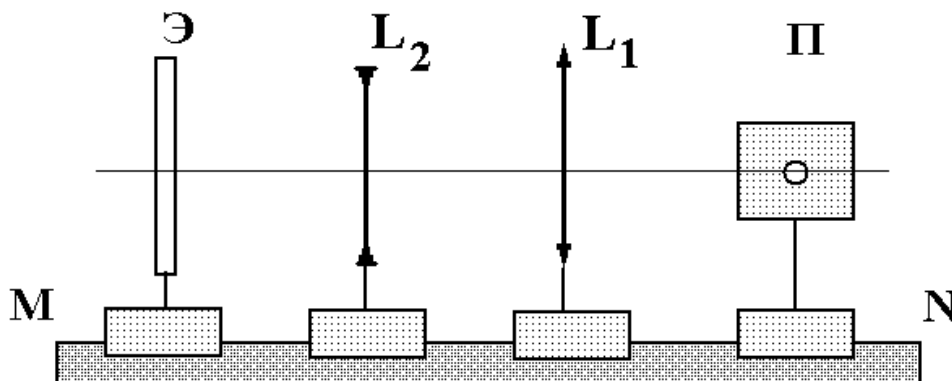


Рис. 9. – Лабораторная установка

Все эти приборы установлены так, чтобы их центры лежали на одной высоте, плоскость экрана была перпендикулярна к оптической скамье, а главная оптическая ось - ей параллельна. Расстояние между приборами отсчитывается линейкой с миллиметровыми делениями при помощи указателей, укрепленных на рейтерах. Ввиду неточности визуальной оценки резкости изображения измерения рекомендуется повторить не менее трех раз.

## Порядок проведения лабораторной работы и обработка результатов измерений

### *Определение фокусного расстояния собирающей линзы*

*Способ 1. Определение фокусного расстояния по расстоянию предмета и его изображения от линзы.*

1. Помещают экран на расстоянии 40-50 см от осветителя. Включают осветитель.

2. Ставят собирающую линзу  $L_1$  на оптическую скамью между экраном и осветителем вплотную к экрану.

3. Передвигают линзу в сторону до тех пор, пока не получат на экране отчетливое изображение выреза в осветителе.

4. Отсчитывают расстояние от осветителя до линзы ( $a$ ) и расстояние от линзы до экрана ( $b$ ) (рис. ).

5. Меняя положения экрана и линзы, повторяют измерения три раза.

6. Подставляя в формулу (2) значения  $a$  и  $b$ , рассчитывают величину фокусного расстояния собирающей линзы для каждого из трех измерений. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 1 и вычисляют среднее значение фокусного расстояния.

Таблица 1

№	a	b	F	⟨F⟩
1				
2				
3				

*Способ 2. Определение фокусного расстояния собирающей линзы по величине перемещения линзы.*

1. Устанавливают осветитель и экран на расстояние  $L > 4F$ . Значение фокусного расстояния берут из предыдущих опытов. Значение  $L$  заносят в таблицу 2.

2. Помещают собирающую линзу  $L_1$  между осветителем и экраном вплотную к осветителю.

3. Передвигая линзу, добиваются получения на экране отчетливого увеличенного изображения предмета (рис. 7).

4. Определяют положение линзы  $a$ .

5. Передвигая линзу к экрану, получают уменьшенное изображение предмета (рис. 7).

6. Определяют новое положение линзы  $b$ .

7. Вычисляют  $l$  - величину перемещения линзы.

8. По формуле (3) вычисляют фокусное расстояние собирающей линзы.

9. Меняя положение линзы и экрана, повторяют измерения три раза.

10. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 2.

Таблица 2

№	$L$	$a$	$b$	$l$	$F$	$\langle F \rangle$
1						
2						
3						

### ***Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы***

1. Между экраном и осветителем помещают собирающую линзу. Получают на экране отчетливое изображение стрелки в вырезе осветителя.

2. Определяют положение экрана  $D$ .

3. Между экраном и собирающей линзой  $L_1$  помещают рассеивающую линзу  $L_2$ .

4. Передвигая экран от осветителя, вновь получают отчетливое изображение стрелки.

5. Определяют положение рассеивающей линзы  $O_2$  и новое положение экрана  $B$ .

6. Вычисляют величины  $a$  и  $b$

7. По формуле (4) вычисляют фокусное расстояние линзы.

8. Меняя положение собирающей линзы  $L_1$  и осветителя, повторяют измерения три раза.

9. Все измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу 3.

Таблица 3

№	$D$	$O_2$	$B$	$a$	$b$	$F$	$\langle F \rangle$
1							
2							
3							

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.

2. Какое изображение называется действительным? Мнимым?

3. Что называют оптическим центром линзы? Главной и побочными оптическими осями линзы?

4. Построить ход трех характерных лучей через собирающую линзу.

5. Построить ход трех характерных лучей через рассеивающую линзу.

6. Написать формулу тонкой линзы в соответствии с правилом знаков. Вывести формулу Ньютона.

7. Можно ли с помощью рассеивающей линзы получить:

а) действительное изображение действительного предмета?

б) увеличенное изображение предмета?

8. Какая точка, лежащая на главной оптической оси собирающей линзы «переводится» линзой сама в себя?

9. На каком расстоянии надо поместить предмет перед собирающей линзой, чтобы расстояние от предмета до его действительного изображения было наименьшим?

10. Что такое принцип оптической обратимости?

11. Почему, оставляя предмет и экран неподвижными и передвигая между ними линзу, можно получить на экране два отчетливых изображения предмета? Верно ли, что одно из них будет увеличенным, а другое уменьшенным?

12. Как следует расположить две собирающие линзы, чтобы входящий параллельный пучок света после прохождения через них остался параллельным?

## Лабораторная работа № 2

### СФЕРИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ

Приборы и принадлежности: оптическая скамья с экраном и держателем для линзы, осветитель с электрической лампочкой, короткофокусная плосковыпуклая линза, четыре диафрагмы, масштабная линейка.

*Цель работы* – определить продольную и поперечную сферические aberrации, а также получить кривую сферической aberrации короткофокусной плосковыпуклой линзы для двух ее положений:

- 1) плоской стороной к падающему параллельным лучам;
- 2) выпуклой.

#### Введение

Аберрацией называют погрешности, создаваемые оптической системой изображения, вызывающие ухудшение резкости, нарушение подобия между изображением и объектом. Если используется немонахроматический свет, то вследствие дисперсии изображение может быть еще и окрашенным.

Для того, чтобы линза (или система линз) давала отчетливое неискаженное изображения предмета, необходимо соблюдение следующих основных условий:

1. Все лучи, исходящие из любой точки А предмета (рис. 1), должны сходиться после преломления в линзе в одной точки изображения (условие стигматичности).

2. Все точки изображения, полученного от плоского предмета, перпендикулярного к оптической оси линзы, должны лежать также в плоскости, перпендикулярной к оси линзы.

3. Масштаб изображения (увеличение) должен сохраняться постоянным в пределах всего поля изображения (условие постоянства масштаба).

4. Невыполнение этих условий для лучей всех длин волн приводит к aberrациям, ухудшающим качество изображения.

Например, в простых линзах для широких монохроматических пучков наблюдается нарушение условия стигматичности. Вследствие этого для точек, лежащих на оси линзы, имеет место сферическая aberrация.

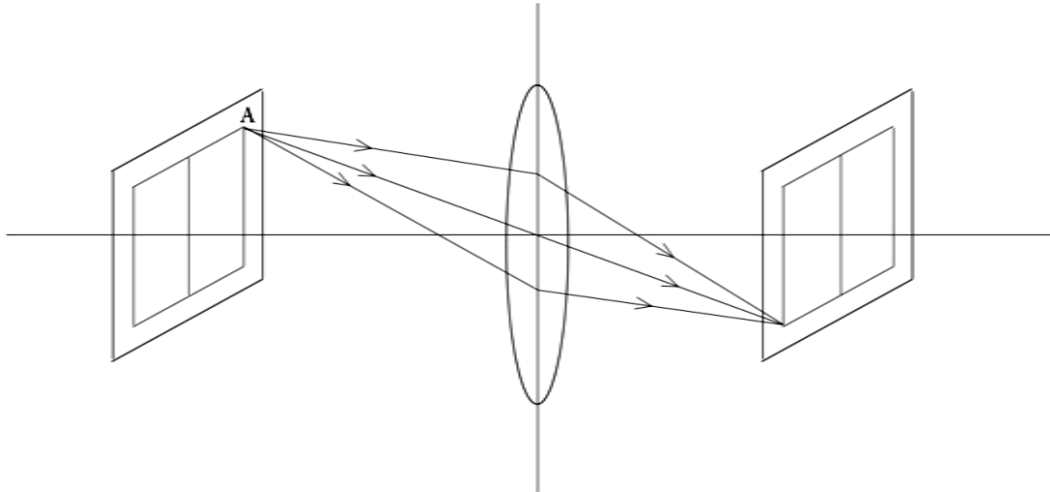


Рис. 1 – Ход лучей в линзе

### Описание приборов и методов измерений

Пусть на двояковыпуклую стеклянную линзу падает широкий пучок лучей, параллельных главной оптической оси (рис. 2). Только лучи  $OO$  узкого параксиального пучка после преломления пересекутся в точке  $F'_0$  – главном фокусе линзы. Лучи  $BB$ , падающие на линзу на расстоянии  $h$  от оптической оси, после преломления пересекутся в точке  $F_0$ .

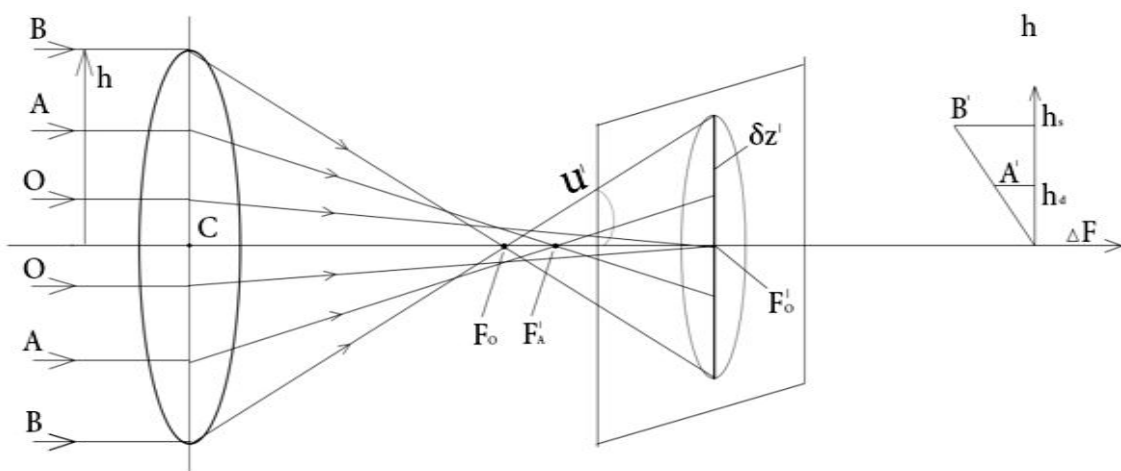


Рис. 2 – Формирование изображения в широких лучах

Таким образом, на экране, помещенном за линзой, изображение светящейся точки получится в виде размытого кружка, а изображение предмета – нерезким, расплывчатым. Этот недостаток линзы носит название *сферической aberrации*.

Различают продольную и поперечную сферические aberrации.

За меру продольной aberrации принимается расстояние  $\Delta F' = F'_0 - F_0$  по оси системы от изображения, даваемого параксиальными лучами, до изображения, даваемого лучами кольцевой зоны радиуса  $h$ .

Поперечная сферическая aberrация для той же зоны измеряется радиусом кружка рассеяния  $\delta z'$ , в плоскости, перпендикулярной оси и проходящей через точку  $F'_0$ . Из рис. 2:

$$\delta z' = \Delta F' \operatorname{tgu}' \quad (1)$$

где  $u'$  – угол, образуемый лучами, проходящими через рассматриваемую зону, с осью системы

$$\operatorname{tgu}' = \frac{h}{f'} \quad (2)$$

где  $f'$  – заднее фокусное расстояние линзы.

Сферическая aberrация быстро уменьшается с уменьшением радиуса зоны.

Приближенно считают

$$\Delta F' = ah^2 + bh^4 + \dots \quad \delta z = ah + b_1 h^3 + \dots \quad (3)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $a_1$ ,  $b_1$  и т. д. зависят от формы и материала линзы, от положения предмета и от длины волны  $\lambda$ .

Для исправления оптических систем в отношении сферической aberrации применяются специально рассчитанные комбинации двух или более линз с положительной и отрицательной (продольной) сферическими aberrациями.

Полную характеристику сферической aberrации даёт график продольной сферической aberrации, на котором по оси ординат откладывается величина  $h$  различных лучей, а по оси абсцисс – соответствующие этим величинам  $h$  значения  $\Delta F'$ .

На рис. 2 ось абсцисс совпадает с главной осью линзы.

Начало координат взято в точке схождения узкого параксиального приосевого пучка лучей  $F'_0$ . Величина сферическая aberrация лучей  $BB$ , падающих на линзу на расстоянии  $h$  от оси, на графике изображается точкой  $B'$ . Для луча  $A$ , падающего на ином расстоянии, такой точки является  $A'$ .

Установка представляет собой оптическую скамью, для которой укреплены линза (рис. 3) и экран, перемещающийся вдоль скамьи.

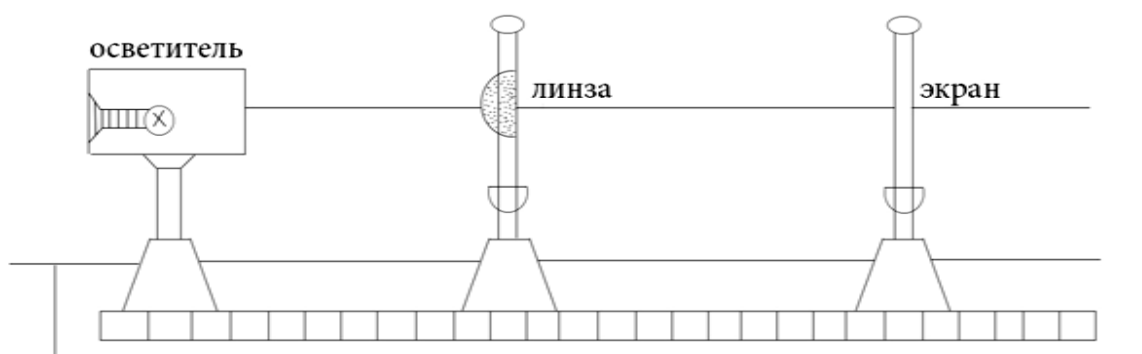


Рис. 3. – Схема установки

Положение экрана может быть отсчитано по шкале.

Светящимся предметом является нить лампочки накаливания. Осветитель с лампочкой следует поместить на расстоянии 3-4 м от линзы. Тогда для короткофокусной линзы падающие лучи можно считать практически параллельными. Нить лампочки должна лежать на главной оптической оси линзы.

Закрыв линзу диафрагмой с небольшим круглым отверстием у главной оси линзы, получим на экране резкое изображение светящегося предмета. Это положение экрана –  $F'_0$ .

Обозначим соответствующий отчет по шкале прибора буквой  $K_0$ . Закрыв линзу диафрагмой с двумя отверстиями так, чтобы ось линзы проходила посередине между отверстиями, снова перемещением экрана получим резкое изображение.

Отсчет положения экрана  $K$  определяет точку схождения на главной оси лучей, падающих на линзу на расстоянии  $h$  от оси.

Здесь  $h$  равно половине расстояния между отверстиями на диафрагме.

Разность отсчетов  $K-K_0=\Delta F'$  и значение  $h$  определяют одну точку на графике сферической аберрации. Повторив измерения с диафрагмами с другим значением  $h$ , получим несколько точек, по которым строится кривая.

Фокусировка изображения при диафрагме с двумя отверстиями облегчается тем, что два пучка лучей образуют на экране два изображения, сходящихся в одно только при искомом положении экрана.

### Порядок выполнения работы

1. Поставить осветитель на расстоянии 3-4 м от скамьи, расположив нить лампочки на главной оптической оси линзы.

2. Повернуть линзу выпуклой стороной к источнику.

Закрепить перед ней диафрагму с одним отверстием у оси линзы.

3. Перемещая экран, получить четкое изображение нити лампочки. Отсчитать по шкале положение экрана  $K_0$ .

4. Заменить диафрагму другой – с двумя отверстиями.

Перемещая экран добиться слияния двух изображений нити лампочки. Отсчитать положение экрана  $K$ .

5. Повторять этот опыт еще с двумя диафрагмами с другими расстоянием между отверстиями.

6. Измерить масштабной линейкой расстояние между центрами отверстий на диафрагмах, равное  $2h$ . Все результаты записать в отчетную таблицу.

7. Повернуть линзу стороной к падающим лучам, и повторите измерения, построить график сферической аберрации для этого случая.

Плосковыпуклая линза  $f'= +$  \_\_\_\_\_

*Сферическая поверхность линзы обращена к источнику.*

Расстояние между отверстиями диафрагмы $2h$ (мм)				
Отсчеты положения экрана $K$ (мм)				
$\Delta F'=K-K_0$ (мм)				
Координаты луча $h$ (мм)				
$\delta Z'$ (мм)				

*Сферическая поверхность линзы обращена к предмету.*

Расстояние между отверстиями диафрагмы $2h$ (мм)				
Отсчеты положения экрана $K$ (мм)				
$\Delta F' = K - K_0$ (мм)				
Координаты луча $h$ (мм)				
$\delta z'$ (мм)				

### **Обработка результатов измерений**

Результаты всех измерений должны быть записаны в отчетную таблицу.

Вычислить найти разности  $\Delta F' = K - K_0$ , где  $K_0$  – положение крапа для нулевого луча.

По найденным значениям  $h$  и  $\Delta$  построить график сферической аберрации.

При построении графика необходимо:

а) на оси координат нанести масштаб;  
б) выбрать масштаб по осям так, чтобы график помещался, приблизительно, в квадрате;

в) указать, какие величины и, в каких единицах откладываются по осям.

По формуле (2) для известных значений  $h$  и  $f'$  вычислить величины поперечной сферической аберрации  $\delta z'$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Когда возникает сферическая аберрация?
2. Какие факторы определяют величину сферической аберрации?
3. Что такое продольная сферическая аберрация?
4. Как вычисляется поперечная сферическая аберрация?
5. Каким способом можно уменьшить сферическую аберрацию?

## Лабораторная работа № 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА КРИВИЗНЫ ЛИНЗЫ ПРИ ПОМОЩИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА

*Цель работы:* изучение интерференции и измерение радиуса кривизны линзы.

Приборы и принадлежности: микроскоп с окулярным микрометром, осветитель, исследуемая линза, стеклянная пластинка, светофильтр, отражатель.

#### Введение

Интерференция света относится к числу явлений, свойственных волновым процессам, и заключается в наложении световых волн, сопровождающемся их взаимным усилением или ослаблением в области совместного распространения. Устойчивая интерференционная картина наблюдается в случае суперпозиции когерентных волн, линейно поляризованных в одной плоскости. Когерентными волнами являются монохроматические волны (световые волны с какой-либо одной частотой колебания), колебания в которых происходят с постоянной разностью фаз.

Естественные источники света одинаковых частот излучают волны, неспособные интерферировать, что объясняется самим механизмом излучения. Волны света излучает каждый атом в отдельности, причем это излучение длится лишь очень короткое время. Атом снова начинает излучать лишь после того, как получит извне запас энергии. Новая порция излучения атома совершенно не связана с предыдущим излучением, атом полностью "забывает" характеристики предыдущего излучения. Никак не связаны и не согласованы между собой и колебания излучения атомов, принадлежащих различным телам, различным источникам излучения.

Испускание света атомами нагретых тел носит статистический характер, т.е. все характеристики излучения (длительность, начальные фазы каждой порции излучения и т.д.) каждый раз принимают случайные значения вблизи своих средних. Поэтому разность фаз колебаний, создаваемых двумя независимыми источниками оптического излучения, не остается постоянной – она хаотически меняется с течением времени. Это приводит к неустой-

чивости картины интерференции от двух независимых источников, а именно: интерференционные максимумы быстро сменяются минимумами. Человеческий глаз в силу своей инерционности воспринимает усредненную по времени картину. Поэтому освещенная поверхность воспринимается как равномерно освещенная.

Свет, способный интерферировать, можно получить, только разделив каким-нибудь искусственным способом один луч на две части, направив их по различным путям, разность длин которых должна быть меньше длины элементарного цуга волн, излучаемых атомом или молекулой.

### **Приборы и методы измерений**

Способы наблюдения интерференционной картины от одного естественного источника осуществляются различными методами, одним из которых является метод "колец Ньютона", заключающийся в следующем.

Положим плоско-выпуклую линзу выпуклой стороной на отполированную плоскую стеклянную пластинку и осветим монохроматическим светом. Между линзой и пластинкой образуется тонкая воздушная прослойка. Лучи света, отраженные от верхней и нижней границ этой прослойки, интерферируют друг с другом. В результате виден ряд концентрических темных и светлых колец ("колец Ньютона"), окружающих центральное темное пятно, образующееся в точке соприкосновения линзы и пластинки. Каждое кольцо соответствует одной и той же толщине воздушной прослойки. Расстояние между кольцами зависит от толщины линзы. Измеряя диаметры колец, получаем возможность вычислить радиус кривизны линзы.

Волны монохроматического света, падающего сверху на линзу, пройдя линзу, расщепляются на две отраженные. Первая (1-1) образуется отражением от кривой поверхности линзы, вторая (1-2) – отражением от плоской пластины. Там, где эти две волны сходятся вместе, они, интерферируя, усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от приобретенной ими разности фаз. Кривизна линзы достаточно мала, поэтому можно считать, что луч, отраженный от плоской пластинки, проходит путь больше чем луч, отраженный от кривой поверхности линзы, на удвоенную толщину прослойки  $\delta_m$  (см. рис. 1).

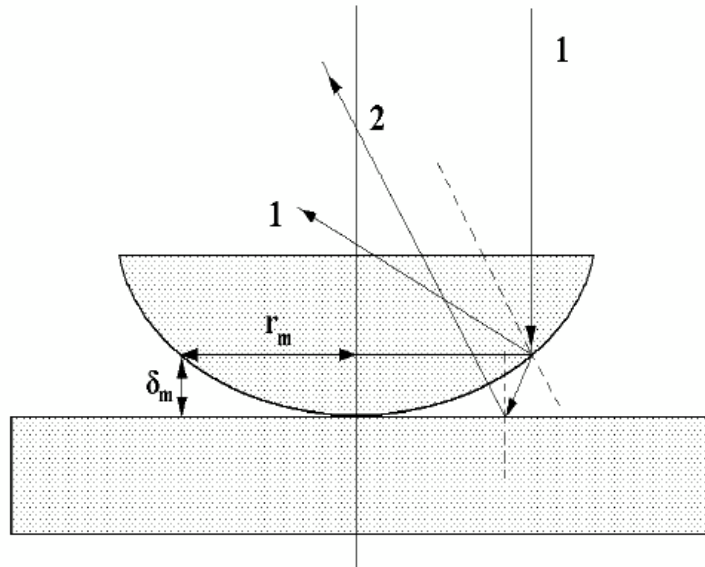


Рис. 1 – Ход интерферирующих лучей

Следовательно, разность хода лучей равна  $2\delta_m$ . Кроме того, опыт показывает, что отражение волн от среды с большим показателем преломления происходит с изменением фазы скачком на  $\pi$ . С учетом этого обстоятельства необходимо к разности хода лучей добавить половину длины волны.

Заметим, что длина волны  $\lambda$  – расстояние между точками, колеблющимися с разностью фаз  $2\pi$ . Поэтому полная разность хода будет равна:

$$2\delta_m + \frac{\lambda}{2}.$$

Пусть на расстояние  $r_m$  от точки соприкосновения линзы и пластинки эта разность хода равна нечетному числу полуволен, то есть:

$$2\delta_m + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Здесь  $m$  - целое число. Тогда фазы колебаний двух интерферирующих волн будут противоположны. Вследствие интерференции происходит ослабление колебаний, и мы увидим темное кольца радиуса  $r_m$ . В том случае, когда разность хода равна четному числу полуволен, колебания происходят в одной фазе, лучи вследствие интерференции усиливают друг друга, и здесь формируется светлое кольцо.

Установим соотношение между радиусом  $r_m$  темного кольца и радиусом кривизны линзы  $R$ .

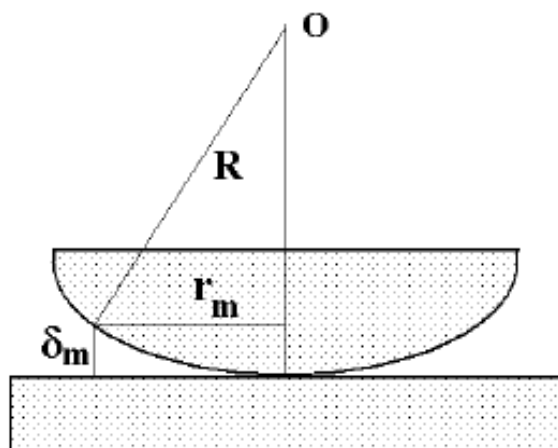


Рис. 2 – К расчету радиуса кольца

По теореме Пифагора из рис. 2 следует:

$$R^2 = r_m^2 + (R - \delta_m)^2,$$

$$r_m^2 = (2R - \delta_m) \cdot \delta_m.$$

В условиях разбираемой задачи  $\delta_m$  сравнима с длиной световой волны, то есть  $\delta_m \sim 10^{-4}$  см, а  $R$  – порядка десятка сантиметров. Поэтому величиной  $\delta_m$  по сравнению с  $2R$  можно пренебречь. Получаем:

$$r_m^2 = 2R \cdot \delta_m. \quad (2)$$

С другой стороны, из уравнения (1) следует, что

$$\delta_m = \frac{m\lambda}{2}.$$

Подставляя последнее выражение в (2), получаем:

$$R = \frac{r_m^2}{m\lambda}. \quad (3)$$

При  $m = 0$  радиус кольца также равен нулю, поэтому центральное пятно темное.

При  $m = 1$  получаем радиус первого темного кольца и т.д. Зная длину волны света, радиус и порядок темного кольца, по формуле (3) можно вычислить радиус кривизны линзы  $R$ .

## Описание прибора

Прибор состоит из микроскопа, к предметному столику которого прикреплена стеклянная полупрозрачная плоскопараллельная пластинка. На эту пластинку кладется линза, радиус кривизны которой определяется. На столик ставится отражатель для освещения линзы отраженным светом от источника со светофильтром. В окуляре микроскопа имеется отсчетная шкала, цена деления которой указана на приборе.

## Порядок выполнения работы

1. Включить источник света.
2. Перемещая окуляр, добиваются четкого изображения шкалы.
3. Перемещая тубус микроскопа, достигают резкого изображения колец.
4. Поворачивая окуляр микроскопа относительно тубуса, располагают ось шкалы окуляра так, чтобы она проходила через центр среднего темного пятна.
5. По шкале окуляра измеряют диаметр одного из темных колец. Для этого необходимо:
  - а) определить порядок взятого кольца, то есть число  $m$  в формуле (3),
  - б) отсчитать по шкале положение точек пересечения кольцом шкалы справа и слева от центрального темного пятна.Эти отсчеты в делениях шкалы микрометра обозначаются  $a$  и  $b$ . Результаты записываются в таблицу. Отсчет следует вести против середины темной полосы.
6. Производят отсчет для пяти колец.
7. Повернув шкалу на  $90^\circ$ , повторить измерения.

## Обработка результатов измерений

1. Разность двух отсчетов  $a-b$  равна диаметру темного кольца, выраженному в делениях шкалы микроскопа. По цене деления шкалы микроскопа следует найти радиус кольца в миллиметрах.
2. По формуле (3) вычислить радиус кривизны линзы по данной длине волны света.

3. Найти среднее значение  $R$ , отклонение от среднего значения в отдельных опытах и среднюю квадратическую ошибку.

4. Среднее значение и величину ошибки определить для каждого положения шкалы отдельно.

– Первое положение шкалы.

– Длина волны света  $\lambda =$

– Цена деления микроскопа ...

### Первое положение шкалы

N	Порядок кольца, $m$	Отсчет справа, $a$	Отсчет слева, $b$	$a-b=2r_m$	$r_m$	$R_i$	$ R' - R_i $

При первом положении шкалы

$$R' = \frac{\sum R_i}{5}, \quad \delta_1 = \sqrt{\frac{(R' - R_i)^2}{4}}$$

### Второе положение шкалы

N	Порядок кольца, $m$	Отсчет справа, $a$	Отсчет слева, $b$	$a-b=2r_m$	$r_m$	$R_i$	$ R'' - R_i $

При втором положении шкалы

$$R'' = \frac{\sum R_i}{5}, \quad \delta_2 = \sqrt{\frac{(R'' - R_i)^2}{4}}$$

Окончательный результат:

$$R_{cp} = \frac{R' + R''}{2}, \quad \delta_{cp} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}, \quad R = R_{cp} \pm \delta_{cp}$$

## Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления интерференции?
2. Какие колебания называются когерентными и как получить когерентные световые волны?
3. Что называется геометрической и оптической длиной пути?
4. Что называется оптической и геометрической разностью хода?
5. Укажите условия формирования максимума и минимума при интерференции.
6. Нарисуйте ход лучей в приборе для наблюдения колец Ньютона. Укажите где и почему возникает разность хода.
7. Напишите формулу разности хода для тонкого слоя.
8. Объясните происхождение интерференционной картины колец Ньютона в отраженном свете.

## Литература

1. И. В. Савельев, Курс общей физики, т. 2, 1988, § 122.
2. Т. И. Трофимова, Курс физики, 1985, § 175.

## Лабораторная работа №4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

**Цель работы:** определить постоянную дифракционной решетки и измерить длину световой волны видимого спектра.

**Приборы и принадлежности:** источник света, дифракционная решетка, оптическая скамья с мерной линейкой, экран с отсчетной шкалой.

#### Введение

*Дифракцией* называется огибание волнами препятствий, встречающихся на их пути. Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, проникать через небольшие отверстия в экранах.

Расчет распределения интенсивности света на экране производится с помощью основного принципа волновой оптики – принципа Гюйгенса-Френеля. В его рамках оперируют с такими понятиями как волновая поверхность, волновой фронт, световой луч и т.д.

Волновой поверхностью (ВП) называется геометрическое место точек, в которых в данный момент времени фаза колебаний одинакова. Направление светового луча совпадает с направлением распространения волн. В однородной изотропной среде лучи всегда нормальны к ВП.

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к данному моменту времени, называется волновым фронтом. Волновых поверхностей можно провести бесконечное множество, а волновой фронт в каждый момент один. Если фронт волны представляет собой сферу, то волна называется сферической, если плоскость – плоской, если цилиндрическую поверхность - цилиндрической волной.

Согласно принципу Гюйгенса каждая точка среды, до которой дошло колебание, сама становится источником вторичных волн той же частоты. Огибающая этих вторичных волн дает положение нового волнового фронта, каждая его точка становится в свою очередь источником новых вторичных волн.

На рис. 1 в качестве примера применения принципа Гюйгенса показано падение плоской волны на преграду с отверстием. Из рисунка видно, что у границ отверстия происходит загибание волнового фронта, т.е. волна проникает в область геометрической тени, огибая края преграды.

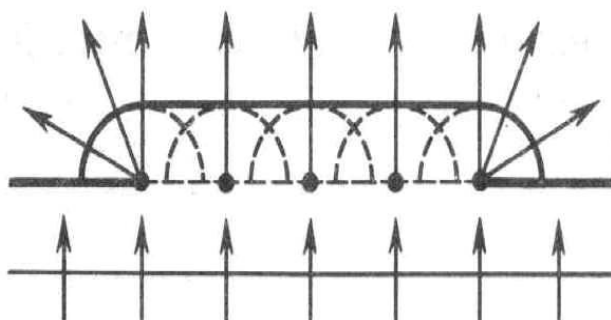


Рис. 1 – Пояснение к принципу Гюйгенса

Принцип Гюйгенса позволяет качественно объяснить явление дифракции, но не позволяет рассчитать распределение интенсивности дифрагированных лучей. Френель развил и дополнил принцип Гюйгенса, указав, что в точке наблюдения следует проводить сложение всех вторичных волн с учетом разности их хода до точки наблюдения. Иными словами, следует рассчитывать результат интерференции бесконечного числа вторичных волн, пришедших в точку наблюдения.

Для расчета интенсивности света в результате интерференции Френель предложил разбить волновую поверхность на участки поверхности (зоны Френеля), имеющие одинаковые площади, расстояние от которых до точки наблюдения отличается от зоны к зоне на  $\lambda/2$  ( $\lambda$  – длина волны). Тогда световые возмущения, пришедшие в точку наблюдения от соседних зон, будут противофазе, т.к. разность фаз  $\lambda$  и разность хода  $\Delta$  связаны друг с другом соотношением

$$\delta = 2\pi\Delta / \lambda.$$

Рассмотрим дифракцию Фраунгофера на узкой прямоугольной щели и применим принцип Гюйгенса-Френеля для анализа возникающей в этом случае дифракционной картины.

Пусть плоская монохроматическая волна падает на длинную узкую прямоугольную щель в непрозрачном экране (рис. 2).

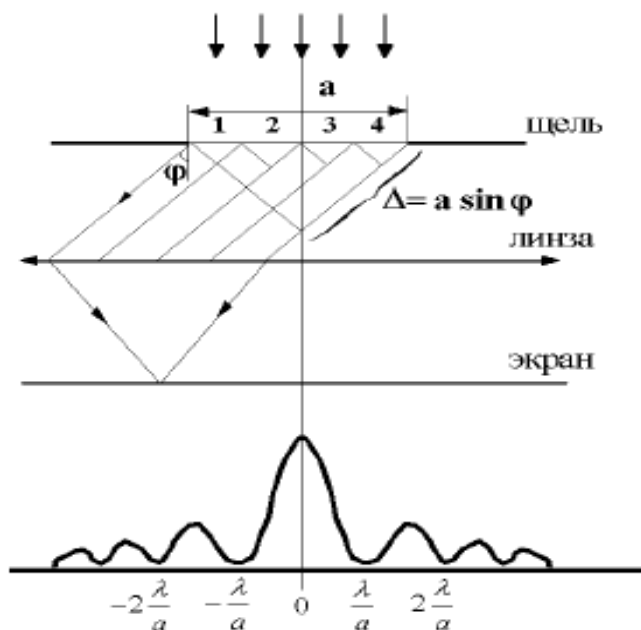


Рис. 2 – Дифракция на щели

Ширина щели  $a$ . За щелью помещен экран. Чтобы наблюдать интерференцию параллельных лучей, надо свести их в одну точку экрана. Для этого между щелью и экраном располагают собирающую линзу так, чтобы экран оказался в ее фокальной плоскости. Линза не вносит дополнительной разности хода для лучей, проходящих через нее.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, освещенную щель можно рассматривать как бесконечное множество вторичных точечных источников света, каждый из которых излучает цилиндрическую волну.

Лучи света идут от каждой точки щели по всем возможным направлениям. Из всех возможных направлений распространения выберем одно, под углом  $\varphi$  относительно нормали к плоскости щели. Воспользуемся методом зон Френеля. Для этого разобьем открытую часть фронта волны на зоны Френеля параллельными плоскостями, отстоящими друг от друга на  $\lambda/2$  и перпендикулярными к направлению лучей. Площади зон в этом случае будут одинаковыми. Тогда световые возмущения, пришедшие в точку наблюдения от соседних зон, будут находиться в противофазе, и будут полностью гасить друг друга.

Амплитуда результирующего колебания будет зависеть от того, четное или нечетное число зон Френеля помещается на открытой части волнового фронта.

Если число зон четное (как на рис. 2), то в результате взаимного погашения световых колебаний, выходящих из каждой пары соседних зон, будет наблюдаться минимум. В случае нечетного числа зон световые колебания от одной из зон останутся непогашенными, и на экране будет наблюдаться светлая полоса.

Таким образом, если на отрезке длиной  $\Delta = a \cdot \sin \varphi$ , определяющем разность хода волн, идущих от противоположных краев щели, укладывается нечетное число зон Френеля

$$a \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (1)$$

Уравнение (1) является условием образования максимума для угла дифракции  $\varphi$ .

Условием формирования дифракционного минимума в точке наблюдения соответственно является равенство

$$a \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (2)$$

Заметим, что расположение максимумов и минимумов (в фокальной плоскости линзы) зависит от длины волны света. Распределение освещенности на экране, полученное вследствие дифракции световой волны, называется дифракционным спектром.

Рассмотрим дифракцию плоской волны от двух и более щелей (см. рис. 3). Для нахождения дифракционного спектра от двух и более параллельных щелей необходимо учесть не только взаимную интерференцию лучей, выходящих из одной щели, но и интерференцию лучей, пришедших в данную точку экрана из различных щелей.

Максимумы интенсивности света при интерференции световых волн получаются, если разность фаз волн, пришедших из подобных точек различных щелей, отличается на целое кратное  $2\pi$ , т.е. разность хода подобных лучей (отстоящих на одинаковое расстояние от краев щелей) от соседних щелей ( $\Delta = d \cdot \sin \varphi$ ) равна  $\lambda$  или целому кратному  $\lambda$ .

Поэтому условие

$$d \cdot \sin \varphi = \kappa \lambda \quad (\kappa = 0, 1, 2, \dots), \quad (3)$$

где  $d$  – расстояние между соответствующими краями двух соседних щелей, определяет местонахождение максимумов света (их называют главными дифракционными максимумами).

Дополнительные максимумы в распределении интенсивности света на экране на рис. 3 связаны с рассмотренной выше дифракцией.

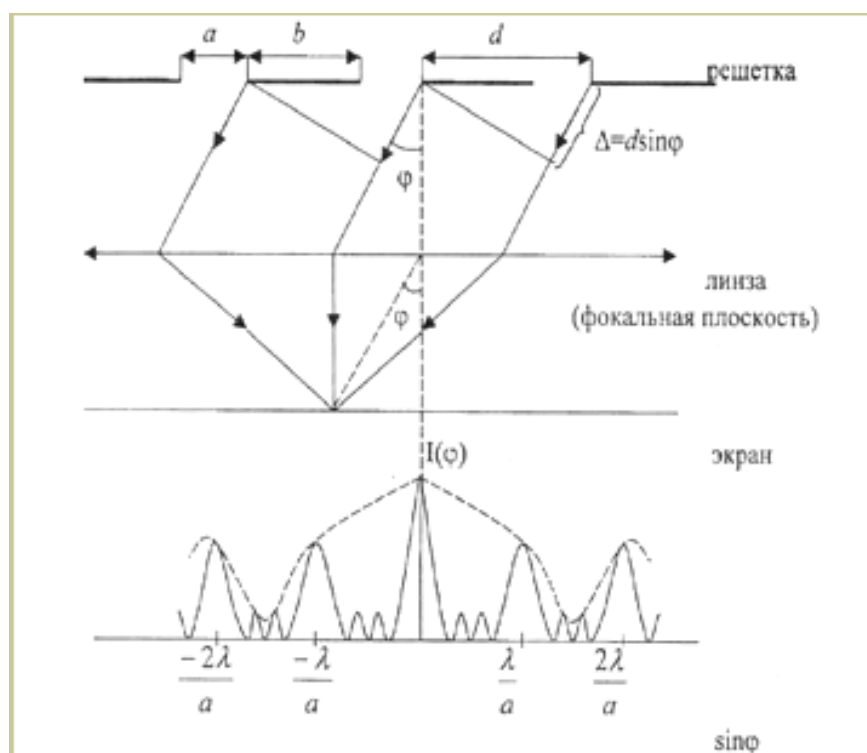


Рис.3. – Дифракция на решетке

Формула (3) является рабочей формулой в данной работе. По ней определяется длина волны излучения.

Совокупность  $N$  одинаковых щелей шириной  $a$ , разделенных непрозрачными промежутками  $b$  (рис. 3), называют *дифракционной решеткой*.

Величина  $d = a + b$  называется периодом или постоянной решетки. Решетки изготавливаются путем нанесения штрихов на прозрачную пластинку резцом специальной делительной машины. Число  $\kappa$  определяет порядок спектра.

## Приборы и методы измерений

В данной работе в качестве осветителя используется лампа накаливания, испускающие излучение заметной интенсивности в видимом диапазоне длин волн  $0,4 \div 0,76$  мкм.

При освещении решетки (R) таким светом, падающим на нее перпендикулярно, на экране (Э) возникает ряд узких ярко освещенных полос (линий), называемых максимумами. Против центра решетки на экране наблюдается самая яркая полоса, которая называется нулевым максимумом. Нулевой максимум окрашен белым, поскольку формула (3) справедлива для всех длин волн в видимом диапазоне.

Дифракционная картина симметрична относительно нулевого максимума. Положение максимумов на экране в соответствии с формулой (3) определяет угол  $\varphi$  отклонения света от перпендикуляра к плоскости решетки (первоначального распространения).

Угол отклонения лучей различных длин волн для максимумов первого и последующих порядков в соответствии с (3) зависит от длины волны  $\lambda$ . Следовательно, эти линии представляют чередование цветов от фиолетового ( $\lambda = 0,4$  мкм) до красного цвета ( $\lambda = 0,76$  мкм).

Для определения угла, под которым наблюдается максимум  $k$ -ого порядка, измеряют расстояние  $x$  от этого максимума до максимума нулевого порядка и расстояние от решетки до экрана  $L$  (рис. 4).

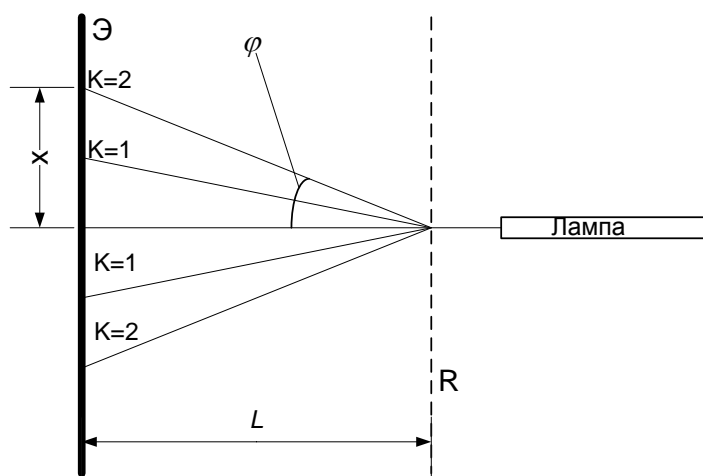


Рис. 4 – Экспериментальная установка

Зависимость между  $L$ ,  $x$  и  $\varphi$  определяется формулой

$$\frac{x}{L} = \tan \varphi$$

Поскольку в условиях данного эксперимента,  $\frac{x}{L} \ll 1$ , то,  $\sin \varphi \approx \tan \varphi$  и формула (3) принимает вид

$$d \cdot \frac{x}{L} = \kappa \lambda (\kappa = 0, 1, 2, \dots), \quad (4)$$

### Порядок выполнения работы

Определение постоянной дифракционной решетки  $d$ .

1. Для определения постоянной решетки  $d$  определяют положение линии красного цвета ( $\lambda = 0,76$  мкм).

2. По указанию преподавателя установить расстояние  $L$  от решетки до экрана.

3. Включить осветитель. Измерить расстояния от нулевого максимума до краев максимумов красного цвета первого и второго порядка, расположенных слева ( $x_1$ ) и справа ( $x_2$ ) от центрального максимума. В качестве  $x$  в формулу (4) подставляется значение  $x = (x_1 + x_2)/2$ . Результаты занести в таблицу 1.

4. Рассчитать постоянную  $d$  дифракционной решетки. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

Порядок спектра	L (мм)	X <sub>1</sub> (мм)	X <sub>2</sub> (мм)	X (мм)	d (мкм)
$\kappa=1$					
$\kappa=2$					

### Определение длины волны зеленого света

1. По указанию преподавателя установить расстояние  $L$  от решетки до экрана.

2. Включить осветитель. Измерить расстояния от нулевого максимума до краев максимумов зеленого цвета первого и второго порядка, расположенных слева ( $x_1$ ) и справа ( $x_2$ ) от центрального максимума. В качестве  $x$  в формулу (3) подставляется значение  $x = (x_1 + x_2)/2$ . Результаты занести в таблицу 2.

3. Рассчитать длину волны зеленого света. Результаты занести в таблицу 2. Сравнить результаты расчета со справочными данными.

Таблица 2

Порядок спектра	L (мм)	X <sub>1</sub> (мм)	X <sub>2</sub> (мм)	X (мм)	d (мкм)
$k=1$					
$k=2$					

### Контрольные вопросы

1. Что называется дифракцией света и каковы условия ее наблюдения?

2. Как устроена дифракционная решетка? Назовите ее конструктивные параметры

3. Сформулируйте принцип Гюйгенса. Как Френель дополнил принцип Гюйгенса?

4. Чем отличается дифракция Френеля от дифракции Фраунгофера?

5. Дать вывод условия формирования главных максимумов дифракционной решетки.

6. Почему дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр?

7. Что называется угловой дисперсией дифракционной решетки? Какое свойство решетки она характеризует? Как она связана с конструктивными параметрами решетки?

## Лабораторная работа № 5

### ПРОВЕРКА ЗАКОНА МАЛЮСА

**Цель работы:** ознакомление с явлением поляризации света, проверка закона Малюса.

**Приборы и принадлежности:** поляризационный прибор, осветитель, оптическая скамья, фотоприемник.

#### Введение

**Световая волна** – это электромагнитная волна в оптическом диапазоне частот спектра.

Явление поляризации, так же как интерференция и дифракция, выявляет волновую природу света и подтверждает то, что свет представляет собой поперечные волны.

В соответствии с электромагнитной теорией Максвелла, световая волна описывается двумя векторами **E** и **H**. Вектор напряженности электрического поля (световой вектор) **E** перпендикулярен направлению распространения луча света или его скорости  $\vec{v}$  (ось  $x$  на рисунке 1).

Вектор напряженности магнитного поля **H** также перпендикулярен вектору  $\vec{v}$  и перпендикулярен вектору **E**.

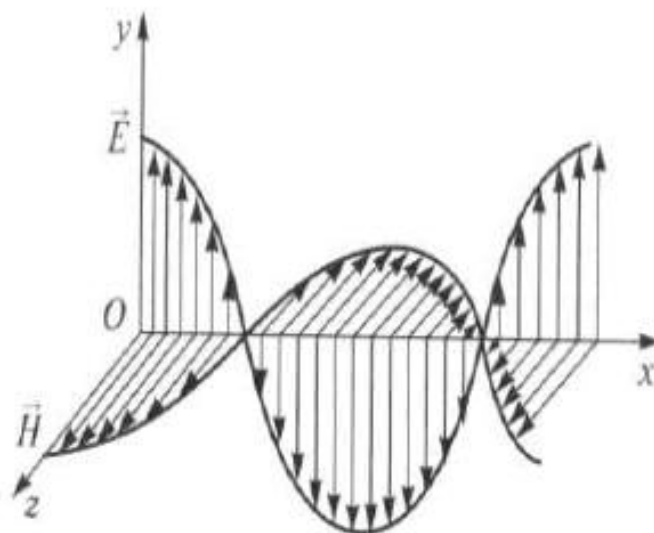


Рис. 1 – Электромагнитная волна

Естественный свет имеет сложную микроструктуру. Каждый атом источника излучает волны света не согласованно с другими. Это длящееся очень короткое время ( $\sim 10^{-8}c$ ) излучение называется цугом волн. Атом снова начинает излучать лишь после того, как получит извне новый запас энергии. Естественный свет представляет собой очень сложную систему большого количества элементарных волн, излучаемых отдельными атомами. Колебания векторов **E** и **H** в световом луче перпендикулярны к направлению его распространения, но, вследствие громадного количества независимо излучающих атомов, в естественном свете нет преимущественного направления, в котором бы совершались эти колебания. Взаимное расположение векторов **E** естественного света, падающего на наблюдателя, показано на рис. 2а.

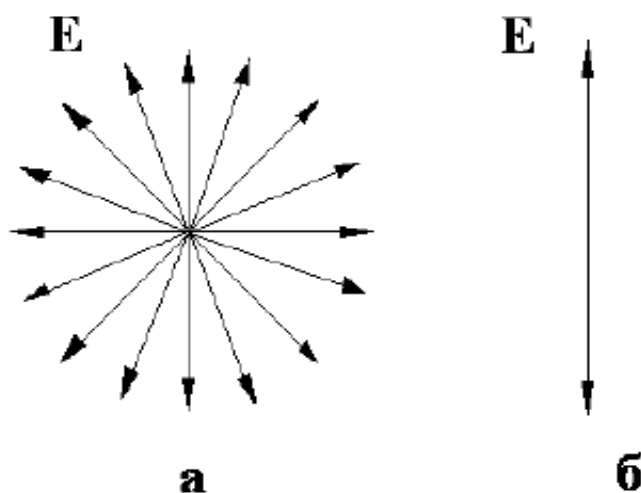


Рис. 2 – Естественный и поляризованный свет

Если упорядочить направление колебаний электрического и магнитного векторов падающего на нас света, так как это сделано на рис. 2б, мы получим плоско поляризованный свет. В таком свете колебания **E** совершаются только в одной плоскости.

Плоско поляризованный свет можно получить в результате отражения падающего излучения от границы раздела двух диэлектриков. Тогда если угол падения (рис. 3) удовлетворяет условию

$$\tan i_B = n_{12}, \quad (1)$$

где  $n_{12}$  – относительный показатель преломления, то отраженный луч оказывается полностью поляризованным, а степень поляризации преломленного луча максимальна.

Соотношение (1) известно в качестве закона Брюстера.

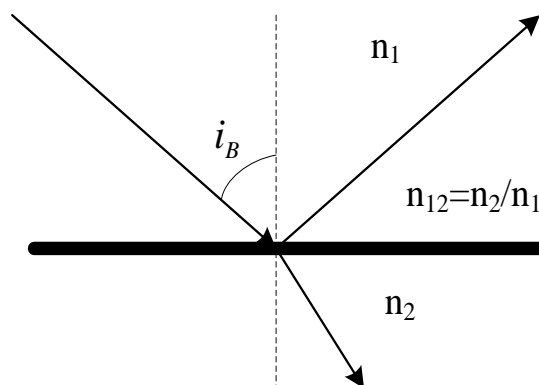


Рис. 3 – Поляризация при отражении

Другим способом получения поляризованного света является поляризация при двойном луче преломлении.

В природе существуют кристаллы, например исландский шпат, которые дают двойное лучепреломление. Кристаллы – анизотропные тела, физические свойства которых различны в различных направлениях.

Особенностью кристалла является то, что в них можно выделить оптическую ось и главное сечение кристалла. Это сечение проходит через оптическую ось и нормаль, проведенную в точку падения луча.

Свойства кристалла одинаковы во всех направлениях, которые составляют оптической осью равные углы (для любого угла  $\varphi$ ). Скорость распространения света в кристалле зависит от угла  $\varphi$  между направлением колебаний и оптической осью кристалла.

Если на кристалл падает луч естественного света, то в кристалле он раздваивается на луч обыкновенный (o) и луч необыкновенный (e). Раздвоение лучей в кристалле происходит потому, что скорость распространения необыкновенного луча  $v_e$ , а следовательно и показатель преломления кристалла  $n_e$ , для него зависят от направления распространяющегося луча, т.е. угла  $\varphi$ .

Скорость распространения обыкновенного луча  $v_o$  и показатель преломления кристалла  $n_o$  для него не зависят от направления его распространения ( $\varphi = \pi/2 = \text{const}$ ) и ( $n_o \geq n_e$ ).

Вдоль направления оптической оси двойного лучепреломления нет, т.к.  $v_o = v_e$  и  $n_o = n_e$ . Причем, оба луча поляризованы.

Колебания вектора  $\mathbf{E}$  в необыкновенном луче совершается в плоскости главного сечения кристалла, а в обыкновенном – в плоскости, перпендикулярной главному сечению кристалла.

Отделение одного луча от другого осуществляется в призме Николя. Для ее изготовления используют кристалл исландского шпата, который распиливают определенным образом, а потом, склеивают «канадским бальзамом», показатель преломления которого  $n_{кб}$ .

Для обыкновенного луча «канадский бальзам» оптически менее плотен, чем исландский шпат, луч испытывает полное внутреннее отражение и поглощается зачерненной гранью призмы.

Необыкновенный луч проходит через слой «канадского бальзама» и выходит из призмы полностью поляризованным. Устройства, при помощи которых получают поляризованный свет, называют поляризаторами.

Для анализа степени поляризации света применяют анализаторы, в качестве которых используют также призмы Николя. Если взять две призмы Николя: одна – поляризатор, из нее выходит поляризованный свет, а вторая анализатор, то по закону Малюса интенсивность света  $I$  выходящего из анализатора определяется по формуле

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \alpha \quad (2)$$

где  $I_0$  – интенсивность вышедшего света;

$\alpha$  – угол между направлением плоскостей колебаний вектора  $\mathbf{E}$  поляризатора и анализатора.

### Приборы и методы измерений

Проверка закона Малюса производится на установке, схема которой представлена на рис. 4.

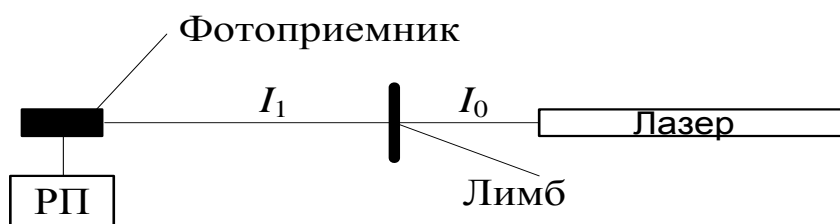


Рис. 4 – Схема установки

Установка состоит из следующих элементов:

1. Лазер, испускающий плоско поляризованный свет.
2. Лимб с поляридом-анализатором, который служит для отсчета величины угла между плоскостью колебания вектора  $\mathbf{E}$  и плоскостью главного сечения кристалла.
3. Фотоприемник и регистрирующий прибор (микроамперметр) для регистрации фототока.

### Порядок выполнения работы

1. Вращая лимб, установить начальный угол в  $0^\circ$  между плоскостью колебания вектора  $\mathbf{E}$  и плоскостью главного сечения кристалла.
2. Включить лазер и добиться попадания света, прошедшего через анализатор, в окно фотоприемника. Измерить величину фототока. Занести показание регистрирующего прибора в таблицу.
3. Вращая лимб в пределах от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  через  $15^\circ$ , занести показания регистрирующего прибора в таблицу.
4. Построить график зависимости тока  $I$ , регистрируемого прибором, от угла поворота лимба  $\alpha$ .

Таблица

$\alpha$ , град	0	15	30	45	60	75	90
$I$ , мкА							
$\alpha$ , град	105	120	135	150	165	180	195
$I$ , мкА							
$\alpha$ , град	210	225	240	255	270	285	300
$I$ , мкА							
$\alpha$ , град	315	330	345	360			
$I$ , мкА							

## Контрольные вопросы

1. Что такое естественный свет? Что такое линейно-поляризованный
2. Как получить линейно-поляризованный свет?
3. Чему равен угол полной поляризации при отражении?
4. Свет поляризован отражением, укажите, в какой плоскости совершаются колебания в отраженном луче.
5. Что такое поляризатор и анализатор? Какова роль этих приборов в исследованиях по поляризации света?

## Лабораторная работа № 6

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА

**Цель работы:** Разобраться в явлениях поляризации света и научиться определять процентное соотношение сахара в растворе.

**Приборы и принадлежности:** поляриметр П-161, раствор глюкозы.

#### Введение

##### *Явление вращения плоскости поляризации*

В некоторых кристаллах (например, кварце) распространение света вдоль оптической оси сопровождается поворотом плоскости поляризации. Такие вещества называются *оптически активными*, а явление – *естественным вращением плоскости поляризации*.

Кроме кварца, оптически активными веществами являются некоторые кристаллы (киноварь и др.), чистые жидкости (скипидар, никотин и др.) и растворы некоторых веществ (водные растворы сахара, глюкозы, винной кислоты, спиртовой раствор камфары).

В зависимости от направления вращения плоскости поляризации оптически активные вещества подразделяются на право- и левовращающие: первые поворачивают световой вектор по часовой стрелке, если смотреть навстречу лучу, а вторые против часовой стрелки.

Для оптически активных растворов угол поворота плоскости поляризации определяется соотношением:

$$\varphi = \alpha_0 \cdot C \cdot l \quad (1)$$

где  $l$  – толщина слоя раствора;

$C$  – концентрация раствора;

$\alpha_0$  – коэффициент, называемый удельным вращением вещества.

Удельное вращение зависит от природы вещества, его температуры, длины волны света.

Определив значение  $\alpha_0$  для данных условий можно использовать соотношение (1) для определения концентрации растворенного активного вещества.

Этот метод широко применяется для количественного определения концентраций таких веществ, как камфара, кокаин, никотин, сахар. Приборы для таких измерений называются поляриметрами или сахариметрами.

Естественное вращение плоскости поляризации можно наблюдать, поместив оптически активное вещество между поляризатором и анализатором. Если их главные плоскости взаимно перпендикулярны, то плоско-поляризованный свет, вышедший 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 просветлеет.

Повернув анализатор вокруг светового луча 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 из-за адаптации глаза трудно найти с достаточной точностью положение анализатора, соответствующее максимальному затемнению поля зрения.

В то же время глаз способен с большой точностью фиксировать равенство освещенностей двух соседних полей. Поэтому при измерениях обычно применяют полутеневого метод, в котором установка производится не на темноту поля зрения, а на равную яркость полей сравнения.

### *Полутеневого метод*

Рассмотрим схему, состоящую из поляризатора и анализатора. Пусть поляризатор  $P$  будет составлен из двух поляроидов (1 и 2 на рис.1а) так, что направления пропускания обеих  $P_1$  и  $P_2$  частей расходятся на некоторый угол  $\beta$  (рис. 1б). Та часть светового потока, которая прошла через первую половину поляризатора, будет поляризована в направлении  $P_1$ , а другая половина в направлении  $P_2$ . Интенсивности обеих частей одинаковы.

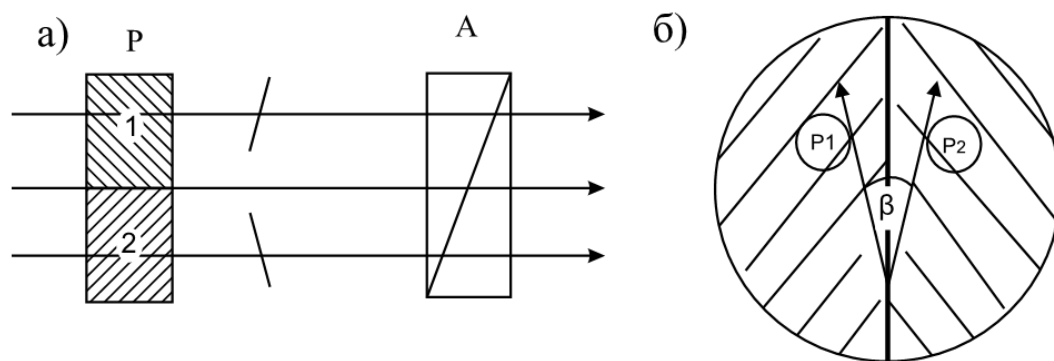


Рис. 1

Будем рассматривать полученный световой поток через анализатор. Наблюдаемая картина будет зависеть от того, как ориентирована плоскость пропускания анализатора  $AA'$  (см. рис. 2) относительно направления  $P_1$  и  $P_2$ .

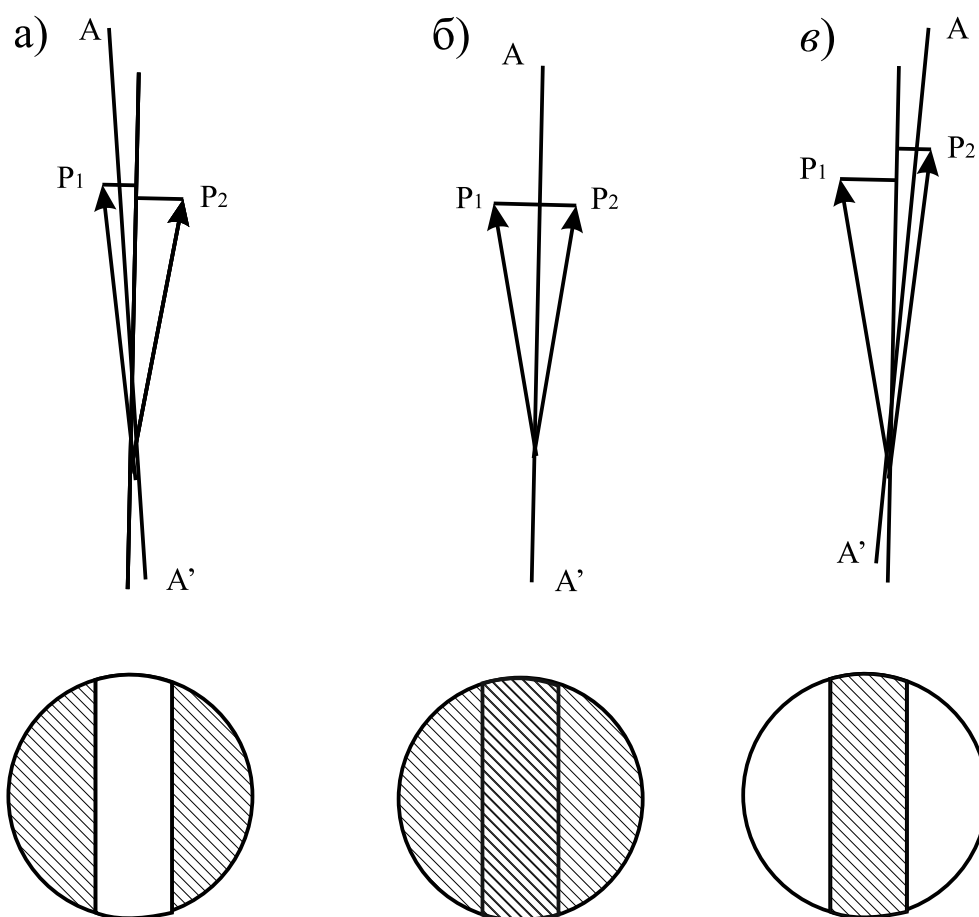


Рис. 2

От каждой волны через анализатор проходит колебание с амплитудой, равной проекции ее светового вектора на направление  $AA'$ . В общем случае, эти проекции не равны и обе части поля зрения будут освещены неодинаково (см. рис. 2 а, в).

Если же главное направление анализатора совпадает с биссектрисой угла между векторами  $P_1$  и  $P_2$ , то обе половинки поля зрения будут освещены одинаково: исчезнет граница раздела полей. Это положение исключительно, так как незначительное отклонение от него приводит к нарушению светового равновесия. Таким образом, в описанной схеме нулевым положением будет такое положение анализатора, при котором поле зрения однородно.

Если между поляризатором и анализатором ввести оптически активное вещество, то плоскости поляризации обоих пучков повернутся на один и тот же угол  $\varphi$  и яркость полей сравнения изменится. Угол  $\varphi$  легко определить: он равен углу, на который следует повернуть анализатор, чтобы опять уравнять яркость обоих полей.

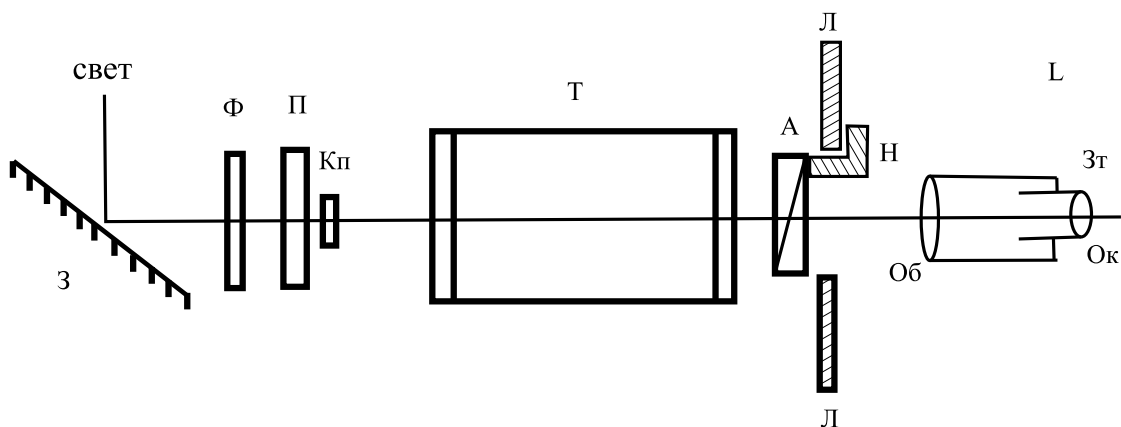
## **Выполнение работы**

### ***Описание прибора***

В работе используются поляриметр П-161. Он предназначен для измерения угла вращения плоскости поляризации оптически-активными однородными растворами и жидкостями и широко применяются в научно исследовательских лабораториях, в пищевой и химической промышленности, в медицине, а также в других отраслях науки и производства.

На рис. 3 изображена оптическая схема П-161.

Конструктивно различают следующие узлы поляриметра: поляризационное устройство, которое состоит из оранжевого светофильтра, поляризатора и тонкой кварцевой пластинки. Кварцевая пластинка занимает половину поля зрения в поляриметре П-161. Так как кварц является оптически активным веществом, то он поворачивает на небольшой угол ( $5-7^\circ$ ) плоскость поляризации у той части поляризованного света, которая проходит через пластинку.



*З – зеркало; Ф – светофильтр; П – поляризатор;  
 К<sub>п</sub> – кварцевая пластинка; Т – трубка для исследуемой жидкости;  
 А – анализатор с нониусом Н; Л – неподвижный лимб с градусной шкалой;  
 L – отсчетная лупа; Об и Ок – объектив и окуляр зрительной трубы;  
 З<sub>т</sub> – анализатор и поляризатор изготовлены из полярной пленки.*

Рис. 3

Таким образом, создаются поля сравнения, необходимые для реализации полутеневого метода. На рис. 4 изображены возможные виды поля зрения для прибора П-161.

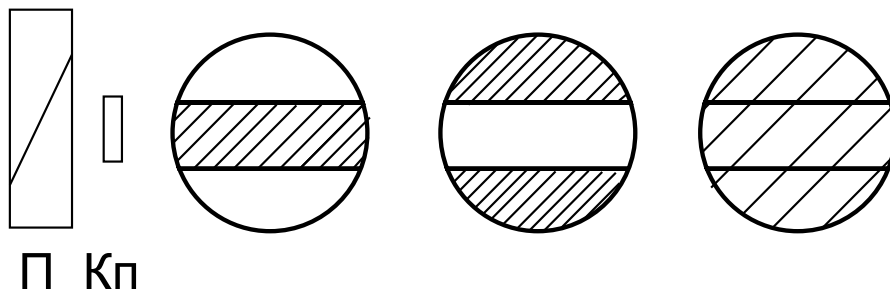


Рис. 4

Так как у многих веществ коэффициент  $\alpha_0$  зависит от длины волны света, перед поляризатором ставится оранжевый светофильтр.

Головка анализатора состоит из зрительной трубки, неподвижного лимба с градусной шкалой и совместно вращающихся частей: анализатора, нониуса и отсчетной лупы.

Зрительная трубка состоит из объектива и окуляра и служит для наблюдения поля зрения.

Вращением оправы окуляра производится установка окуляра на резкость изображения линий раздела поля зрения.

На неподвижном лимбе (рис. 5) вправо и влево от нуля нанесено 20 делений. Цена деления лимба –  $1^\circ$ .

В плоскости лимба на подвижной, вращающейся вместе с анализатором, втулке, имеются два нониуса – левый и правый. Каждый нониус разделен на 10 делений. Минимальное значение величины отсчета по нониусу равно  $0.1^\circ$ .

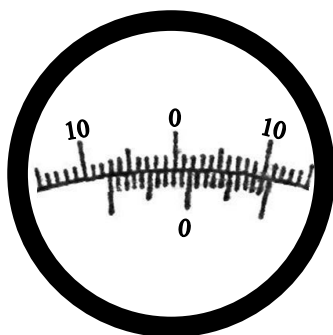


Рис. 5

### **Порядок выполнения**

1. Установите прибор на штативе без кюветы с раствором.
2. Дневной свет с помощью зеркала или свет от матовой электрической лампочки направьте в прибор, наблюдая через окуляр фотометрическое поле.

Вращая зеркало или перемещая прибор, добейтесь максимальной и равномерной освещенности поля зрения.

3. Перемещением окуляра добейтесь резкого изображения линий раздела поля.

### ***Определение нулевого положения прибора***

Определение нулевого отсчета производят без кюветы или с кюветой, наполненной водой.

1. Подготовьте прибор к работе.
2. Вращая оправу анализатора, установите фотометрическое равновесие в его чувствительном положении, которое характеризуется тем, что: части поля уравнены при минимальных яркостях (затемнены); незначительное вращение анализатора вызывает резкое изменение освещенности наблюдаемых частей поля.

При этом в поле зрения не должно наблюдаться окрашивания одной части поля относительно другой и не должна быть заметна резкая граница сторон кварцевой пластинки.

Если в поле зрения наблюдается окрашивание, то необходимо немного отжать покровные стекла трубки (если установка нуля происходит с трубкой), так как окрашивание поля зрения в данном случае получается за счет возникших натяжений в покровных стеклах трубки.

Наличие резких границ кварцевой пластинки может происходить от неправильной установки зеркала.

3. Снимите по нониусу нулевой отсчет. Если нулевой штрих нониуса при установке на равенство оказался смещенным относительно нулевого штриха лимба по часовой стрелке, то поправке на "0" приписывается знак (+), если против часовой стрелки знак (-).

4. Определение нулевого положения следует произвести не менее 5-7 раз и записать соответствующие отсчеты *in* по нониусу. Найти среднее значение.

### ***Определение угла вращения плоскости поляризации***

1. Подготовьте прибор к работе и снимите нулевой отсчет с трубкой, наполненной дистиллированной водой. Запишите в тетрадь все измерения, среднее значение.

2. Заполните трубку исследуемым раствором и установите ее в приборе.

3. Поворотом анализатора вновь установите фотометрическое равенство.

4. Определение угла вращения плоскости поляризации рекомендуется вести в следующем порядке:

а) определить знак угла поворота;

б) определить число полных градусов - от нуля лимба до нуля нониуса;

в) определить дробную часть угла поворота. Для этого подсчитайте число делений нониуса от нуля нониуса до того штриха нониуса, которое совпадает с каким-либо градусным штрихом лимба и умножьте полученное число делений нониуса на  $0.1^\circ$ .

г) к числу градусов прибавьте отсчет по нониусу.

Запишите значение угла.

5. Из полученного среднего значения угла поворота вычтите нулевой отсчет.

Таблица 1

№ опыта	Измерено
1	
2	
3	
4	
$V_{\text{ср}}$	

### **Определение неизвестной концентрации вещества**

Если удельное вращение  $\alpha_0$  вещества (см. табл. 1) при данной температуре для оранжевого света известно, то измерив, угол поворота плоскости поляризации раствором, можно найти его концентрацию:

Таблица 2

Вещество	Растворитель	$\alpha_0$
Сахар тростниковый	вода	66,4
Глюкоза	вода	52,5
Скипидар	вода	-37
Никотин	вода	-164
Миндальная кислота	вода	156

$$C = \frac{\varphi}{\alpha_0 \times l}$$

где  $l$  – толщина слоя раствора;

$C$  – концентрация раствора (массовая доля активного вещества в %);

$\alpha_0$  – коэффициент, называемый удельным вращением вещества (в градусах);

$\varphi$  – угол поворота плоскости поляризации.

#### **Пример:**

$\Phi = 10^\circ$ ;  $\alpha_0 = 66,4^\circ$  (сахар тростниковый);  $l = 1$  дм;

$$C = \frac{10}{1 \cdot 66,4} \cdot 100\% = 7,5\%$$

### **Контрольные вопросы**

1. Какие вещества называются оптически активными?
2. От чего зависит угол поворота плоскости поляризации?
3. В чем заключается преимущество полутеневого метода определения угла поворота плоскости поляризации?

## Лабораторная работа № 7

### ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

**Цель работы:** исследовать зависимость фототока от величины приложенного к фотоэлементу напряжения; исследовать зависимость фототока от освещенности фотокатода.

**Приборы и принадлежности:** вертикальный штатив, источник света, фотоэлемент, микроамперметр, измерительная линейка, реостат, вольтметр, выпрямитель.

#### Введение

Фотоэлектрическим эффектом называется совокупность явлений, наблюдаемых при взаимодействии света с веществом и заключающихся в изменении электропроводности этого вещества, либо в выходе электронов за его пределы.

Различают внешний и внутренний фотоэффекты. При внутреннем фотоэффекте изменяется электропроводность облучаемого вещества. При внешнем фотоэффекте электроны выходят за пределы облучаемого вещества. В настоящей работе изучается внешний фотоэффект.

Фотоэффект был обнаружен в 1887 году Генрихом Герцем и детально изучен А.Г. Столетовым.

Если составить цепь из батареи, амперметра и двух металлических дисков - сплошного в качестве катода и сетки в качестве анода (рис. 1), и сквозь сетку поверхность металла осветить, в цепи потечет электрический ток, называемый фототоком.

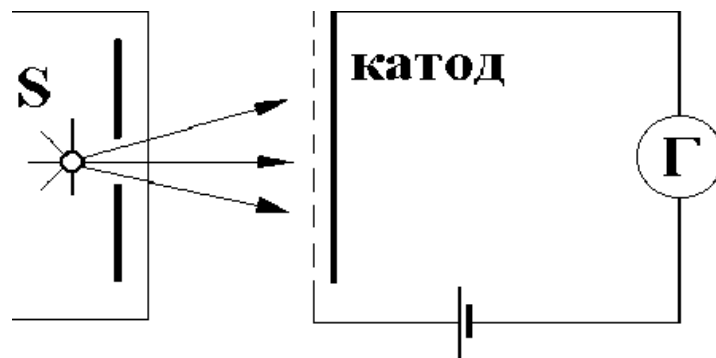


Рис. 1 – Схема наблюдения фототока

При поглощении света из поверхности катода вырываются электроны; они и переносят заряды между электродами, замыкая цепь. Если опыт ставится в воздухе, фотоэлектроны могут ионизировать молекулы газа, и ионы примут участие в образовании тока.

Зависимость фототока от напряжения на электродах показана на рис. 2. Из графика видно, что при некотором  $U > 0$  сила фототока достигает максимального значения. Этот ток называется *током насыщения*  $I_n$ . При этом все электроны, покинувшие катод, достигают анода.

Фототок может наблюдаться и при  $U = 0$ . Электроны в момент выхода из металла уже имеют скорость, за счет которой и могут достигать анода без ускоряющего внешнего поля. Если это объяснение справедливо, то прекратить фототок можно, лишь наложив на сетчатый электрод отрицательный потенциал (рис. 2).

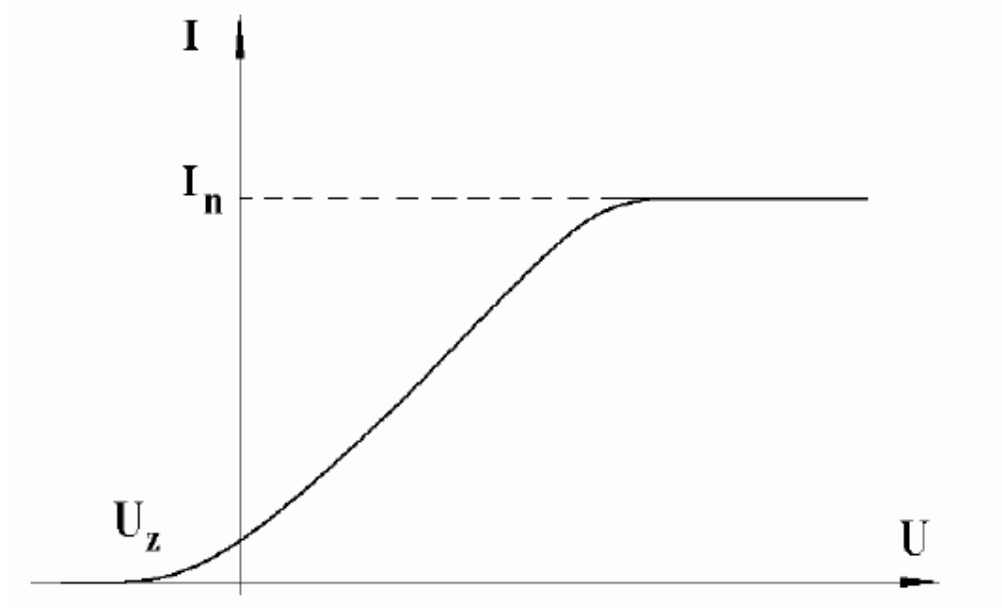


Рис. 2 – Вольтамперная характеристика фотоэлемента.

Теперь электрическое поле между электродами будет замедлять электроны и ток прекратится, если работа перемещения электрона от катода до сетки равна кинетической энергии, с которой электрон выходит из катода, т.е.

$$\frac{mv_0^2}{2} = eU_z. \quad (1)$$

Здесь  $U_z$  – разность потенциалов между электродами в момент прекращения фототока (задерживающий потенциал),  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $v_0$  – максимальная скорость, с которой электроны выходят из металла.

Закономерности фотоэффекта установлены экспериментально А.Г. Столетовым.

1. Фототок насыщения пропорционален падающему на катод световому потоку  $\Phi$ .

2. Существует минимальная частота (или максимальная длина волны света  $\lambda_0$ ), ниже которой фототока нет при любом значении светового потока. Эта частота или длина волны  $\lambda_0$  называется *"красной границей" фотоэффекта*.

Если длина волны  $\lambda$  короче  $\lambda_0$ , то уже слабые световые потоки вызывают появление фототока. Но если  $\lambda > \lambda_0$ , то даже самые мощные световые потоки фотоэффекта не вызывают.

Для большинства чистых металлических поверхностей красная граница фотоэффекта лежит в области ультрафиолетовых лучей; например, для серебра  $\lambda_0 = 0,261$  мкм, у щелочных металлов – в видимой области спектра, например, для натрия  $\lambda_0 = 0,540$  мкм. Граничная частота некоторых полупроводников лежит в инфракрасной области.

3. Максимальная энергия фотоэлектронов, вылетающих из катода, линейно возрастает с частотой падающего света и не зависит от его интенсивности.

Закономерности фотоэффекта не могут быть объяснены волновой теорией света. Так, нельзя понять, почему мощные световые потоки с частотой ниже красной границы фотоэффекта не вырывают электронов, в то время как слабые световые потоки с частотой выше красной границы вызывают появление фототока. Основные закономерности фотоэффекта получают полное объяснение в квантовой теории света, развитой в 1905 году А. Эйнштейном.

Основные положения этой теории заключаются в следующем:

1. Излученный, согласно гипотезе М. Планка, квант света с энергией  $h\nu$  сохраняет свою индивидуальность в процессе распространения света и, попадая в вещество, передает свою энергию электрону.

2. За счет поглощенной энергии кванта электрон способен совершить работу против сил, удерживающих его в веществе (работу выхода  $A$ ) и вылететь за пределы фотокатода.

На основании закона сохранения энергии вылетающий электрон обладает остаточной кинетической энергией

$$\frac{mv_0^2}{2} = h\nu - A, \quad (2)$$

где  $v_0$  – максимальная скорость электронов.

Откуда следует

$$h\nu = \frac{mv_0^2}{2} + A \quad (3)$$

– уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: энергия фотона расходуется на работу выхода и на сообщение электрону кинетической энергии.

Развитая Эйнштейном теория полностью объясняет все закономерности фотоэффекта.

1. *Первый закон Столетова* – пропорциональность тока насыщения (т.е. числа фотоэлектронов) световому потоку объясняется тем, что энергия светового потока равна числу квантов в потоке света. Следовательно, с увеличением числа падающих на поверхность катода квантов увеличивается и число выбитых ими электронов.

2. Зависимость кинетической энергии электронов от частоты падающего света следует из формулы (2).

Из формулы (2) следует также, что при частоте света  $\nu = \nu_0$ , при которой энергия фотона равна работе выхода  $A$ , кинетическая энергия электрона станет равной нулю и фотоэффект наблюдаться не будет.

Частота  $\nu_0$  и соответствующая ей длина волны  $\lambda_0 = c/\nu_0$  есть красная граница фотоэффекта для данного вещества.

Для ее вычисления в формуле (2) надо положить  $\frac{mv_0^2}{2} = 0$ .

Тогда  $\nu_0 = A/h$ .

## Приборы и методы измерений

В данной работе изучается внешний фотоэффект с помощью фотоэлемента.

*Фотоэлемент* – стеклянный баллон (рис. 3), внутри которого два электрода: анод в виде проволочной петли и катод – серебряная пленка на стекле, покрытая с внутренней стороны светочувствительным слоем. В баллоне – вакуум. При падении света в цепи течет фототок.

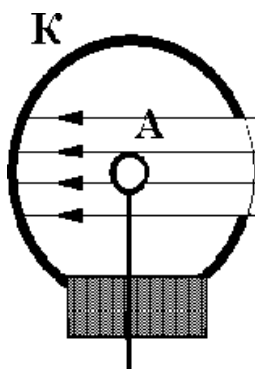


Рис. 3 – Устройство фотоэлемента

Фотоэлемент применяется для преобразования световых сигналов в электрические в автоматике, телемеханике, в звуковом кино, в лабораторной практике, при фотометрических и других измерениях, при исследовании космических и ядерных излучений и т.п.

Красная граница фотоэффекта чистых металлов лежит в ультрафиолетовой области спектра и лишь у щелочных и щелочноземельных металлов – в видимой области спектра.

Можно подобрать полупроводники, чувствительные ко всему видимому спектру и к инфракрасным лучам. Поэтому светочувствительный слой делают из полупроводников, например, из соединения сурьмы и цезия.

Красная граница сурьмяно-цезиевого фотоэлемента лежит около  $\lambda_0$ , максимум чувствительности приходится на зеленые лучи, чувствительность к белому свету от 50 до 150 микроампер на люмен.

Кроме вакуумных применяют также газонаполненные фотоэлементы, чувствительность которых в 10 раз больше вакуумных. Баллон наполняется газом аргоном при давлении от 0,01 до 0,1 мм. рт. ст. Электрический ток в цепи усиливается за счет ионизации газа фотоэлектронами.

Второй способ усиления фототока – использование вторичной электронной эмиссии.

Фотоэлектроны электрическим полем направляются на специальной электрод, из которого они освобождают вторичные электроны, направляемые на анод. Усиление получается потому, что при надлежащем выборе материала электрода число вторичных электронов больше, чем фотоэлектронов. Подобные приборы называют однокаскадными фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Изготавливают также многокаскадные ФЭУ. Их чувствительность доходит до 10 ампер на люмен и более.

Работа выполняется при помощи специальной установки, на которой закреплен фотоэлемент и источник света, а также микроамперметр. Чтобы устранить влияние рассеянного света, фотоэлемент вделан в цилиндрическую оправу. Оправа имеет крышку, которую следует снимать только при измерениях.

### Порядок выполнения работы

1. Проверить установку приборов: ось оправы фотоэлемента и нить лампочки должны лежать на одной вертикальной оси. При передвижении фотоэлемента на его чувствительную поверхность не должно падать никаких теней.
2. Собрать цепь по схеме (рис. 4).

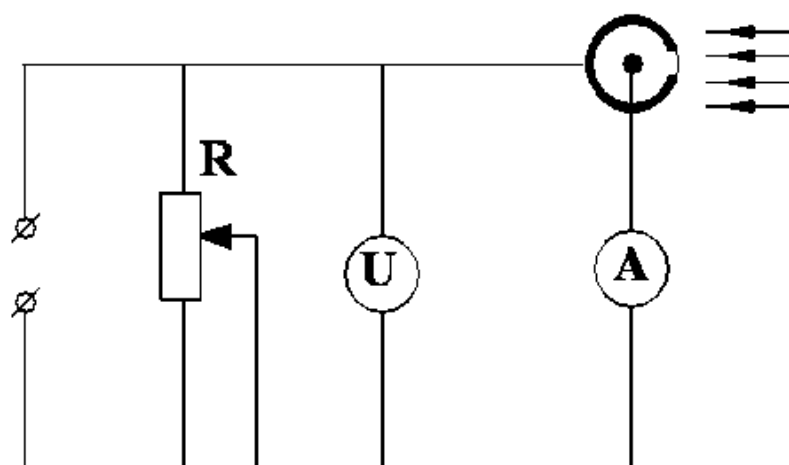


Рис. 4 – Схема установки

3. Последовательно устанавливая расстояния  $r_1 = 50$  см,  $r_2 = 45$  см,  $r_1 = 40$  см от источника света до фотоэлемента, снять зависимость фототока от величины приложенного напряжения.

Меняя напряжение через 25 В, достигнуть максимального значения фототока  $I_n$  который соответствует току насыщения.

Результаты записать в таблицу 1.

### Обработка результатов измерений

1. По данным таблицы 1 построить семейство вольтамперных характеристик фотоэлемента, откладывая  $U$  по горизонтальной оси.

2. Используя формулу

$$\Phi = \frac{I_c S}{r^2}$$

где  $S$  – площадь фотокатода ( $S = 10$  см<sup>2</sup>),

$I_c$  – сила света источника ( $I_c = 100$  кд).

Определить величину светового потока  $\Phi$ , соответствующего различным установкам  $r$ .

Используя данные таблицы 2, построить зависимость фототока насыщения  $I_n$  от величины светового потока  $\Phi$ .

3. Подсчитать интегральную чувствительность фотоэлемента  $\gamma = I_n/\Phi$  [А/лм].

$r_1 = 50$  см

$\Phi_1 =$

Таблица 1

$U$	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225
$I$										

$r_2 = 45$  см

$\Phi_2 =$

Таблица 1

$U$	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225
$I$										

$$r_3=40 \text{ см}$$

$$\Phi_3=$$

Таблица 1

$U$	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225
$I$										

Таблица 2

$r$ (см)	50	45	40
$\Phi$ (лм)			
$I_n$ (мкА)			

### Контрольные вопросы

1. Что называется фотоэффектом?
2. Какие законы фотоэффекта установлены А.Г. Столетовым?
3. Как объяснил сущность фотоэффекта А. Эйнштейн?
4. Что такое красная или длинноволновая граница фотоэффекта?
5. Как фотоэффект подтверждает квантовую природу света?
6. Что из себя представляет вакуумный фотоэлемент?
7. Что такое ФЭУ?
8. Что такое внешний и внутренний фотоэффект?

### Литература

1. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. 3, 1968, § 9.
2. Т.И. Трофимова, Курс физики, 1985, § 202-204.
3. Н.П. Калашников, М.А. Смондырев, т. 2, 2003, § 28.2.

*Учебное издание*

Антошкин А.А.,  
Иванов В.П.,  
Хафизов Р.С.,  
Окунев А.Ю.

**Физика**

**ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ  
ОПТИКА**

*Практикум  
для выполнения лабораторных работ*

Специальности и направления подготовки:  
21.03.02 – Землеустройство и кадастры  
21.03.03 – Геодезия и дистанционное зондирование  
21.05.01 – Прикладная геодезия

*Издано в авторской редакции*

*Редакционно-издательский отдел ГУЗ*

Подписано в печать 16.05.19. Сдано в производство 26.06.19.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 4 п.л., 3,55 уч.- изд.  
Бумага офсетная. Тираж 100. Заказ № \_\_\_\_\_

---

Отдел издательства ГУЗ  
Москва, ул. Казакова, 15





