

И.Н. ФЕТИСОВ

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

*Методические указания к лабораторной работе О-60
по курсу общей физики
2009*

ВВЕДЕНИЕ

На границе раздела двух прозрачных сред свет частично отражается, а частично проходит во вторую среду. Отношение интенсивностей этих двух компонент зависит от угла падения и от скорости распространения света в этих средах.

Если во второй среде свет распространяется быстрее, чем в первой, то существует замечательное явление – *полное внутреннее отражение* света от границы раздела [1, 2].

Это явление, известное давно, используется в оптических приборах (отражательные призмы в бинокле и т.п.). Во второй половине 20 в. стала развиваться *волоконная оптика* – раздел оптики, в котором изучается распространение оптического излучения по волоконному световоду, на поверхности которого происходит полное отражение [3, 4]. Сначала стекло было недостаточно прозрачным, поэтому длина световода составляла порядка одного метра. Такие световоды нашли применение для освещения труднодоступных объектов, а жгуты из очень большого числа тонких стеклянных волокон стали использоваться для передачи изображений в технической и медицинской эндоскопии (например, при обследовании желудка).

Второе рождение волоконной оптики произошло, когда были разработаны волоконные световоды на основе очень чистого плавленого кварца. Они пропускают 50% света на длине несколько километров. Эти световоды используются в системах *оптической связи*.

Цель работы – ознакомиться с явлением полного внутреннего отражения света и его использованием в волоконной оптике; исследовать угловую характеристику световода; продемонстрировать работу оптической линии связи.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электромагнитные волны в зависимости от длины волны подразделяют на различные виды (диапазоны). Оптическим излучением называют видимый участок спектра ($\lambda = 0,4 - 0,75$ мкм) и примыкающие к нему ультрафиолетовое (УФ) и инфракрасное (ИК) излучения.

Волновой поверхностью называют поверхность одинаковой фазы волны. Лучами называют линии, перпендикулярные волновой поверхности и указывающие направление распространения энергии волны.

В вакууме все электромагнитные волны распространяются с одинаковой скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. В веществе оптическое излучение распространяется медленнее, чем в вакууме, и его скорость u зависит от вещества и длины волны. Отношение

$$n = c/u$$

называют *абсолютным показателем преломления* данной среды. Обычно показатель преломления приводят для желтого света с $\lambda = 589$ нм. Для примера, показатель преломления равен 1,004 - для воздуха, 1,33 - для воды, 1,5 - 1,8 - для различных марок стекла. Среда с более высоким показателем преломления называется оптически более плотной.

В одном и том же веществе скорость света (показатель преломления) зависит от длины волны. Это явление называют *дисперсией света*. С уменьшением длины волны показатель преломления возрастает (нормальная дисперсия).

Электромагнитные волны обладают *двойственной природой*: волна - частица. При испускании и поглощении они ведут себя скорее как частицы, а не волны. Например, фотоэффект объясняется корпускулярной природой света. В таких явлениях, как интерференция, дифракция и поляризация, свет представляет собой волну. С другой стороны, во многих случаях распространение света можно рассматривать как распространение не волны, а лучей. Этот подход составляет содержание так называемой *геометрической* или *лучевой оптики*. Рассматривать свет лучами можно, если длина волны много меньше, чем размеры препятствий, например, диаметра отверстия или толщины оптического волокна. Далее мы рассматриваем лучевое приближение.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно, т.е. световые лучи представляют собой прямые линии (*закон прямолинейного распространения света*).

Если луч падает на гладкую границу раздела двух прозрачных сред, то наблюдаются явления отражения и преломления света (рис. 1). Углом падения α называют угол между падающим лучом и перпендикуляром AB , восстановленным к поверхности в точке падения луча.

Закон зеркального отражения света: луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения.

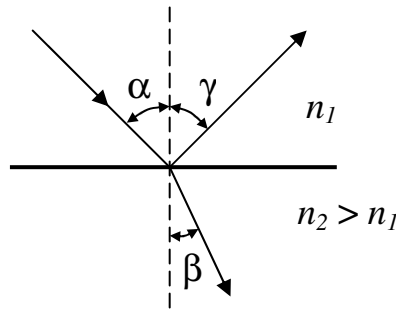


Рис. 1. Отражение и преломление света
границе раздела двух прозрачных сред

Закон преломления: луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр лежат в одной плоскости; углы падения и преломления связаны соотношением

$$\sin \alpha / \sin \beta = u_1 / u_2 = n_2 / n_1 \quad (1)$$

Если $n_2 > n_1$, то угол преломления меньше угла падения. С увеличением угла падения доля отраженного света возрастает, а прошедшего – уменьшается. При этом свет проходит во вторую среду при любых углах падения, вплоть до почти 90° .

Если вторая среда оптически менее плотная ($n_2 < n_1$), то угол преломления больше угла падения (рис. 2, а). Угол преломления увеличивается быстрее, чем угол падения. При некотором угле падения α_0 , называемым *предельным углом* полного внутреннего отражения, угол преломления достигает 90° и больше расти не может. При углах падения больше предельного происходит полное внутреннее отражение света – свет не выходит во вторую среду (рис. 2, б). По мере приближения угла падения α к предельному углу α_0 интенсивность преломленного пучка, непрерывно уменьшаясь, обращается в нуль. Интенсивность же отраженного пучка, непрерывно возрастая, становится равной интенсивности падающего пучка.

Отметим, что граница раздела двух веществ в случае полного отражения является более совершенным зеркалом, чем наилучшие металлические зеркала, где всегда происходит частичное поглощение энергии падающего пучка света.

Запишем закон преломления для предельного угла:

$$\sin \alpha_0 / \sin 90^\circ = n_2 / n_1.$$

Отсюда получаем выражение для предельного угла

$$\alpha_0 = \arcsin (n_2 / n_1). \quad (2)$$

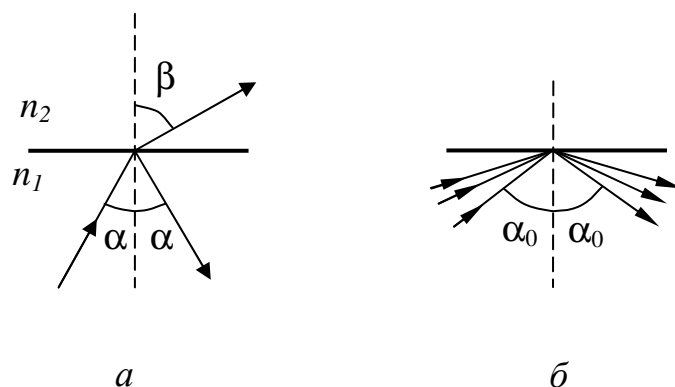


Рис. 2. Отражение и преломление света в случае, когда вторая среда оптически менее плотная ($n_2 < n_1$):

a – угол падения меньше предельного угла полного отражения α_0 ;

б – углы падения больше предельного, все лучи полностью отражаются

Например, если первая среда вода ($n_1 = 1,33$), а вторая – воздух ($n_2 = 1,004$), то $\alpha_0 = 49^\circ$. Свет не выходит из воды в воздух, если углы падения превышают 49° (рис. 2, *б*).

Волоконный световод в простейшем варианте представляет собой длинную гибкую нить круглого сечения, сердцевина которой из высокопрочного диэлектрика с показателем преломления n_1 окружена оболочкой с показателем преломления $n_2 < n_1$ (рис. 3). Диаметр сердцевины в зависимости от назначения световода варьируется от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

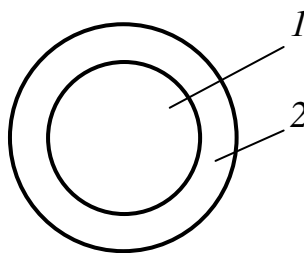


Рис. 3. Сечение волоконного световода:

1 – сердцевина с показателем преломления n_1 ;

2 – оболочка с показателем преломления $n_2 < n_1$

Распространение света по световоду обусловлено полным внутренним отражением света на границе сердцевина – оболочка (рис. 4). Световые лучи распространяются зигзагообразно. Такая картина имеет место, если диаметр сердцевины много больше длины волны. Однако имеются световоды, в которых эти величины одного порядка. Тогда вместо лучевого приближения необходимо рассматривать распространение волны определенного типа (т.н. одномодовые волоконные световоды).

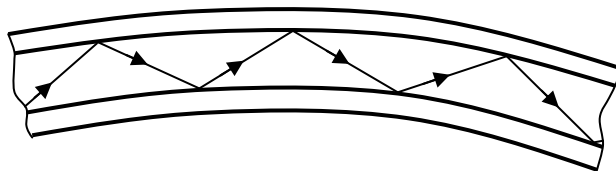


Рис. 4. Распространение луча света в волоконном световоде

Рассмотрим прохождение луча света в меридиональной плоскости, проведенной через ось и диаметр световода. На рис. 5 показана траектория луча, падающего на границу сердцевина – оболочка под предельным углом α_0 . При этом луч падает на торец световода под углом $\alpha_{кр}$, который назовем

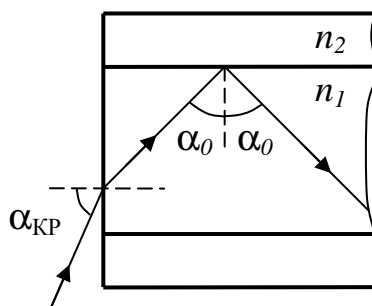


Рис. 5. К выводу формулы (3) для критического угла $\alpha_{кр}$

критическим углом. Все лучи, падающие на торец под углами меньше критического, будут полностью отражаться в световоде. Лучи, для которых $\alpha > \alpha_{кр}$, частично отражаясь на границе раздела, преломляются в оболочку и поглощаются внешним поглощающим покрытием. Такие лучи быстро выводятся из световода. Следовательно, угол $\alpha_{кр}$ является мерой способности световода захватывать свет.

Используя закон преломления, легко получить следующее выражение для критического угла:

$$\sin \alpha_{кр} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

Величина критического угла зависит от различия показателей преломления сердцевины и оболочки. Требуемая величина $\alpha_{кр}$ зависит от назначения световода. Например, в системах связи она может быть очень небольшой, при этом показатели преломления n_1 и n_2 различаются незначительно.

Рассмотрим некоторые физические факторы, влияющие на дальность оптической связи и скорость передачи информации.

Высокая прозрачность световода была получена с использованием очень чистого кварцевого стекла с добавками германия. Содержание некото-

рых вредных примесей было снижено до нескольких молекул на миллиард молекул основного вещества. Кварц обладает наибольшей прозрачностью не в видимом свете, а в ближнем ИК - диапазоне (от 0,8 мкм до 1,8 мкм). В таком световоде интенсивность ИК - излучения уменьшается примерно в 2 раза на каждый километр.

Информация передается по световоду в цифровой форме в виде коротких вспышек (импульсов) света. При этом двоичная единица отличается от нуля длительностью импульсов или к.-л. другим признаком. Чем короче импульсы и чем чаще они следуют, тем больше скорость передачи информации. Однако повышению частоты следования импульсов мешает *дисперсия* – зависимость скорости распространения света в материале световода от длины волны. Предположим, что источник света (лазер) обладает высокой монохроматичностью, т.е. энергия излучения сосредоточена в очень узком интервале длин волн. Это же излучение в виде коротких импульсов не столь монохроматично, его спектр занимает более широкий интервал $\Delta\lambda$ длин волн, который возрастает с уменьшением длительности импульсов. Вследствие дисперсии различные частотные составляющие спектра сигнала распространяются по световоду с различной фазовой скоростью, поэтому импульсы расширяются, начинают перекрываться, что приводит к потере информации.

Линии дальней оптической связи имеют промежуточные станции, на которых сигнал принимается, расшифровывается, а лазер на станции генерирует импульсы, повторяющие принятый сигнал. Эти импульсы передаются дальше по линии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная установка состоит из двух стендов. На стенде № 1 изучают угловую характеристику волоконного световода и определяют критический угол (см. формулу (3)). Стенд № 2 – демонстрационный.

В обоих стендах используются одинаковые световоды длиной 2 м и диаметром сердцевины 2 мм, изготовленные из полимерных материалов. Они пропускают 85% видимого света. Торцы световодов отполированы. Снаружи световоды защищены черным пластиком. Комплект из световода и мощного светодиодного источника света рекомендован изготовителем для светолечения в медицинской практике, а также для других целей.

Лабораторные задания

Задание 1. Наблюдать прохождение света по волоконному световоду.

1. Ознакомиться со стендом №2. Он состоит из волоконного световода, источника света (светодиода обычной яркости) и источника питания. Светодиод установлен вблизи торца световода. Свет, выходящий через другой торец световода и защитное стекло, наблюдают глазом.

Стенд в плане показан на рис. 6. Световод и светодиод находятся в корпусе 1. Светодиод работает от источника питания 4 напряжением 9 В, с сетевым выключателем 2 и индикаторной лампой 3. Резистор, ограничиваю-

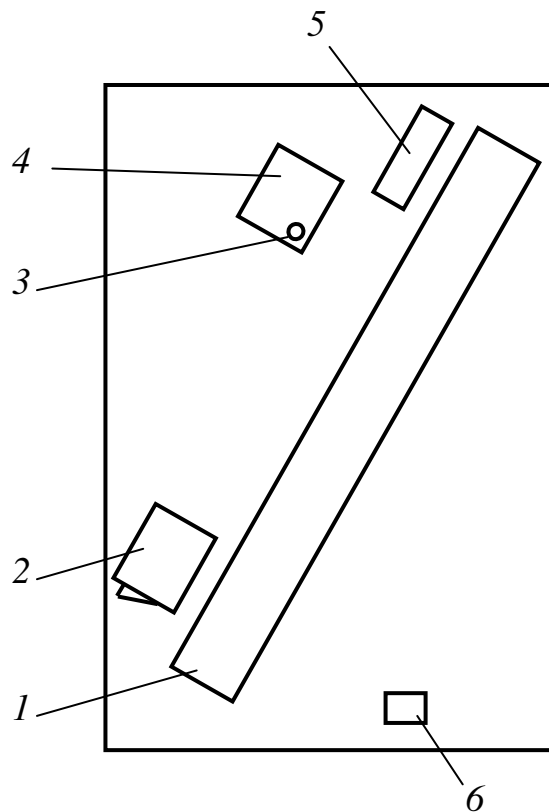


Рис. 6. Стенд №2: 1 – корпус с волоконным световодом и светодиодом; 2 - выключатель; 3 - световой индикатор; 4 - блок питания; 5 - резистор; 6 – кнопка включения светодиода

щий ток светодиода, находится в коробке 5. Светодиод включают кнопкой 6.

2. Включить питание стенда. Вставить вилку в сетевую розетку, выключатель 2 (рис. 6) установить в положение “ВКЛ”, при этом должна загореться индикаторная лампа 3.

3. Нажать и удерживать кнопку 6. При этом должен загореться красный светодиод, излучение которого наблюдать на другом конце световода.

Задание 2. Изучить угловую характеристику световода и определить критический угол.

1. Ознакомиться со схемой опыта (рис. 7). На входной торец 1 световода 2 падает широкий параллельный пучок света, угол падения α которого можно изменять и измерять. К выходному торцу 3 световода примыкает приемник света (фотодиод) 4. На $p-n$ – переход фотодиода подается обратное смещение 1,5 В от источника 5: минус источника подключен к p -области, а плюс – к n -области. Ток фотодиода измеряют микроамперметром (мультиметром) 6. В отсутствие света через фотодиод протекает маленький обратный (темновой) ток, который в условиях опыта может и не наблюдаться. При ос-

вещении фотодиода появляется ток, пропорциональный интенсивности (мощности) света.

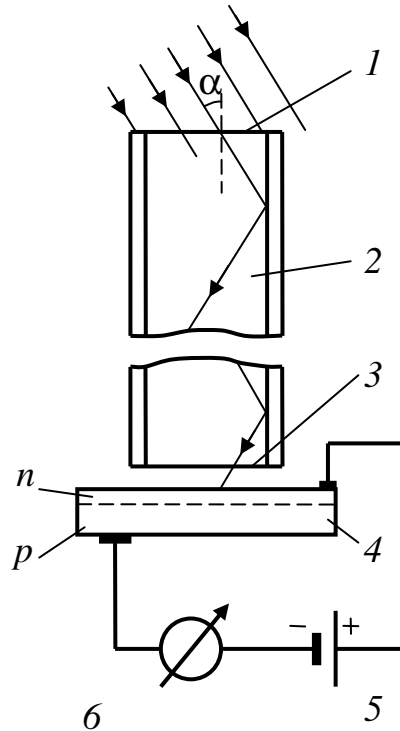


Рис. 7. Схема лабораторной установки для определения критического угла: 1 – входной торец световода; 2 – световод; 3 – выходной торец световода; 4 – фотодиод; 5 – батарея; 6 – микроамперметр

2. Ознакомьтесь со стендом № 1 (рис. 8). Светодиодный яркий источник света 1 и объектив 2 для получения параллельного пучка света закреплены на поворотном столике 3. Угол падения α пучка света на входной торец 4 световода 6 можно изменять, поворачивая столик 3 рычагом 5. Угол α измеряют по градусной шкале 12 напротив риски 11.

На выходном конце световода установлен фотодиод 14 с большой площадью чувствительной поверхности. Ток фотодиода измеряют цифровым мультиметром 10. Сетевой источник 13 питания светодиода включают выключателем 7. В отсеке 8 расположены гальванические элементы для питания мультиметра (9 В) и фотодиода (1,5 В). При измерении тока фотодиода нажать и удерживать два выключателя (кнопки) 9 для включения питания мультиметра и фотодиода.

3. Вставить вилку в сетевую розетку. Выключателем 7 включить источник света, при этом должно появиться яркое свечение.

4. Ознакомиться с установкой в рабочем состоянии. Нажать две кнопки 9 и, вращая столик с помощью рычага 5, наблюдать изменение тока фотодиода при изменении угла поворота.

5. Выключить источник света и, нажав две кнопки 9, измерить “темновой” ток приемника света (не более 1% максимального тока).

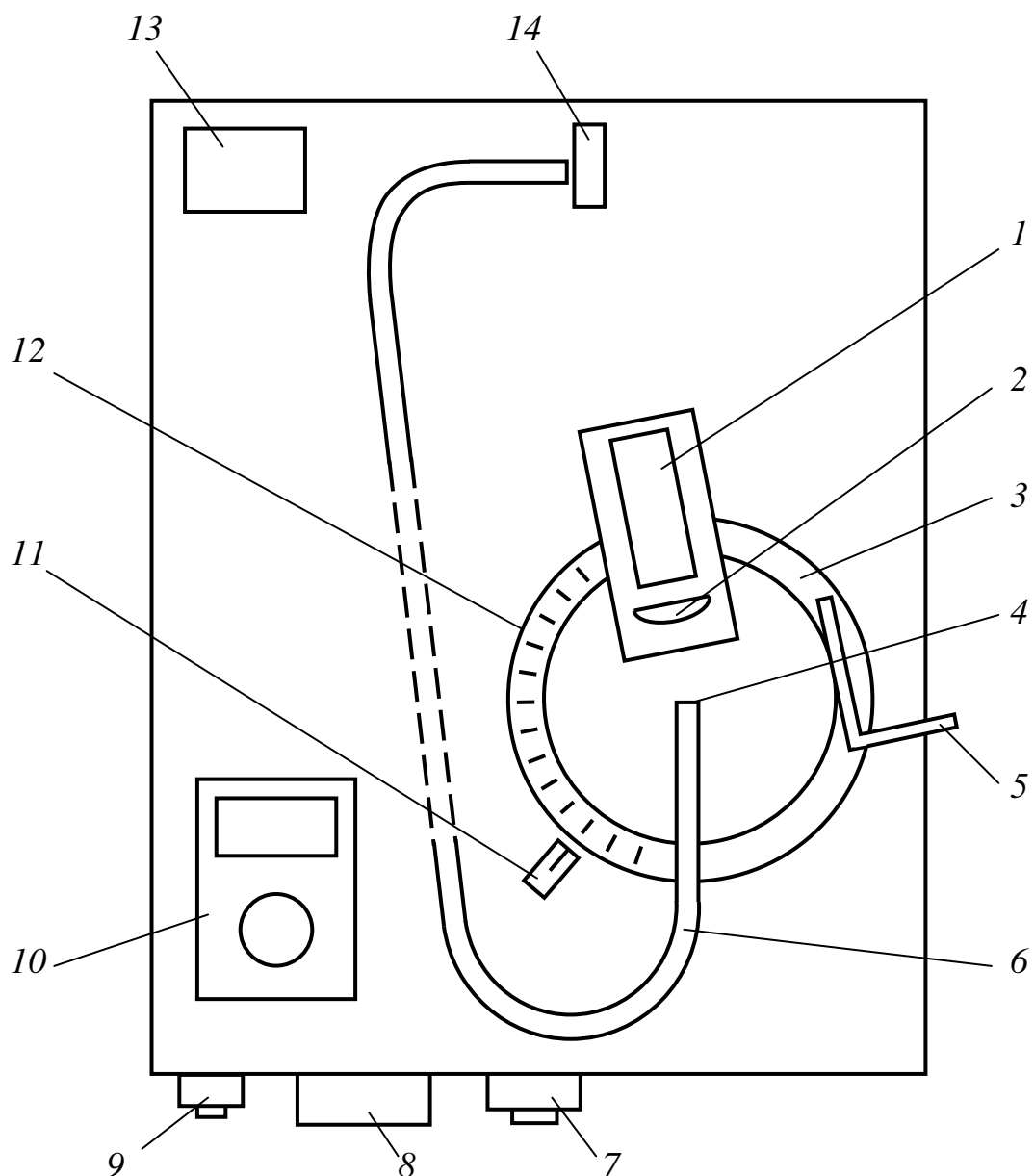


Рис. 8. Стенд №1: 1 – источник света; 2 – объектив (собирающая линза); 3 – поворотный столик; 4 – входной торец световода; 5 - ручка; 6 – волоконный световод; 7 – выключатель источника света; 8 – батарейный отсек; 9 – кнопки включения питания; 10 – мультиметр; 11 – риска; 12 – угломерная шкала; 13 – блок питания источника света; 14 - приемник света (фотодиод)

6. Включить источник света и измерить зависимость силы тока фотодиода от угла α . Угол изменять от нуля до максимального с интервалом 5° . Результаты измерений угла и тока I записать в табл. 1.

7. Все измерения повторить два раза.

8. Выключить источник света выключателем 7.

Результаты измерений

α , угл. град.	I	I	I	$\langle I \rangle$	$\langle I \rangle_{\text{отн}}$

Примечание. Таблица должна содержать 12 строк.

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения α вычислить среднее из трех измерений значение силы тока $\langle I \rangle$ и записать его в табл.1.

2. Вычислить среднее значение силы тока в относительных единицах $\langle I \rangle_{\text{отн}}$, приняв за 1 среднее при нулевом угле. Величину $\langle I \rangle_{\text{отн}}$ принимаем за интенсивность света на выходе из световода.

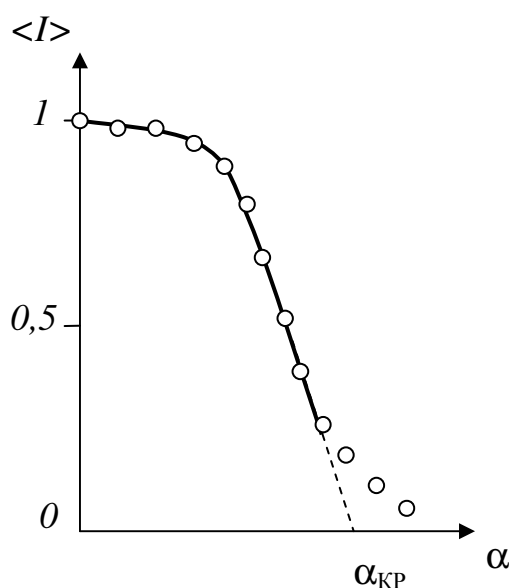


Рис. 9. Пример графического представления результатов измерения

3. Построить графическую зависимость $\langle I \rangle_{\text{отн}}$ от угла α .

4. Экстраполяцией крутого участка графика определить критический угол $\alpha_{\text{кр}}$, как показано для примера на рис. 9.

5. Вычислить по формуле (3) отношение n_2 / n_1 показателей преломления материалов оболочки и сердцевины световода; показатель преломления сердцевины $n_1 = 1,49$. Результаты привести в табл. 2.

Таблица 2

$\alpha_{\text{кр}} =$	$n_2 / n_1 =$
------------------------	---------------

Задание 3. Передать сообщение по оптической линии связи

Волоконные световоды широко используются для передачи информации (интернет, телевидение и т.д.). Для этого информация должна быть преобразована в цифровую (двоичную) форму. Двоичный “ноль” отличается от

“единицы” либо величиной сигнала, либо его длительностью или другим признаком.

Простым двоичным кодом для передачи текста является азбука Морзе (см. табл. 3), в которой двоичным нулем служит короткий сигнал (“точка”), а двоичной единицей – более продолжительный сигнал (“тире”).

Код Морзе имеет более короткие комбинации нулей и единиц по сравнению с кодом в компьютерах *IBM PC*. (При желании, студенты могут применить другой код или придумать собственный код.)

В электрическом классическом телеграфе сигнал распространяется по металлическому проводу в виде электромагнитной волны, вызывающей импульсы электрического тока на другом конце линии. В случае оптического телеграфа по волокну распространяются световые вспышки.

Таблица 3

Код Морзе

А = 01	К = 101	Ф = 0010	1 = 01111
Б = 1000	Л = 0100	Х = 0000	2 = 00111
В = 011	М = 11	Ц = 10101110	3 = 00011
Г = 110	Н = 10	Ч = 1111	4 = 0001
Д = 100	О = 111	Ш = 1101	5 = 00000
Е = 0	П = 0110	Щ = 1101	6 = 10000
Ж = 0001	Р = 010	Ъ, Ъ = 1001	7 = 11000
З = 1100	С = 000	Ы = 1011	8 = 11100
И = 00	Т = 1	Э = 00100	9 = 11110
Й = 0111	У = 001	Ю = 0011	0 = 11111
		Я = 0101	

Порядок выполнения задания. Задание выполняют на стенде №2, в котором выключатель б (рис. 6) служит телеграфным ключом.

Один студент составляет короткий текст, кодирует его и передает по волокну другому студенту. Нулю соответствует короткая вспышка света, единице – длинная. Интервалы между буквами должны быть более длинными, чем между двоичными знаками.

Другой студент принимает телеграмму, записывая комбинации нулей и единиц, а затем ее расшифровывает. По результатам работы составить отчет.

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Какая связь между показателем преломления среды и фазовой скоростью света?
3. Что такое полное внутренне отражение света? При каких условиях оно имеет место?
4. Что такое угол полного внутреннего отражения?
5. Как устроен волоконный световод?

6. Какие преимущества имеет стеклянный световод с полным отражением от такого же световода с металлическим отражающим покрытием?
7. Что такое критический угол световода?
8. Вывести формулу (3) для критического угла.
9. Какие физические факторы влияют на скорость и дальность передачи информации по световоду?

Список рекомендуемой литературы

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. т.2. М., 1978 г., 480 с.
2. *Бутиков Е. И.* Оптика. М.: Высш. шк., 1986. – 512 с.
3. Физическая энциклопедия (в 5-ти т.). Т. 1. 1998. 704 с. Статья “Волоконная оптика”.
4. *Капани Н.* Волоконная оптика. М.: Мир, 1969. – 464 с.