

Лабораторная работа №1

Изучение явления полного внутреннего отражения в оптическом волокне

Цель работы:

1. Изучение основ геометрической оптики.
2. Изучение явления полного внутреннего отражения.
3. Знакомство с основами передачи сигнала по оптическому волокну.
4. Измерение апертуры оптических волокон.
5. Определение режима распространения излучения в оптическом волокне.

1.1. Законы геометрической оптики

С давних времен известны четыре основных закона:

- закон прямолинейного распространения света,
- закон независимости световых лучей,
- закон отражения света,
- закон преломления света.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Это вытекает из того, что непрозрачные предметы при освещении их источниками малых размеров дают тени с резко очерченными границами. Закон прямолинейного распространения является приближенным; при прохождении света через очень малые отверстия наблюдаются отклонения от прямолинейности, тем большие, чем меньше отверстие.

Независимость световых лучей заключается в том, что они при пересечении не возмущают друг друга. Пересечения лучей не мешают каждому из них распространяться независимо друг от друга.

При прохождении света через границу двух прозрачных веществ падающий луч разделяется на два – отраженный и преломленный (рис. 1.1). Направления этих лучей определяются законами отражения и преломления света (законами Снеллиуса).

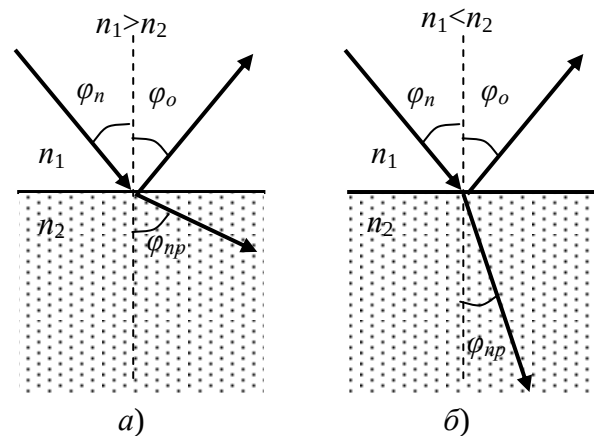


Рис. 1.1. Падение света на границу раздела двух сред при $n_1 > n_2$ (а) и при $n_1 < n_2$ (б)

Закон отражения света гласит, что *отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения. Угол отражения равен углу падения;*

$$\varphi_n = \varphi_o . \quad (1.1)$$

Закон преломления света формулируется следующим образом: *преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных веществ:*

$$\sin \varphi_n / \sin \varphi_{np} = n_2 / n_1 , \quad (1.2)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления первой и второй среды соответственно.

Из закона отражения света следует закон обратимости (или взаимности) световых лучей: *если навстречу лучу, претерпевшему ряд отражений и преломлений, пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, что и первый (прямой) луч, но в обратном направлении.*

1.2. Полное внутреннее отражение. Распространение света в оптическом волокне

При падении света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную ($n_1 > n_2$) можно наблюдать явление полного внутреннего отражения (рис. 1.2).

По второму закону Снеллиуса:

$$\sin \varphi_n / \sin \varphi_{np} = n_2 / n_1 .$$

Если $\varphi_{np} = \pi/2$, т.е. $\sin \varphi_{np} = 1$, то

$$\varphi_n = \arcsin(n_2 / n_1) , \quad (1.3)$$

Угол падения, определяемый выражением (1.3), называется критическим углом или углом Брюстера θ_{Br} . При падении света под углом $\varphi_n = \theta_{Br}$ преломленный луч распространяется по границе раздела. При всех углах падения, больше угла Брюстера ($\varphi_n > \theta_{Br}$), преломленный луч отсутствует. Таким образом, при соблюдении условия $\varphi_n \geq \theta_{Br}$ луч распространяется в первой среде, не попадая во вторую. Полное внутреннее отражение возможно лишь при соблюдении условия $n_1 > n_2$. При $n_1 < n_2$ выполнение условия (1.3) невозможно (рис. 1.1, б).

Явление полного внутреннего отражения широко используется для передачи светового сигнала в волоконных световодах, в планарных световодах, а также в лазерах с распределенной обратной связью.

Передача волны по оптическому волокну осуществляется за счет многократных отражений от границы раздела сердцевины и оболочки с показателями преломления n_1 и n_2 .

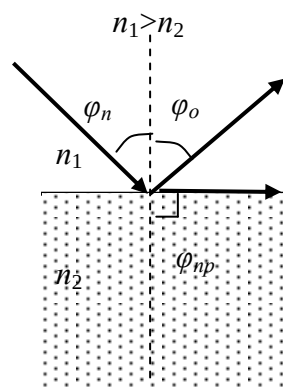


Рис. 1.2. Полное внутреннее отражение

По законам геометрической оптики на границе раздела сердцевина – оболочка будут находиться падающая волна AB с углом φ_n , отраженная BC с углом φ_o и преломленная BD с углом φ_{np} (рис. 1.3). При переходе из оптически более плотной среды в менее плотную (при $n_1 > n_2$) волна при определенном угле падения полностью отражается от границы раздела сред. Угол $\varphi_n = \theta_e$ называется *углом полного внутреннего отражения*:

$$\sin \theta_e = n_2 / n_1 = \sqrt{\mu_2 \varepsilon_2 / \mu_1 \varepsilon_1},$$

где $\mu_1, \varepsilon_1, \mu_2, \varepsilon_2$ – магнитные и диэлектрические проницаемости сердцевинны и оболочки.

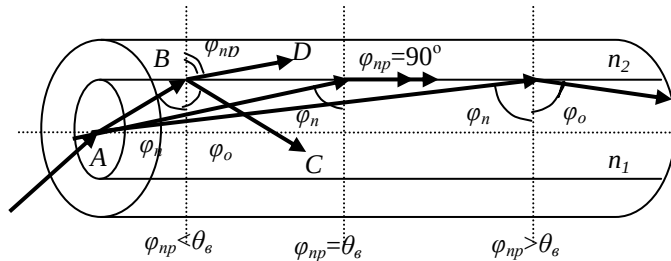


Рис. 1.3. Распространение лучей в оптическом волокне

При критическом угле $\varphi_n = \theta_e$ волна распространяется вдоль границы раздела сердцевина – оболочка и не излучается в окружающее пространство. При $\varphi_n > \theta_e$ волна полностью отражается и возвращается в исходную среду (сердцевину).

Таким образом, оптическое волокно пропускает свет, заключенный в пределах телесного угла θ_a , связанного с углом полного внутреннего отражения. Этот телесный угол характеризуется апертурой (рис. 1.4).

Апертура – угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волокна, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

Обычно пользуются понятием числовой апертуры NA :

$$NA = n_o \sin \theta_A = n_o \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где n_o – показатель преломления воздуха, так как $n_o = 1$, то

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.4)$$

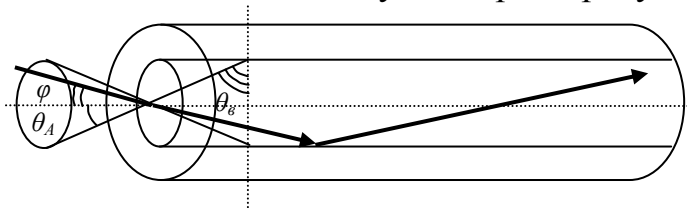


Рис. 1.4. Апертура оптического волокна

1.3. Моды в волоконных световодах. Одномодовый режим распространения излучения в волокне

В общем случае в волоконных световодах могут существовать три типа волн: *направляемые*, *вытекающие* и *излучаемые*. Преобладание какого-либо типа волн связано с апертурой и соотношением углов падения φ и полного внутреннего отражения θ_e (рис. 1.5).

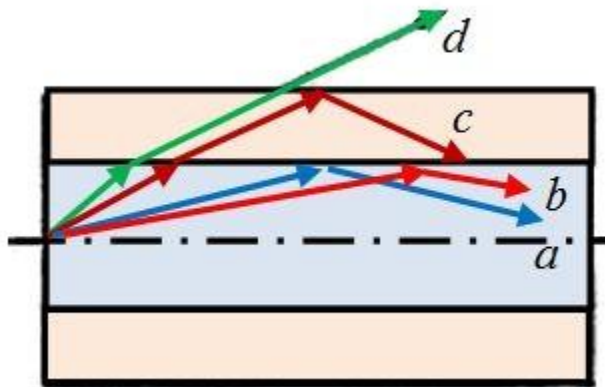


Рис. 1.5. Типы волн в ступенчатом волоконном световоде

Направляемые волны (НВ) (волны сердцевины, a , b) – основной тип волны, распространяющийся по световоду. Вся энергия сосредоточена внутри сердцевины световода и обеспечивает передачу информации. Направляемые волны возбуждаются при вводе лучей в торец световода под углом, большим угла полного внутреннего отражения ($\varphi > \theta_c$), то есть в пределах апертурного угла.

Излучаемые волны (ИВ) (пространственные волны, d) возникают при вводе под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения ($\varphi < \theta_c$), то есть вне апертуры. Вся энергия уже в начале линии излучается в окружающее пространство и не распространяется вдоль световода. Это приводит к дополнительным потерям энергии. ИВ также возникают в местах нерегулярностей световодов.

Промежуточное положение занимают *вытекающие волны* (ВВ) (волны оболочки, c). Энергия частично распространяется вдоль световода, а частично переходит в оболочку и излучается в окружающее пространство. Вытекающие волны образуются в основном за счет косых лучей и кривизны поверхности раздела сердцевины и оболочки.

Характер распространения электромагнитных волн в направляющих системах зависит, прежде всего, от класса волны, используемой для канализации энергии.

Кроме деления на классы электромагнитные волны делятся также на моды. Каждая мода представляет собой колебание, которое характеризуется определенной пространственной структурой электрического и магнитного поля и соответствующей постоянной распространения, т. е. *фазовой скоростью*. Любое оптическое излучение, распространяющееся по световоду, можно представить как суперпозицию мод. Их число может быть рассчитано, если известны длина волны, радиус сердцевины световода и разность показателей преломления сердцевины и оболочки.

Мода определяется сложностью структуры, то есть числом максимумов и минимумов электромагнитного поля в поперечном сечении, и обозначается

двумя индексами n и m . Индекс n в круглых волноводах означает число изменений поля по периметру волновода, а индекс m – число изменений поля по диаметру.

В волоконных световодах могут существовать два типа волн: симметричные E_{0m} и H_{0m} и несимметричные гибридные EH_{nm} и HE_{nm} . Наибольшее применение получила волна типа HE_{11} . На этой волне работают одномодовые световоды, имеющие наибольшую пропускную способность.

Представляет интерес сопоставление классификации электромагнитных волн с лучевой классификацией. По волоконным световодам возможно распространение двух видов лучей: *меридиональных* и *косых*. Меридиональные лучи проходят через ось световода, а косые – не пересекают ось световода и проходят по сложным траекториям. Меридиональным лучам соответствуют симметричные электрические E_{0m} и магнитные H_{0m} волны, косым – несимметричные гибридные волны HE_{nm} и EH_{nm} .

В волоконных световодах при очень высоких частотах почти вся энергия поля концентрируется внутри сердцевины, с уменьшением частоты происходит перераспределение поля и оно переходит в окружающее пространство. При определенной (*критической*) частоте f_0 , или *частоте отсечки*, волна больше не распространяется по световоду, и вся энергия рассеивается в окружающее пространство.

$$f_0 = g_1 a c / \left(\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right), \quad (1.5)$$

где $g_1 a = P_{nm}$ – корни бесселевых функций, являющихся решением уравнения распространения электромагнитной волны по световоду для различных мод.

Соответственно, *критическая длина волны*:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{\pi d}{g_1 a} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.6)$$

Можно отметить, что чем толще сердцевина световода и чем больше отличаются n_1 и n_2 , тем больше критическая длина волны и, соответственно, ниже критическая частота. При $n_1 = n_2$ $\lambda_0 = 0$, $f_0 = \infty$ и передача по такому световоду невозможна.

В выражения (1.5) и (1.6) входят корни бесселевых функций $g_1 a = P_{nm}$ (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Значения корней бесселевых функций для различных типов волн

Тип волны	n	$g_1 a = P_{nm}$		
		$m=1$	$m=2$	$m=3$
E_{0m}, H_{0m}	0	2,405	5,520	8,654
HE_{1m}	1	0,000	3,832	7,016
EH_{1m}	1	3,832	7,016	10,173
HE_{2m}	2	2,405	5,538	8,665
EH_{2m}	2	5,136	8,417	11,620

Из данных, приведенных в табл. 1.1, видно, что только одна волна (гибридная HE_{11}) имеет нулевое значение корня и, следовательно, она распространяется во всем диапазоне частот. Всем остальным волнам свойственны критические частоты отсечки f_0 , причем, чем больше индексы n и m , тем выше критическая частота.

Как уже отмечалось, по режиму распространения волоконные световоды делятся на *одномодовые* и *многомодовые*. Число мод зависит от соотношения диаметра сердцевин d и длины волны λ . С увеличением d число передаваемых мод резко возрастает. Для обеспечения *одномодового режима передачи* необходимо, чтобы $d \approx \lambda$.

Достоинства *одномодовых систем* – малая дисперсия (искажение сигналов), большая информационно-пропускная способность и большая дальность передачи. Одномодовые системы – наиболее перспективное направление развития техники передачи информации.

При *многомодовой передаче* из-за дисперсии импульс на приеме уширяется и искажается, что существенно ограничивает полосу передаваемых частот и дальность передачи.

При *одномодовой передаче* распространяется лишь один луч, и нет модовых искажений. Поэтому одномодовые световоды позволяют передавать большой объем информации на дальние расстояния.

Одномодовая передача реализуется на гибридной волне HE_{11} . Только эта волна имеет нулевое значение g_1a (при $n=1$ и $m=1$), следовательно, она не имеет критической частоты и может распространяться при любой частоте. Все другие волны имеют конечное значение g_1a , и они не распространяются на частотах ниже критической. Как видно из таблицы 71.1, интервал значений g_1a , при которых распространяется лишь один тип волн HE_{11} , находится в пределах $0 < g_1a < 2,405$. При выборе частоты передачи и диаметра сердцевин световода исходят из этого условия.

Подставляя в (1.5) и (1.6) значения $g_1a = 2,405$, получим

$$f_0 = \frac{2,405c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}.$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405}$$

Откуда предельный диаметр сердцевин для одномодовой передачи:

$$d_0 = \frac{2,405c}{\pi f \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{2,405\lambda}{\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}.$$

Число типов волн (мод) в световоде N зависит от диаметра сердцевин $2a$ и длины волны λ :

$$N = \frac{V^2}{2(1 + 2/u)}, \quad V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где V – *нормированная частота*, u – *показатель степени изменения ППП*:

а). для ступенчатого волокна ($u=\infty$):

$$N = \frac{1}{2}V^2 = 2\left(\frac{\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)^2,$$

б) для градиентного волокна ($u=2$):

$$N = \frac{1}{4}V^2 = \left(\frac{\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)^2.$$

Для одномодовых световодов $V < 2,405$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405. \quad (1.7)$$

Выполнение условия (1.7) является критерием одномодового режима распространения излучения в волокне.

1.4. Измерение апертурного угла оптического волокна

Апертурный угол можно определить на основании измерения угловой характеристики излучения волокна. Для этого в отрезок волокна длиной несколько метров вводится излучение от лазера. На выходе волокна на расстоянии 5 ... 20 мм от его торца измеряется под различными углами к оси волокна сканирующим фотодетектором относительная яркость излучения.

Для упрощения и наибольшей наглядности в данной лабораторной работе использован лазер с длиной волны $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ (видимый свет). При этом мы можем наблюдать световое пятно на экране, расположенном на расстоянии 5 ... 20 мм от выходного торца волокна.

В установке для измерения числовой апертуры волокна источником излучения служит полупроводниковый лазер. Лазерный луч проходит через конденсор (систему линз) с фокусным расстоянием $F=90 \text{ мм}$, обеспечивающий эффективный ввод излучения в образец. Далее с помощью вертикального юстировочного устройства с жестким креплением излучение направляется в оптическое волокно. На расстоянии L от выходного торца волокна установлен экран, на котором отражается лазерный луч в виде светового пятна. Экран выполнен из миллиметровой бумаги, что позволяет точнее определить размер пятна.

Числовую апертуру NA находят путем расчета угла расходимости пучка света, поступающего с выходного торца волокна. В соответствии с законом обратимости световых лучей этот угол равен апертурному. Измеряют диаметр пятна на экране, а затем, зная расстояние L между волокном и экраном, вычисляют числовую апертуру волокна по формуле:

$$NA = \frac{D}{2L} \quad (1.8)$$

Схема установки для измерения числовой апертуры изображена на рис. 1.6.

1.5. Задания на выполнение ЛР

1. Изучить основы геометрической оптики.
2. Изучить явление полного внутреннего отражения.
3. Познакомиться с основами передачи сигнала по оптическому волокну.
4. Рассчитать по формуле (1.8) числовую апертуру различных оптических волокон по измеренным значениям L и D , которые указаны в таблице 1.2. Номер варианта соответствует последней цифре в зачетной книжке. В каждом варианте надо провести расчеты для двух оптических волокон.

Таблица 1.2

Расчетные задания

№ варианта	№ задания	L , мм	D , мм	n_1	$d=2a$, мкм
1	1	5	2,2	1,45	8
	2	5	5,3	1,46	50
2	1	10	3,6	1,48	6
	2	10	11,0	1,45	50
3	1	15	5,7	1,45	7,5
	2	15	15,0	1,46	50
4	1	5	2,1	1,48	6,5
	2	5	5,8	1,45	50
5	1	10	4,0	1,45	7
	2	10	10,2	1,46	50
6	1	15	6,6	1,48	8
	2	15	15,9	1,45	50
7	1	5	1,8	1,45	6
	2	5	5,1	1,46	50
8	1	10	3,8	1,48	7,5
	2	10	10,4	1,45	50
9	1	15	6,3	1,45	6,5
	2	15	17,1	1,46	50
10	1	5	2,0	1,48	7
	2	5	5,0	1,45	50

5. По полученным значениям NA и предложенным значениям n_1 , a (также указанным в таблице 1) рассчитать сперва n_2 , а затем V по формулам (1.4) и (1.7). По значению V определить режим распространения излучения в данном волокне ($\lambda=0,65$ мкм).
6. Рассчитанные значения занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Рассчитанные параметры

№ варианта	№ задания	L , мм	D , мм	NA	n_1	n_2	a , мкм	V	Режим распространения
	1								
	2								

1.6. Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет оформляется в соответствии и требованиями СТО ИРНИТУ.005-2015 и СТО ИРНИТУ 027-2015.

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Результаты вычислений.
4. Выводы.
5. Ответы на контрольные вопросы.

1.7. Контрольные вопросы

1. Каковы законы геометрической оптики?
2. Что такое явление полного внутреннего отражения и где оно применяется?
3. Что такое апертура?
4. Как определяется числовая апертура?
5. Направляемые, вытекающие и излучаемые волны в световоде.
6. Какие классы и моды электромагнитных волн, распространяющихся в волоконных световодах?
7. Критическая частота и длина волны.
8. Основная мода, одномодовый режим передачи.
9. Максимальный диаметр сердцевины для одномодовой передачи.
10. Число волн, распространяющихся в световоде.
11. Нормированная частота.

1.8. Рекомендуемая литература

1. Леонова Н.В. Волоконно-оптические системы передачи. Курс лекций. - Иркутск, 2008. - 170 с.

2. Леонова Н.В. Физические основы оптоэлектроники. Курс лекций. - Иркутск , 2010. - 148 с.