

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие технологий производства систем и средств связи с практически неограниченной пропускной способностью и дальностью передачи, их массовое использование привели к формированию глобального информационного общества. Телекоммуникации сегодня — одна из самых быстроразвивающихся наукоемких и высокотехнологичных отраслей мировой экономики. При передаче информации стратегическим направлением считается дальнейший количественный рост пропускной способности используемых линий и узлов электро­связи за счет технологического развития оптических способов передачи и методов уплотнения по длине волны, переход к полностью оптическим сетям, а также расширение областей использования оптических способов передачи, вплоть до терминалов пользователей. Широкому внедрению оптических ЛС способствовали новые технологии в строительстве ВОЛП, к которым можно отнести технологию прокладки путем подвески ОК на опорах ЛЭП, электрифицированных ж/д, пневмопрокладки ОК в защитные пластмассовые трубы. Простота, быстрота и экономичность — вот основные достоинства этих технологий. Необходимость в специалистах, способных квалифицированно заниматься разработкой, проектированием, строительством и технической эксплуатацией в области электросвязи, постоянно растет.

В учебном пособии изложены особенности передачи информационных сигналов по оптическим линиям связи; физические процессы, возникающие при передаче оптического излучения; основные параметры передачи; особенности производства кварцевого волокна; конструкция оптических кабелей и пассивные компоненты оптических систем. Представлены основы проектирования волоконно-оптических линий связи, кратко представлено необходимое при проектировании содержание общей пояснительной записки, сметной документации и рабочих чертежей. Приведен перечень нормативно-технической документации, необходимой при проектировании. Дается описание количественных показателей надежности проектируемых ВОЛС.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», также оно будет полезно для слушателей курсов повышения квалификации, специалистов предприятий телекоммуникационного профиля.

# 1. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ ЛИНИЯМ СВЯЗИ

В последнее время одним из наиболее перспективных и развивающихся направлений построения сети связи в мире являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). В области систем передачи информации с большой информационной емкостью и высокой надежностью работы ВОЛС не имеют конкурентов. Это объясняется тем, что они значительно превосходят проводные по таким показателям, как пропускная способность, длина регенерационного участка, а также помехозащищенность. Понятие ВОЛС является собирательным. Оно включает приемники, передатчики оптического сигнала, оптический тракт, регенераторы и иное оборудование. В связи с этим волоконно-оптическую линию можно разделить на локальные и распределенные участки. Локальные участки включают в себя модуляторы, оптические передатчики и приемники, регенераторы. Распределенные участки (волоконно-оптические тракты) обладают наибольшей протяженностью [4, 5].

*Таблица 1.1*

**Основные преимущества и недостатки ВОЛС**

<b>Преимущества волоконной оптики</b>	<b>Недостатки волоконной оптики</b>
<p>Высокая несущая частота (<math>10^{14}</math> Гц), обусловленная широкой полосой пропускания. Благодаря этому осуществляется большой поток информации по 1 волокну (до нескольких терабит/с). Такая полоса пропускания является важным достоинством перед любой средой для передачи данных.</p> <p>Затухание сигнала выпускаемого сегодня оптоволокну достаточно мало (0,2–0,3 дБ). Такое затухание с небольшой дисперсией позволяет построить без ретрансляции линии, протяженность которых может составить более 100 км. К тому же кабель имеет низкий уровень шумов, за счет чего увеличивается полоса пропускания (для этого передается модуляция сигналов, имеющих малую избыточность кода).</p> <p>Защита от помех весьма высока, потому что изготовлено волокно из диэлектрического материала, которое не воспринимает электромагнитные помехи от различных возможных источников, способных индуцировать как-либо электромагнитное излучение. И в кабелях, имеющих множество волокон, не возникает перекрестное влияние электромагнитного излучения, что свойственно медным или же многопарным кабелям.</p>	<p>Цена на интерфейсное оборудование. Оно главным образом необходимо для преобразования электрических сигналов в оптические и обратно. Стоимость оптических приемников и передатчиков все же на сегодняшний день остается довольно большой. Для создания ВОЛС нужны высоконадежное коммутационное специализированное пассивное оборудование, аттенюаторы, оптические разветвители, соединители (оптические) с небольшими потерями и одновременно с этим с большим ресурсом на отключение-подключение.</p> <p>Обслуживание и установка оптических линий. Монтаж, тестирование и поддержка ВОЛС стоят недешево. В частности, если повреждается кабель, то требуется место разрыва соединить при помощи сварки и обеспечить защиту данному участку кабеля от внешней среды. Однако производителями постоянно поставляются усовершенствованные инструменты для устранения неполадок с ВОК, цены которых постепенно снижаются</p>

<b>Преимущества волоконной оптики</b>	<b>Недостатки волоконной оптики</b>
<p>ВОЛС имеют небольшой объем и вес. К примеру, 900-парный кабель телефона имеет диаметр 7,5 см, который можно заменить лишь одним волокном, диаметр которого 0,1 см. И даже защищенное волокно множеством оболочек имеет несравнимо малый диаметр, лишь 1,5 см.</p> <p>ВОК (волоконно-оптический кабель) прекрасно защищен. Он практически не имеет радиоизлучения, потому передаваемую информацию по нему довольно тяжело подслушать, не нарушив при этом прием или передачу сигнала. А система мониторинга при необходимости мгновенно подаст сигнал тревоги и отключит «взламываемый» канал.</p> <p>Гальваническая развязка различных элементов сети заключается в изолирующем свойстве волокна. А благодаря тому, что оптоволокно не может образовывать искры, существенно повышается пожаро- или взрывобезопасность. Это очень актуально для таких предприятий, как нефтеперерабатывающие или химические, с повышенным риском при определенных технологических процессах.</p> <p>ВОК достаточно экономичен, поскольку изготавливается из кварца, основа которого — двуокись кремния. Данный материал популярен и весьма доступен по стоимости в сравнении с медью. Цена волокна по отношению к медной паре соотносится как 2:5. ВОК при этом передает сигнал на большие расстояния. И количество повторителей существенно сокращается.</p> <p>Довольно длительный срок службы ВОЛС также относится к преимуществам. Деградацию, которую испытывает со временем волокно (возрастание затухания), значительно замедляют с помощью современных технологий. Таким образом, срок эксплуатации составляет до 25 лет, в течении которых может смениться не одно поколение приемных (передаточных) систем.</p> <p>Бывают случаи, когда необходимо удаленное питание (электрическое) узла сети. В этом случае ВОЛС прекрасно подойдут. Конечно, оптоволокно не выполнит функцию силового кабеля. Но здесь возможно использование смешанного кабеля (к оптоволокну «добавляют» медный проводящий элемент). Подобный кабель широко применяют и за рубежом</p>	<p>Специальные требования по защите волокна. Насколько прочным является оптоволокно? В теории этот материал очень прочен, стекло выдерживает (как материал) повышенные нагрузки, имеющие предел прочности на разрыв выше 1 Гпа. И теоретически это означает, что волокно диаметром 125 мкм в количестве 1 шт. сможет выдержать груз весом 1 кг. Однако практика таких результатов не показывает. Причиной этому служат имеющиеся микротрещины, инициирующие разрыв.</p> <p>Естественно, для повышения прочности и надежности этот материал в процессе изготовления подвергается специальной обработке, а именно: его покрывают лаком, основа которого составляет эпоксиакрилат, а сам кабель упрочняют (к примеру, нитями, основа которых — кевлар). Для того чтобы повысить прочность ВОК, его упрочняют стеклопластиковыми стержнями или же стальным специальным тросом. Однако все это приводит к большей цене кабеля</p>

Волоконно-оптический кабель представляет собой сложную конструкцию с несколькими слоями покрытия оптического волновода. Параметры его таковы, что в окружающем кабель пространстве информативное оптическое излучение практически не создает каких-либо электромагнитных полей диапазона, близкого к частоте модуляции.

## 1.1. Вопросы теории света

Раздел физики, занимающийся изучением природы света, закономерностей его испускания, распространения и взаимодействия с веществом, называется оптикой. В физике все виды материи разделяются по природе либо на *волны*, либо на *частицы*. Чаще всего свет представляется в виде волн, а электроны — в виде частиц, но современные физические исследования показали, что четкой границы между частицами и волнами не существует. Поведение как частицы, так и волны может быть и корпускулярным, и волновым [1–3, 31].

Частицы света называются фотонами. Фотоны представляют собой квант, или пакет излучения, который является элементарной единицей излучения. Количество энергии, переносимое квантом, зависит от его частоты: большие частоты соответствуют большему количеству энергии. Длинам волн фиолетового диапазона соответствует большее количество энергии, чем красному цвету, так как фиолетовому диапазону соответствуют большие частоты. Энергия  $E$  (в ваттах), запасенная в одном фотоне, равна

$$E = hf, \tag{1.1}$$

где  $f$  — его частота;  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,63 \times 10^{-34}$  Дж/с (Джоуль в секунду).

Из этого уравнения видно, что энергия фотона зависит только от его частоты (или длины волны). Энергия фотона пропорциональна частоте. Квант энергии света, заключенной в одном фотоне, равен  $hf$ .

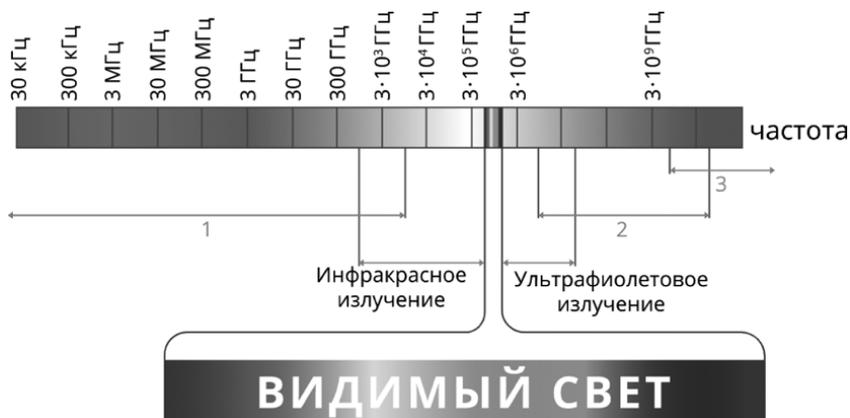
Чем выше частота, тем большую энергию имеет квант.

Инфракрасный свет	$(10^{13} \text{ Гц})$	$6,63 \times 10^{-20} \text{ Дж/с}$
Видимый свет	$(10^{14} \text{ Гц})$	$6,63 \times 10^{-19} \text{ Дж/с}$
Ультрафиолетовый свет	$(10^{15} \text{ Гц})$	$6,63 \times 10^{-18} \text{ Дж/с}$
Рентгеновские лучи	$(10^{18} \text{ Гц})$	$6,63 \times 10^{-15} \text{ Дж/с}$

Фотон является частицей с нулевой массой покоя. Если он не движется, то он не существует. В этом смысле фотон не является частицей, такой как материальный предмет. Он служитместилищем энергии, но ведет себя как частица.

Спектр электромагнитных волн, представленный на рисунке 1.1, характеризуется отсутствием пробелов и наложением некоторых областей, т. е. нет четких границ между областями. Для передачи информации посредством световых волн используется не весь оптический спектр, в пределах которого находится ультрафиолетовое излучение, видимый свет и инфракрасное излучение. Использование того или иного диапазона данного спектра для передачи ин-

формации определяется параметрами среды распространения электромагнитных волн, в частности показателем затухания, стабильностью показателей распространения.



**Рис. 1.1**  
Спектр электромагнитных волн

В волоконной оптике свет рассматривают и как частицу, и как волну. Обычно в зависимости от смысла используют либо одно, либо другое понятие. Например, характеристики оптического волокна основаны на длине волны, и свет рассматривается как волна. Для описания работы одномодового волокна пригодна только волновая теория [1–3, 31].

Поскольку корпускулы излучаются отдельными порциями (квантами), здесь для описания работы многомодового волокна пригодна лучевая теория. Кроме того, испускание света источником или его поглощение детектором также лучше описываются теорией частиц.

К физическим свойствам света относятся интерференция, дифракция, поляризация и дисперсия — свойства, определяемые волновой природой света и конечной скоростью его распространения.

Основными характеристиками оптических свойств среды являются показатель преломления, показатель поглощения и коэффициент поглощения света, которые в дальнейшем будем называть оптическими коэффициентами.

Геометрические и физические свойства света широко используются для создания различного рода оптических приборов и устройств, в основе работы которых лежат оптические свойства различных веществ. Таким образом, измерение и изучение оптических коэффициентов является важнейшей задачей физики, изучающей оптические свойства вещества.

Интерференцией волн называется явление наложения волн, при котором происходит устойчивое во времени их взаимное усиление в одних точках пространства и ослабление в других в зависимости от отношения между фазами этих волн. Интерферировать могут только когерентные волны, которым соответствуют колебания, совершающиеся вдоль одного и того же или близких направлений.

Под дифракцией света понимают огибание светом встречных препятствий, т. е. отклонение от законов геометрической оптики.

Поглощением света называется явление уменьшения энергии световой волны при ее распространении в веществе, происходящее вследствие преобразования энергии волны во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного излучения, имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения (например, фотолюминесценция). Поглощение света может вызвать нагревание вещества, возбуждение и ионизацию атомов или молекул и др.

Поглощение света описывается законом Бугера — Ламберта (закон Бугера), согласно которому интенсивность  $I$  плоской волны монохроматического света уменьшается по мере прохождения через поглощающую среду по экспоненциальному закону [1–3, 31]:

$$I = I_0^{-ax}. \quad (1.2)$$

Здесь  $I_0$  и  $I$  — значения интенсивности света на входе и выходе из слоя среды толщиной  $x$ , а  $a$  — натуральный показатель преломления среды, который зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины волны света  $\lambda$ .

Рассеянием света называется явление преобразования света веществом, сопровождающееся изменением направления распространения света. Рассеяние света происходит в оптически неоднородной среде, показатель преломления которой нерегулярно изменяется от точки к точке вследствие флуктуаций плотности среды (рэлеевское рассеяние) либо за счет присутствия в среде инородных малых частиц, так как во всех типах стекол, как правило, имеются примеси (такие как окислы металлов, ионы переходного металла), размеры которых гораздо меньше, чем длина волны. В первом случае рассеяние света называется молекулярным рассеянием, а во втором — рассеянием света в мутной среде [1–3, 31].

Количество рассеиваемой энергии зависит от плотности расположения дефектов.

Молекулярное рассеяние света в чистых средах, не содержащих инородных примесей, обусловлено неоднородностями, которые возникают в процессе беспорядочного теплового движения частиц среды. Эти неоднородности связаны с флуктуациями плотности, а в средах с анизотропными (полярными) молекулами — также с флуктуациями ориентации этих молекул. Среда называется изотропной, если ее физические свойства, существенные в рассматриваемых задачах, одинаковы во всех направлениях.

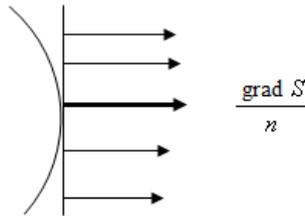
## **1.2. Физические процессы, возникающие при передаче оптического излучения**

Свет имеет дуалистическую природу и обладает как свойствами луча с прямолинейным распространением, так и свойствами волны с возможностью огибания препятствий. Таким образом, для полного представления процессов, происходящих при передаче оптического излучения, необходимо задействовать геометрическую оптику и волновой анализ [1–4, 31].

Как правило, гармоническая волна имеет неплоские волновые поверхности. На каждом малом участке волновую поверхность можно заменить частью плоскости, касательную к ней в рассматриваемой точке.

В результате приходим к теории световых лучей, направленных по нормали к волновым поверхностям, то есть к геометрической оптике. Величиной  $\text{grad } S$  определяется световой луч в каждой точке волновой поверхности.

Нужно хорошо усвоить, что физический смысл плоской волны и физический смысл световых лучей (иначе говоря, геометрической оптики) один и тот же.



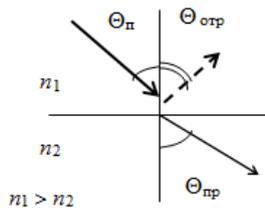
**Рис. 1.2**

Пучок локально параллельных световых лучей

Законы геометрической оптики используются для описания и анализа процесса передачи оптических сигналов, когда длина волны излучения  $\lambda$  значительно меньше размеров диаметра сердцевины  $OB$ , то есть  $\lambda \ll 2R$ , где  $R$  — радиус сердцевины.

В геометрической оптике световые волны изображаются световыми лучами, которые распространяются в однородной среде прямолинейно.

При попадании на границу раздела двух сред с разными значениями показателей преломления световой луч изменяет свое направление и в общем случае появляется преломленный и отраженный лучи (см. рис. 1.3, 1.4).



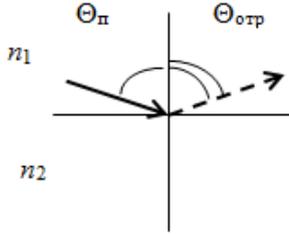
**Рис. 1.3**

Законы геометрической оптики:

$\Theta_n$  — угол падения;  $\Theta_{отр}$  — угол отражения ( $\Theta_n = \Theta_{отр}$ );  $\Theta_{пр}$  — угол преломления ( $\Theta_{пр} > \Theta_n$ ).

Показатель преломления, обозначаемый  $n$ , является безразмерной величиной, выражаемой через отношение скорости света в вакууме ( $c$ ) к скорости света в материале ( $v$ ):

$$n = \frac{c}{v}. \quad (1.3)$$

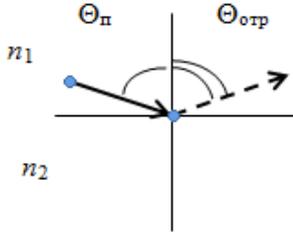


**Рис. 1.4**

Угол падения равен углу отражения:  $\Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{отр}}$

Среда, у которой показатель преломления больше, называется оптически более плотной, в противном случае — менее плотной.

Если угол падения больше критического, то свет будет отражен от границы двух сред (рис. 1.5).



**Рис. 1.5**

Законы преломления и отражения

Соотношения между углами падения  $\Theta_{\text{п}}$ , отражения  $\Theta_{\text{отр}}$  и преломления  $\Theta_{\text{пр}}$  определяются законом Снеллиуса:

$$\Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{отр}} \quad \text{и} \quad n_1 \sin \Theta_{\text{п}} = n_2 \sin \Theta_{\text{пр}}, \quad (1.4)$$

$$\text{или} \quad \frac{\sin \Theta_{\text{п}}}{\sin \Theta_{\text{пр}}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad \text{если } n_1 > n_2, \quad \text{то } \Theta_{\text{пр}} > \Theta_{\text{п}}.$$

Путем увеличения угла падения можно достичь состояния, при котором преломленный луч будет скользить по границе раздела сред, не переходя в другую среду, т. е.  $\Theta_{\text{пр}} = \pi/2$ . Угол падения, при котором имеет место данный эффект, называется критическим углом  $\Theta_{\text{кр}}$  полного внутреннего отражения:

$$\Theta_{\text{кр}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.5)$$

Очевидно, что для всех углов падения, больших критического ( $\Theta_{\text{п}} > \Theta_{\text{кр}}$ ), будут иметь место только отражения, а преломления будут отсутствовать. Это

явление называется полным внутренним отражением. На этом эффекте основан принцип передачи оптического излучения по оптическим волноводам [1–3, 31].

Даже когда свет проходит в более плотную среду, некоторая его часть отражается назад в исходную среду. Этот эффект получил название отражение Френеля. Чем больше разница показателей преломления сред, тем больше доля света, отражающегося назад. Показатель френелевского отражения  $F$  на границе с воздухом равен

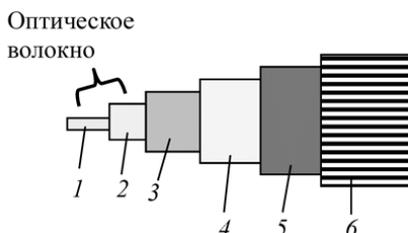
$$F = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2. \quad (1.6)$$

Для света, падающего из воздуха на границу стекла ( $n = 1,5$  для стекла), френелевское отражение равно примерно 0,17 дБ. Поскольку такого рода потери происходят как при вхождении света в стекло, так и при выходе из него, то потери на соединении двух стекол составляют 0,34 дБ. Френелевское отражение не зависит от направления прохождения двух сред.

Все вышесказанное относится к лучевому или геометрическому анализу распространения светового излучения. Но при передаче оптического излучения явно выражены волновые процессы. Известно, что электрическое и магнитное поля имеют поперечные и продольные составляющие. При падении светового луча параллельно оси в среде распространения электрическое поле волны будет иметь продольные составляющие, а магнитное поле — поперечные составляющие (окружности), т. е. формируется волна типа  $E$ . Точно также может быть сформирована волна типа  $H$ , у которой магнитное поле имеет продольные составляющие, а электрическое поле — поперечные составляющие. Могут существовать гибридные волны, т. е. волны смешанного типа  $EH$  или  $HE$ . Тип волны, характеризуемый определенной пространственной и волновой структурой, называется модой [1–3, 31].

### Конструкция оптического волокна

Как известно, отражение и преломление зависят от показателей преломления граничащих сред и угла падения света на границу. Работа волокна основана на тех же принципах [31].



**Рис. 1.6**

Конструкция оптического волокна:

1 — сердцевина; 2 — рабочая оболочка; 3 — силиконовая оболочка (полимерное покрытие); 4 — первичное защитное покрытие из эпоксиакрилата внешним диаметром  $245 \pm 15$  мкм; 5 — вторичное защитное (буферное) покрытие; 6 — внешняя (упрочняющая) оболочка.

Рабочая оболочка предназначена:

а) для создания лучших условий отражения на границе раздела сердцевины — оболочка;

б) для снижения излучения энергии в окружающее пространство:

$n_1$  — показатель преломления сердцевины;

$n_2$  — показатель преломления оболочки.

Причем  $n_1 > n_2$ .

Для характеристики волокна используются соотношения, которые принято называть разностью показателей преломления и относительной разностью показателей преломления.

Разность показателей преломления сердцевины  $n_1$  и оболочки  $n_2$  для многоволнового оптического волокна типовое значение порядка 0,01 и менее 0,004 для одномодового волокна. Обозначается  $\Delta n$  и вычисляется по формуле  $\Delta n = n_1 - n_2$ .

Под относительной разностью показателей преломления  $\Delta$  понимают величину, равную отношению разности показателей преломления сердцевины и оболочки к показателю преломления сердцевины:  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1$ , которое для большинства ОВ равно  $\Delta = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ .

Показатель преломления оболочки имеет постоянное значение, а показатель преломления сердцевины может быть либо постоянным, либо изменяться вдоль радиуса по определенному закону. Характер изменения показателя преломления ОВ вдоль радиуса называется профилем (индексом) показателя преломления.

Показатель преломления оптической оболочки менее чем на один процент меньше показателя преломления сердцевины. Характерные величины показателей преломления  $n_1 = 1,47$  и  $n_2 = 1,46$ . Производители волокна строго контролируют разность показателей для получения нужных характеристик волокна.

Волокна, удовлетворяющие условию  $n_1 - n_2 \ll n_1$ , относятся к слабо направляющим волокнам.

Специфические особенности движения света вдоль волокна зависят от многих факторов:

1) размера волокна;

2) состава волокна;

3) процесса инъекции света внутрь волокна.

Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. Наиболее распространенные типы волокон имеют следующие размеры:

сердцевина (мкм)	оболочка (мкм)
8	125
50	125
62,5	125

Оптические волокна позволяют проводить разные функциональные операции со световыми сигналами и потоками, обладают специальными физико-химическими свойствами.

Существует два основных вида профиля: ступенчатый и сглаженный (градиентный). В случае сглаженного профиля показатель преломления сердцевины не является однородным: показатель максимален в центре и постепенно спадает вплоть до оптической оболочки [4, 31]. Показатель преломления сердцевины меняется вдоль радиуса по закону показательной функции:

$$n(r) = n_1 \sqrt{\left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R}\right)^q\right]}, \quad (1.7)$$

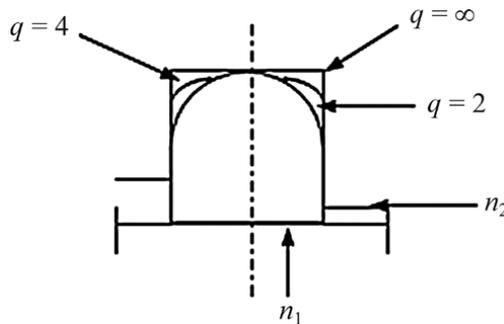
где  $r$  — текущий радиус;  $R$  — радиус сердцевины;  $n_1$  — показатель преломления в центре сердцевины, равный примерно 1,5;  $q$  — показатель степени, определяющий изменение  $n(r)$ ;  $\Delta$  — 0,003–0,01.

Чаще всего применяются световоды с параболическим профилем. В этом случае  $q = 2$  и соответственно

$$n(r) = n_1 \sqrt{\left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]}. \quad (1.8)$$

Если принять  $q = \infty$ , то показатель преломления определится как

$$n(r) = n_1 \sqrt{\left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]}. \quad (1.9)$$



**Рис. 1.7**

Изменение показателя преломления

На рисунке 1.7 показан характер изменения показателя преломления сердцевины при разных значениях  $q$ .

Ступенчатые волокна могут иметь и несколько отражающих оболочек, например так называемое волокно  $W$ -типа, с сердцевинной из материала с показателем преломления  $n_1$ , окруженной двумя оболочками, первая из которых имеет показатель преломления  $n_2$ , а второй  $n_3$ , причем  $n_1 > n_2 < n_3$ . Диаметр внутренней оболочки равен  $2a \approx 15$  мкм.

При распространения светового излучения по оптическому волокну необходимо учитывать групповой показатель преломления  $n_g$ :

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (1.10)$$

На рисунке 1.8 представлена зависимость группового показателя преломления от длины волны, а типичные значения показателя преломления — в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Типичные значения показателя преломления

$\lambda$ , нм	$n$	$n_g$
800	1,453	1,467
1300	1,447	1,4617
1500	1,444	1,4623

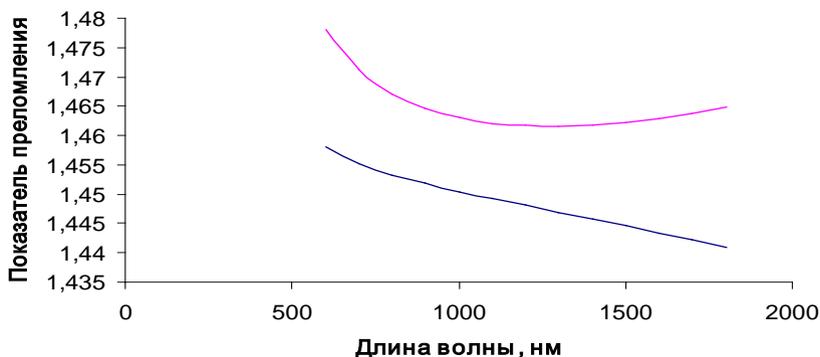


Рис. 1.8

Зависимость показателя преломления от длины волны

### 1.3. Изготовление оптических волокон

#### Свойства материала.

Передача светового излучения осуществляется по оптическому волокну — световоду [2].

При выборе материалов для волоконной оптики учитывались функциональные назначения:

- пассивные или передающие оптические материалы, предназначенные для передачи информации в виде оптических сигналов или изображения на большие, средние или короткие расстояния;
- активные оптические материалы, предназначенные для проведения разнообразных функциональных операций со световыми сигналами и потоками, для усиления, модуляции, изменения плоскости поляризации и т. д.

Для первого типа используются высокочистые, высокопрозрачные и высокооднородные неорганические стекла, стеклокерамики и органические полимеры. Пассивные оптические материалы можно разделить по спектральному диапазону на:

- ультрафиолетовые материалы (рабочая область — 200–400 нм), к которым относятся кварцевое стекло и бескислородные фторидные стекла;

- материалы видимого и инфракрасного диапазона (рабочая область — 400–3000 нм), к которым относятся кварцевое стекло и многокомпонентные оксидные силикатные и фосфатные стекла;
- среднего инфракрасного диапазона (рабочая область — 3–8 мкм), к которым относятся безкислородные фторидные и халькогенидные стекла;
- дальнего инфракрасного диапазона (рабочая область — 8–20 мкм), к которым относятся безкислородные фторидные и халькогенидные стекла.

Для изготовления активного материала используются такие типы стекол, как лазерные, фоторефрактивные, фототерморефрактивные, фотохромные, электрохромные, электрооптические, магнитооптические и с нелинейным откликом, легированные специальными активаторами и добавками:

- ионами редкоземельных элементов — эрбием, иттербием, неодимом, празеодимом и т. д.;
- ионами переходных материалов — хромом, никелем, кобальтом и т. д.;
- фоточувствительными ионами — церием, серебром, железом;
- наноразмерными и диэлектрическими кристаллами;
- квантовыми полупроводниковыми кристаллами;
- низкоразмерными металлическими частицами серебра, золота, меди и т. д.

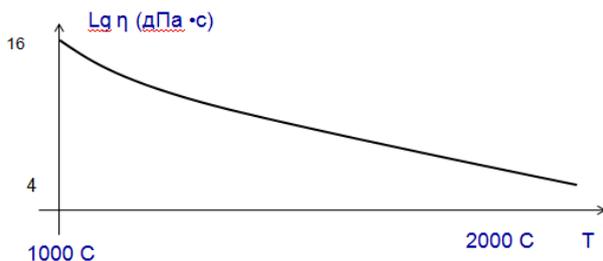
Известно, что в земной коре широко распространен диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), который является одним из основных стеклообразователей. Кристаллическая модификация диоксида кремния используется для получения кварцевого стекла. Благодаря ряду уникальных свойств оно нашло применение во многих отраслях промышленности. Кварцевое стекло обладает высокой прозрачностью в ультрафиолетовой, видимой и ближней областях спектра (от 0,2 до 1,7 мкм), достигая минимального затухания вблизи длины волны 1,55 мкм.

Прочность кварцевых световодов в герметичном покрытии на растяжение достигает 12–14 ГПа, что существенно выше прочности стали, а расчетный предел прочности составляет 15–25 ГПа. В полимерном покрытии световоды менее прочны (примерно в два раза), чем в герметичной металлической оболочке, за счет влияния влаги на процесс разрушения стекол. Приложение высоких температур при изготовлении световодов позволяет избавиться от различных примесей и сделать стекло сверхчистым, что существенно уменьшает затухание в кварцевом стекле, обусловленное внутренним рассеянием света и поглощением.

Температурный коэффициент расширения (ТКЛР) равен  $5 \cdot 10^{-7}$  1/градус, что намного ниже по сравнению с тугоплавкими материалами. Данный низкий ТКЛР делает кварцевое стекло термостойким, т. е. нагретые до температуры 1000–1200°C кварцевые стержни не разрушаются при погружении их в воду.

В противоположность кварцу, кварцевое стекло — это аморфный, т. е. некристаллический, затвердевший стекловидный расплав, который является твердым веществом только благодаря своей высокой вязкости. Оно не имеет точку плавления, а при высоких температурах становится все более мягким и испаряется прямо из этого состояния, минуя жидкую фазу. Вязкость является существенной характеристикой для производства стекла в целом и для его обработки. С ее помощью описывается внутреннее трение в кварцевом стекле.

Оно обозначается  $\eta$  и может быть выражено в деципаскалях в секунду, при этом 1 деципаскаль в секунду ( $\text{дПа}\cdot\text{с}$ ) = 1 г/см·с. В кварцевом стекле вязкость уменьшается монотонно по мере роста температуры. Данная зависимость представлена на рисунке 1.9. Верхняя и нижняя точки отжига ограничивают область стеклования или превращения, т. е. переход из упруговязкого состояния переохлажденного расплава к хрупкому состоянию кварцевого стекла. В области точки размягчения форма тела кварцевого стекла изменяется под воздействием собственного веса [4, 5].



**Рис. 1.9**

Зависимость логарифма вязкости кварцевого стекла от температуры

Таблица 1.3

**Параметры вязкости кварцевого стекла**

Логарифм вязкости $\lg \eta$	Описание	Температура кварцевого стекла, °C
7,6	Точка размягчения	1730
13	Точка отжига	1180
14,5	Точка упругой деформации	1075

Для изготовления световодов формируется двухслойное кварцевое стекло. Первый слой носит название — сердцевина и характеризуется несколько большим показателем преломления, нежели второй слой — оболочка. Для формирования различных слоев используются примеси. Для понижения показателя преломления возможно использовать оксид бора или фтор (показатель преломления стекла уменьшается на 0,2% при изменении молярной концентрации фтора на 1%). Легирование фтором по сравнению с оксидом бора не влияет на оптические свойства кварца, т. е. не увеличивает внутреннее рассеяние света, но увеличивает вероятность возникновения трещин и, как следствие, уменьшает прочность стекла, а также делает кварц более чувствительным к диффузии водорода. Такие добавки, как  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , приводят к увеличению показателя преломления по сравнению с чистым кварцем без ухудшения его оптических свойств. Так, кварц с добавкой германия ( $\text{GeO}_2$ ) для изготовления сердцевины имеет широкое окно прозрачности (минимальные затухания) вплоть до 1,7 мкм, фосфорный ангидрид ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ведет к небольшому повышению внутреннего поглощения и рэлеевскому рассеянию, но является более дешевым легирующим материалом. Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) имеет меньшие по-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)