

## Введение

Развитие телекоммуникационных сетей во всем мире в первую очередь основывается на использовании волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). На сегодняшний день в России на сетях связи различного назначения проложено около 100 000 км оптических кабелей связи.

Оптический кабель (ОК), основой которого являются оптические волокна (ОВ), считается в настоящее время самой совершенной направляющей системой как для телекоммуникационных магистралей большой протяженности, так и для локальных сетей передачи данных. Объясняется это тем, что ОК по своим характеристикам значительно превосходят электрические кабели.

*Достоинства ВОЛС:* малое затухание и дисперсия сигналов в ОВ позволяют довести длину ретрансляционного участка ВОЛС до 100 км и более. Широкая полоса пропускания дает возможность передавать по одному ОВ поток информации со скоростью в десятки гигабит в секунду. Высокая защищенность от несанкционированного доступа позволяет использовать ОК в системах, где предъявляются повышенные требования к информационной безопасности.

Оптические волокна невосприимчивы к внешним электромагнитным влияниям, так как в многоволоконных ОК не возникает проблемы взаимных помех, присущих электрическим кабелям. При одной и той же пропускной способности электрических кабелей и ОК последние имеют меньшие габариты и массу. ОВ изготавливают из широко распространенных и недорогих материалов (двуокись кремния, полимеры). В настоящее время стоимость кварцевого ОВ не превышает половины стоимости медной пары.

*Недостаток* современных ВОЛС – высокая стоимость интерфейсного и монтажного оборудования. Однако улучшение конструкции и повышение надежности оптических передатчиков, приемников и пассивных элементов линейного тракта позволяют постоянно снижать стоимость производства волоконно-оптической продукции, а совершенствование технологии монтажа ОК и соединительных элементов, а также упрощение используемого оборудования приводят к существенному уменьшению трудоемкости строительно-монтажных работ.

Началом масштабного применения оптических кабелей связи (ОКС) в России следует считать реализацию крупнейшим оператором

ром связи России – ОАО «Ростелеком» – проекта трансроссийской линии связи, национальной цифровой транспортной линии международной и междугородной оптической связи. Примерно с 1996 г. развитие магистральной и внутрizonовых сетей ведется с применением ОКС, на этих сетях практически полностью прекратилось применение медножильных кабелей связи при новом строительстве.

На начальном этапе внедрения ОКС их поставки осуществлялись зарубежными компаниями, российские кабельные заводы не могли составить им конкуренцию. К 2000 г. ситуация изменилась уже в пользу российских предприятий.

Дальнейшее развитие ВОЛС по мнению специалистов будет заключаться в разработке и внедрении в сетях ЕСЭ различного назначения новых волоконно-оптических технологий, направленных на повышение эффективности ВОЛС. На линиях дальней связи основное внимание по-прежнему будет уделяться повышению скорости передачи информации, увеличению длины регенерационных участков и повышению надежности. Широкое распространение получают промежуточные оптические усилители и методы волнового (спектрального) мультиплексирования. Большие надежды возлагаются на использование среднего инфракрасного диапазона. Применение новых материалов (фтористых стекол и других соединений) позволило изготовить ОК с затуханием не более 0,01 дБ/км.

Доминирующей особенностью развития волоконно-оптических технологий в местных и локальных сетях будет приближение ОВ к конечному пользователю сети (абоненту). Рост потребности в новых видах информационного обслуживания абонентов, а также совершенствование и постоянное снижение стоимости аппаратуры и средств коммутационной техники готовят окончательный переход сетей доступа на ОВ. Ведущая роль в этом процессе принадлежит сети Internet.

Сегодня и в ближайшей перспективе нет альтернативы ВОЛС. Должна быть создана необходимая нормативная база, позволяющая строить и эффективно эксплуатировать надежные оптические линии передачи, а также выработаны стратегии преобразования сетей доступа, сельских сетей и стратегия развития подводных кабельных линий связи.

e-mail: Rodina-Olga@mail.ru

# Глава 1. Основные положения передачи информации по волоконным световодам

## 1.1. Основные понятия и определения

В волоконно-оптических линиях связи информационные сигналы передаются по оптическим кабелям. Основным элементом ОК является волоконный световод – круглый стержень из оптически прозрачного диэлектрика, структура которого обеспечивает распространение вдоль него световых волн. Волоконные световоды из-за малых размеров поперечного сечения обычно называются оптическими волокнами.

Дуплексная связь осуществляется по двум волоконным световодам, каждый из которых предназначен для передачи сигнала в одном направлении (рис. 1.1).

ЭОП – преобразует электрический сигнал в световой (оптический) с помощью полупроводникового лазера (ПЛ) или светоизлучающего диода (СД).

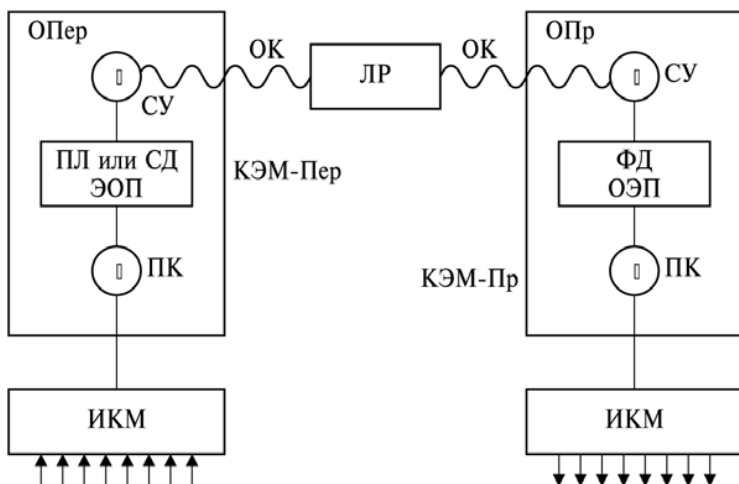


Рис. 1.1. Структурная схема волоконно-оптической связи

ОЭП – преобразует оптический сигнал в электрический с помощью фотодиода (ФД).

ПК – преобразователь кода формирует требуемую последовательность импульсов (для синхронизации и помехозащищенности) и осуществляет согласование уровней по мощности между электрическими (ИКМ) и оптическими (ПЛ, СД, ФД) элементами схемы.

СУ – согласующее устройство формирует и согласует диаграммы направленности и апертуру между приемо-передающими устройствами и кабелями.

Обычно приемники и передатчики выполняют в виде модулей, содержащих преобразователи и согласующие устройства. Такие модули имеют размеры, со спичечную коробку, позволяющие подключить с одной стороны ИКМ, с другой ОК.

Из-за потерь в ОК через ~100 км располагают линейные регенераторы (ЛР). В них оптический сигнал преобразуется в электрический, затем регенерируется и усиливается, после чего снова преобразуется в оптический (для передачи по кабелю).

## **Свет**

Свет представляет собой один из видов электромагнитной энергии, носителем которой является электромагнитное поле, т.е. особый вид материи, оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы и обладающий энергией, массой, скоростью. Поле отличается непрерывным распространением в пространстве (электромагнитные волны) и обнаруживает дискретность структуры (фотоны).

Обычно свет представляется в виде волн, а электроны – в виде частиц. Однако 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. В *волоконной оптике свет рассматривают и как частицу, и как волну.*

Строгое исследование процесса распространения световых волн в ОВ может быть выполнено лишь на основе уравнений электродинамики (уравнения Максвелла), т.е. методами волновой теории. Однако в тех случаях, когда длина волны излучения много меньше размеров поперечного сечения ОВ, для описания процесса распространения света можно пользоваться приближенными методами геометрической (лучевой) оптики, которые отличаются простотой и наглядностью.

Если же указанное условие не выполняется или законы геометрической оптики не позволяют получить правильные результаты, для исследования волновых явлений в ОВ, необходимо решать уравнение Максвелла, что требует применения аппарата математической физики.

Процесс распространения световых волн, когда это возможно, исследуется методами геометрической оптики, а в остальных случаях поясняется основными результатами волновой теории.

### **Показатель преломления**

Показатель преломления  $n$  (величина безразмерная) выражается через отношение скорости света в вакууме  $c$  к скорости света в материале  $v$ :

$$n = c/v.$$

Показатели преломления различных веществ и скорости распространения света в них приведены в табл. 1.1:

Таблица 1.1.

#### *Показатели преломления различных материалов*

Материал	Показатель преломления	Скорость света, км/с
Вакуум	1,0	300000
Воздух	1,0003 (1)	300000
Вода	1,33	225000
Кварц	1,46	205000
Стекло	1,5	200000
Алмаз	2,5	120000

В общем случае под скоростью света понимают скорость электромагнитной энергии в вакууме. В других материалах (например, в стекле) свет распространяется с меньшей скоростью. При перемещении из одного материала в другой изменяется скорость рас-

пространения, что с точки зрения волновой теории, приводит к изменению направления движения. Отклонение света от прямого направления называется *преломлением*.

Показатель преломления, связанный с диэлектрической проницаемостью на высоких частотах, может быть выражен через относительные магнитную  $\mu_a$  и относительную диэлектрическую  $\epsilon_a$  проницаемости. Фазовая скорость электромагнитных волн, распространяющихся в диэлектрической среде, определяется следующим выражением:

$$V = 1/\sqrt{\mu_0\mu_a\epsilon_0\epsilon_a} = c/\sqrt{\mu_a\epsilon_a},$$

где  $\mu_0$  и  $\epsilon_0$  — соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства. Поскольку магнитные эффекты в диэлектриках очень малы, то принимается, что  $\mu_a = 1$ , а в результате получается следующее выражение для  $n$ :

$$n = \sqrt{\epsilon_a}.$$

### **Волоконный световод**

Основным элементом волоконно-оптического кабеля (ВОК) является волоконный световод (ВС). Волоконный световод, или оптическое волокно (ОВ) по которому осуществляется передача микронных длин волн, что соответствует диапазону частот  $10^{14} \dots 10^{15}$  Гц. Оптическое волокно, как правило, имеет двухслойную конструкцию и состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления  $n_1, n_2$ , где значение  $n$  равно  $\sqrt{\mu\epsilon}$ .

Среда с более высоким значением показателя преломления называется оптически более плотной средой. В волокне такой средой является сердцевина, выполняющая роль среды распространения света. Показатель преломления оболочки, окружающей сердцевину немного меньше, чем у сердцевины и за счет этого на границе «сердцевина-оболочка» происходит отражение света. На этом эффекте основана передача информации по волокну.

Сердцевина ОВ – это центральная область ОВ (рис. 1.2), через которую передается основная часть оптической мощности сигнала. Диэлектрическим материалом для сердцевины и оболочки ОВ служит плавленный кварц (кварцевое стекло), чистый или с примесями

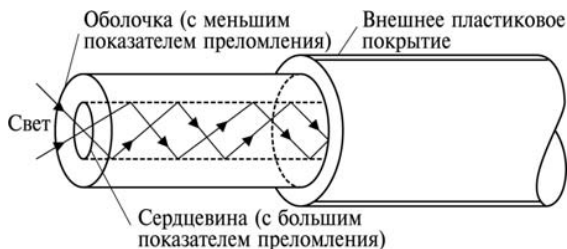


Рис. 1.2. Волоконный световод

химических элементов и их соединений, небольшие пропорции которых способствуют изменению оптических свойств плавленного кварца должным образом. Плавленный кварц – это аморфное, прозрачное вещество с химической формулой двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$ . Сердцевина и оболочка ОВ обладают разными оптическими характеристиками (показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$ ). Если сердцевина служит для передачи электромагнитной энергии, то оболочка – для создания лучших условий отражения на границе раздела *сердцевина-оболочка*, защиты сердцевины волокна от механических повреждений, а также для защиты от излучений энергии в окружающее пространство и поглощения нежелательного излучения извне. Оболочка оптического волокна имеет одно или несколько защитных покрытий.

## Мода

Мода представляет собой математическое и физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. В своей математической формулировке модовая теория возникает из уравнений Максвелла и представляет собой возможное решение этих уравнений.

Свет по своей природе является электромагнитной волной, имеющей электрическую и магнитную составляющие. Обычно электрическая составляющая электромагнитной волны представляется в виде вектора  $\mathbf{E}$  (вектор напряженности электрического поля), а магнитная составляющая – в виде вектора  $\mathbf{H}$  (напряженности магнитного поля).

Различные комбинации этих векторов представляют собой типы волн, называемые модами. Таким образом, *мода* – это одна из составляющих света, распространяющегося в волокне, которая соот-

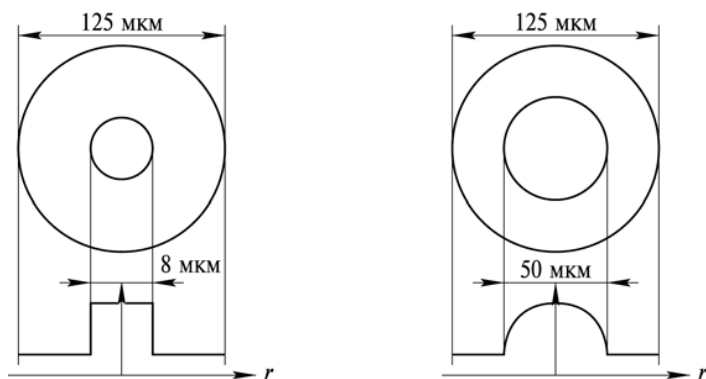


Рис. 1.3. Поперечное сечение одномодового и многомодового волокон

ветствует определенному типу колебаний или определенной траектории прохождения луча.

По волокну могут распространяться, как только одна мода – одномодовый режим, так и много мод – многомодовый режим. Многомодовый или одномодовый характер, идущего по волокну света, коренным образом влияет на дисперсию, а, следовательно, и на пропускную способность волокна.

Число мод, допускаемых в ОВ, колеблется от 1 до 100000. Таким образом, ОВ позволяет свету распространяться по множеству траекторий, число которых зависит от размера и свойств волокна.

### Одномодовые и многомодовые волокна

Волоконные световоды (ВС) делятся на две группы: *многомодовые* и *одномодовые* (рис. 1.3). В конструктивном отношении они различаются диаметром сердцевины.

В одномодовом световоде диаметр сердцевины меньше или соизмерим с длиной волны ( $d \leq \lambda$ ) и по нему передается лишь один тип волны (мода). В многомодовых световодах диаметр сердцевины больше длины волны и по нему распространяется большое число волн ( $d > \lambda$ ).

Практически диаметр сердцевины световода составляет 8; 10 мкм у одномодовых и 50; 62,5 мкм (рис. 1.3) у многомодовых световодов, диаметр оболочки – 125 мкм, диаметр волокна по защитному покрытию 250 мкм.



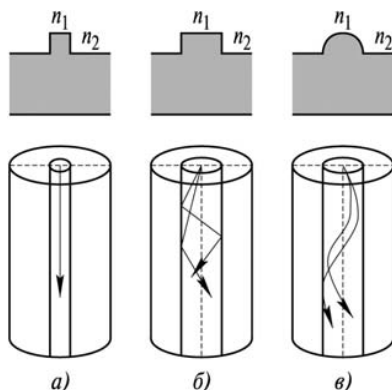


Рис. 1.4. Профили показателей преломления:  
 а – ступенчатый одномодовый; б – ступенчатый многомодовый;  
 в – градиентный многомодовый

### Профили показателя преломления

По профилю показателя преломления (ППП), т.е. по закону изменения коэффициента преломления вдоль радиуса сердцевины различают *ступенчатые* и *градиентные* (сглаженные) ОВ (рис. 1.4).

В ступенчатых ВС показатель преломления в сердцевине постоянен и имеется резкий переход от  $n_1$  сердцевины к  $n_2$  оболочки.

Градиентные ВС имеют непрерывное плавное изменение показателя преломления в сердцевине по радиусу световода от центра к периферии.

По своему профилю, одномодовые световоды более разнообразны: есть ступенчатого профиля, есть условно W-образного или двухступенчатого (с так называемой депрессированной двойной оболочкой и с тремя показателями преломления  $n_1 > n_2 > n_3$ , например  $n_1 = 1,51$ ;  $n_2 = 1,49$  и  $n_3 = 1,50$ ) и, наконец, треугольного (рис. 1.5).

Как видно на рис. 1.6 в ступенчатом многомодовом световоде лучи резко отражаются от границы сердцевина – оболочка. При этом пути следования различных лучей различны, и поэтому они приходят к концу линии со сдвигом во времени, что приводит к искажению передаваемого сигнала (дисперсии).

В градиентных световодах лучи распространяются по волнообразным траекториям, поэтому искажений меньше.

В наилучших условиях находится одномодовая передача, так как здесь распространяется лишь один луч.

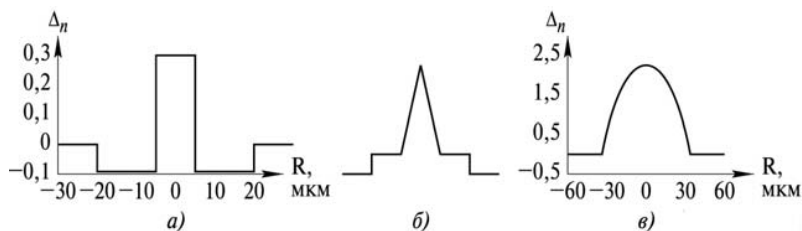


Рис. 1.5. Типовые профили показателя преломления:  
*a* – ОМ ОВ одномодового W-образного профиля; *б* – ОМ ОВ одномодового треугольного профиля; *в* – ОВ градиентного профиля

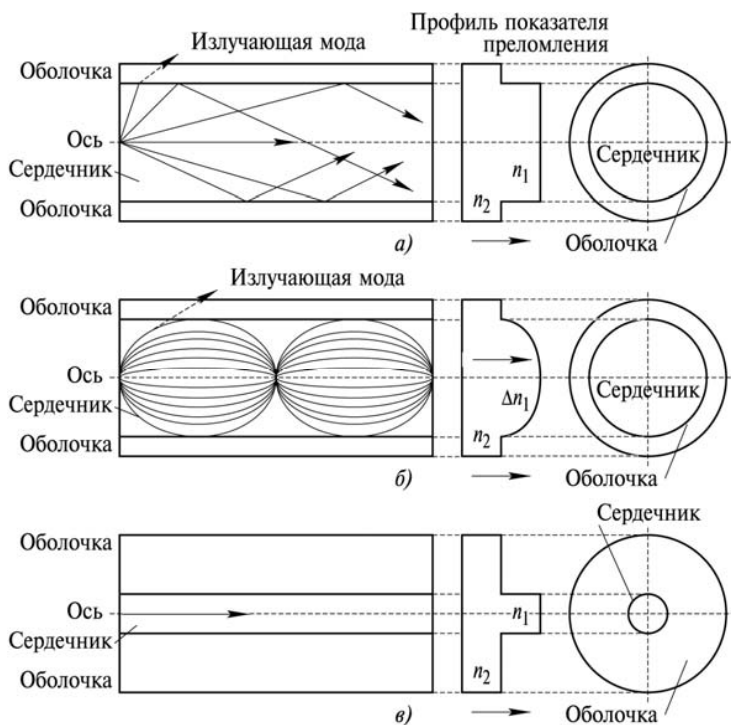


Рис. 1.6. Профили показателей преломления и моды, распространяющиеся в трех типах ОВ:

*a* – многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления; *б* – многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления; *в* – одномодовое волокно

### Принцип действия волоконных световодов

В световоде, где границей раздела сердцевина – оболочка являются прозрачные стекла, возможно не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условия полного внутреннего отражения.

Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, т.е. при  $n_1 > n_2$ , волна при определенном угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду. Угол падения, начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, т.е.  $\varphi_n = \theta_v$  называется *углом полного внутреннего отражения*. Этот угол определяется из соотношения:

$$\sin \theta = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{\mu_{r2} \varepsilon_{r2}}{\mu_{r1} \varepsilon_{r1}}}$$

## 1.2. Основы геометрической оптики

Геометрическая оптика предполагает, что свет состоит из лучей, распространяющихся от источника по прямым линиям в стекле, воде, воздухе или вакууме.

Световые волны (моды) изображаются лучами, которые отражаются и преломляются на границах раздела сред с разными оптическими свойствами.

Как известно, луч света при падении на границу раздела двух сред делится на отраженный и преломленный (рис. 1.7).

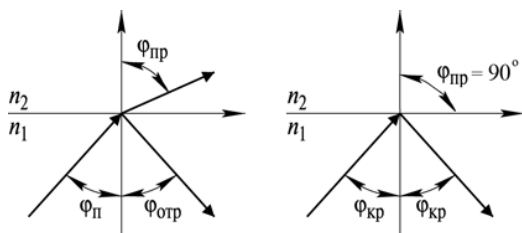


Рис. 1.7. Луч света при падении на границу раздела двух сред

Согласно закону отражения луч света, который падает на границу раздела двух сред, отражается под тем же самым углом  $\varphi_{\text{отр}}$  к нормали (перпендикуляру к границе), что и угол падения  $\varphi_n$  к поверхности, т.е.  $\varphi_{\text{отр}} = \varphi_n$ .

Согласно закону Снеллиуса (закон преломления) лучи света, падающие на границу раздела двух сред, имеют углы преломления, отличные от углов падения к нормали границы этих сред. Связь этих углов определяется выражением:

$$n_1 \sin \varphi_{1\text{п}} = n_2 \sin \varphi_{1\text{пр}},$$

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

Особый интерес для волоконной оптики представляет тот факт, что показатель преломления стекла может изменяться в зависимости от его состава. Количество отраженного света от границы двух сред зависит от их показателей преломления. Если излучение видимой области спектра падает на границу раздела двух сред и переходит из оптически более плотной среды  $n_1$  на оптически менее плотную  $n_2$  ( $n_2$  меньше  $n_1$ ) и угол падения увеличивается, то угол преломления приближается к  $90^\circ$ .

Увеличивая угол падения, можно добиться такого состояния, при котором преломленный луч будет располагаться вдоль границы сред, не переходя в другую среду. Угол падения при этом называется *критическим углом* ( $\varphi_{\text{кр}}$ ) полного внутреннего отражения, т.е. угол падения, при котором угол преломления равен  $90^\circ$ , называется критическим углом. Если угол падения больше критического, то свет полностью отражается в исходную среду, не проникая в другой материал. При этом имеет место только отражение, а преломление отсутствует, что приводит к полному внутреннему отражению, т.е. при  $\varphi_{1\text{пр}} = 90^\circ$

$$\sin \varphi_{1\text{п}} = n_2/n_1.$$

На этом явлении основан принцип передачи оптического излучения по волоконным световодам.

Рассмотрим отражение света при угле падения, равном  $90^\circ$ . Даже, когда свет проходит в более плотную среду, некоторая его часть отражается в исходную среду. Этот эффект получил название *отражение Френеля*. Чем больше разница показателей преломле-