

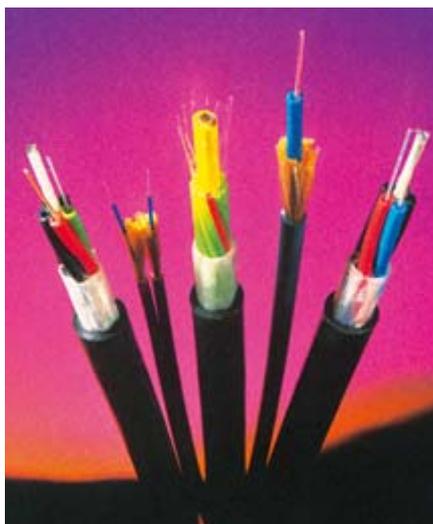
Валерий Яковлев

## ОСНОВЫ ОПТОВОЛОКОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

### ВВЕДЕНИЕ

Характерной чертой информационной эры является бурное развитие коммуникаций — одной из составляющих инфраструктуры информационных технологий. В условиях возросшей потребности в обеспечении надежного канала связи как в сфере построения глобальных информационных сетей, так и в области промышленной автоматизации возникла необходимость поиска альтернативных технологий передачи данных взамен традиционных, основанных на медном кабеле. Эта альтернатива — волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), которая позволяет передавать информацию с существенно более высокими скоростями по сравнению с медным кабелем, невосприимчива к электромагнитному излучению и имеет вполне приемлемые для большинства применений стоимостные показатели в пересчете на канал. Информационный канал при этом содержит оптический излучатель, приемник и среду передачи информации — оптическое волокно (пластиковая или стеклянная нить).

Толчком к интенсивному развитию волоконно-оптических линий связи послужило решение ряда технологических проблем, связанных с получением качественного оптического волокна (с малым коэффициентом затухания), и достижения в области полупроводниковых лазеров. Безусловно, одним из моментов, способствующих продвижению ВОЛС, явилось развитие цифровых методов передачи информации. Хочется особо отметить тот факт, что использование оптоволоконного решения является идеальным техническим решением при организации канала связи в системах автоматизации тех производств, где предъявляются повышенные требования к взрывобезопасности. Не секрет, что оптоволоконно нашло широкое применение при построении сетей как на гражданском транспорте (например, сетей на базе трансиверов, кон-



Волоконно-оптические кабели фирмы Belden

центраторов и коммутаторов фирмы Hirschmann, получивших одобрение Германского морского регистра), так и в военной технике, ввиду существенного снижения веса сетевого оборудования самолетов и кораблей, а также обеспечения высокой устойчивости информационных каналов к сильным электромагнитным импульсам, в том числе и от ядерного взрыва. Кроме того, оптоволоконно часто является одним из составных элементов датчиков.

Целью настоящей статьи является рассмотрение оптоволоконного как среды передачи информации. Вопросы, связанные с другими компонентами ВОЛС (передатчиками, приемниками, разветвителями и т.д.) здесь не рассматриваются. В статье основное внимание уделяется освещению фундаментальных знаний, лежащих в основе технологии

производства и использования оптоволоконного и оптоволоконных кабелей. Для начала вспомним основополагающие законы оптики, играющие важную роль для понимания принципа распространения света в оптическом волокне.

### ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Важнейшим оптическим параметром материала является его показатель преломления. По волновой теории света показатель преломления материала ( $n$ ) выражается через отношение скорости света в вакууме ( $c$ ) к скорости света в среде данного материала ( $v$ )

$$n = c / v \quad (1)$$

или оптической длины волны в вакууме ( $\lambda_{в.}$ ) к длине волны в материале ( $\lambda_{м.}$ )

$$n = \lambda_{в.} / \lambda_{м.} \quad (2)$$

Поскольку  $n > 1$  для всех известных веществ, свет распространяется в материале медленнее, чем в вакууме.

Типичные значения показателей преломления материалов, используемых в оптоволоконной, приведены в табл. 1.

Из формул (1), (2) и значений, приведенных в табл. 1, видно, что показатель преломления стекла изменяется в зависимости от его состава.

Основные понятия, используемые при обсуждении механизма преломления, иллюстрирует рис. 1. На всех трёх видах рисунка граница раздела проходит между двумя средами с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , причём  $n_1 > n_2$ .

Рассмотрим случай преломления светового луча при переходе из одной

Таблица 1. Показатели преломления материалов, используемых в оптоволоконной

Материал	Длина волны в вакууме, нм	Показатель преломления	Длина волны в материале, нм
Стекло	850	1,4525	585,5
	1300	1,4469	898,5
	1550	1,4440	1073,4
GaAlAs	850	3,6	236,1
Пластик	650	1,4-1,5	433-464

среды в другую (рис. 1 а). Углом падения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и падающим лучом ( $\theta_1$ ). На границе раздела часть света отражается обратно (отражение Френеля). Углом отражения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и отраженным лучом. Оставшаяся часть света пересекает границу раздела, образуя преломленный луч, который распространяется под углом  $\theta_2$ . Согласно закону Снеллиуса между углом падения и углом преломления существует следующее соотношение:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (3)$$

Если угол падения  $\theta_1$  увеличивается, то при определенном его значении преломленный луч полностью исчезает ( $\theta_2=90^\circ$ ). Такой угол называется критическим углом скольжения  $\theta_c$  (рис. 1 б):

$$\theta_c = \arcsin(n_2 / n_1) \quad (4)$$

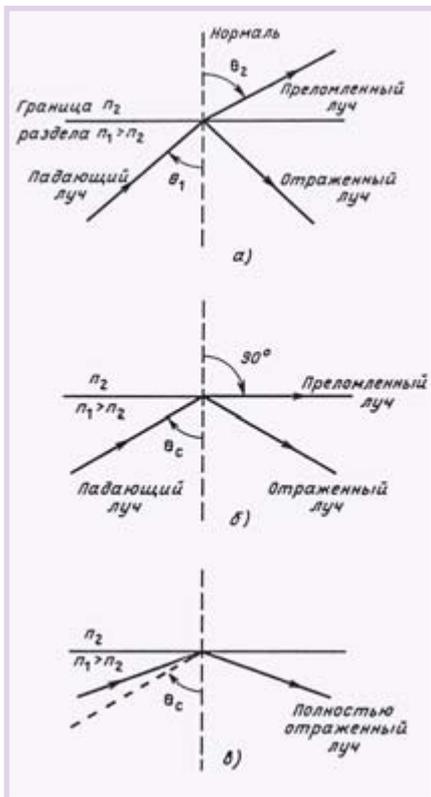


Рис. 1. Отражение и преломление света на границе двух сред

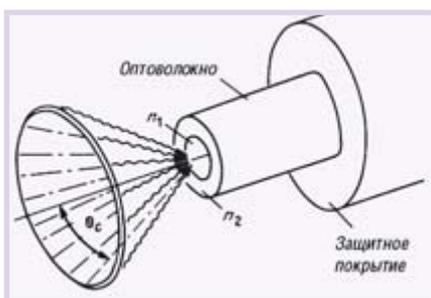


Рис. 2. Входной конус при вводе света в оптоволокно

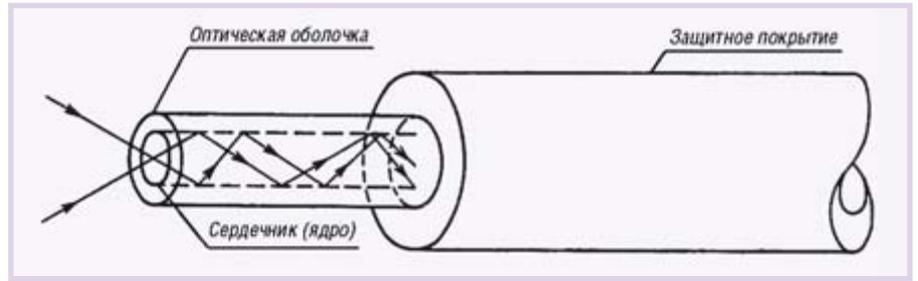


Рис. 3. Структура оптического волокна

При углах, больших критического (рис. 1 в), свет полностью отражается и во вторую среду не проникает, а интенсивность отражённого луча равна интенсивности падающего. Это явление называется полным внутренним отражением.

При расчете характеристик реально-го распространения света в оптоволокну используется величина числовой апертуры (NA). Эта величина тесно связана с условием полного внутреннего отражения и волнового распространения света в оптоволокну. Она определяет угловой растр входного конуса (рис. 2), соответствующего максимальному углу ввода света в оптоволокно:

$$NA = \sin \theta \quad (5)$$

( $\theta$  – половина угла ввода)

Величина NA – важный технологический параметр, так как чем больше значение NA, тем лучше свет вводится в оптоволокно. При малых значениях NA вводится достаточно узконаправленный луч света.

### Устройство оптического волокна

Оптическое волокно (рис. 3) состоит из двух концентрических слоев: сердечника (ядра) и оптической оболочки, имеющих показатели преломления соответственно  $n_1$  и  $n_2$ . Ядро и оптическая оболочка могут быть изготовлены из одного материала (например, особо чистого кварцевого стекла), изменение показателя преломления при этом достигается подбором специальных добавок, вводимых в чистый расплав кварца. Этот процесс называется легированием. В качестве легирующего вещества чаще всего выступают окислы германия ( $GeO_2$ ), фосфора ( $P_2O_5$ ), бора ( $B_2O_3$ ), фтор (F), эрбий (Er) и неодим (Nd). В частности, фтор и окись бора уменьшают показатель преломления, а окись германия и окись фосфора его увеличивают. Вокруг оптической оболочки в целях предохранения от внешних воздействий, влияющих на оптические свойства оптоволокна (влага,

царапины, микротрещины), наносятся два слоя полимера (акрилат). Ядро оптоволокна также может быть изготовлено из стекла, а оптическая оболочка из пластика (PCS-оптоволокно). И, наконец, пластиковое оптоволокно имеет ядро и оболочку из пластика.

Показатель преломления сердечника  $n_1$  больше показателя преломления оптической оболочки  $n_2$ . Численная разница показателей преломления невелика – порядка одного процента. Наиболее распространённые соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки приведены в табл. 2.

При указании значений этих величин для конкретного оптоволокна используется запись, в которой после численного значения диаметра сердечника через « / » указывается значение диаметра оптической оболочки. Например, оптоволокно для сетевого оборудования фирмы Hirschmann имеет маркировку 62,5/125.

При вводе света внутрь волокна под углом, большим критического, свет, испытывая полное внутреннее отражение, будет двигаться зигзагообразно вдоль сердечника оптоволокна. Лучи, при движении пересекающие ось световода, называются меридиональными. Отметим, что часть лучей, называемых косыми (асимметричными), будет двигаться по спиралеобразной траектории, не пересекая ось волокна; при анализе волоконно-оптических процессов они, как правило, не учитываются. Используемые материалы, состав и размеры компонентов определяют физические параметры и особенности оптоволокна.

Таблица 2. Наиболее распространённые соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки

Сердечник, мкм	Оптическая оболочка, мкм
8	125
50	125
62,5	125
100	140

Под основными параметрами оптоволоконна понимают профиль показателя преломления, число мод, потери оптической мощности.

### Профиль показателя преломления

Распределение значений показателя преломления вдоль диаметра поперечного сечения оптического волокна называют профилем показателя преломления. Различают оптические волокна со ступенчатым профилем, когда сердечник и оптическая оболочка имеют однородный (но разный!) показатель преломления, и с градиентным профилем, когда показатель преломления сердечника плавно уменьшается от центра к краям. У градиентных волокон отсутствует резкое изменение показателя преломления на границе ядра и оптической оболочки, что характерно для ступенчатого профиля. Чаще всего у градиентных световодов профиль показателя преломления близок к параболе, такие световоды называют параболическими.

Для оптимизации работы на какой-либо одной длине волны используется и более сложная структура профиля (рис. 4).

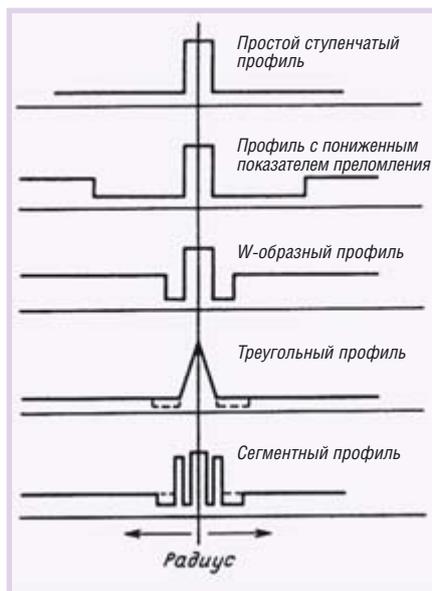


Рис. 4. Профили показателей преломления для одномодового волоконного световода

### Моды

Строгое рассмотрение уравнений Максвелла, определяющих характер распространения света в оптоволоконне, показывает, что в волокне может распространяться ограниченное число типов электромагнитных колебаний, называемых модами. Каждая мода имеет характерные для нее структуру элект-

ромагнитного поля, а также фазовую и групповую скорость. Напомню, что под фазовой скоростью понимается скорость перемещения фазы волны, а групповая скорость определяет скорость переноса энергии электромагнитной волной. Для свободно распространяющихся электромагнитных волн обе скорости эквивалентны и равны скорости света, в то время как для электромагнитных волн, перемещающихся в оптоволоконне, величины фазовой и групповой скорости различны и зависят от частоты колебаний, материала оптоволоконна и его геометрических параметров. Следствием влияния этих факторов является дисперсия. Различают следующие виды дисперсии:

- материальную (молекулярную) дисперсию, обусловленную зависимостью показателя преломления материала световода от длины волны излучения;
- волноводную дисперсию, определяемую длиной волны в оптическом волноводе и фактически зависящую от совокупности таких геометрических параметров оптоволоконна, как отклонение от круглой формы сечения, непостоянство диаметра, несоосность ядра и оболочки, непостоянство показателя преломления по длине оптоволоконна и т.п.;
- межмодовую (модовую) дисперсию, являющуюся результатом различной скорости распространения мод в многомодовом волокне.

Моды характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы сердечника и оптической оболочки их электромагнитные поля оказываются в фазе. Если это условие не соблюдается, то волны, интерферируя, гасят друг друга.

Являясь одним из возможных решений уравнения Максвелла, мода выступает в качестве математического понятия, определяющего такую физическую характеристику, как режим работы оптоволоконна.

Различают одномодовый и многомодовый режимы работы волоконно-оптических линий связи. Условием одномодового режима, в котором по оптоволоконну распространяется одна основная мода, является выполнение неравенства:

$$F = (2\pi \times NA \times r / \lambda_0) < F_{\text{отс}} \quad (6)$$

Здесь  $\lambda_0$  — рабочая длина волны,  $r$  — радиус сердечника,  $F$  — нормированное значение рабочей частоты,  $F_{\text{отс}}$  — нормированное значение частоты отсечки

(частоты, соответствующей предельному значению длины волны данной моды). Величина  $F_{\text{отс.}} = 2,405$  для световодов со ступенчатым профилем и  $F_{\text{отс.}} = 3,53$  в случае параболического профиля.

Величину NA можно найти из выражения:

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (7)$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сердечника и оптической оболочки.

Условие, определяемое неравенством (6), необходимо, но недостаточно. Кроме него, должно выполняться следующее равенство:

$$2r \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = 0,38 \lambda_0 \quad (8)$$

Если неравенство (6) не выполняется, в световоде устанавливается многомодовый режим. В этом случае число мод приблизительно равно  $N = F^2/2$  для световода со ступенчатым профилем и  $N = F^2/4$  в случае градиентного профиля. Характер распространения света в многомодовом и одномодовом волокне для разных профилей показателя преломления поясняется на рис. 5.

Подробнее рассмотрим характерное для многомодового волокна явление межмодовой дисперсии. При вводе луча в оптическое волокно путь распространения от начала до конца волокна для разных мод различен. Это обуславливает разное время распространения мод, переносящих энергию первичного сигнала, и перераспределение выходной суммарной энергии в заданном отрезке времени. В результате, если импульс света на входе оптоволокна имел ярко выраженные фронт и срез сигнала, то на выходе получаем существенно «размытый» сигнал со сглаженными фронтами и срезами. Это «размывание» сигнала обусловлено межмодовой дисперсией и проявляется тем сильнее, чем длиннее линия связи. Межмодовая дисперсия ограничивает пропускную способность волокна, так как при повышении частоты входного сигнала (последовательность коротких импульсов) размытые края среза одного импульса начинают перекрываться размытым фронтом последующего, ведя к потере информативности сигнала (рис. 6). Несмотря на большую дисперсию, многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления является очень распространенным в силу более низких требований к технологическому оборудованию для его производства и используемому материалу. Данное волокно может иметь сердечник из стекла и оптическую оболочку

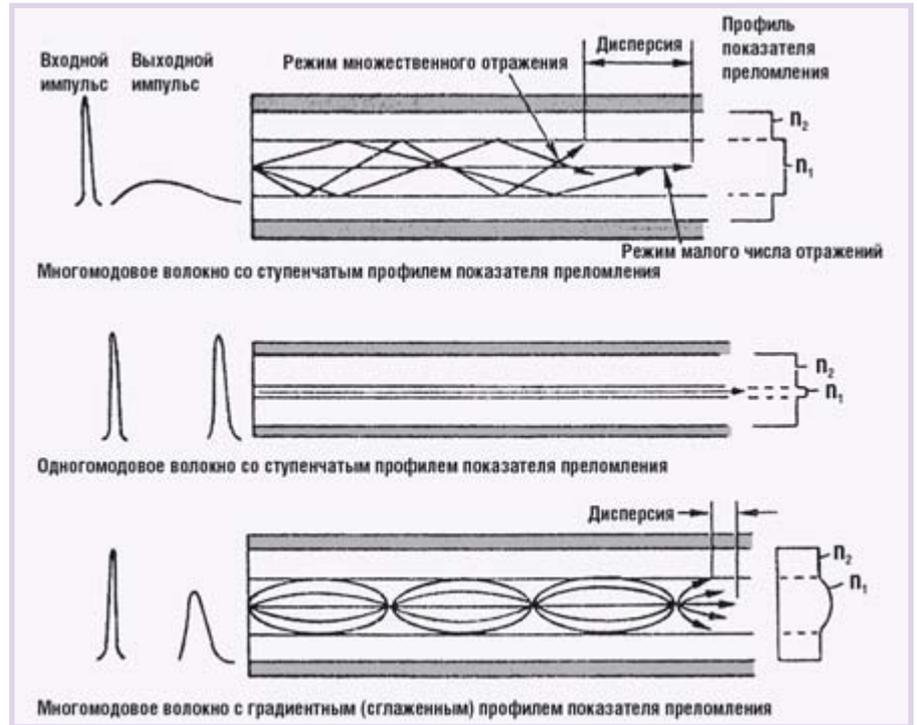


Рис. 5. Распространение света в многомодовом и одномодовом волокнах для разных профилей показателя преломления

ку из полимера (PCS) или быть полностью изготовленным из пластика. Для волокна с градиентным показателем преломления величина межмодовой дисперсии существенно меньше. Это

происходит благодаря свойству света распространяться быстрее в среде с меньшим показателем преломления: большую часть пути переотраженные лучи проходят через области сечения

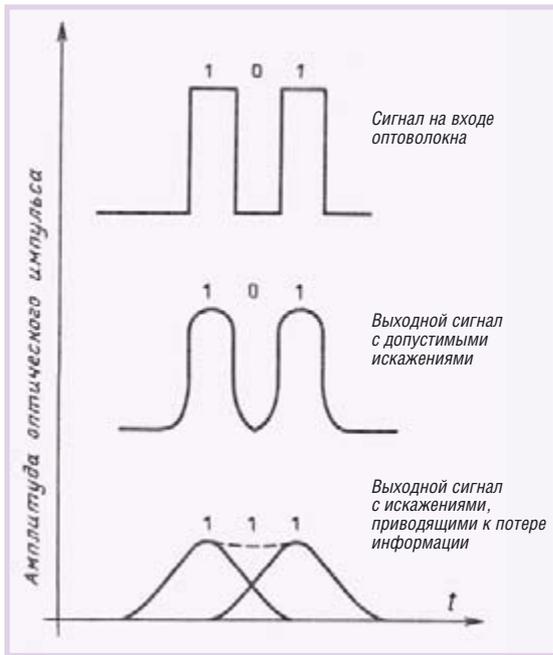


Рис. 6. Искажение передаваемого сигнала вследствие межмодовой дисперсии

оптоволокна с меньшим показателем преломления, поэтому на выходе оптоволокна они появляются почти одновременно с лучами, распространявшимися вдоль оси через область с максимальным значением показателя преломления. Градиентное оптоволокно широко используется при построении локальных сетей и в коммуникациях, требующих широкой полосы пропускания, например, при передаче видеоизображения. При этом наиболее распространённые значения отношения диаметра ядра к диаметру оптической оболочки составляют 50/125, 62,5/125. Для многомодового световода важной характеристикой является также ширина полосы пропускания волокна в пересчёте на километр его длины, называемая коэффициентом широкополосности. Например, величина этого коэффициента, равная 600 МГц·км (стандартное многомодовое волокно фирмы Siemens для длины волны до 1300 нм) говорит о том, что на расстояние в 1 км может быть передан сигнал в полосе частот до 600 МГц или на расстояние 2 км — в полосе до 300 МГц, то есть произведение длины линии передачи на ширину полосы частот сигнала должно быть величиной, меньшей или равной коэффициенту широкополосности.

Для одномодового волокна существенным является другой вид дисперсии — материальная дисперсия (или молекулярная). Если вспомнить формулу (2), то очевидно, что для разных длин волн (для источников излучения характерна

определённая ширина спектра для заданного значения рабочей частоты) показатель преломления также различен. Таким образом, даже в рамках одной моды скорость распространения в оптоволокне для разных значений частот спектра рабочей частоты различна. Этот вид дисперсии присутствует и в многомодовом оптоволокне, но им, по сравнению с межмодовой дисперсией, можно пренебречь.

Еще один вид дисперсии — волноводная дисперсия — также является существенным для одномодового волокна. По существу этот вид дисперсии связан с тем, что заметная часть оптической мощности (до 20% от общей мощности) распространяется по оптической оболочке, имеющей отлич- ный от ядра показатель преломле-

ния, что делает её скорость иной, чем при распространении в ядре. Суммарную дисперсию, включающую в себя материальную и волноводную, называют хроматической дисперсией. Хроматическая дисперсия обозначается как  $D(\lambda)$  и выражается в единицах пс/(нм·км). Для одномодового волокна, в отличие от многомодового, где оперируют понятием коэффициента широкополосности, спецификация хроматической дисперсии необходима. Типовое значение для стандартного одномодового волокна:  $D(1310 \text{ нм}) < 1,8 \text{ пс}/(\text{нм}\cdot\text{км})$ . Приблизительная оценка ширины полосы пропускания (BW) через величину одномодовой дисперсии может быть получена из выражения:

$$BW = 0,187 / (D(\lambda) \times SW \times L) \quad (9)$$

Здесь SW — ширина спектра излучателя [нм], L — длина волокна [км].

Из приведенных выражений (6) и (8) хорошо видны основные технологические пути решения вопроса получения одномодового режима: это уменьшение диаметра сердечника, уменьшение разности показателей преломления сердечника и оптической оболочки, увеличение длины волны источника излучения. Реально компромисс следует искать только между первыми двумя параметрами. С увеличением диаметра улучшаются условия для ввода повышенной мощности и условия сочленения отрезков волокна, одновременно с этим необходимо выбирать малое значение разности показателей преломле-

ния ядра и оптической оболочки, что, в свою очередь, приводит к ухудшению распространения основной моды и повышенной чувствительности к внешним воздействиям (например изгибам). При большой разности показателей преломления сердечника и оболочки маленький диаметр сердечника повышает требования к точности стыковки отрезков волокна. В современных одномодовых волокнах диаметр сердечника составляет порядка 6...10 мкм, а разность показателей преломления  $n_1 - n_2 = 0,003...0,005$ . Одномодовый режим работы для заданной длины волны реализуется при диаметре волокна, соизмеримом с длиной волны. Всё это приводит к тому, что световой пучок отражается от поверхности сердечника режее, вызывая меньшую дисперсию. В результате одномодовое волокно по сравнению с многомодовым имеет существенно меньший коэффициент затухания и большую пропускную способность (на сегодняшний день по грубой оценке более 10 Гбит/с против 2,5 Гбит/с), но само одномодовое волокно, а также соответствующие приёмники и передатчики стоят дороже, чем многомодовые.

### ПОТЕРИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Потери оптической мощности (или затухание) являются результатом поглощения света материалом световода, рассеяния в местах микро- и макроизгибов, а также отражения на концах световода. Коэффициент затухания, отражающий потери оптической мощности, обозначается  $\alpha$  и измеряется в дБ/км.

Величину потерь оптической мощности в оптоволокне можно рассчитать из соотношения (10), носящего название закона Бугера.

$$P_L = P_0 e^{-\alpha L} \quad (10)$$

Здесь  $P_L$  — величина потерь мощности на длине L,  $P_0$  — величина введенной мощности.

Учитывая, что мощность на выходе оптоволокна меньше, чем на входе, значение потерь, выраженное в децибелах, будет иметь знак минус, который часто опускается в тексте. Для современных типов одномодового оптоволокна величина коэффициента затухания при длине волны 1,3 мкм лежит в диапазоне 0,4...0,45 дБ/км. Для многомодового волокна величина коэффициента затухания при той же длине волны составляет 0,6...1,0 дБ/км. Например, для стан-

дартного многомодового оптоволоконна фирмы Siemens, используемого для построения оптических сетей PROFIBUS, коэффициент затухания при длине волны до 1300 нм составляет 0,8...1,0 дБ/км. Или другой пример: для внутренней прокладки, в частности, для организации протяженных сетей внутри зданий широко применяется оптический кабель Indoor Mini-Breakout (2, 4, 6, 8, 12, 16 или 24 оптоволоконна) фирмы Belden, многомодовые оптические волокна которого при длине волны до 1300 нм имеют коэффициент затухания всего 0,5...0,8 дБ/км (табл. 3).

Поглощение в оптическом материале определяет долю энергии волны, преобразуемую в тепловую энергию. Под поглощением в материале оптоволоконна понимается поглощение света остаточными примесями в кварцевом стекле. У кварцевого стекла это проявляется в наличии полос в частотном спектре поглощения в области длин волн 725, 875, 950, 1125, 1225 и 1370 нм, соответствующих гармоникам фундаментальной частоты колебаний межатомной связи в гидроксильных ионах  $\text{OH}^-$  и частоте колебаний связи Si-O. Концентрация ионов  $\text{OH}^-$  один на миллиард дает потери 1 дБ/км при длине волны 950 нм и около 3 дБ/км при 1225 нм. Путь решения этой проблемы очевиден — дегидратация материала, уменьшающая число гидроксильных ионов  $\text{OH}^-$ . Другие виды поглощения вызваны остаточными примесями переходных металлов, например ионами  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{2+}$ . Поглощение света в кварцевом стекле вызывается и легирующими примесями, добавляемыми в стекло для изменения показателя преломления.

Рассеяние определяет часть оптической энергии, которая переизлучается в направлении, отличном от первоначального. Рассеяние света вызвано присутствием в стекле микроскопических неоднородностей и изменением величины плотности самого материала (кварца). Это явление описывается как релеевское рассеяние, интенсивность которого обратно пропорциональна длине волны в четвертой степени. Неоднородности появляются как неизбежное зло в процессе изготовления

Таблица 3. Основные характеристики многомодового оптического волокна кабеля Indoor Mini-Breakout фирмы Belden

Тип оптоволоконна	Размеры диаметра ядра и оболочки (мкм)	Длина волны (нм)	Коэффициент затухания (средний/макс., дБ/км)	Ширина полосы пропускания (МГц·км)	Допустимая длина линии гигабитного Ethernet (м)	Показатель преломления
50/125	50 ± 2,5	850	2,5/2,7	≥600	550	1,481
	125 ± 2	1300	0,5/0,8	≥1200	550	1,476
62,5/125	62,5 ± 2,5	850	3,0/3,2	≥200	220	1,495
	125 ± 2	1300	0,6/0,9	≥600	550	1,490

оптоволоконна. Как правило, чем ниже температура осаждения стеклообразующего вещества, тем меньше флуктуации плотности материала. При длине волны 1000 нм потери за счет рассеяния составляют порядка 0,75 дБ/км.

Потери, вызванные микро- и макроизгибами волокна, неизбежны всякий раз, когда волокно имеет отклонения от правильной геометрической формы или не размещено вдоль прямой линии. Микроизгибы носят случайный характер и являются вариациями профиля границы ядра и оптической оболочки, то есть фактически проявлением технологического дефекта. Макроизгибы являются следствием неправильной прокладки оптоволоконного кабеля. Кроме увеличения затухания, при этом снижается предел прочности кабеля на разрыв (максимально допустимая нагрузка на растяжение или изгиб, не приводящая к повреждению

световода; для стандартного оптоволоконного кабеля фирмы Siemens — до 800 Н при кратковременном воздействии).

Потери, связанные с отражением на концах световода, обусловлены отражением Френеля, о котором говорилось ранее. В разговоре о потерях хотелось бы подчеркнуть фундаментальное отличие между оптическим кабелем и медным (витая пара, коаксиал): в случае медного проводника потери в линии пропорциональны увеличению частоты передаваемого сигнала, в то время как потери в оптическом волокне практически постоянны для широкого диапазона частот (рис. 7).

Отдельно хочется остановиться на вопросах температурной и радиационной стойкости оптоволоконна.

Температурные колебания оказывают влияние на абсолютные значения коэффициентов преломления ядра и оптической оболочки, а следовательно, и на их разность, что может приводить к нарушению условий существования одной моды и появлению дополнительных мод. При этом перераспределение энергии между модами приведет к потере мощности основного сигнала. Различие коэффициентов теплового расширения стеклянного сердечника и полимерной оптической оболочки увеличивает потери на микроизгибах. Поскольку температурные колебания ухудшают прочностные характеристики оптоволоконна и кабеля в целом, диапазон температур, допустимых при прокладке кабеля (–5...+50°C для кабелей Belden и Siemens), более



Рис. 7. Зависимость затухания от частоты передаваемого сигнала для разных типов проводников

узкий по сравнению с диапазоном рабочих температур. Надо подчеркнуть, что перечисленные проблемы, как правило, являются следствием резких перепадов температуры, а не стабильно высоких или низких её значений, так как диапазон рабочих температур оптоволоконных кабелей обычно лежит в границах  $-40...+70^{\circ}\text{C}$  (например,  $-30...+70^{\circ}\text{C}$  для кабелей фирмы Belden или  $-25...+60^{\circ}\text{C}$  для кабелей фирмы

Siemens), что в большинстве случаев соответствует требуемым условиям эксплуатации.

Радиационная стойкость — это способность оптоволоконной системы противостоять действию ионизирующего излучения (гамма-излучение, потоки нейтронов и т.д.). Под действием ионизирующего излучения, изменяющего структуру стекла, оптоволоконная система «темнеет», увеличивая потери мощности за счёт появ-

ляющейся структурной неоднородности волокна. Величина потерь зависит от типа излучения, дозы облучения и времени экспозиции. Под воздействием радиации происходит ионизация молекул  $\text{SiO}_2$ , миграция электронов, миграция легирующих примесей и образование гидроксильных ионов  $\text{OH}^-$  из свободного водорода. Продолжительное экспонирование волокна при низкой интенсивности облучения приводит к более сильному «потемнению», чем та же доза, полученная за более короткое время. После прекращения воздействия облучения наступает постепенное восстановление пропускной способности волокна. Например, при действии радиоактивного излучения 3700 рад в течение 3 нс (условия ядерного взрыва) затухание может достигать 1000 дБ/км, и уже через 10 с величина потерь становится меньше 5 дБ/км. Имеются данные, на основании которых можно сделать следующий вывод: оптоволоконная система с ядром из стекла с высоким содержанием гидроксильных ионов  $\text{OH}^-$  после воздействия излучения работает лучше, так как ионы  $\text{OH}^-$ , поглощая энергию ионизирующего излучения, уменьшают вероятность образования дефектов и сокра-

Модули ADAM-4541  
(сопряжения  
RS-232/422/485  
с волоконно-оптической  
линией связи)  
и ADAM-6521  
(5-портовые  
коммутаторы Ethernet  
с оптическим  
портом)



щают время восстановления. В общем случае существенными факторами, влияющими на радиационную стойкость оптоволоконна, являются тип легирующей добавки в материале ядра, диаметр ядра и тип оптической оболочки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор статьи, не претендуя на полноту и фундаментальную глубину освещения вопроса, ставил своей целью познакомить разработчиков, еще не обративших внимания на эту интересную технологию, с основными понятиями и законами физической оптики, на которых она базируется. Технические решения с использованием оптического канала связи уже сейчас становятся все более привлекательными в

силу существенного снижения стоимости технических средств в пересчете на оптический канал. В сфере автоматизации, где к каналу связи предъявляются требования по обеспечению

большой пропускной способности и высокой помехозащищенности, взрывобезопасности и секретности, а также особые требования к минимизации веса оборудования для коммуникаций и удобству его монтажа, оптический канал находит всё более широкое применение. В этой связи по-

казательным стало появление модулей сопряжения с оптоволоконном ADAM-4541, ADAM-6521 среди изделий фирмы Advantech, которая чутко отслеживает тенденции на рынке промышленной автоматизации, модемов LDM80/85 с выходом на оптоволоконно фирмы Dataforth, интерфейсных модулей серии MACH-300 с оптическими портами, в том числе и для гигабитного Ethernet, фирмы Hirschmann.

Если говорить о преимуществах оптоволоконна, с точки зрения скорости передачи, то можно привести следующий факт. В 2001 году фирмой



Интерфейсный модуль  
M-GIGA 2SX-SC  
серии MACH-3000  
с 2 оптическими портами

Alcatel был установлен рекорд скорости передачи данных по оптоволоконну, проложенному под водой: без повторителей на расстоянии 320 км сигнал передавался с скоростью 1,6 Тбит/с. Цифры фантастические! Очевидно, что за оптоволоконном будущее. ●

**Автор — сотрудник  
фирмы ПРОСОФТ  
Телефон: (812) 325-3790  
Факс: (812) 325-3791  
E-mail: valera@spb.prosoft.ru**