

## 2. Характеристики ОВ

### а. оптические характеристики многомодового волокна

Основными оптическими характеристиками многомодового волокна являются следующие

- затухание
- широкополосность
- межмодовая дисперсия
- дифференциальная групповая задержка
- диаметр сердцевины
- профиль показателя преломления
- числовая апертура.

*Затухание* света в многомодовом волокне вызывается теми же механизмами, что и в одномодовом. Они будут рассмотрены в разделе 2.б.

*Широкополосность и межмодовая дисперсия* многомодового волокна существенно зависят от профиля показателя преломления. Наибольшей широкополосностью обладают оптические волокна с параболическим градиентным *профилем показателя преломления*.

Профилем показателя преломления оптического волокна называется зависимость показателя преломления  $n$  волокна от расстояния  $r$  от оси волокна. Для описания профиля показателя преломления многомодового волокна используется нормализованная функция

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right] \quad \text{при } r < a \quad (2.1)$$

и  $n(r) = n_2$  (постоянная величина) при  $r > a$ ,

где  $n_1$  – максимальное значение показателя преломления сердцевины,

$\Delta = \frac{NA^2}{2n_2^2} = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2}$  – нормированная разность показателей преломления,  $r$  –

расстояние от оси волокна,  $a$  – радиус сердцевины,  $n_2$  – показатель преломления оболочки [1]. Параметр  $a$  характеризует профиль показателя преломления.

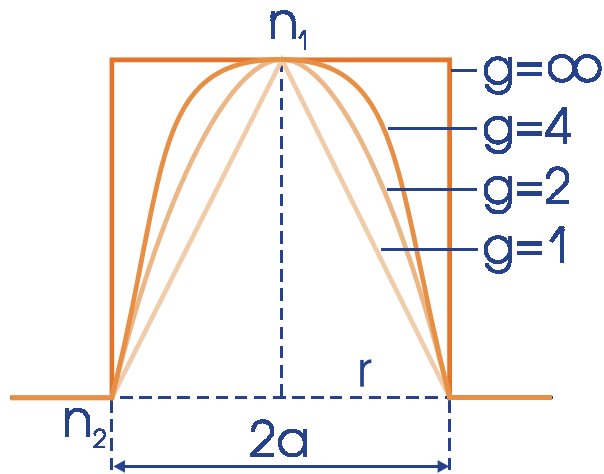


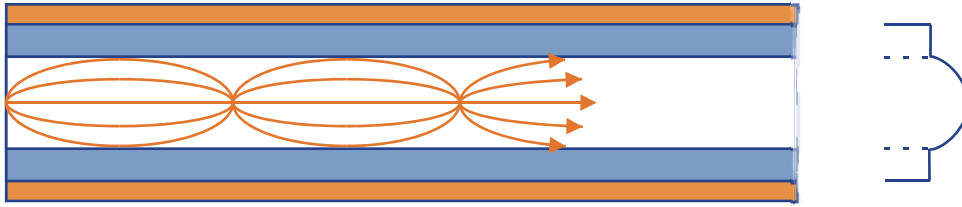
Рис.2.1. Профили показателя преломления многомодового волокна:

$g = \infty$  профиль ступенчатый

$g = 1$  профиль треугольный

$g = 2$  профиль параболический

Только при  $g = \infty$  показатель преломления сердцевины является постоянной величиной  $n_1$  для всей сердцевины. В других случаях показатель преломления зависит от  $r$ . Такое волокно называется *градиентным волокном*. В настоящее время практическое применение в ВОСП находит волокно, профиль показателя преломления которого является параболическим ( $g = 2$ ), поскольку именно такое волокно обеспечивает минимальную величину межмодовой дисперсии и максимальную широкополосность.



Лучи 1 и 2 проходят больший путь ( $L_1 = L_2 > L_3$ ), чем аксиальный луч,

но их средние скорости также больше ( $V_{1cp} = V_{2cp} > V_{3cp}$ ),

поэтому задержки всех лучей примерно одинаковы

$$\frac{L_1}{V_{1cp}} = \frac{L_2}{V_{2cp}} \approx \frac{L_3}{V_{3cp}}$$

Рис.2.2. Ход лучей в градиентном волокне

Разность показателей преломления сердцевины и оболочки определяет числовую апертуру ОВ (см. раздел 1, формулу (1.3)). Большие диаметр сердцевины и числовая апертура волокна облегчают ввод светового сигнала в волокно и соединение волокон, но уменьшают его широкополосность. Число мод многомодового волокна определяется нормированной частотой (см. раздел 1)

$$N = \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2}. \quad (2.2)$$

Поскольку  $V$  пропорционально радиусу волокна и числовой апертуре (1.9) то число мод быстро растет с увеличением этих параметров.

Неравенство групповых скоростей распространения приводит к увеличению длительности световых импульсов из-за различного времени распространения модовых компонент импульса. Это явление называется межмодовой дисперсией (см. раздел 1). При распространении в волокне гармонически модулированных световых волн дисперсия приводит к уменьшению амплитуды модуляции выходного сигнала с увеличением частоты модуляции и постоянной величина амплитуды модуляции входного сигнала.

Зависимость от частоты отношения комплексной амплитуды модуляции выходного сигнала к комплексной амплитуде модуляции входного сигнала называется *передаточной функцией*  $H(f)$ . Зависимость модуля передаточной функции от частоты называется *амплитудно-частотной характеристикой*, а зависимость фазы от частоты модуляции – *фазо-частотной характеристикой*. Шириной полосы пропускания многомодового волокна  $\Delta f$  называется минимальная частота модуляции, при которой амплитуда выходного сигнала уменьшается вдвое (т.е. на три децибела) по сравнению с амплитудой сигнала на нулевой частоте. Для большей определенности ее называют шириной полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ.

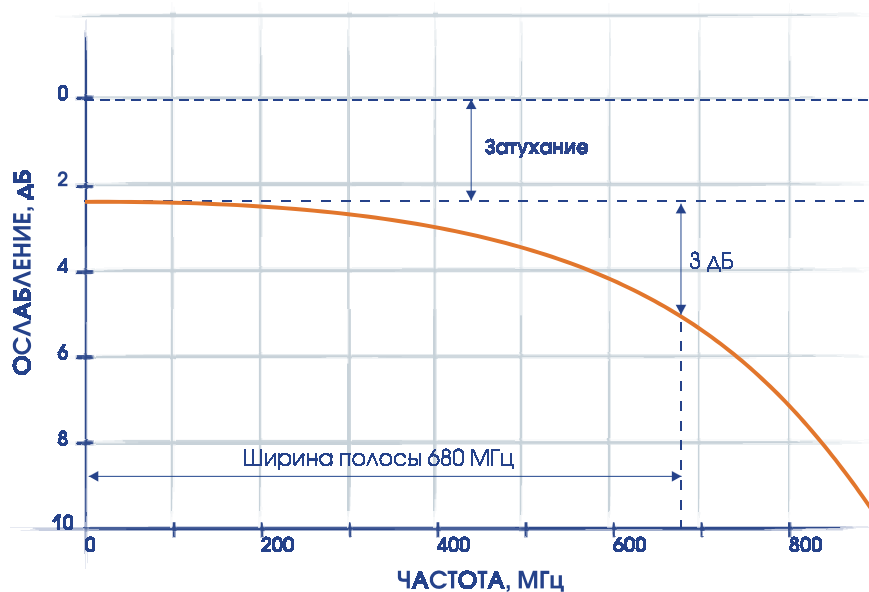


Рис.2.3. Амплитудно-частотная характеристика и ширина полосы пропускания волокна

Ширина полосы пропускания  $\Delta f$  и межмодовая дисперсия  $\Delta T_{mm}$  связаны приближенной формулой

$$\Delta f \approx \frac{0.375}{\Delta T_{mm}}. \quad (2.3)$$

## *b. Затухание*

Уменьшение средней мощности светового сигнала по мере распространения вдоль волновода называется затуханием. Затухание света в оптическом волокне вызывается несколькими физическими механизмами, связанными с поглощением или рассеянием света.

Затухание света в волокне (при малой мощности светового сигнала), как и в любой другой линейной среде, приводит к уменьшению мощности:

$$dP / dz = -\gamma P$$

(2.4)

где  $\gamma$  – это коэффициент затухания, а  $P$  – оптическая мощность. Проинтегрировав (2.4) по  $z$  получим хорошо известный в оптике линейных сред закон экспоненциального убывания мощности (закон Бугера) [2]:

$$P_{out}(z) = P_{in} \exp(-\gamma L) \quad (2.5)$$

Поскольку величина мощности сигнала в ВОСП может меняться на много порядков в прикладной волоконной оптике чаще используются логарифмические единицы. Удельное затухание в логарифмических единицах измеряется в дБ/км и определяется следующим выражением:

$$\alpha \text{ (дБ/км)} = \frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = -10\gamma \log_{10}(e) = -4.343\gamma \quad (2.6)$$

В формуле (2.6) коэффициент затухания должен быть выражен в ( $\text{км}^{-1}$ ). Затухание в отрезке волокна длиной  $L$  км равно

$$Z = \alpha L \quad (2.7)$$

Отметим, что затухание  $Z$  и удельное затухание  $\alpha$  являются отрицательными величинами, однако знак минуса часто опускают и приводят значения модуля этих величин.

Если потери в отрезке волокна длиной  $L$  км равны 10дБ, это означает, что мощность сигнала  $P(L)$  в световоде на расстоянии  $L$  составляет 10% от мощности сигнала  $P(0)$  в начале световода; при затухании в 3дБ  $P(L)$  равна 50% от  $P(0)$ , а при затухании в 1дБ – около 80%. Экспоненциальный закон (2.5) изменения мощности светового сигнала превращается в линейный, если мощность также выразить в логарифмических единицах.

Логарифмический уровень энергетической величины  $P_2$  (мощность или интенсивность света) относительно начального уровня  $P_1$  одноименной величины определяется выражением:

$$A = 10 \log P_2 / P_1 \text{ (дБ)}. \quad (2.7)$$

В качестве начального уровня обычно выбирается значение мощности 1 мВт. Логарифмической единицей мощности, в этом случае, является децибелл на милливатт, которая имеет обозначение дБм. Мощность в дБм связана с мощностью в мВт следующим выражением:

$$P[\text{дБм}] = 10 \log \frac{P[\text{мВт}]}{1[\text{мВт}]}. \quad (2.8)$$

С учетом введенных обозначений (2.6-2.8) формула (2.5) для выходной мощности примет следующий вид:

$$P_{out}[\text{дБм}] = P_{in}[\text{дБм}] + \alpha L[\text{дБ}] \quad (2.9)$$

Основными физическими явлениями, приводящими к затуханию являются следующие:

- Рэлеевское рассеяние  $\alpha_R$
- Рассеяние на дефектах волокна  $\alpha_d$
- Поглощение матрицей кварцевого стекла  $\alpha_{SIL}$
- Примесное поглощение  $\alpha_{Dop}$
- Поглощение на микро и макроизгибах  $\alpha_B$

Полные потери  $\alpha_\Sigma$  определяются суммированием вкладов всех источников потерь:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_R + \alpha_d + \alpha_{SIL} + \alpha_{Dop} + \alpha_B. \quad (2.10)$$

Так называемое *рэлеевское рассеяние*  $\alpha_R$  связано с рассеянием на неоднородностях, размеры которых значительно меньше длины световой волны. Этот вид рассеяния определяет теоретическую границу, ниже которой затухание не может быть уменьшено и в современных ОВ является основным источником потерь в рабочих областях спектра.

Если все виды неоднородностей, связанные с технологией производства удалось устранить, то рэлеевское рассеяние вызывается рассеянием на неоднородностях показателя преломления, возникших в расплавленном кварце в связи с локальными термодинамическими флуктуациями концентрации молекул (плотности) кварца из-за их хаотического движения в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна неоднородности, возникшие в расплавленной фазе, застывают на своих местах, как бы «вмораживаются» в структуру кварцевого стекла. Колебания плотности приводят к случайным флуктуациям показателя преломления в масштабе, меньшем, чем длина световой волны  $\lambda$ . Эффективное сечение рассеяния пропорционально  $\lambda^{-4}$ . Так что собственные потери в стеклянном волокне из-за рэлеевского рассеяния можно описать следующей функцией:

$$\alpha_R = C/\lambda^{-4} \quad (2.11)$$

где значение постоянной  $C$  находится в диапазоне 0.7-0.9 (дБ/км)мкм<sup>4</sup> (в зависимости от компонентов сердцевины волокна). Такие значения  $C$  соответствуют, при  $\lambda = 1.55$  мкм,  $\alpha_R = 0.12 - 0.16$  дБ/км.



Рис.2.4. Рэлеевское рассеяние в волокне

Еще один источник потерь - дефекты на границе раздела сердцевины и оболочки (например, случайные изменения радиуса сердцевины). Как правило, неоднородности, возникающие вследствие таких дефектов, имеют масштаб, превышающий длину волны света. Рассеяние на таких объектах называется *рассеянием Ми*. В современных ОВ потери на такое рассеяние, как правило, не превышают 0.03дБ/км.

Поэтому рассеяние на микродефектах  $\alpha_d$  в современных одномодовых волокнах играет незначительную роль, однако оно несколько более заметно в многомодовом волокне.

Собственное поглощение кварцевого стекла (химическая формула  $SiO_2$ ) определяется поглощением *фотонов* (квантов света) при котором энергия фотона переходит либо в энергию электронной подсистемы либо в колебательную энергию матрицы. Первый тип поглощения соответствует электронному спектру поглощения, а второй – колебательному.

Спектр собственного электронного поглощения кварцевого стекла лежит в ультрафиолетовой области ( $\lambda < 0.4$  мкм). Колебательный спектр лежит в инфракрасной области ( $\lambda < 7$  мкм). Поскольку структура кварцевого стекла аморфная, полосы поглощения имеют размытые границы, а их «хвосты» заходят в видимую область спектра. Во втором и третьем окнах прозрачности в диапазоне длин волн 1.3-1.6 мкм потери, вызванные собственным поглощением, имеют порядок 0.03 дБ/км.

Примесное поглощение вызывается поглощением фотонов примесями с возбуждением электронных или колебательных уровней частиц примеси. Примеси в виде ионов металлов переходной группы, таких, как Fe, Cu, Ni, Mn и Cr вызывают сильное поглощение на длинах волн в диапазоне 0.6-1.6 мкм. Для того чтобы уровень потерь был ниже 1 дБ/км, количество примесей должно быть менее одной части на миллиард. Современная технология позволяет получать кварц такой высокой чистоты.

Основной причиной примесного поглощения в современных волокнах, изготовленных по последнему слову техники, является наличие молекул воды. Вода состоит из водорода и кислорода, ее химическая формула  $H_2O$ . При взаимодействии с матрицей кварца молекула воды *диссоциирует* с образованием ионов водорода  $H$  и гидроксильной группы  $OH$ . Центральная длина волны колебательной полосы поглощения ионов  $OH$  равна 2.73 мкм. Гармоники и комбинационные частоты с кварцевой матрицей вызывают сильное поглощение на длинах волн 1.39, 1.24 и 0.95 мкм.



Три пика, расположенные поблизости от этих длин волн вызваны наличием в матрице кварцевого стекла молекул воды. Даже наличие одной части на миллион может привести на длине волны 1.39мкм к потерям 59дБ/км. Как правило, для того чтобы получить волокно с низкими потерями, концентрацию *ОН*-ионов нужно снижать до уровня ниже  $10^{-8}$ . Поэтому наибольший интерес для целей передачи информации представляет световое излучение с длинами волн 850 нм, 1.31 мкм и 1.55мкм, поскольку они расположены между зонами поглощения, и затухание на этих длинах волн минимально. Области вокруг этих длин волн называются первым, вторым и третьим окнами прозрачности.

Дополнительные потери могут вызываться и такими легирующими присадками, как  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{B}_2\text{O}_3$  (используемыми при изготовлении волокна для изменения показателя преломления кварцевого стекла). На рис.2.4 приведен график зависимости затухания типичного волокна от длины волны.

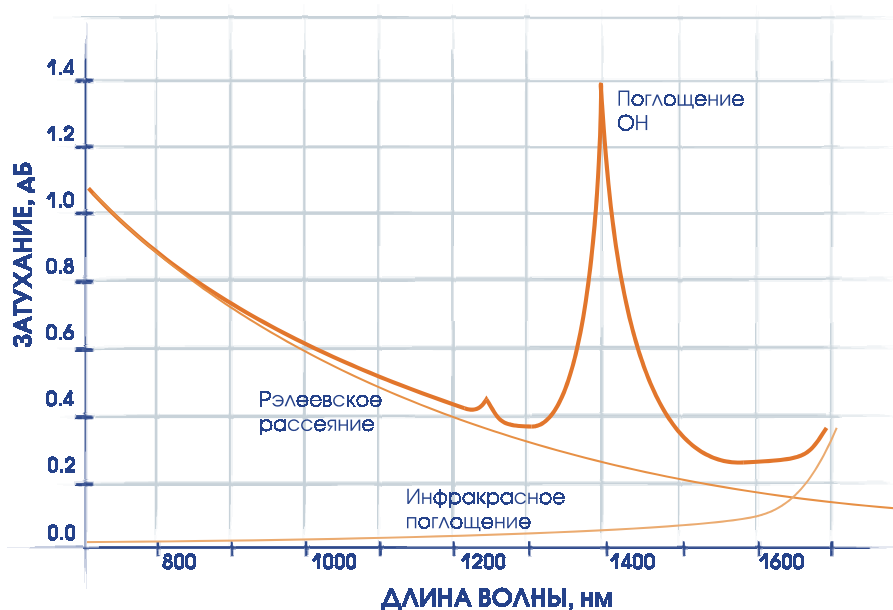


Рис.2.5. Зависимость затухания одномодового кварцевого волокна от длины волны

Еще одной причиной возникновения потерь в ОВ являются изгибы волокна. Потери на изгибе прямо пропорциональны  $\exp(-R/R_c)$ , где  $R$  – это радиус кривизны изгиба волокна, а  $R_c = \alpha / (n_1^2 - n_2^2)$ . У одномодовых волокон обычно  $R_c = 0.2-0.4$ мм, а потери на изгиб, при радиусе изгиба  $R > 5$ мм, пренебрежимо малы ( $< 0.01$ дБ/км). Поскольку у большинства макроизгибов значение  $R$  превышает 5мм, то *потери на макроизгибах практически пренебрежимо малы.*

Серьезной причиной потерь в волокне (особенно входящем в состав кабеля) является случайная осевая деформация, неизбежно возникающая при прокладке кабеля. Такие потери называются *потерями на микроизгибах*. Микроизгибы приводят к увеличению потерь как в одномодовом, так и в многомодовом волокне, причем эти потери – если не принять мер по их уменьшению – могут быть исключительно велики ( $\approx 100$ дБ/км). Потери на микроизгибах в одномодовых волокнах можно свести к минимуму, если выбрать значение структурного параметра  $V$ , как можно более близкое к критическому значению 2.405, так как в этом случае большая часть мощности моды сосредоточена в сердцевине. На практике волокно конструируется таким образом, чтобы значение нормированной частоты  $V$ , при работе на рабочей длине волны находилось в диапазоне 2.0-2.4.

### с. Хроматическая дисперсия

Межмодовая дисперсия принципиально отсутствует в одномодовых волокнах. Однако уширение импульсов в них полностью не исчезает, т.к. групповая скорость распространения фундаментальной моды зависит от длины волны (см. раздел 1.с). В результате этого, различные составляющие спектра импульса распространяются со слегка отличными друг от друга групповыми скоростями. Это явление называется *хроматической дисперсией*.

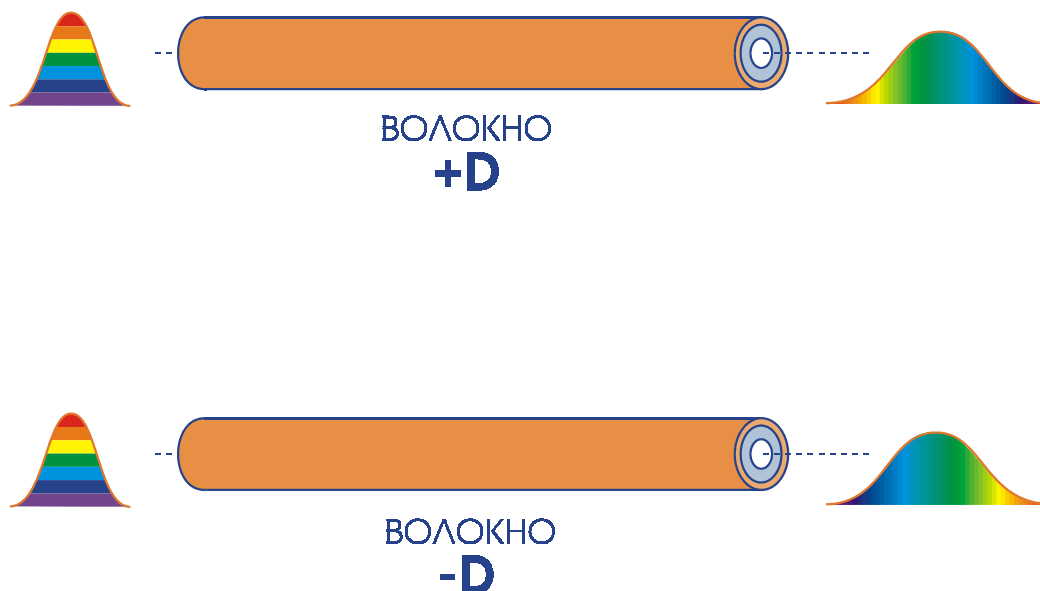


Рис.2.6. Хроматическая дисперсия.

Результатом того, что различные спектральные компоненты движутся с различной скоростью, как правило, является уширение светового импульса. Поскольку

хроматическая дисперсия связана с различием групповых скоростей разных спектральных компонент светового сигнала, то величина уширения импульса  $\Delta T_{hr}$  пропорциональна не только длине волокна  $L$ , но и ширине спектра оптического сигнала  $\Delta\lambda$  :

$$\Delta T_{hr} = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{L}{V_{eG}} \right) \Delta\lambda = D_{hr} L \Delta\lambda, \quad (2.12)$$

где введен коэффициент хроматической дисперсии

$$D_{hr} = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{1}{V_{eG}} \right) \quad (2.13)$$

измеряется в пикосекундах на километр и нанометр  $[пс \cdot км^{-1} \cdot нм^{-1}]$ .

Длина волны  $\lambda_{ZD}$ , при которой  $D=0$ , называется длиной волны нулевой дисперсией.

Вклад в хроматическую дисперсию вносят два механизма: *материальная дисперсия*  $D_M(\lambda)$  (дисперсия материала) и *волноводная дисперсия*  $D_W(\lambda)$ :

$$D_{hr}(\lambda) = D_M(\lambda) + D_W(\lambda). \quad (2.14)$$

Дисперсия материала возникает вследствие того, что показатель преломления кварцевого стекла изменяется в зависимости от длины волны оптического излучения. Для фазового показателя преломления существует эмпирическая формула Солмейера (см. приложение). Групповой показатель преломления связан с фазовым формулой (1.14)

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2.15)$$

Величина материальной дисперсии  $D_M(\lambda)$  зависит от крутизны зависимости группового показателя преломления кварцевого стекла от длины волны:

$$D_M = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda}. \quad (2.16)$$

На рис.2.7 показана зависимость от длины волны параметров  $n$  и  $n_g$  кварцевого стекла в диапазоне 500-1600 нм.

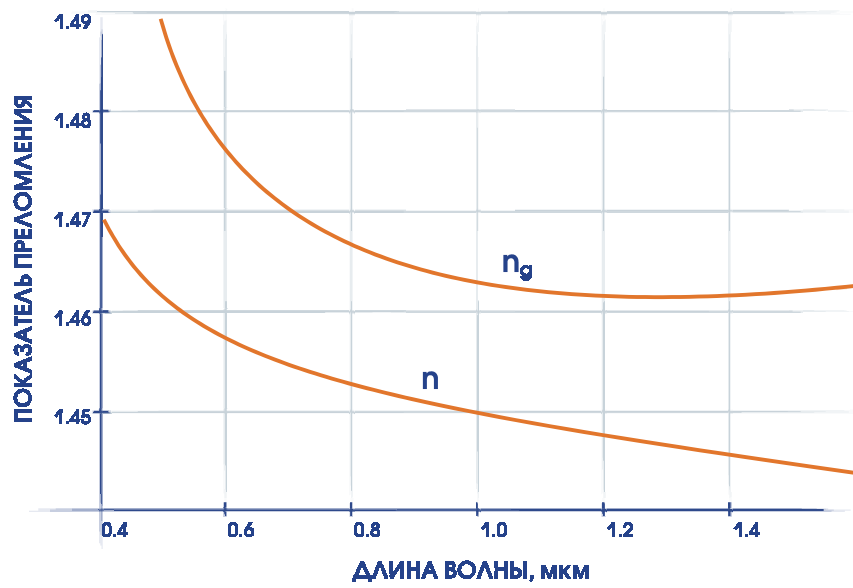


Рис.2.7. Зависимости фазового и группового показателей преломления от длины волны

У чистого кварцевого стекла при  $\lambda = 1276$  нм  $dn_g / d\lambda = 0$ . Эта длина волны называется *длиной волны нулевой дисперсии материала* ( $\lambda_{ZD}$ ), т.к.  $D_M = 0$ . При длине волны ниже длины волны нулевой дисперсии параметр дисперсии  $D_M$  имеет отрицательное значение, в обратном случае – положительное. В диапазоне длин волн 1.25-1.66 можно пользоваться приближенным эмпирическим соотношением:

$$D_M \approx 122(1 - \lambda_{ZD} / \lambda) \text{ [пс/(нм·км)]}. \quad (2.17)$$

При этом нужно подчеркнуть, что  $\lambda_{ZD} = 1276$  нм только у чистого кварцевого стекла. У оптических волокон с сердцевиной и оболочкой, легированными с целью изменения показателя преломления, длину волны нулевой дисперсии можно изменять в небольших пределах (диапазон изменения 1270-1290 нм).

Другой источник хроматической дисперсии – волноводная дисперсия  $D_W(\lambda)$ . Этим термином обозначается зависимость задержки светового импульса от длины волны, связанная с изменением скорости его распространения в волокне из-за волноводного характера распространения. На языке геометрической оптики изменение длины волны приводит к изменению угла наклона системы зигзагообразных лучей, которые можно поставить в соответствие фундаментальной моде (см. раздел 1.с) следствием чего является изменение времени распространения лучей в волокне даже при постоянстве показателей преломления сердцевины и оболочки волокна.

Параметр  $D_W$  во всем диапазоне длин волн 800-1600 нм отрицателен,  $D_M$  отрицателен при длинах волн меньше  $\lambda_{ZD}$  и положителен при длинах волн, превышающих  $\lambda_{ZD}$ . Параметры  $D_M$ ,  $D_W$  и их сумма  $D = D_M + D_W$  для стандартного одномодового волокна показаны на рис.2.8.

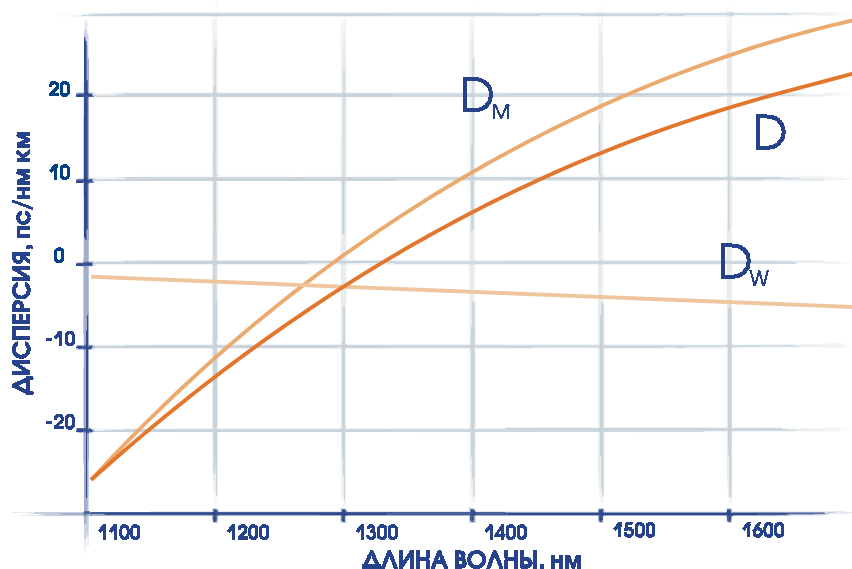


Рис.2.8. Зависимости коэффициентов хроматической дисперсии, материальной и волноводной дисперсии от длины волны в стандартном волокне со ступенчатым профилем.

Влияние волноводной дисперсии заключается в смещении  $\lambda_{zD}$  на 30-40нм, так что полная дисперсия становится нулевой при длине волны около 1310нм. Волноводная дисперсия также уменьшает значение параметра  $D$  (его составляющую  $D_M$ ) в диапазоне длин волн 1300-1600 нм. Это представляет интерес для волоконно-оптических систем связи. При длине волны около 1550нм типичные значения  $D$  находятся в диапазоне 15-18 пс/(км-нм). Этот диапазон длин волн представляет значительный интерес для оптических систем, а высокие значения  $D$  в стандартном волокне ограничивают эксплуатационные характеристики волоконно-оптических систем, работающих на длине волны 1550нм.

Поскольку значение параметра  $D_w$  зависит от таких параметров волокна, как радиус сердцевинны и разность между показателями преломления, то оказывается вполне возможным сконструировать такое оптическое волокно, у которого параметр  $\lambda_{zD}$  будет смещен в область 1550нм. Такие волокна называются *волокнами со смещенной дисперсией*. Можно также изменить значение волноводной дисперсии таким образом, что полная дисперсия  $D$  станет относительно небольшой в широком диапазоне длин волн (от 1300 до 1600нм). Такие волокна называются *волокнами со сглаженной дисперсией*.

Они особенно перспективны в системах с плотным *спектральным разделением каналов* (DWDM – системах). Характеризует степень «сглаженности» кривой зависимости коэффициента хроматической дисперсии от длины волны *наклон зависимости хроматической дисперсии* от длины волны при длине волны нулевой дисперсии

Очень важно отметить, что расширение световых импульсов из-за хроматической дисперсии может быть скомпенсировано. Принцип компенсации поясняет рис.2.9. Световой импульс после прохождения отрезка волокна с положительной дисперсией расширяется т.к. его различные спектральные компоненты распространяются с разной скоростью (см. раздел 1.с). В результате импульс становится частотно модулированным: на фронте сосредоточены коротковолновые спектральные компоненты, а на спаде – длинноволновые компоненты. Это связано с тем, что в волокне с положительной дисперсией коротковолновые компоненты



В то же время при распространении в волокне с отрицательным чирпом их длительность на некотором расстоянии от входа в волокно даже сокращается.

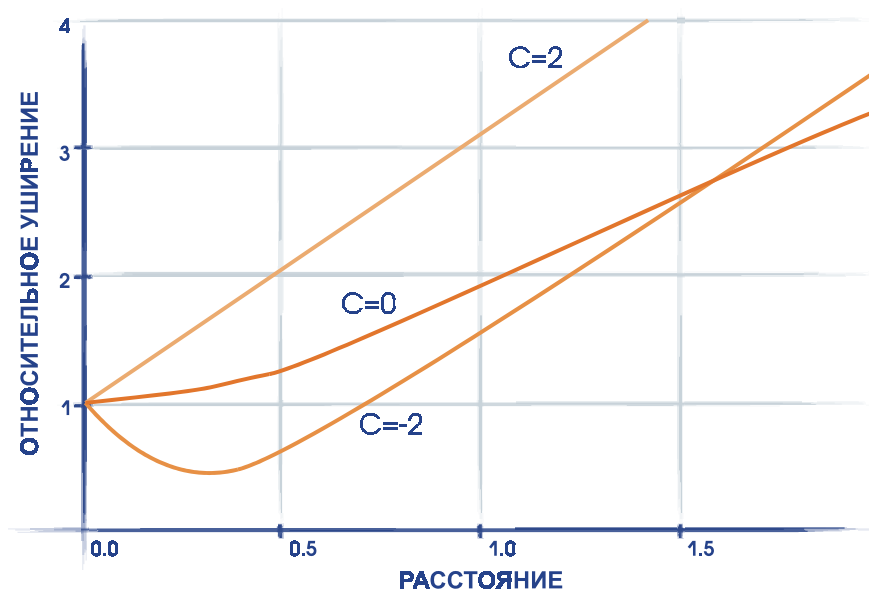


Рис.2.10. Распространение импульсов с положительным чирпом и без чирпа в волокнах с положительной и отрицательной дисперсией.

#### *d. Поляризационная модовая дисперсия*

Еще один потенциальный источник уширения импульсов связан с двулучепреломлением волокна. Свет – это поперечные электромагнитные волны. Направление колебаний вектора электрического поля в идеально круглом волокне может быть любым в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Поэтому фундаментальная мода в одномодовом волокне содержит две ортогонально поляризованные компоненты, т.е. включает в себя две ортогонально поляризованные моды. В волокне с оптически идеальной симметричной круглой сердцевиной и оболочкой как в объемной изотропной среде моды обеих поляризаций распространялись бы с одинаковой скоростью. Небольшие отклонения сердцевины волокна или оболочки от идеальной вращательной симметрии а также возникновение механических напряжений ведут к появлению двулучепреломления.



Такие нарушения идеальной круговой симметрии всегда присутствуют в реальных волокнах, поэтому в них ортогонально поляризованные компоненты световых импульсов (поляризационные моды) распространяются с несколько различными скоростями.

Если входной импульс возбуждает обе составляющих поляризации, то у выхода из волокна он уширяется из-за того, что ортогонально поляризованные компоненты оказываются сдвинуты друг относительно друга (см. рис. 2.11).

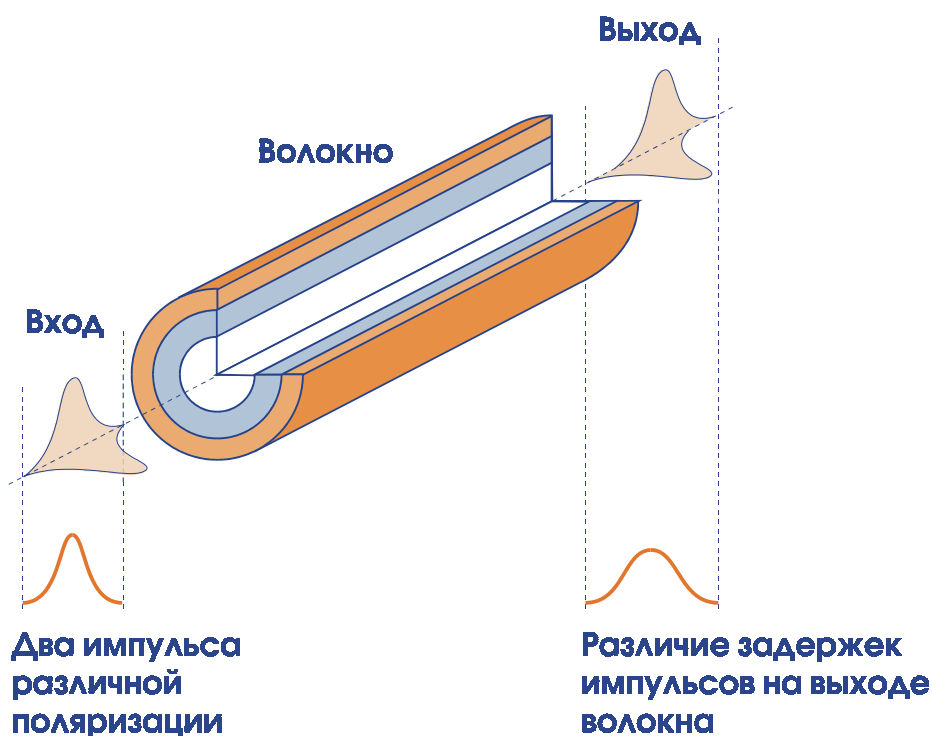


Рис.2.11. Поляризационная модовая дисперсия.

Разделение мод, а точнее их задержка друг относительно друга (в пс), на выходе из волоконного световода называется *поляризационной модовой дисперсией* (ПМД). ПМД играет важную роль в высокоскоростных ВОСП, особенно при использовании усилителей для увеличения дальности передачи информации и компенсаторов для уменьшения влияния хроматической дисперсии.

Некоторые специальные типы оптического волокна изготавливаются с постоянным значением двулучепреломления. Такое волокно обладает способностью сохранять поляризацию света, если поляризация света соответствует одному из двух собственных типов поляризации волокна, и, поэтому, оно называется *сохраняющим поляризацию волокном*. В большинстве случаев изготавливается волокно, сохраняющее

линейную поляризацию, направленную вдоль двух ортогональных осей  $x$  и  $y$ , называемых главными осями ОВ.

Величину уширения импульсов в таком волокне можно оценить, используя время задержки  $\Delta T_{xy}$  между двумя составляющими поляризации во время распространения импульса. При длине волокна  $L$  значение  $\Delta T_{xy}$  определяется следующим образом:

$$\Delta T_{xy} = \left| \frac{L}{V_{eGx}} - \frac{L}{V_{eGy}} \right|, \quad (2.18)$$

где подстрочные индексы  $x$  и  $y$  относятся к двум ортогонально поляризованным модам.

Величина  $\Delta T/L$  является единицей измерения ПМД (аналогично межмодовой дисперсии в коротком многомодовом волокне). У волокон, сохраняющих поляризацию,  $\Delta T/L$  имеет довольно большое значение ( $\approx 1$  нс/км). Однако ПМД в таких волокнах можно свести к нулю, если вводить свет в волокно вдоль одной из главных осей.

Для оценки значения ПМД в обычных телекоммуникационных волокнах выражение (2.18) использовать непосредственно нельзя. В силу случайного характера анизотропии в волокне, используемом в системах связи, в них нет выделенных состояний поляризации. Фактически, ПМД характеризуется среднеквадратичным значением  $\Delta T_{PMD}$ , получаемым после усреднения случайных возмущений вдоль всего волокна. В результате такого усреднения для величины среднеквадратичного уширения световых импульсов в ОВ получим формулу:

$$\Delta T_{PMD} \approx \Delta \beta_1 \sqrt{hL} = D_{PMD} \sqrt{L}, \quad (2.19)$$

где  $D_{PMD}$  – это параметр ПМД с типичными значениями, находящимися в диапазоне  $D_{PMD} = 0.1 - 1$  пс/ $\sqrt{\text{км}}$ .

ПМД может стать ограничивающим фактором для волоконно-оптических систем связи, рассчитанных на передачу сигналов на большие расстояния на длине волны, близкой к длине волны нулевой дисперсии волокна. В частности ПМД становится определяющим фактором уширения световых импульсов при использовании узкополосных источников излучения и систем компенсации хроматической дисперсии.

#### *е. Геометрические характеристики*

Основными геометрическими характеристиками ОВ являются следующие.

- Диаметр сердцевины и диаметр поля моды
- Диаметр оболочки
- Величина отклонения диаметра сердцевины от номинальной
- Величина отклонения диаметра оболочки от номинальной
- Отклонение сердцевины и оболочки волокна от формы круга
- Ошибка concentричности сердцевины и оболочки
- Ошибка concentричности оболочки и защитного покрытия
- Разность показателей преломления и числовая апертура
- Профиль показателя преломления

Геометрические параметры являются основным фактором, определяющим уровень потерь при сварке волокон и количество успешных сварок. Преимущества более строгой геометрии волокна могут быть весьма ощутимыми, поскольку любое сокращение потерь при сварке волокон и увеличение количества успешных сварок означает существенное снижение затрат. Устанавливая оптическое волокно, важно понимать, как его характеристики влияют на качество сращивания и на работу системы в целом.

Волокно с жесткими допусками на геометрические характеристики не только упрощает и ускоряет сварку, но и снижает потребность в испытаниях, обеспечивая надежное, высококачественное выполнение соединения. Сегодня порядка 9% общей стоимости трудозатрат на установку системы приходится на сварку волокна.

Доказано, что наиболее заметное влияние на качество соединения оказывают три параметра:

- неконцентричность сердцевины и оболочки волокна,
  - диаметр оболочки и
  - собственный изгиб волокна.
- **Неконцентричность сердцевины/оболочки** определяет, насколько точно сердцевина волокна центрирована по отношению к его оболочке. Улучшение этой характеристики уменьшает шансы на смещение сердцевин свариваемых волокон, обеспечивая, в результате, более качественные соединения с меньшими потерями.
  - **Собственный изгиб волокна** определяет радиус изгиба вдоль волокна. Если изгиб значителен, это может привести к слишком большим отклонениям при одновременной сварке нескольких волокон, или неточной стыковке при совмещении V – образных канавок сварочного аппарата, что может вызвать значительные приросты затухания в месте сварки и снижение числа успешных сварок.
  - **Диаметр оболочки** определяет наружный размер волокна. Это диаметр стеклянной оболочки. Чем жестче спецификации на диаметр, тем больше однородность внешнего размера волокна. Диаметр оболочки особенно важен при использовании размерных наконечников или коннекторов, устанавливаемых в полевых условиях. Эффективность этих устройств при совмещении и соединении волокон зависит от совпадения диаметров оболочек. Диаметр оболочки также имеет значение при совмещении V – образных канавок.

Указанные параметры контролируются в процессе изготовления волокна и должны закладываться в каждый метр волокна, а не выбираться из общего распределения после производства. Это важно, поскольку измерения, выполняемые по окончании производства, не гарантируют постоянства параметров волокна по всей его длине.

На практике доказано, что волокна с улучшенной concentricity сердцевины и оболочки, незначительным собственным изгибом и строго постоянным диаметром наружной оболочки облегчают одновременное сращивание нескольких волокон. При массовом сращивании волокон, индивидуального совмещения волокна с волокном не происходит, поэтому соблюдение всех геометрических параметров позволяет добиться качественного соединения волокон.

На рис.2.12 показано, как диаметр наружной оболочки, неконцентричность сердцевины/оболочки и собственный изгиб волокна способны повлиять на качество совмещения волокон во время сращивания. Для компаний, устанавливающих волоконно–оптические линии, жесткие производственные допуски означают значительно более высокий процент выполнения сварок с низким уровнем потерь.

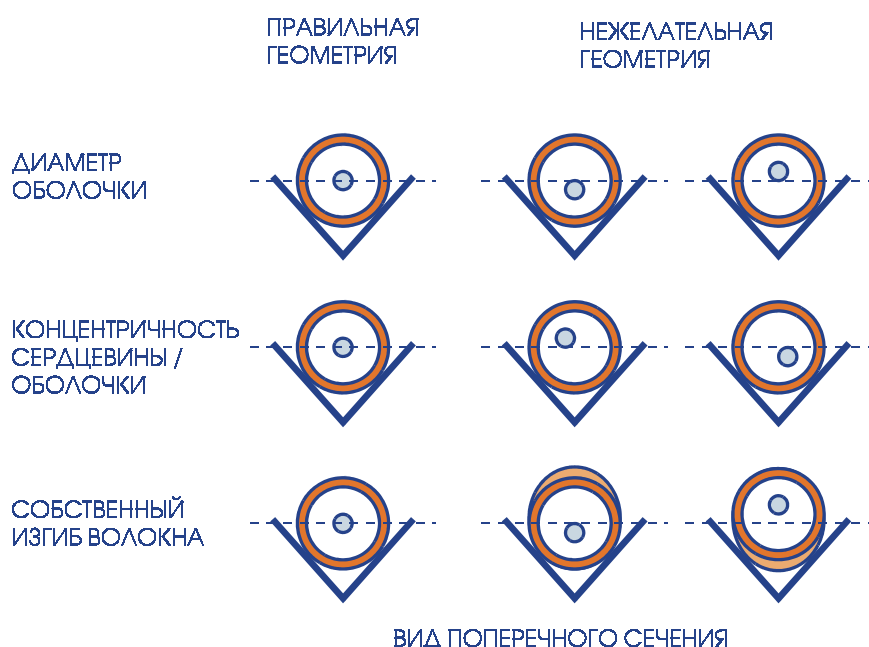


Рис.2.12. Влияние геометрических параметров оптического волокна на качество соединения.

Для обеспечения высокого качества соединения многомодовых волокон кроме размеров сердцевины должны совпадать профили показателей преломления. При соединении одномодовых волокон необходимо обеспечивать максимальное совпадение распределения полей (интенсивностей) их фундаментальных мод. Распределения интенсивностей в реальных ОВ описываются часто слишком громоздкими формулами для того, чтобы их можно было использовать на практике. Поэтому часто производится аппроксимация функций распределения стандартным гауссовым распределением:

$$I(r) = I_0 e^{(-2r^2 / w_0^2)} \quad (2.20)$$

где  $I(r)$  - приближенное распределение интенсивности в поперечном сечении,  $I_0$  - интенсивность на оси волокна,  $w_0$  - радиус поля моды, который также называют размером пятна,  $r$  - расстояние от оси волокна. Иногда используется термин "диаметр поля моды", равный удвоенному радиусу поля  $2w_0$ . Размер пятна определяется подбором гауссовой функции, наилучшим образом аппроксимирующей точное распределение света.

При значениях параметра  $V$ , близких к 2, для стандартного волокна со ступенчатым профилем показателя преломления качество подбора обычно является вполне хорошим.

### *f. Механические характеристики*

Основными механическими характеристиками ОВ являются следующие.

- Прочность на разрыв
- Прочность по отношению к давлению
- Прочность после механической зачистки
- Уменьшение прочности при старении
- Стойкость по отношению к истиранию
- Сила снятия покрытия

Сила снятия покрытия волокна определяют удобство эксплуатации оптического кабеля, изготовленного с использованием того или иного волокна.

Прочностные испытания оптического волокна являются разрушающими, поэтому невозможно обеспечение их постоянного контроля в процессе производства. Поэтому для постоянного текущего контроля ведущими производителями применяется процедура перемотки с натяжением. Отсутствие разрыва при такой процедуре гарантирует определенный уровень прочности тестируемого волокна на разрыв.

### *g. Прочие характеристики*

Оптическое волокно может также характеризоваться стойкостью к внешним воздействиям: стойкостью к воздействию температурных циклов, стойкостью к химическим воздействиям, стойкостью к воздействию гамма излучения. Дополнительными свойствами могут характеризоваться специальные типы волокна. К характеристикам специальных типов волокна относятся чувствительность к воздействию ультрафиолетового излучения, способность поддерживать определенный тип поляризации, малые потери на закруглениях большой кривизны.

Отдельный класс представляют собой волокна, легированные ионами эрбия и других редкоземельных ионов, предназначенные для работы в качестве усилителей или активных элементов лазеров.

В настоящее время разрабатываются специальные типы волокна для рамановских усилителей (ВКР-усилителей).

© OPTICTELECOM 2002