

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное общеобразовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

(специальность 013800 радиофизика и электроника)

Часть II

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА**

Ростов-на-Дону

2006

Кафедра прикладной электродинамики и компьютерного моделирования

Методические указания разработаны  
кандидатом физико-математических наук, доцентом Нойкиным Ю. М.

Ответственный редактор – доктор физико-математических наук Латуш Е.Л.

Компьютерный набор и вёрстка студента Угарова А. М.

Печатается в соответствии с решением кафедры ПЭКМ физического  
факультета РГУ, протокол № 19 от 25 апреля 2006 г.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

## АННОТАЦИЯ

Дан анализ причин потерь в оптическом волокне (ОВ) (за счёт релеевского рассеяния, поглощения примесей в кварце, потерь на изгибах и микронеоднородностях). Подробно рассмотрены виды дисперсий – модовая, материальная, волноводная, а также поляризационная модовая дисперсия и их влияние на форму импульса сигнала.

## 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

### 1.1 Затухание

Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяющегося в волокне сигнала, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

Затуханием называется потеря оптической мощности по мере движения света по волокну.

Затухание в ОВ выражается в децибелах (дБ). Коэффициент затухания в ОВ – это величина затухания, приходящаяся на единицу длины волокна, и выражается в децибелах/километр.

На затухание влияют такие факторы, как:

- потери на рассеяние;
- потери на поглощение в материале волокна;
- поглощение на примесях;
- кабельные потери.

Потери на рассеяние и поглощение называются собственными потерями, в то время как кабельные потери, в силу их природы, называют также дополнительными потерями (рисунок 1).

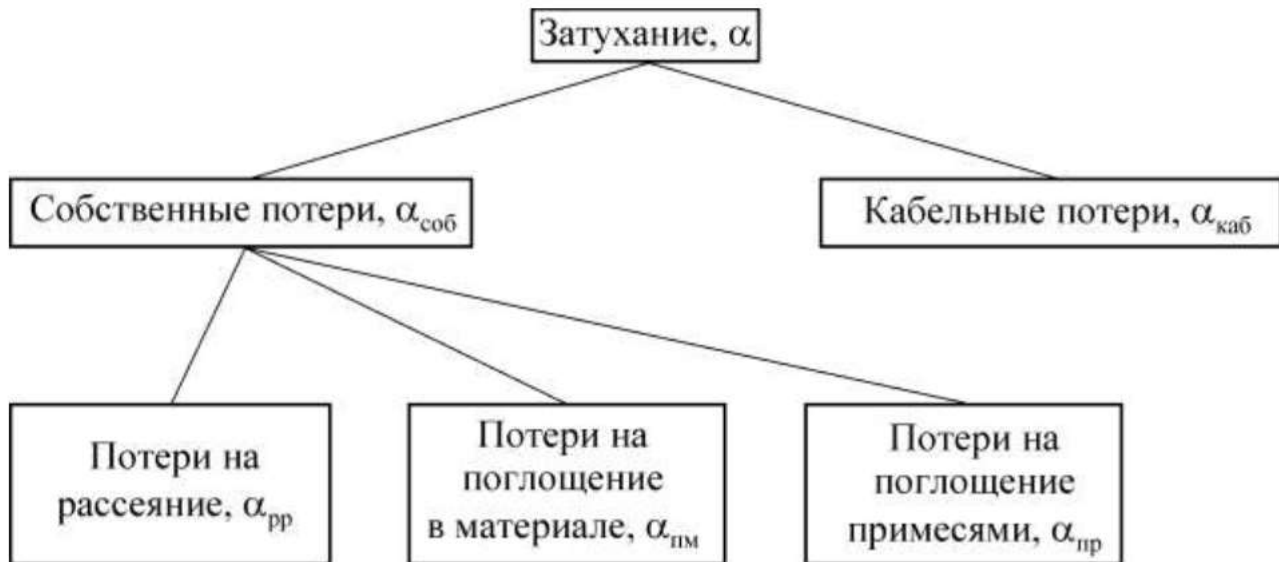


Рисунок 1 – структура основных типов потерь в ОВ

Полное затухание в волокне определяется в виде суммы

$$\alpha = \alpha_{\text{соб}} + \alpha_{\text{каб}} = \alpha_{\text{рр}} + \alpha_{\text{пм}} + \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{каб}} \quad (1)$$

## 1.2 Рэлеевское рассеяние

Это рассеяние обусловлено рассеянием света на случайных изменениях плотности, вызванных в процессе изготовления. В идеале чистое стекло имеет совершенную молекулярную структуру и, как следствие, однородную плотность. В действительности же плотность стекла не является однородной. В результате этого и возникает рассеяние. Рассеяние на неоднородностях происходит во всех направлениях (рисунок 2)

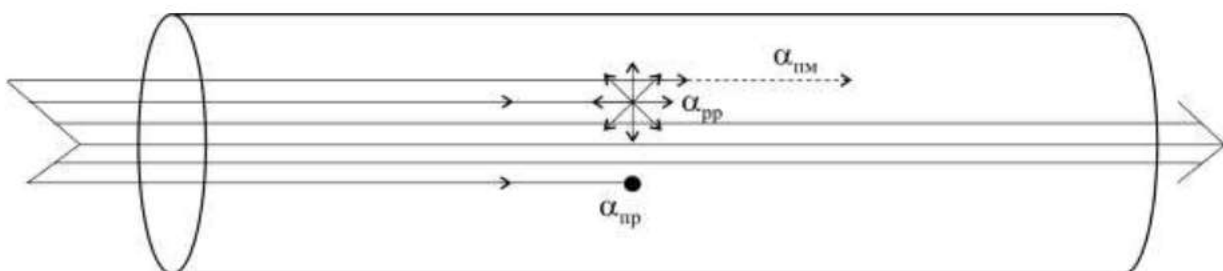


Рисунок 2 – Механизм основных потерь в ОВ

В результате часть его теряется в оболочке. Потери из-за рэлеевского рассеяния зависят от длины волны по закону  $\lambda^{-4}$ , поэтому сильнее проявляются в области коротких длин волн, где и ограничивают нижний предел потерь.

### 1.3 Поглощение в материале волокна

Это поглощение в волокне, обусловленное свойствами материала и рабочей длиной волны, имеет место при возбуждении в материале электронных переходов, атомных колебательных резонансов и резонансов с последующими неизлучательными релаксационными процессами. В результате этого энергия света переходит в тепловую.

Резонансы в ультрафиолетовой области спектра связаны с электронными структурами атомов кристаллической решётки. Резонансы в инфракрасной области обусловлены колебаниями самих атомов в решётке.

Хотя эти резонансы и лежат весьма далеко от тех оптических частот, которые используются в ВОСП, однако они вызывают столь сильное поглощение, что «хвосты» их полос поглощения захватывают эту область при очень малом уровне потерь.

Собственные потери на поглощение  $\alpha_{\text{пм}}$  быстро растут в инфракрасной области. При  $\lambda > 1,8 \text{ мкм}$  обычное кварцевое ОВ становится непрозрачным, что ограничивает верхнюю длину волны пропускания.

### 1.4 Поглощение примесями

Другим характерным видом потерь, имеющим резонансный характер, является поглощение примесями в кварце ( $\alpha_{\text{пр}}$ ) – основном материале для изготовления оптоволокна. Примесные центры (см. рисунок 2) в зависимости от типа примеси поглощают свет на определённых, присущих каждой примеси, длинах волн. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь. Наиболее заметное поглощение соответствует примесям

ОН<sup>-</sup> – ионы гидроксильных групп. Они в основном определяют пики потерь в области длин волн 725нм, 825нм, 1383нм и др.

К другим неоднородностям, обуславливающим поглощение, относятся ионы железа, меди, кобальта, ванадия, хрома и др. Для обеспечения низких потерь производители волокна должны поддерживать концентрацию этих ионов на уровне  $10^{-9}$ . Современная технология производства волокна позволяет добиваться этого в контролируемых условиях особо чистого окружения. Поэтому проблема поглощения света в волокне на примесях тяжёлых металлов не столь важна, как прежде.

### 1.5 Кривая потерь

Таким образом, при распространении оптического сигнала внутри волокна происходит его экспоненциальное затухание, вызванное потерей мощности  $P$  и обусловленное различными линейными и нелинейными механизмами взаимодействия световых волн (частиц) со средой волокна.

Закон затухания имеет вид

$$P = P_0 \exp(-\alpha l) \quad (2)$$

где  $P_0$  – мощность, вводимая в волокно;

$l$  – длина волокна;

$\alpha$  – постоянная затухания, или потери в волокне.

Используя эту формулу, можно получить выражение для оценки погонных потерь  $\alpha_n$  в децибелах на километр

$$\alpha_n = -\frac{10 \cdot \lg(P/P_0)}{l} = 4,343 \cdot \alpha, \text{ дБ/км.} \quad (3)$$

На рисунке 3 приведена типичная для кварцевых ОВ спектральная зависимость собственных потерь.

Представленная кривая потерь позволяет выделить три окна прозрачности с центрами в точках 850, 1300, 1550 нм для использования в ВОСП.

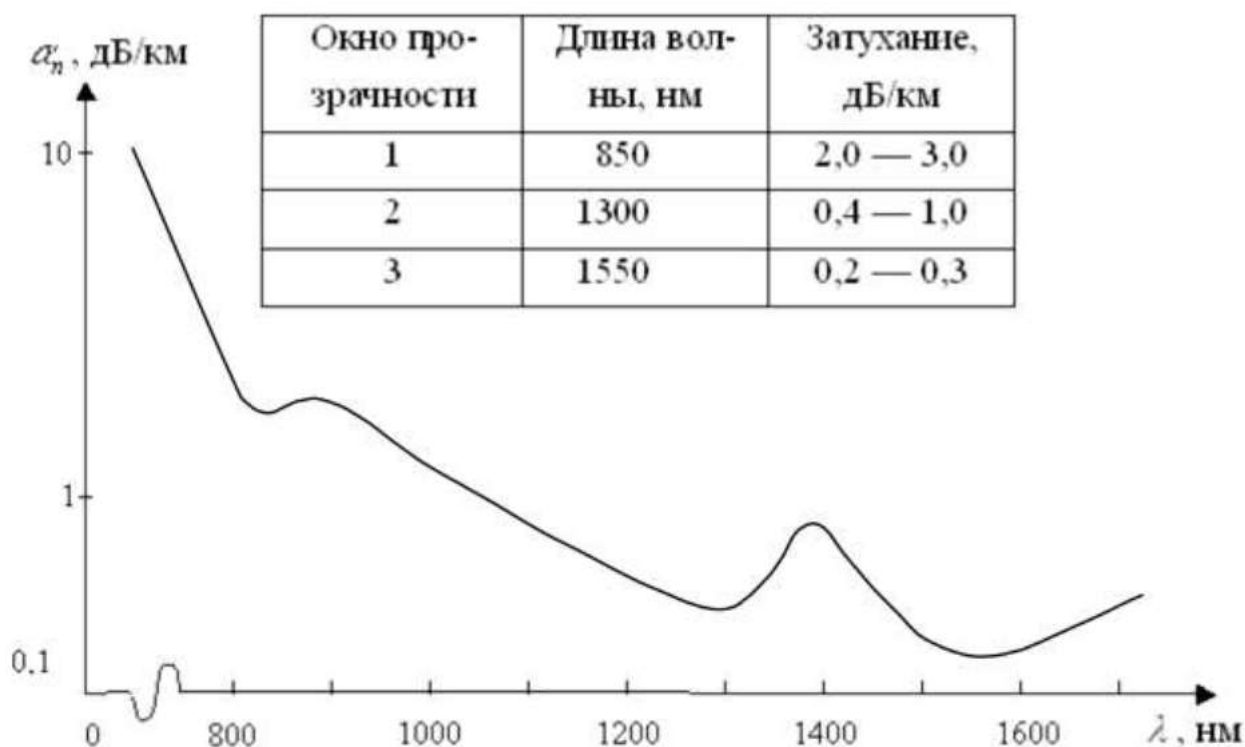


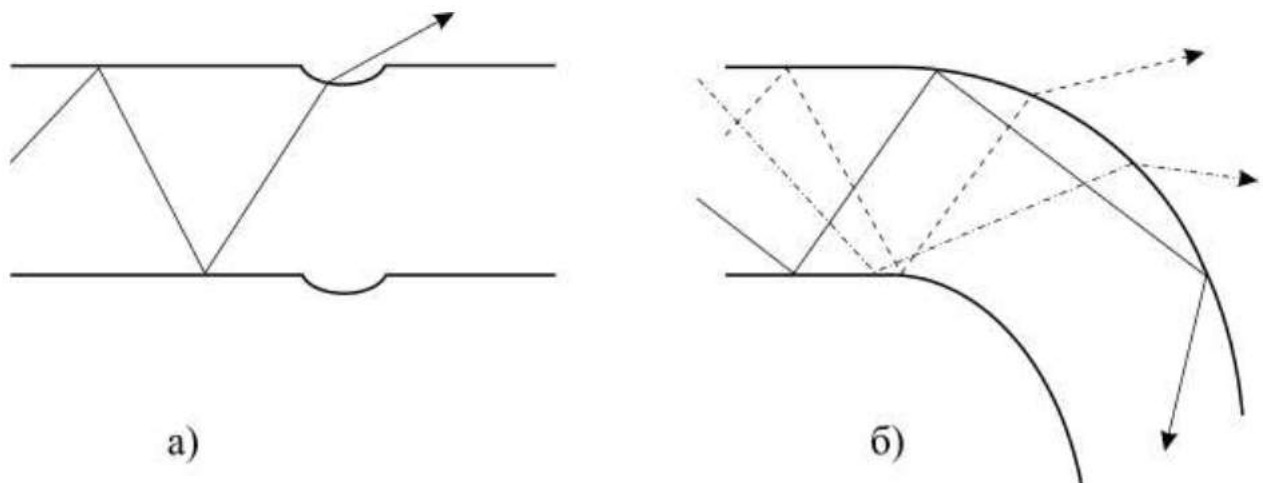
Рисунок 3 – Зависимость собственных потерь в кварцевом ОВ от длины волны

## 1.6 Кабельные потери

При строительстве и эксплуатации оптических кабельных линий возможно появление так называемых эксплуатационных потерь. Они обусловлены скруткой, деформацией и изгибами волокон, возникающих при наложении покрытий и защитных оболочек при производстве кабеля, а также в процессе его прокладки.

Потери на микроизгибах обусловлены преобразованием направляемых мод в моды излучения. Они резко возрастают и становятся недопустимо большими, как только радиус изгиба уменьшается до критического значения, которое для типичных ОВ составляет несколько сантиметров. На рисунке 4 показано, как

вариации границы ОВ могут приводить к отражению мод высокого порядка под углами, при которых дальнейшее отражение невозможно.



а – микроизгиб; б – изгиб

Рисунок 4 – Потери на изгибах волокна

При этом свет покидает волокно. Развитие технологии производства ОВ и ВОК направлено на уменьшение этих микронеоднородностей.

## 2 ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

### 2.1 Дисперсия

Оптический сигнал, распространяясь по волокну, не только затухает, но и искажается за счёт естественной дисперсии различного рода (линейные искажения), вызывающей уширение импульсов во времени, а также нелинейные эффекты, основные из которых обусловлены нелинейным преломлением и генерацией гармоник (нелинейные искажения).

Под дисперсией в оптике понимают зависимость фазовой скорости световых волн  $V_\Phi$  от частоты  $\omega$ . Это же относится и к показателю преломления  $n$ ,  $n = n(\omega)$ . Величина дисперсии определяется значением

$$\left| \frac{dn}{d\omega} \right| \quad \text{или} \quad \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|.$$

В этом смысле дисперсия в объёмной среде и носит название *хроматической* дисперсии, подчёркивая факт разложения света на его составляющие в цветовой



спектр. Дисперсия называется нормальной (или положительной), если  $n$  увеличивается с увеличением частоты  $\omega$  ( $\frac{dn}{d\omega} > 0$ ) и аномальной (или отрицательной), если  $n$  уменьшается с увеличением  $\omega$   $\frac{dn}{d\omega} < 0$ . Зависимость фазовой скорости от  $\omega$  (или от  $\lambda$ ) для нормальной и аномальной дисперсий – обратная.

## 2.2 Воздействие дисперсии на сигнал

*Уширение импульса.* При прохождении импульсных сигналов по световоду дисперсия приводит к уширению импульса (рисунок 5).

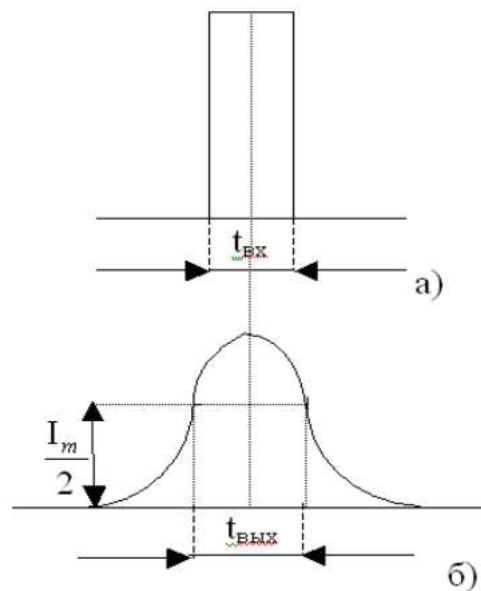


Рисунок 5 – Уширение импульса из-за дисперсии

Она определяется как квадратичная разность длительности импульсов на выходе и входе световода длиной  $l$ , определяемой на половине высоты импульса.

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2} . \quad (4)$$

Обычно дисперсия нормируется в расчёте на один километр и измеряется в пикосекундах на километр.

Уширение импульса определяет полосу частот передаваемого сигнала  $\Delta F$ :

$$\Delta F \approx \tau^{-1}. \quad (5)$$

Например, значения  $\tau=2-5$  пс/км соответствует полосе частот  $\Delta F=500-200$  МГц·км.

Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну.

Дисперсия ограничивает длину регенерационного участка, так как уширение импульса пропорционально длине линии. В конечном итоге может возникнуть ситуация, когда соседние импульсы перекрывают друг друга.

*Виды дисперсии.* В световоде различают четыре вида дисперсии:

- модовая или межмодовая;
- материальная;
- волноводная;
- поляризационная.

На рисунке 6 представлена структура видов дисперсии в оптическом волокне.

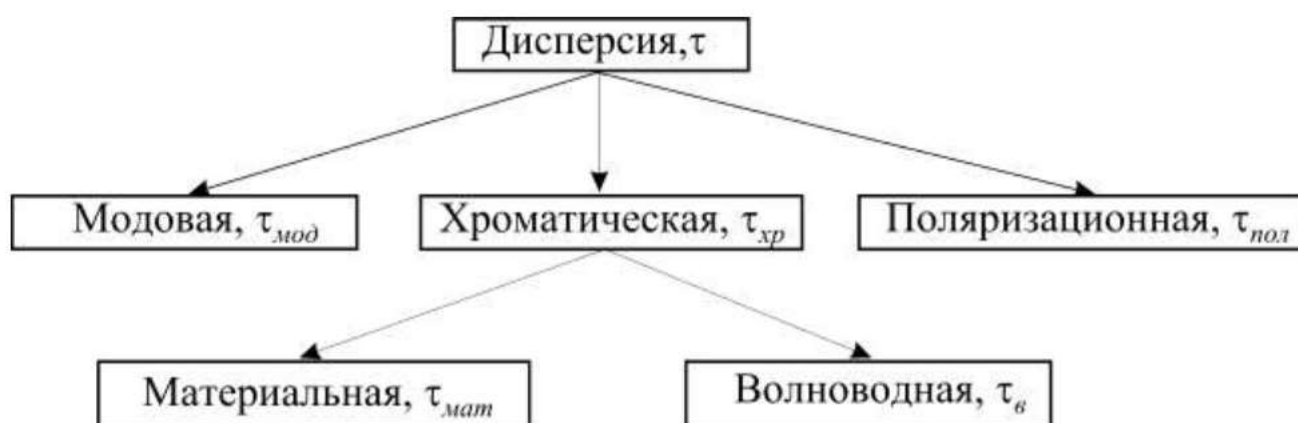


Рисунок 6 – Виды дисперсии

Результирующая дисперсия  $\tau$  определяется из формулы:

$$\tau^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + \tau_{\text{хр}}^2 + \tau_{\text{пол}}^2 = \tau_{\text{мод}}^2 + (\tau_{\text{мат}} + \tau_{\text{вол}})^2 + \tau_{\text{пол}}^2 \quad (6)$$

### 2.3 Модовая дисперсия

Модовая (межмодовая) дисперсия – дисперсия, существующая только в многомодовом волокне и вызванная различной скоростью распространения в световоде лучей разных мод, достигающих выхода в разное время, что приводит к уширению импульса на выходе.

Распространение импульса электромагнитной энергии по световоду может быть представлено упрощённо в виде ряда лучей, как показано на рисунке 7.

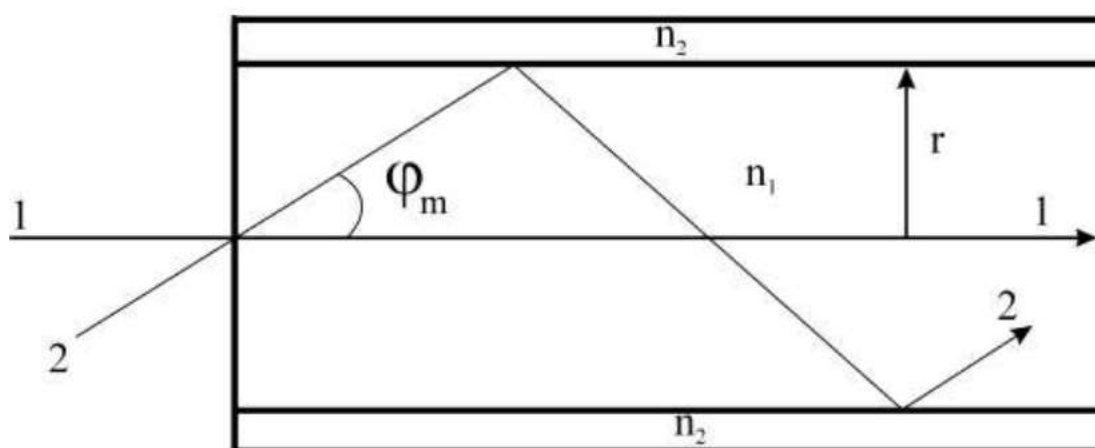
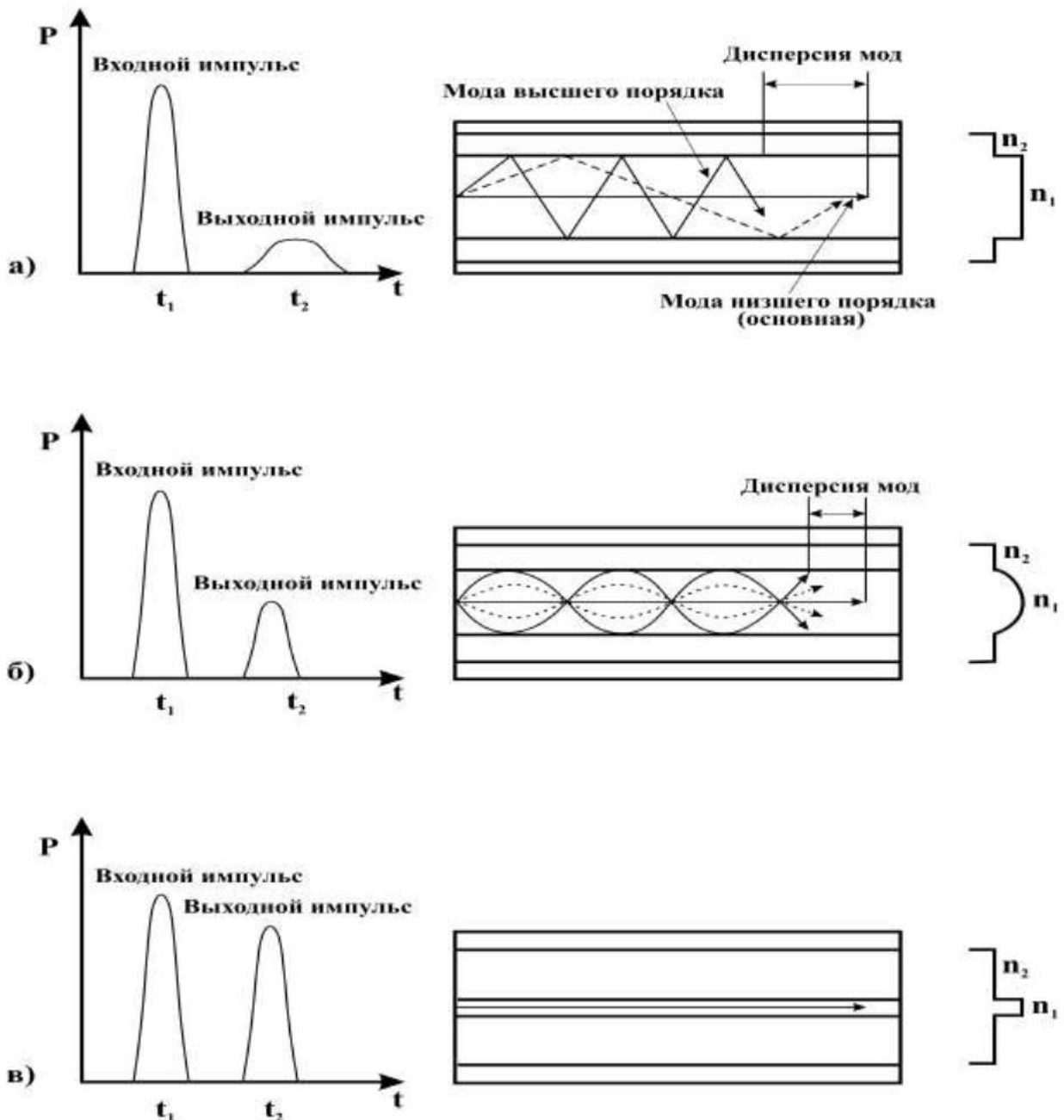


Рисунок 7 – Явление временного запаздывания лучей разных мод в ВС

Следовательно, отрезок световода конечной длины каждая мода будет проходить за различное время. С точки зрения передачи информации по волоконной линии, этот процесс порождает её искажения – каждая составляющая этого спектра проходит отрезок волокна за различное время и на его выходе между ними возникают неустраняемые фазовые сдвиги.

## 2.4 Влияние профиля изменения показателя преломления на дисперсию моды

В простейшем случае оптическое волокно имеет ступенчатый профиль изменения показателя преломления (рисунок 8, а, справа).



а – ступенчатое многомодовое волокно; б – градиентное многомодовое волокно;

в – ступенчатое одномодовое волокно

Рисунок 8 – Характер распространения света в ОВ с различным профилем показателя преломления

Однако в таком волокне лучи, вошедшие под разными углами, имеют различную геометрическую длину пути (осевой – минимальную, крайний апертурный – максимальную, что при одинаковой фазовой скорости света в среде ( $n_c = \text{const}$ ) приводит к различному фазовому запаздыванию (или дисперсии моды). Это, в свою очередь, является одной из причин расплывания импульса при его распространении по волокну (рисунок 8, а, слева). Влияние дисперсии моды резко выражено для многомодового оптоволокна и тем резче, чем больше диаметр сердцевины.

Модовая дисперсия может быть уменьшена тремя путями:

- изменением профиля показателя преломления, то есть использованием градиентного волокна;
- уменьшением диаметра сердцевины  $d_c$ ;
- подавлением мод высшего порядка.

Рассмотрим, как при использовании градиентного волокна уменьшается модовая дисперсия.

В градиентном волокне показатель преломления плавно увеличивается от края сердцевины к середине (в зону максимума  $n_1$ , рисунок 8, б, справа). Условия распространения при этом для осевого и апертурных лучей становятся разными. Апертурные лучи имеют большую геометрическую длину. Однако скорость апертурных лучей на периферии сердцевины больше, чем скорость осевого луча. За счёт выравнивания времени прохождения различных лучей в оптоволокне происходит резкое снижение дисперсии моды (рисунок 8, б)

Наиболее изучены характеристики световодов для которых профиль показателя преломления описывается функцией, аппроксимирующей кривую изменения показателя преломления формулой:

$$n(r) = n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right], \quad 0 \leq r \leq a, \quad (7)$$

где  $\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2}$  – относительный показатель преломления;

$r$  – текущий радиус;

$a$  – радиус сердцевины;

$g$  – показатель степени, определяющий изменение  $n(r)$ .

Световоды с  $g=2$  называются параболическими, так как профиль показателя преломления описывается параболической функцией.

Для одномодового оптоволокна модовая дисперсия отсутствует (рисунок 8, в), поэтому в основном используется простой ступенчатый профиль изменения показателя преломления (рисунок 8, в, справа). Другие типы одномодового волокна – волокно с нулевой дисперсией, с плоской (ненулевой) дисперсией или с компенсацией дисперсии имеют более сложный профиль показателя преломления ввиду использования многослойных оболочек или специальных компенсаторов.

## 2.5 Материальная дисперсия

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны:

$$n = \Psi(\lambda). \quad (8)$$

Различные длины волн (цвета) движутся с различными скоростями по волокну, даже в одной и той же моде. Ранее мы видели, что показатель преломления равен:

$$n = \frac{c}{V}, \quad (9)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$V$  – скорость, соответствующая длине волны в веществе.

Поскольку каждая длина волны движется с разной скоростью, то величина скорости  $V$  в этом уравнении изменяется для каждой длины волны. Таким образом, показатель преломления изменяется в зависимости от длины волны. Дисперсия, связанная с этим явлением, называется материальной (молекулярной) дисперсией, поскольку зависит от физических свойств вещества волокна. Материальная дисперсия определяется электромагнитным взаимодействием волны со связанными электронами материала среды, которое носит, как правило, нелинейный характер. Уровень материальной дисперсии зависит от двух факторов:

- диапазона длин волн света, инжектируемого в волокно;
- центральной рабочей длины волны источника.

Рассмотрим каждый фактор подробнее.

1. Как правило, источник не может излучать одну длину волны; он излучает несколько. Диапазон длин волн  $\Delta\lambda$ , выраженный в нанометрах, называется спектральной шириной источника. Светодиод (СИД) характеризуется большей спектральной шириной  $\Delta\lambda \approx 35\text{нм}$ , а лазерный диод (ЛД) – меньшей: от 2 до 3нм – многомодовый и от 0,01 до 0,02нм – одномодовый.

2. В области 850нм более длинные волны (более красные) движутся быстрее по сравнению с более короткими (более синими) длинами волн. Волны длиной 860нм движутся быстрее по стеклянному волокну, чем волны длиной 850нм. В области 1550нм ситуация меняется: более короткие волны движутся быстрее по

сравнению с более длинными; волна длиной 1560нм движется медленнее, чем волна длиной 1540нм (рисунок 9).

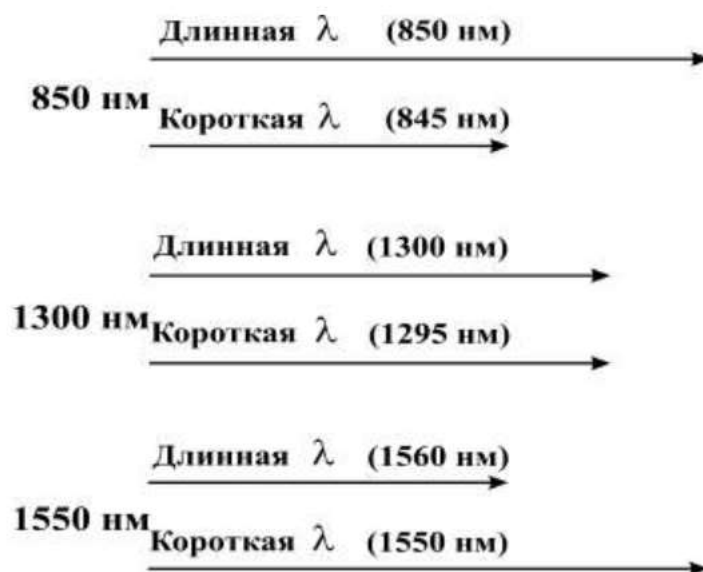


Рисунок 9 – Скорости распространения света разной длины волны

В некоторой точке спектра происходит совпадение, при этом более синие и более красные волны движутся с одной и той же скоростью. Это совпадение скоростей происходит в области 1300нм. Длина стрелок соответствует скорости длин волн; следовательно, более длинная стрелка соответствует более быстрому движению.

В выражение для материальной дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, l) = \Delta\lambda \cdot l \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot l \cdot M(\lambda), \quad (10)$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра источника излучения;

$l$  – длина световода;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$c$  – скорость света в вакууме;

$n_1$  – показатель преломления сердцевины;

$M(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}$  – удельная материальная дисперсия.



Удельная материальная дисперсия измеряется в пикосекундах на километр длины световода и на нанометр ширины спектра источника:

$$M(\lambda), \left[ \frac{пс}{(км \cdot нм)} \right].$$

Типичная картина удельной материальной дисперсии приведена на рисунке 10.

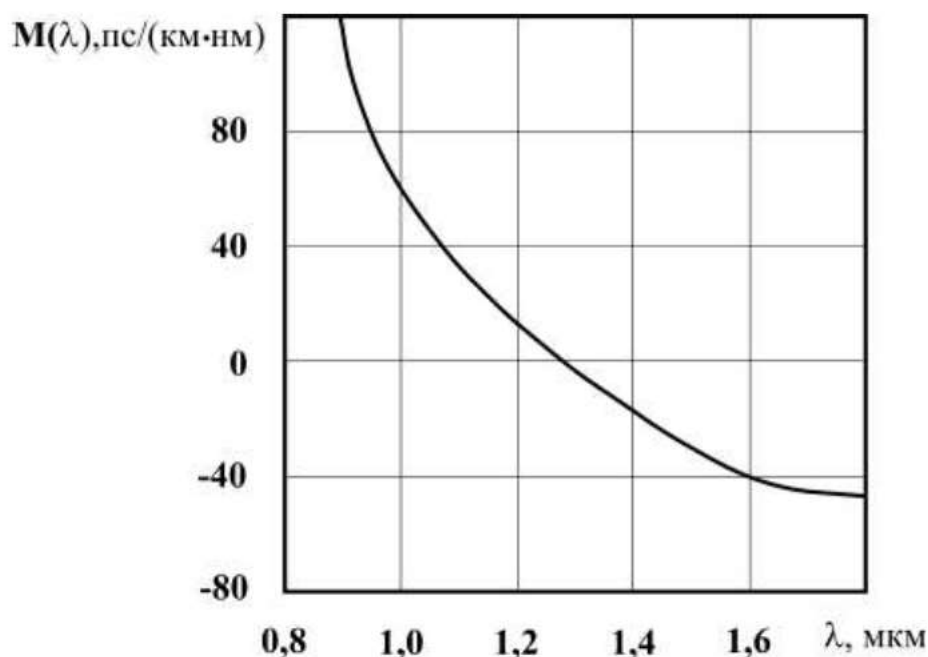


Рисунок 10 – Зависимость удельной материальной дисперсии кварцевого стекла от длины волны

Интересно отметить, что в объёмном кварцевом стекле в диапазоне длин волн 1000 – 1600нм  $M(\lambda)$  почти линейно уменьшается от плюс 70 до минус 40пс/(км·нм), принимая нулевое значение на длине волны примерно 1300нм. Длина волны, при которой удельная материальная дисперсия  $M(\lambda)$  обращается в ноль, называется длиной волны нулевой дисперсии  $\lambda_{0д}$  для объёмной среды.

В области длин волн выше 1300нм материальная дисперсия отрицательная – более красные волны отстают и прибывают позднее. В области менее 1300нм – положительная – более красные волны опережают и прибывают раньше.

Из описанного ясно, что для уменьшения дисперсии нужно, с одной стороны, при выборе источника переходить от оптических источников типа СИД к ЛД, а при выборе волокна – от многомодового к одномодовому волокну. С другой стороны, необходимо переходить от источников с длинами волн порядка 850нм к источникам с длинами волн порядка 1300нм для использования эффекта нулевой дисперсии.

Материальная дисперсия является основным видом дисперсии в одномодовых волокнах. Напротив, в многомодовых волокнах наиболее существенной является модовая дисперсия, так что материальной дисперсией можно пренебречь. Во многих случаях модовая дисперсия не играет никакой роли при конструировании волоконных систем: быстродействие слишком мало или расстояния незначительны.

## 2.6 Волноводная дисперсия

Дисперсия реальных световодов отличается от дисперсии объёмной среды наличием волноводной структуры, изменяющей эффективный показатель преломления моды. В результате появляется особая волноводная составляющая дисперсии.

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны

$$\tau_{вол}(\Delta\lambda, l) = \Delta\lambda \cdot l \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot l \cdot N(\lambda), \quad (11)$$

где  $\Delta$  – относительный показатель преломления;

$$N(\lambda) = \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} \quad \text{– удельная волноводная дисперсия;}$$

$n_1$  – показатель преломления сердцевины;

$l$  – длина световода;

$\Delta\lambda$  – ширина спектра источника излучения;

$c$  – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны излучения.

Типичная картина удельной волноводной дисперсии вещества одномодового волокна приведена на рисунке 11.

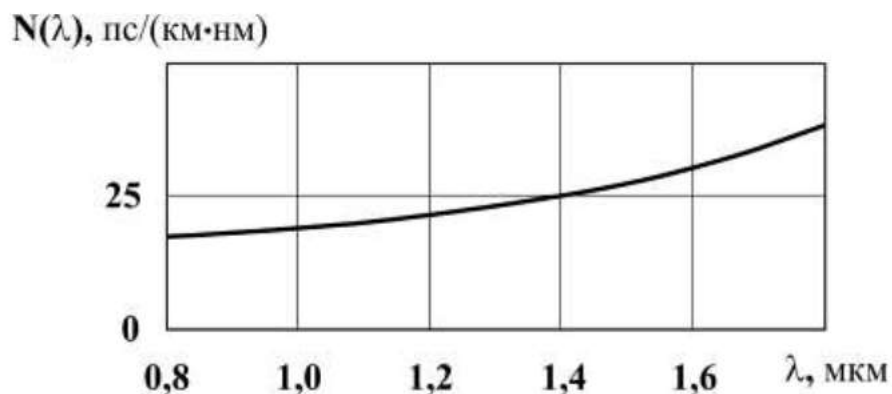


Рисунок 11 – Зависимость удельной волноводной дисперсии кварцевого волокна от длины волны

Как видно из рисунка, удельная волноводная дисперсия  $N(\lambda)$  всегда больше нуля, т. е. положительная. Волноводная дисперсия сдвигает длину волны нулевой дисперсии с 1270 нм (для объёмной среды) до 1312 нм (для оптоволокна), чем и объясняется использование источников излучения с длиной волны 1310 нм для одномодового волокна.

Вклад волноводной дисперсии зависит от:

- радиуса сердцевины;
- разности показателей преломления сердцевины и оболочки;
- числа оболочек.

В многомодовых ОВ волноводная дисперсия относительно мала по величине.

## 2.7 Хроматическая дисперсия

Материальная и волноводная дисперсии, складываясь, формируют хроматическую дисперсию.

Хроматическая дисперсия имеет место при распространении волны как в одномодовом, так и в многомодовом волокне, однако наиболее чётко она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия модовой дисперсии.

Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как

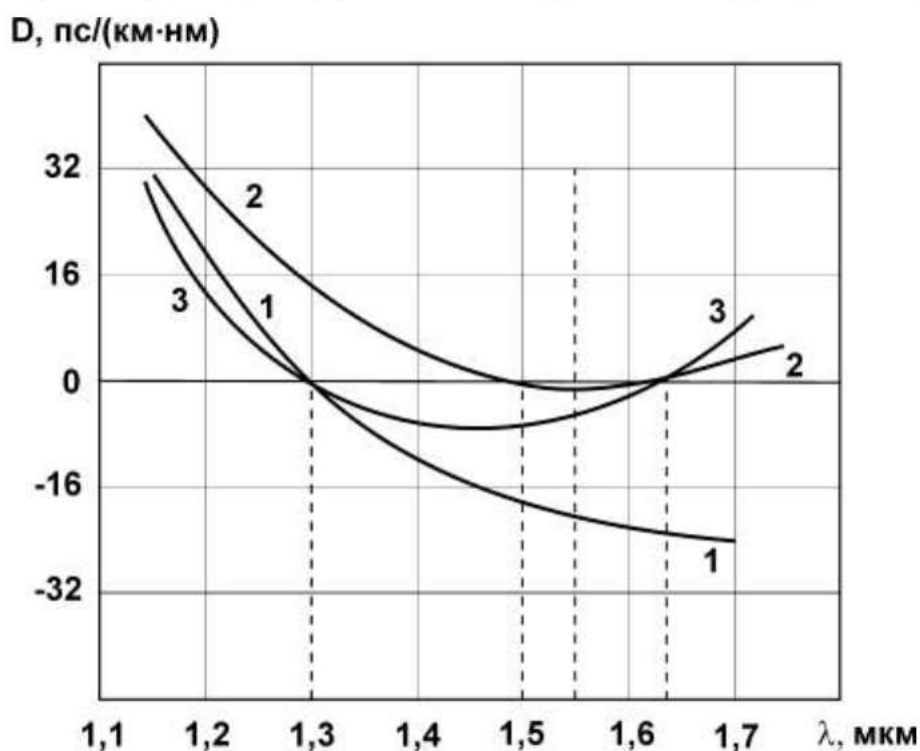
$$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda). \quad (12)$$

Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля ( $N(\lambda) > 0$ ), то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным ( $M(\lambda) > 0$ ), так и отрицательным ( $M(\lambda) < 0$ ). И здесь важным является то, что при определённой длине волны (примерно  $1310 \pm 10 \text{ нм}$  для ступенчатого одномодового волокна) результирующая дисперсия  $D(\lambda)$  обращается в ноль.

Длина волны, при которой результирующая дисперсия  $D(\lambda)$  обращается в ноль, называется длиной волны нулевой дисперсии  $\lambda_{0D}$  для волокна.

Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которого может варьироваться  $\lambda_{0D}$  для данного конкретного волокна.

Действие волноводной составляющей дисперсии, как указывалось выше, сдвигает длину волны нулевой дисперсии до величины  $\lambda_{0D} = 1312 \text{ нм}$  (рисунок 12, кривая 1).



1 – одна оболочка; 2 – две оболочки;

3 – четыре оболочки

Рисунок 12 – Зависимость дисперсионного параметра волокна  $D$  от длины волны и числа оболочек

Используя несколько слоёв оболочки и тем самым изменяя параметры волноводного тракта, можно сдвинуть длину волны нулевой дисперсии в диапазон 1500 – 1600нм. Для этого оказалось достаточно использовать две оболочки (рисунок 12, кривая 2) – этот тип оптоволокна получил название оптоволокна со сдвигом дисперсии. Используя многослойную оболочку (рисунок 12, кривая 3 – оболочка имеет 4 слоя), можно добиться почти плоской и близкой к нулевой дисперсионной характеристики ( $|D| \leq 1 - 6 \text{ пс}/(\text{км} \cdot \text{нм})$ ) в диапазоне волн от 1300 до 1650нм. Так появилось волокно с нулевой (и маломеняющейся) дисперсией.

Таким образом, волокна со смещённой дисперсией имеют дисперсионную характеристику, ноль которой смещён в область третьего оптического окна – 1550нм (в соответствии с рисунком 12). Этот тип ОВ с успехом использовался в ранних оптических системах.

Однако, волокна со смещённой нулевой дисперсией уступили место волокнам с нулевой дисперсией, дисперсионный параметр  $D$  которых не равен нулю, но мал и слабо меняется в указанном диапазоне волн, формируя почти плоскую дисперсионную характеристику (рисунок 13).

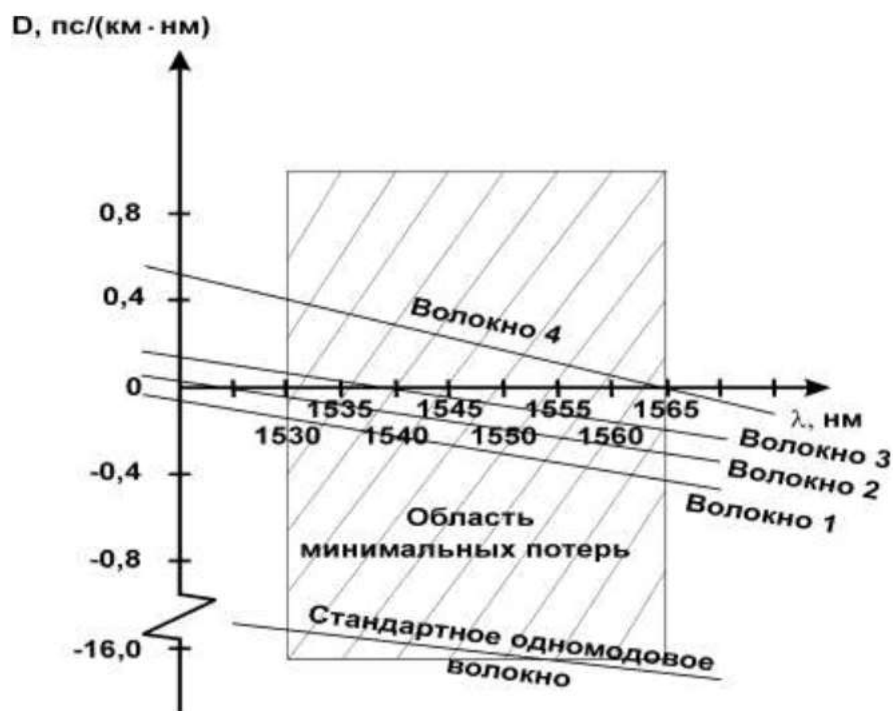


Рисунок 13 – Зависимость дисперсионного параметра  $D$  различных одномодовых ОВ в оптическом окне 1550нм

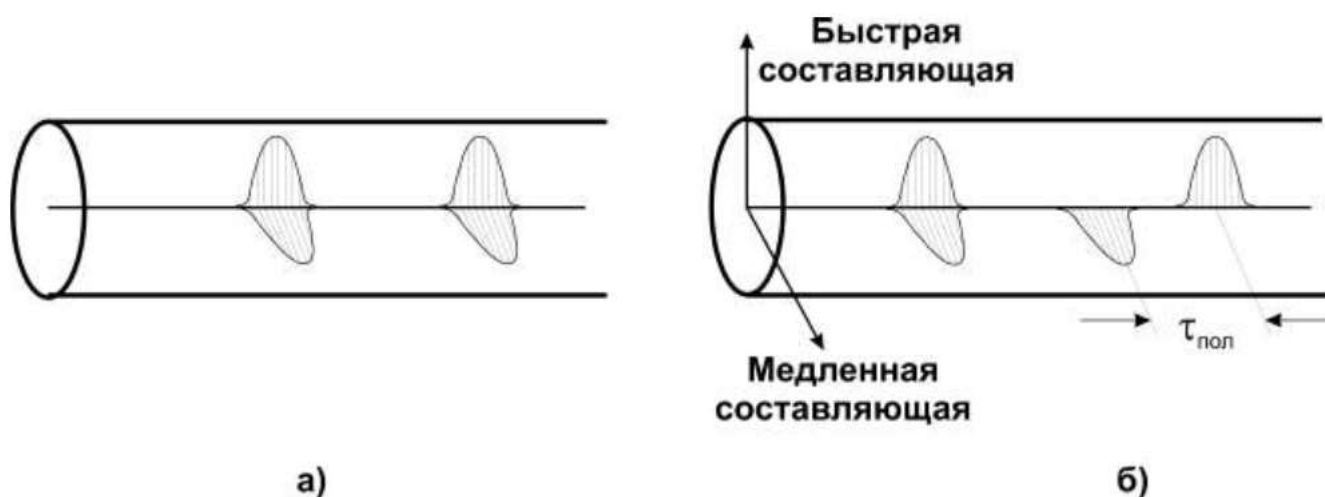
Профиль показателя преломления таких волокон имеет характерную форму трезубца, величина центрального зубца которого существенно больше боковых зубцов.

## 2.8 Поляризационная модовая дисперсия.

Поляризационная модовая дисперсия  $\tau_{\text{пол}}$  возникает вследствие различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных поляризационных составляющих моды.

В одномодовом волокне в действительности может распространяться не одна мода, а две фундаментальные моды – две перпендикулярные поляризации исходного сигнала. Главная причина появления поляризационной моды является нециркулярность (овальность) профиля сердцевинки одномодового волокна, возникающая в процессе изготовления или эксплуатации волокна. При изготовлении волокна только строгий контроль позволяет достичь низких значений этого параметра.

В идеальном волокне, в котором отсутствует овальность, две моды распространялись бы с одной и той же скоростью (рисунок 14, а).



а – волокно с идеальной геометрией; б – волокно с неидеальной геометрией

Рисунок 14 – Появление поляризационной модовой дисперсии

Однако, на практике, волкна имеют неидеальную геометрию, что приводит к различной скорости распространения двух поляризационных составляющих мод (рисунок 14, б).

$\tau_{пол}$  растёт с ростом расстояния по закону:

$$\tau_{пол} = T \cdot \sqrt{l}, \quad (13)$$

где  $l$  – длина волокна, [км];

$T$  – коэффициент удельной поляризационной дисперсии.

Коэффициент  $T$  нормируется в расчёте на 1км и имеет размерность

$$T, \left[ \frac{нс}{\sqrt{км}} \right].$$

Из-за своей небольшой величины поляризационная модовая дисперсия  $\tau_{пол}$  может появляться исключительно в одномодовом волокне, причём тогда, когда используется передача широкополосного сигнала (полоса пропускания 2,4Гбит/с и выше) с очень узкой спектральной полосой излучения (1нм и меньше). В этом случае поляризационная модовая дисперсия становится сравнимой с хроматической модовой дисперсией.

Избыточный уровень  $\tau_{пол}$  может появляться по причине:

- модуляции сигнала лазера нестабильным по амплитуде и частоте напряжением;
- поляризационной зависимостью потерь.

Он приводит к временным колебаниям амплитуды аналогового видеосигнала. В результате ухудшается качество изображения или появляются диагональные полосы на телевизионном экране. При передаче цифрового сигнала широкой полосы ( $> 2,4$ Гбит/с) из-за наличия  $\tau_{пол}$  возрастает битовая скорость появления ошибок.

## 2.9 Результирующая дисперсия

Таким образом, результирующая дисперсия одномодового волокна должна определяться в соответствии с выражением:

$$\tau = \sqrt{(\tau_{вол} + \tau_{mat})^2 + \tau_{пол}^2} . \quad (14)$$

В обычных условиях работы одномодового (ОМ) волокна поляризационная дисперсия достаточно мала и поэтому при расчёте полной дисперсии ею можно пренебречь.

В одномодовых оптических волокнах модовая дисперсия отсутствует, так как по такому волокну распространяется только одна мода  $HE_{11}$  или, как отмечалось ранее, две моды в двух разных состояниях поляризации. Другими словами, расширение импульсов в ОМ волокне определяется хроматической дисперсией в пределах этой моды. Тогда полная дисперсия в ОМ волокне может быть представлена в общем виде выражением:

$$\tau = \sqrt{(\tau_{вол} + \tau_{mat})^2} . \quad (15)$$

Что касается многомодового волокна, то в нём мала по величине волноводная дисперсия, поэтому ею пренебрегают при определении полной дисперсии. Исходя из этого, полная дисперсия многомодового волокна может быть представлена в общем виде выражением:

$$\tau = \sqrt{\tau_{мод}^2 + \tau_{mat}^2} . \quad (16)$$

В многомодовом (ММ) волокне со ступенчатым профилем показателя преломления  $\tau_{мод}$  доминирует над  $\tau_{mat}$ , а в градиентном – наоборот. Это объясняется тем, что в градиентном многомодовом ОВ  $\tau_{мод}$  уменьшается за счёт выравнивания времени распространения различных мод.

Сравнивая дисперсионные характеристики различных волокон, можно отметить, что наилучшими показателями обладают ОМ ОВ, а наиболее сильно



дисперсия проявляется в многомодовых ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления.

## 2.10 Ширина полосы пропускания

Полоса пропускания – это мера способности волокна передавать определённый объём информации в единицу времени.

Чем шире полоса пропускания, тем выше информационная ёмкость волокна. Например, одно волокно с градиентным показателем преломления может легко передавать 500 млн. бит информации в секунду (500Мбит/с).

Многие производители волокна и оптического кабеля не используют в спецификации дисперсию в ММ изделиях. Вместо этого они указывают произведение ширины полосы пропускания  $\Delta F$ , выраженную в мегагерцах на километр. Полоса пропускания в 400МГц·км означает возможность передачи сигнала в полосе 400МГц на расстояние 1км. Это также означает, что произведение максимальной частоты сигнала на длину передачи может быть меньше или равно 400. Другими словами, можно передавать сигнал более низкой частоты на большее расстояние или более высокой частоты на меньшее расстояние, как показано на рисунке 15.

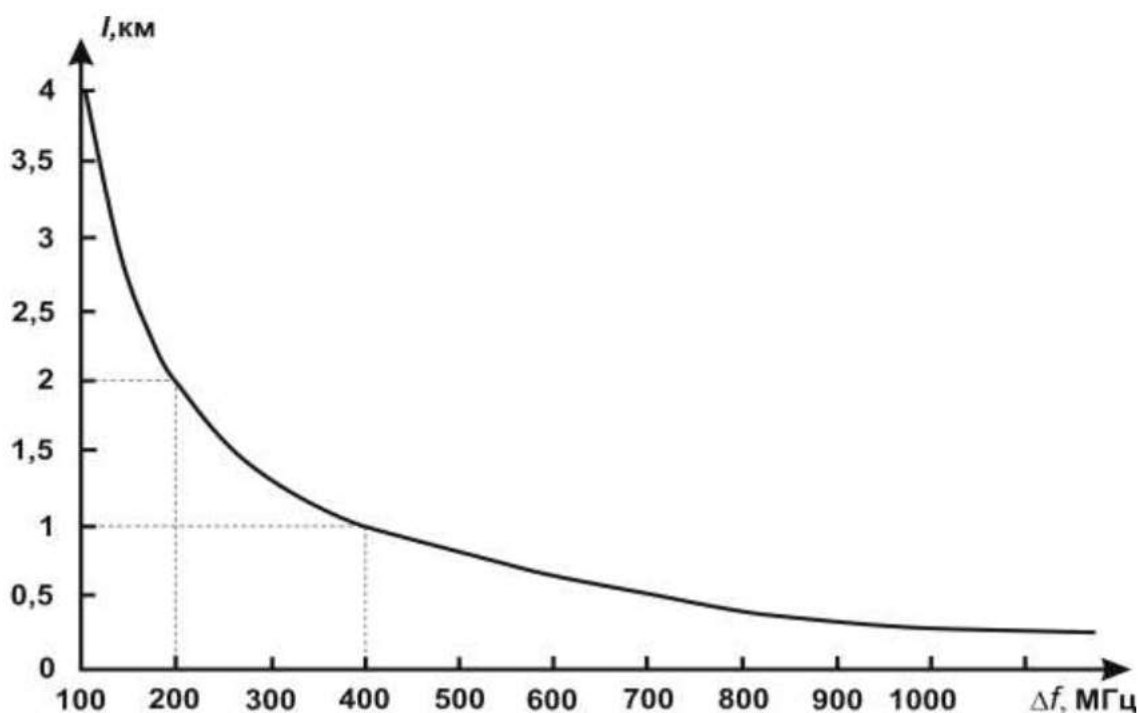


Рисунок 15 – Зависимость длины линии передачи от ширины полосы пропускания для волокна с параметром 400МГц·км

Рабочая полоса частот (полоса пропускания) в ВОК определяет число передаваемых по нему каналов связи и лимитируется дисперсией ОВ.

На рисунке 16 показан характер изменения дисперсии  $\tau$  и пропускной способности  $\Delta F$  ОВ в зависимости от длины линии  $l$ . Снижение из-за дисперсии величины  $\Delta F$  до допустимого значения лимитирует дальность передачи по ВОК.

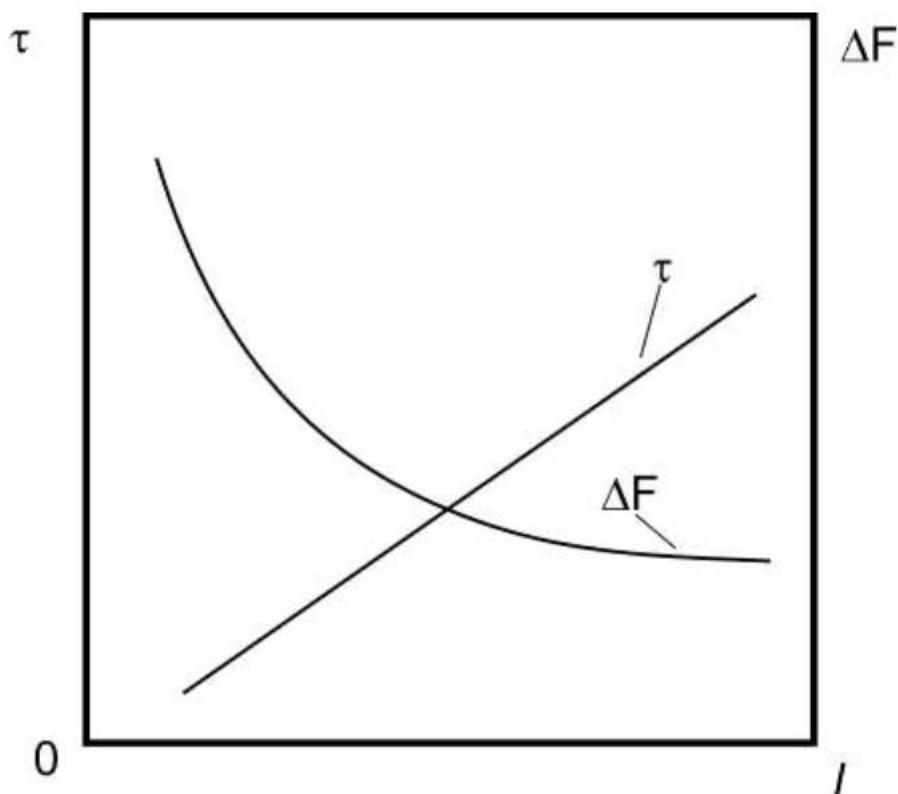


Рисунок 16 – Дисперсия  $\tau$  и пропускная способность  $\Delta F$  ОВ разной длины.

Таким образом, полоса частот  $\Delta F$  и дальность передачи  $l$  взаимосвязаны.

Полоса пропускания  $\Delta F$  зависит от расширения импульсов  $\tau$  и определяется соотношением:

$$\Delta F = \frac{1}{\tau} . \quad (17)$$

В ОМ волокнах спецификация дисперсии необходима. Для заданного ОМ ОВ дисперсия в основном определяется спектральной шириной источника: чем шире полоса излучения источника, тем больше дисперсия.

## Литература

1. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы/ Сборник статей под редакцией Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. – М.: Изд.-во «Connect», 2000. – 376 с.
2. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Радио и связь, 1990. –224 с.
3. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ.- М.: Радио и Связь, 1989. – 504 с.
4. Оптические системы передачи: Учеб. для вузов / Б.А. Скворцов, В.И. Иванов, В.В. Крухмалёв и др. Под ред. В.И.Иванова. – М.: Радио и связь, 1994. – 224 с.
5. Гордеев И.И. Волоконно-оптические системы передачи данных и кабели:-М.: Радио и связь, 1993.–350 с.
6. Рекламный проспект компании HUAWEI.
7. Иванов А.Г. Волоконная оптика: Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус системс, 1999. – 327 с.
8. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник/ И.И. Гроднев и др. –М.:Радио и связь, 1993.– 294 с.
9. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 1998. –267 с.
10. Семёнов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: Компьютер-Пресс, 1988, –302 с.