

Парметры передачи ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

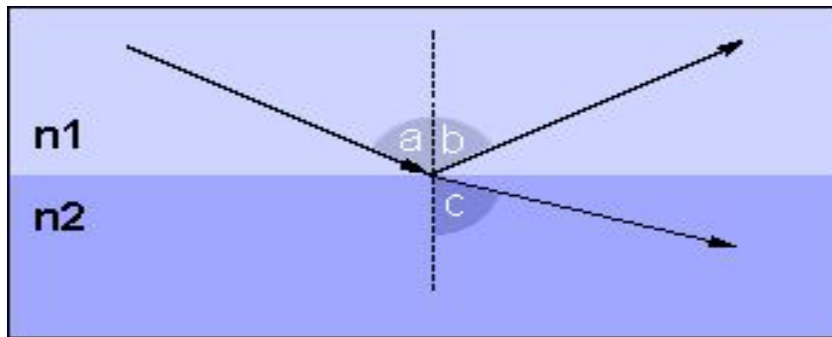
*Оптическое волокно как диэлектрический
волновод*



Многомодовые оптические волокна

Закон оптики

В оптоволоконных технологиях используется волновая теория света. Т.е. свет рассматривается как электромагнитная волна определенной длины. Для ее транспортировки используются изолированные оптически прозрачные среды. В однородной среде электромагнитная волна распространяется прямолинейно, однако на границе изменения плотности среды ее направление и качественный состав меняются.



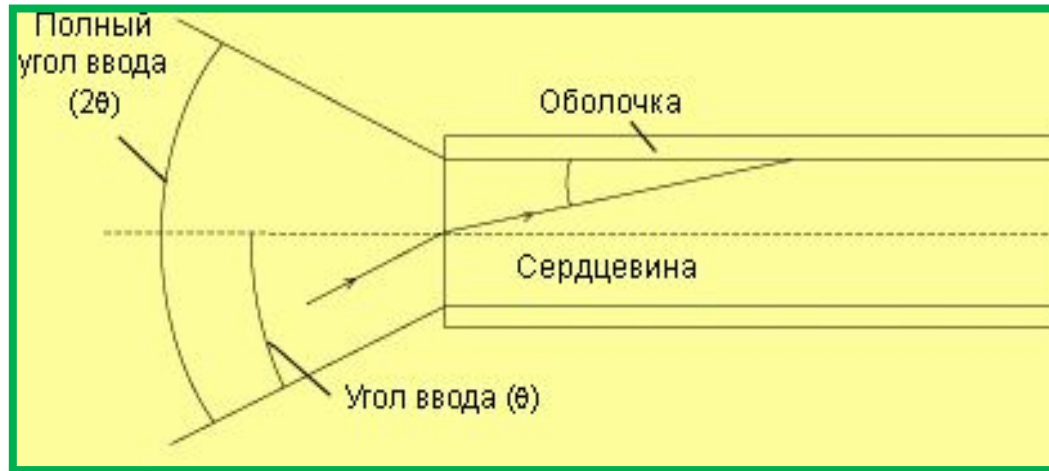
$$a = b \quad n_1 \cdot \sin a = n_2 \cdot \sin c$$

где n_1 и n_2 - плотности сред



Виллеброрд Снелл (Снеллиус) (нидерл. Willebrord Snel van Royen; 1580, Лейден — 30 октября 1626, Лейден) — голландский математик, физик и астроном.

Вводимая в оптическое волокно мощность источника излучения будет определяться числовой апертурой.



Причем, чем больше числовая апертура, тем больше лучей попадет в ОВ, и тем больше будет разница во времени их прохождения волокна длиной L /

Числовая апертура. Она связана с максимальным углом Θ_A вводимого в волокно излучения из свободного пространства, при котором свет испытывает полное внутреннее отражение и распространяется по волокну, формулой:

$$NA = \sin \Theta_A$$

Фирмы - изготовители волокна экспериментально измеряют угол Θ_A и указывают соответствующее значение числовой апертуры для каждого поставляемого типа волокна.

Числовая апертура определяется для:

- оптических волокон со ступенчатым ППП по формуле: $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$,
- оптических волокон с градиентным ППП по формуле: $NA = \sqrt{\frac{n_1^2(r) - n_2^2}{2}}$.

Нормированная частота. Этот параметр, определяющий число мод, равен:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$$

где λ - длина волны, мкм.

Если $0 < v < 2,405$, то режим работы волокна одномодовый, если $v > 2,405$ - многомодовый. Чем меньше диаметр сердцевины ОВ, тем меньшее число мод может распространяться по нему и тем меньшее расширение получают оптические импульсы.

Соответственно увеличивается коэффициент широкополосности ОВ.

Таким образом, одномодовое (ОМВ, англ. SMF – single mode fibre) может передавать более широкополосные сигналы, чем многомодовое (ММВ, англ. MMF – multi mode fibre).

Диаметр модового поля.

- Важным интегральным параметром ОМВ является диаметр модового поля. Этот параметр используется при анализе ОМВ. В ММВ размер сердцевины принято оценивать диаметром ($2a$), в одномодовых волокнах – с помощью диаметра модового поля ($d_{МП}$). Это связано с тем, что энергия основной моды в ОМВ распространяется не только в сердцевине, но и частично в оболочке, захватывая ее приграничную область. Поэтому $d_{МП}$ более точно оценивает размеры поперечного распределения энергии основной моды. Величина $d_{МП}$ является важной при стыковке волокон между собой, а также при стыковке источника излучения с волокном. Этот параметр численно равен удвоенному расстоянию от оси волокна до той точки, где плотность оптической мощности падает в 2,72 раза по сравнению с максимальным значением.

Длина волны отсечки (*cutoff wavelength*)

Минимальная длина волны, при которой волокно поддерживает только одну распространяемую моду, называется длиной волны отсечки. Этот параметр характерен для одномодового волокна. Если рабочая длина волны меньше длины волны отсечки, то имеет место многомодовый режим распространения света.

По ГОСТу различают волоконную длину волны отсечки (λ_{CF}) и кабельную длину волны отсечки (λ_{CCF}). Первая соответствует слабо напряженному волокну. На практике же волокно помещается в кабель, который при прокладке испытывает множество изгибов. Кроме этого, сильные искривления волокон происходят при их укладке в сплайсбоксах. Все это ведет к подавлению побочных мод и смещению λ_{CCF} в сторону коротких длин волн по сравнению с λ_{CF} .

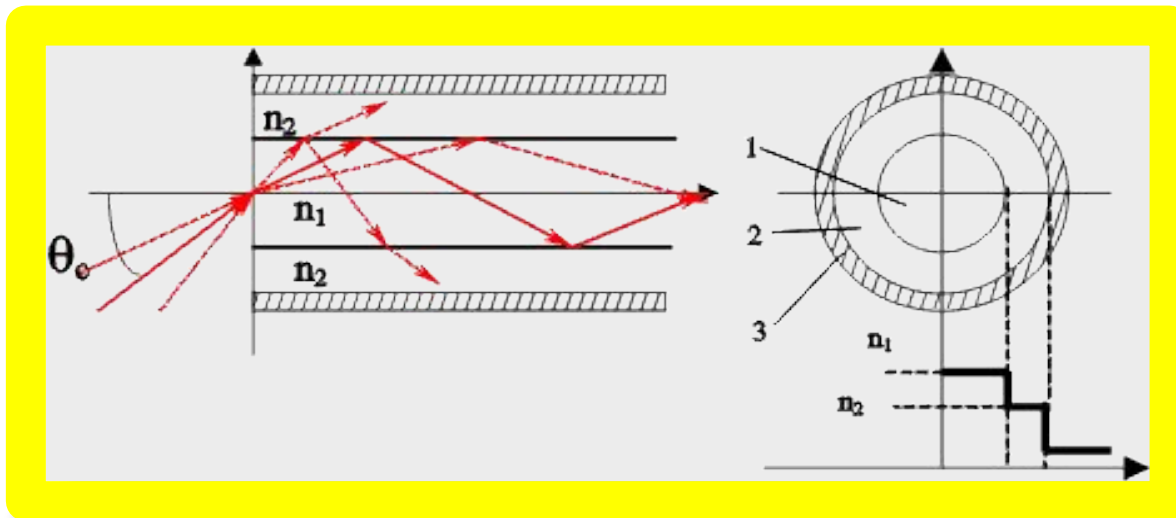
λ_{CF} для ступенчатого ОМВ определяется выражением вида:

$$\lambda_{CF} = 2\pi a \frac{NA}{2,405}$$

Распространение света в многомодовом оптическом ВОЛОКНЕ

Первое использованное в системах связи оптическое волокно (ОВ) было **многомодовым**. Для объяснения этого термина обратимся к рисунку

Ступенчатое ОВ



В состав оптоволокна входят:

1 - сердцевина - n_1

2 - оболочка - n_2

3 - защитная оболочка

$n_1 > n_2$ всегда!

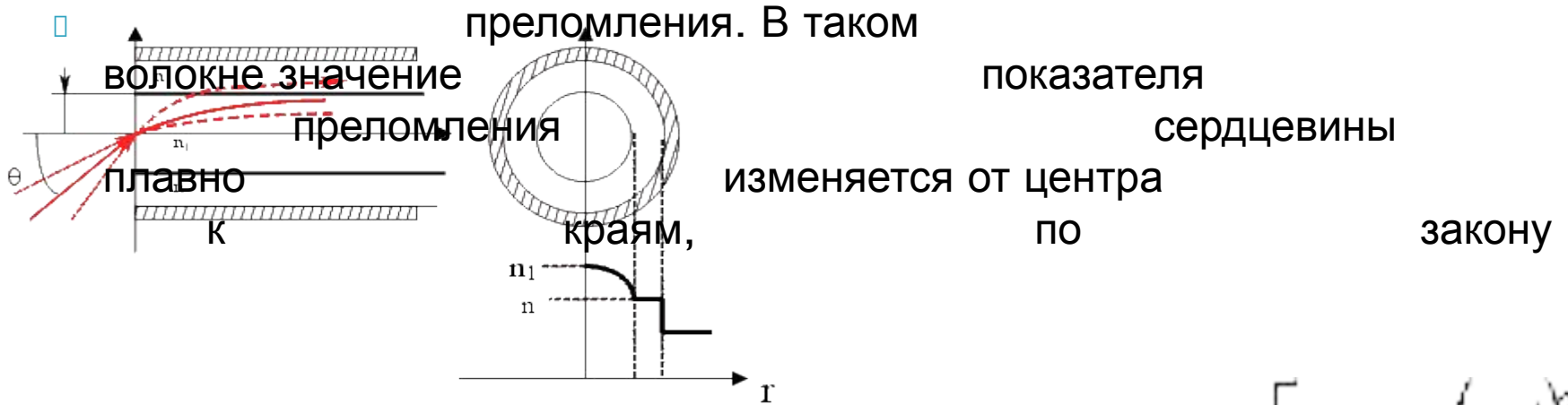
Сердцевина и оболочка изготавливаются из кварцевых стекол с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно, где $n_1 > n_2$. Хорошо известно, что луч света, падающий под углом θ на границу раздела двух сред с различными показателями преломления n_1 и n_2 испытывает явления преломления и отражения. В случае, когда $n_1 > n_2$ возможна ситуация, при которой свет полностью отразится от границы раздела, т.е. будет наблюдаться эффект полного внутреннего отражения. Условием возникновения этого эффекта является выполнение неравенства $\theta < \theta_c$, где θ_c - критический угол, определяемый из выражения

$$\sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



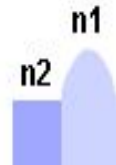
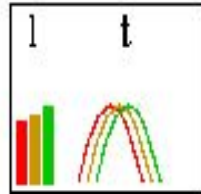
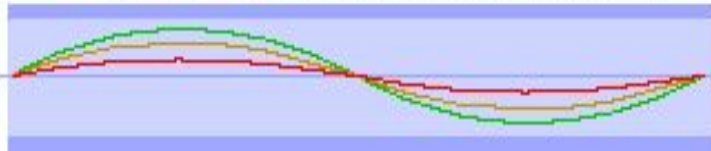
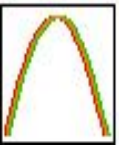
Градиентное ОВ.

Для уменьшения влияния межмодовой дисперсии было разработано многомодовое волокно с градиентным показателем преломления. В таком



показателя преломления сердцевины изменяется от центра по закону

Многомодовое градиентное волокно



$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]$$

одномодовое оптическое волокно

Волокно, диаметр сердцевины и соотношение показателей преломления сердцевины и оболочки которого выбраны таким образом, что в нем может распространяться только одна мода.

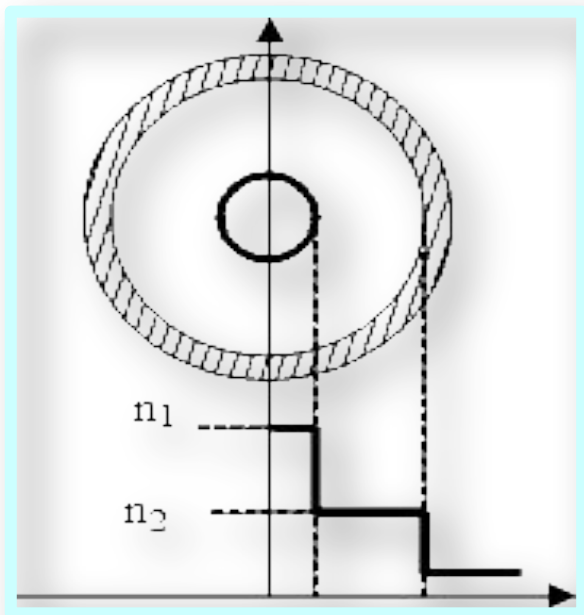
Существует несколько разновидностей одномодовых оптических волокон (ООВ) соответствующих рекомендациям МСЭ-Т и стандартизованных.



андартизация занимает важное место в телекоммуникационной индустрии.

Наличие стандарта на тот или иной вид продукции и услуг существенно облегчает взаимоотношения производителя и потребителя, способствует повышению качества товара и внедрению новых технологий.

Стандартное одномодовое оптическое волокно (SM)



Структура одномодового оптического волокна

Потребность в увеличении полосы пропускания и дальности передачи сигнала привела к необходимости применения **одномодового оптического волокна**, в нем может распространяться только одна мода. Явление межмодовой дисперсии в таком волокне отсутствует, а ширина полосы пропускания ограничивается хроматической дисперсией. Стандартное одномодовое волокно предназначено для работы в диапазоне длин волн 1,285-1,330,, в котором величина хроматической дисперсии в оптическом волокне достигает минимального, близкого к нулю значения, а также 1,55 мкм.

Классификация типов волокна согласно рекомендациям МСЭ-Т.

Стандарт G.650

- Стандарт G.650 дает общие определения типов волокон, перечень основных характеристик и параметров одномодовых волокон, а также методов измерения и контроля этих параметров.

Стандарт G.651

Стандарт G.651 распространяется на многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм (ступенчатые ОВ). Этот тип волокна в настоящее время используется только в коротких, внутриобъектовых ВОЛС с рабочей длиной волны 0,85 и редко 1,31 мкм.

Стандарт G.652

- Одномодовое волокно с несмещенной дисперсией (получило широкое распространение с 1983 года). Его параметры оптимизированы для диапазона длин волн 1,31 мкм, в котором волокно имеет нулевую хроматическую дисперсию и минимальное затухание. Диаметр световедущей жилы волокна — G.652 равен 9 мкм, а оболочки — 125 ± 2 мкм. Это волокно используется для одноволновой передачи и спектрального уплотнения, в диапазоне длин волн 1,55 мкм и обеспечивает передачу информации со скоростями до 10 Гбит/с на средние расстояния (до 50 км).

Стандарт G.653

Распространяется на одномодовое волокно со смещенной нулевой дисперсией в области $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно имеет нулевую дисперсию в области минимальных потерь волокна, что достигается за счет более сложной структуры световедущей жилы, а именно специально заданному распределению коэффициента преломления по диаметру жилы.

Волокно типа G.653 используется в протяженных магистральных широкополосных линиях и сетях связи, оно обеспечивает передачу информации на десятки километров со скоростями до 40 Гбит/с. Однако по нему можно передавать только один спектральный канал информации, то есть оно не может быть использовано в волоконно-оптических системах и сетях, в которых применяются волоконно-оптические усилители и плотное оптическое спектральное мультиплексирование (WDM-технологии).

Одномодовое волокно со смещённой нулевой дисперсией в область 1,55 мкм - длина волны (DS)

В этом волокне область минимума оптических потерь совпадает с областью минимальной хроматической дисперсии. Параметры этого оптического волокна регламентируются **рекомендацией G.653 МСЭ-T**. Волокно со смещенной дисперсией хорошо совместимо с оптическими усилителями, поскольку интервал длин волн в котором оптическое волокно имеет наилучшие параметры по затуханию и дисперсии совпадает с полосой максимального усиления оптических усилителей на эрбиевом волокне.

Такой тип волокна предпочтителен для высокоскоростных линий связи с большой длиной **регенерационного участка**, без применения технологий оптического уплотнения. Возможно также применение этого оптического волкна в системах со спектральным уплотнением **(WDM)** при ограниченной протяженности регенерационного участка, пониженной мощности передаваемого сигнала и ограниченной плотности спектральных компонент

Стандарт G.654

Стандарт G.654 содержит описание характеристик одномодового волокна, имеющего минимальные потери на $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно было разработано для применения в подводных ВОЛС. За счет больших, чем у волокна стандарта G.653 размеров световедущей жилы, оно позволяет передавать более высокие уровни оптической мощности, но в то же время обладает более высокой хроматической дисперсией в диапазоне $\lambda=1,55$ мкм. Волокно типа G.654 не предназначено для работы на какой-либо другой волне излучения кроме $\lambda=1,55$ мкм.

Стандарт G.655

Стандарт G.655 относится к волокну со смещенной ненулевой дисперсией — NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Это волокно предназначено для применения в магистральных волоконно-оптических линиях и глобальных сетях связи, использующих WDM-технологии в диапазоне длин волн 1,55 мкм.

Волокно — G.655 имеет слабую, контролируемую дисперсию в С полосе ($\lambda=1,53-1,56$ мкм) и большой диаметр световедущей жилы по сравнению с волокном типа G.653. Это снижает проблему четырехволнового смешения и нелинейных эффектов и открывает возможности применения эффективных волоконно-оптических усилителей.

Вышеприведённая классификация оптических волокон по их основным характеристикам дана с точки зрения пользователя. Однако следует иметь в виду, что у производителей и поставщиков может быть своя классификация и маркировка, связанная с особенностями производства. Тем не менее, данные материалы помогут потребителям правильно сориентироваться при выборе ВОК для строительства новых и расширения действующих ВОЛС.

Одномодовое оптическое волокно со смещённой ненулевой дисперсией (NZDS).

Внедрение технологий **«плотного» частотного уплотнения (DWDM)** вкупе с использованием эрбиевых оптических усилителей привело к разработке нового типа оптических волокон.

При использовании технологии DWDM в оптическое волокно одновременно вводится большое количество (до 100) оптических каналов на близких длинах волн, каждый из которых несет свой, независимый от других информационный поток, но при этом накладываются **определенные требования** на само оптическое волокно.

Это отсутствие искажений сигнала передаваемого каждой спектральной компонентой по отдельности, что эквивалентно отсутствию хроматической дисперсии.

В случае отсутствия хроматической дисперсии возникает **проблема нелинейных эффектов**, обусловленная высокой мощностью оптических сигналов в волокне.

Наиболее важным для систем, использующих WDM-технологии, является **эффект четырехволнового смещения**, приводящий через взаимодействие отдельных спектральных компонент со средой (сердцевинной ОВ) к взаимодействию спектральных компонент друг с другом.

Эффект четырехволнового смещения приводит к тому, что после прохождения WDM-сигналом определенной длины волокна возникают компоненты на кратных частотах, т. е. становится невозможным **демультиплексирование сигнала**.

Модификация профиля показателя преломления увеличивает волноводную составляющую дисперсии и приводит к уменьшению эффекта четырехволнового смещения



Меняя форму профиля показателя преломления (**глубину провалов**), существует возможность создавать NZDS-волокна как с положительной, так и с отрицательной величиной дисперсии, что открывает возможность сбалансировать дисперсию в оптической линии без использования дополнительных устройств.

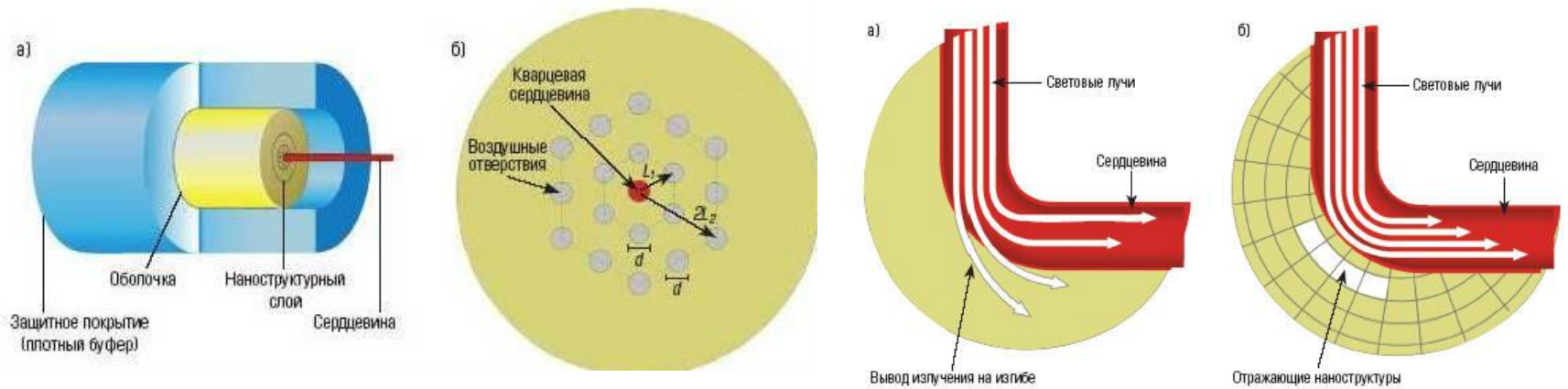
Это волокно предназначено для использования в линиях с большой протяженностью регенерационного участка с DWDM уплотнением сигнала. Рабочий диапазон для этих оптических волкон 1,530-1,565 мкм, уровень хроматической дисперсии в рабочем диапазоне 0,1-6 пс/нм*км.

Такой уровень дисперсии достаточно низок для того, чтобы обеспечить скорость передачи до 10 Гбит/с в каждом спектральном канале, и в то же время достаточно высок для эффективного подавления нелинейных эффектов при использовании DWDM-технологий. Даже без использования DWDM-технологии этот тип волкон обеспечивает большую пропускную способность и протяженность **регенерационного участка**, чем стандартное одномодовое волокно.

Интересной особенностью данного типа волкна является возможность получения волкон с одинаковой по величине, но разной по знаку дисперсией (NZDS+ и NZDS- волкна), что дает возможность построения линий со скомпенсированной, близкой к нулю дисперсией, без применения дополнительных устройств.

На сегодняшний день выпуск волкон со смещенной ненулевой дисперсией налажен тремя фирмами - **Fujikura, Lucent Technology и Corning,**

Стандарт G.657 -микроструктурированные волокна типа HAF(holed assisted fiber).



Конструкция и принцип действия микроструктурированных волокон типа HAF

Характеристики волокон по Рекомендации G.657. волокно обладающее низкой восприимчивостью к изгибам.

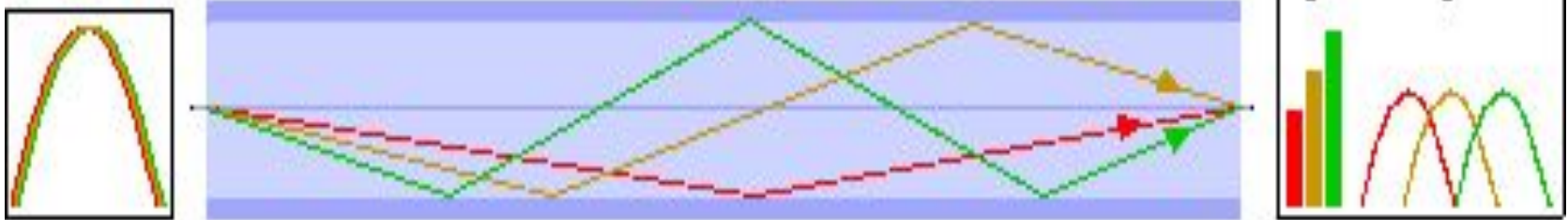
Характеристики волокон					
Характеристика	G.657.A		G.657.B		
Длина волны, нм	1310		1310		
Диаметр модового пятна, мкм	8,6–9,5±0,4		6,3–9,5±0,4		
Диаметр оболочки, мкм	125,0±0,7		125,0±0,7		
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,5 максимум		0,5 максимум		
Сплюсненность оболочки	1,0% максимум		1,0% максимум		
Длина волны среза кабеля, нм	1260 максимум		1260 максимум		
Потери на макроизгибе, дБ:					
радиус, мм	15	10	15	10	7,5
количество витков	10	1	10	1	1
макс. при 1550 нм	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5
макс. при 1625 нм	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум		
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн: 1285-1330 1525-1575	3,5 18		Не является определяющей		

Дисперсия



Межмодовая дисперсия

Межмодовая дисперсия



Поскольку источники излучения не идеальны, испускаемые ими волны не совсем идентичны и могут различаться по направлению распространения. Единичная независимая траектория распространения волны именуется модой. Очевидно, что луч, направленный параллельно оси световода проходит меньшее расстояние, нежели луч распространяющийся по траектории ломаной за счет эффекта отражения. Как следствие, лучи достигнут конца сердечника. Изначальный световой импульс содержит некоторое множество волн, входящих в световод под разными углами. В итоге импульс раскладывается на множество отдельных волн, достигающих приемник в разные моменты.

Именно этот разброс времени и называется межмодовой дисперсией.

Межчастотная (волноводная) дисперсия.



Источники излучения генерируют не одну длину волны, а некоторое их количество, определяемое спектром излучения - $\Delta\lambda$. Согласно законам физики более короткие волны распространяются быстрее, а следовательно волны достигают конца световода в разные моменты времени. Если изначальный световой импульс содержит некоторое множество входящих в световод волн с разной частотой, то он раскладывается на множество отдельных волн, достигающих приемник в разное время.

Именно этот разброс времени и называется межчастотной дисперсией.

Материальная дисперсия



Скорость преодоления расстояний волной зависит не только от частоты, но и от плотности среды распространения. Показатель преломления – n , при более тщательном рассмотрении, зависит от длины волны. Вследствие этого волны, имеющие разную длину, обладают разными скоростями распространения и оказываются в приемнике в разное время.

Очень часто объединяют последние два понятия под термином хроматическая дисперсия. Наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне, в виду отсутствия межмодовой дисперсии.

- Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

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

- Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda)$$

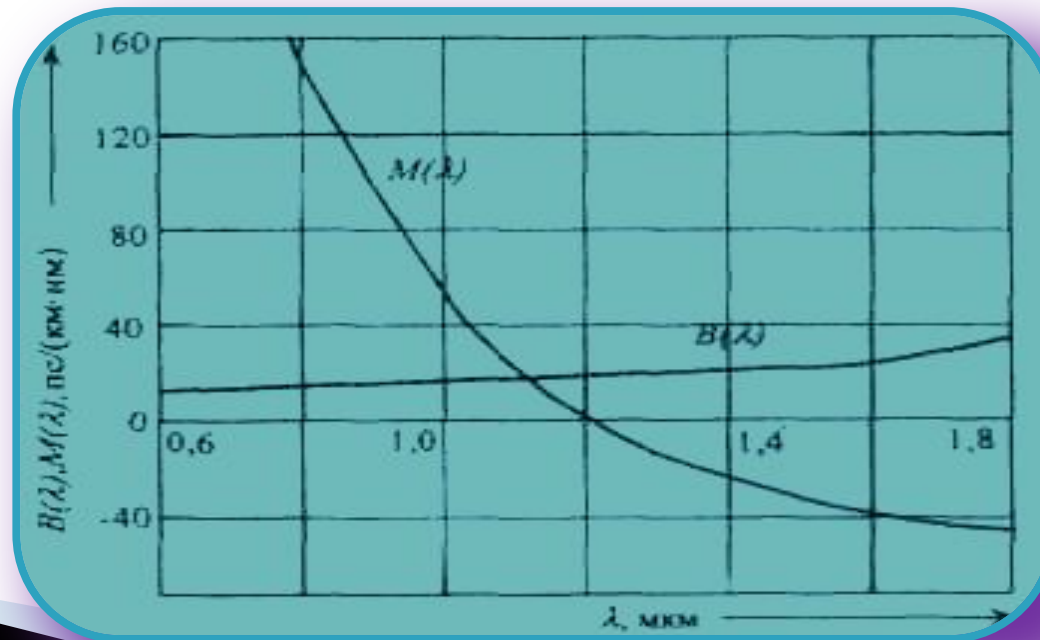
где введем коэффициент материальной дисперсии $M(\lambda)$ и волноводной дисперсии соответственно, а $\Delta\lambda$ (нм) - уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения.

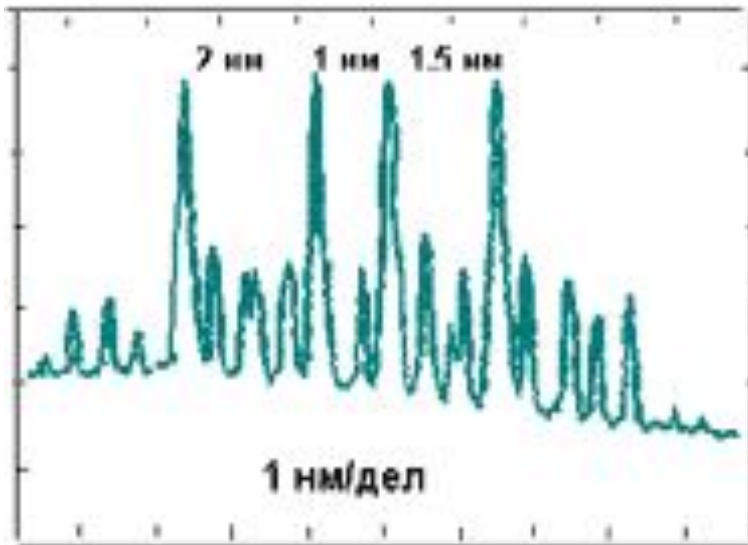
Резльтирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм*км).

Проявление хроматической дисперсии разного знака

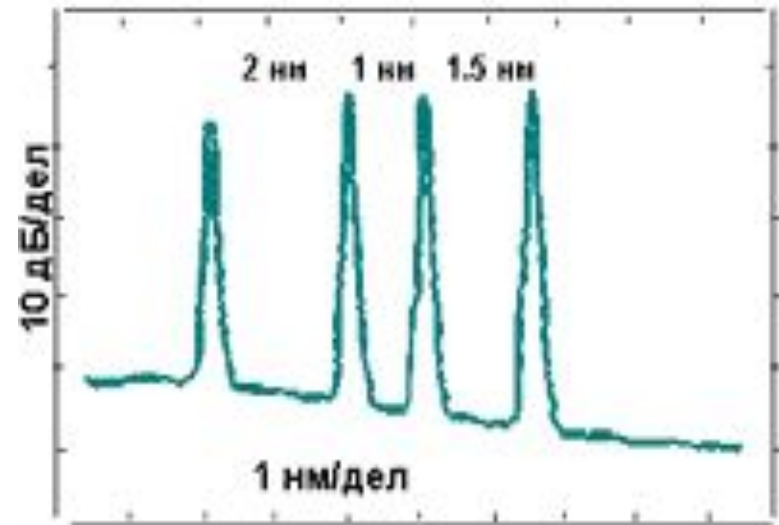
Отметим, что и положительная и отрицательная хроматическая дисперсия проявляется уширением импульса при распространении его по оптическому волокну. Если дисперсия положительна, то импульс будет расширяться за счет того, что более длинные волны будут опережать более короткие. Если она отрицательна – за счет того, что более короткие волны будут опережать более длинные. К этому факту мы еще вернемся, когда будем говорить о компенсации хроматической дисперсии.

- Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть как положительным, так и отрицательным. И здесь важным является то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$, а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в нуль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которых может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.





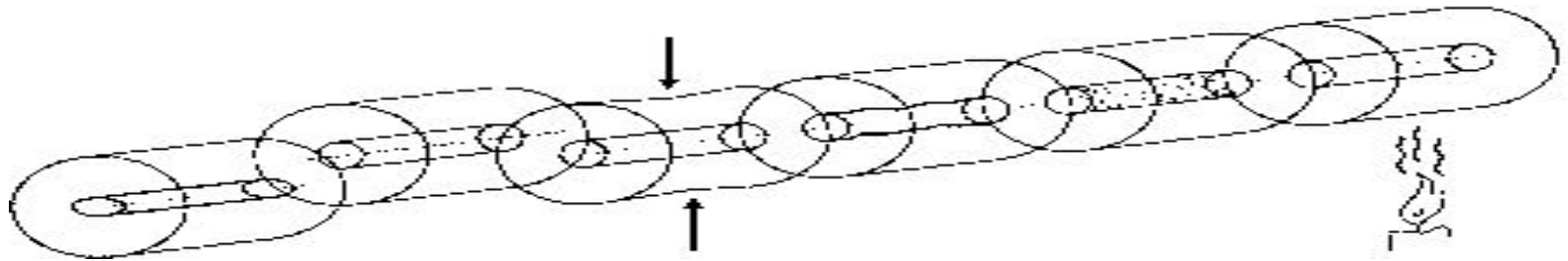
Волокно со смещенной (нулевой) дисперсией. Спектр сигнала после прохождения 25 км искажен четырёхволновым смешением.



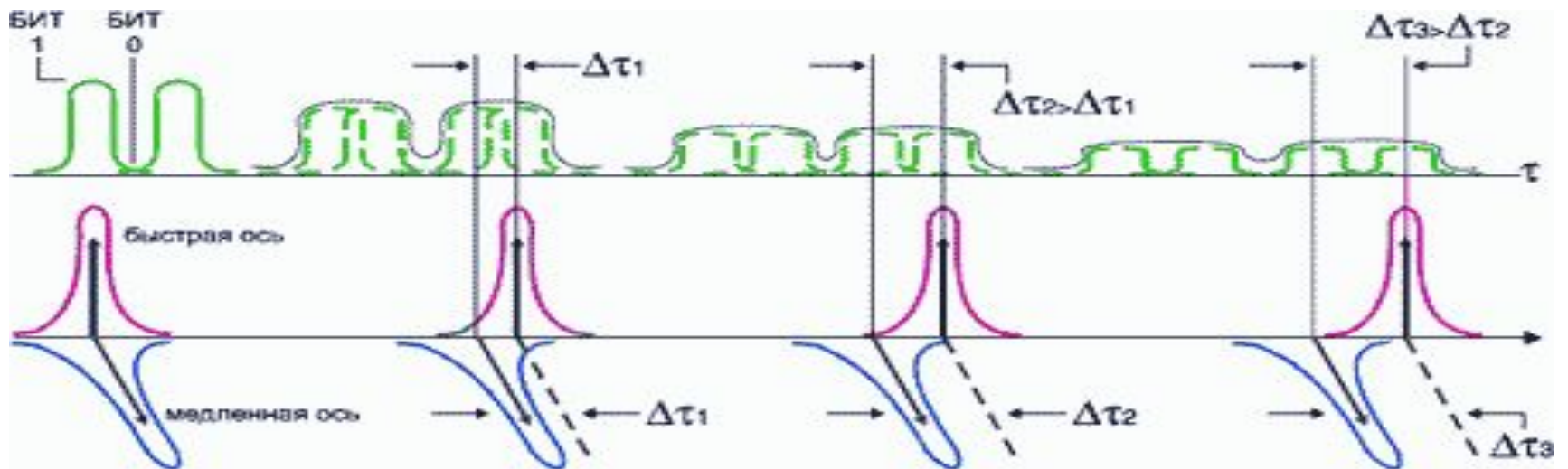
Волокно со смещённой, но ненулевой дисперсией. Спектр сигнала после прохождения 50 км

Поляризационно - модовая дисперсия

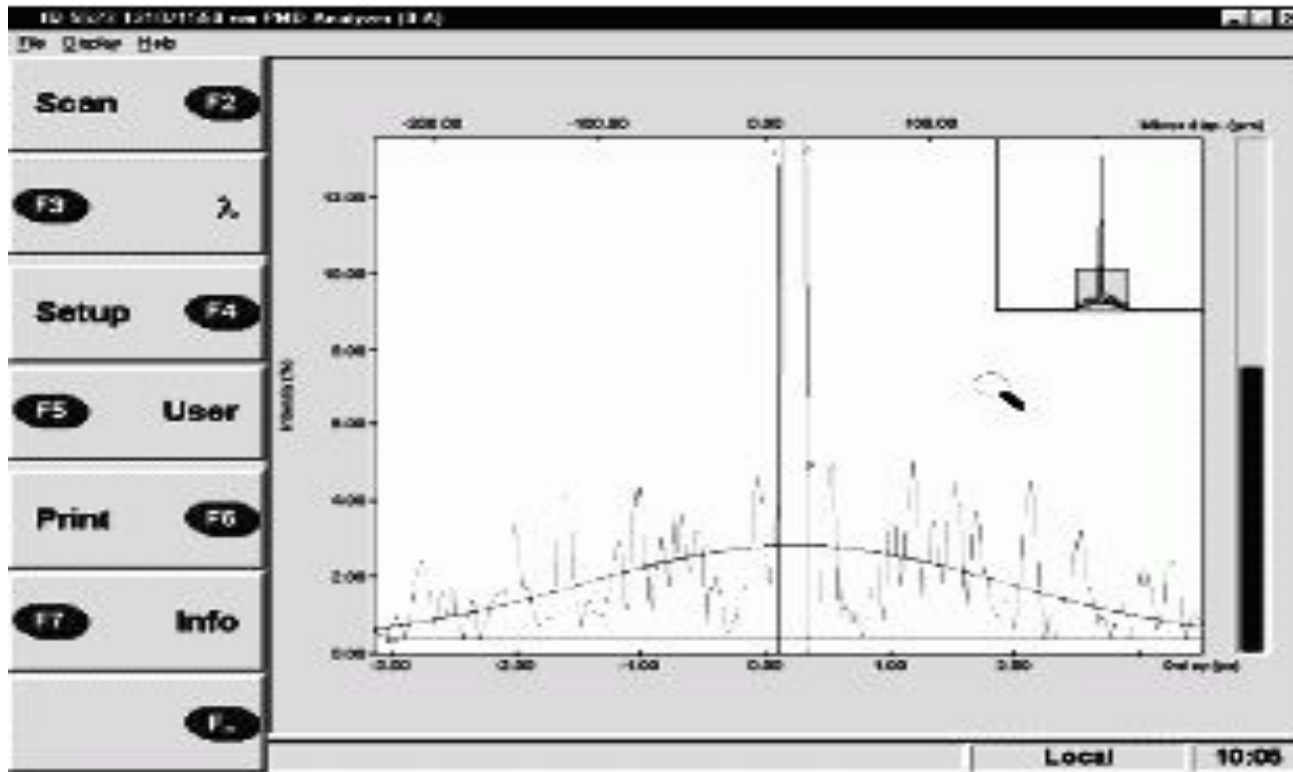
В ОВ имеется еще один вид дисперсии - дисперсия поляризованной моды или поляризационно-модовая дисперсия. Как известно, монохроматический свет представляет собой поперечную электромагнитную волну, которая характеризуется поляризацией - направлением вектора напряженности электрического поля E . В идеальном ОВ с круговой симметрией сердцевины и оболочки показатель преломления и скорость распространения света не зависят от направления его поляризации. В реальных волокнах идеальная круговая симметрия нарушается. В результате в волокне возникает анизотропия (двулучепреломление) и скорость распространения света начинает зависеть от поляризации. При производстве и прокладке кабеля этот эффект усиливается из-за внешних причин нарушения симметрии - изгибов, механических напряжений и т.п. В поперечном сечении анизотропного ОВ можно выявить взаимно перпендикулярные оси наименьшей и наибольшей скорости. Тогда произвольно направленный вектор E можно разложить на две составляющие, направленные вдоль этих осей. Скорости распространения этих составляющих будут различны. Фактически единственная мода в одномодовом ОВ расщепляется на две, отличающиеся по скорости распространения. При малой величине ПМД (обычная ситуация) будет проявляться в расширении проходящего импульса. Расширение возрастает с увеличением длины ОВ, но не пропорционально длине, а пропорционально корню квадратному из длины.



Поляризационная модовая дисперсия PMD чувствительна к колебаниям температуры, механическим напряжениям и искажениям геометрии волокна



PMD измеряется в пс для каждого конкретного участка проложенного волокна в линии связи



Если, например, 9 из 10 участков линии имеют PMD по 0,2 пс каждая, а PMD десятого участка составляет 2 пс, то общая величина PMD линии будет равна 2,088 пс. Иными словами один плохой участок волокна портит общую картину для всей линии связи.

Влияние обратного света

Отраженное излучение, попадая в резонатор лазера, нарушает линейность характеристик лазера, спектральную стабильность и ухудшает шумовые свойства. Искажения могут возникнуть за счет небольшого изменения расстояния между лазером и торцом оптического волокна. Это вызывает скачкообразную смену лазерных мод, и из-за дисперсии материала волокна появляются временные скачки сигнала. На выходе оптического волокна скачкообразная смена мод проявляется в виде фазовой модуляции ИКМ-сигналов.

Влияние обратного света на характеристики лазера заметно уже при попадании в лазер 0,003% излученного света, а при попадании 5% - обратное оптическое излучение приводит к генерации импульсного типа.

Вследствие попадания отраженного сигнала в лазер могут происходить следующие изменения характеристик:

- изменение формы ватт-амперной характеристики, величины порогового тока,
- изменение спектра колебаний (сдвиг резонансной длины, изменение числа генерируемых продольных мод).

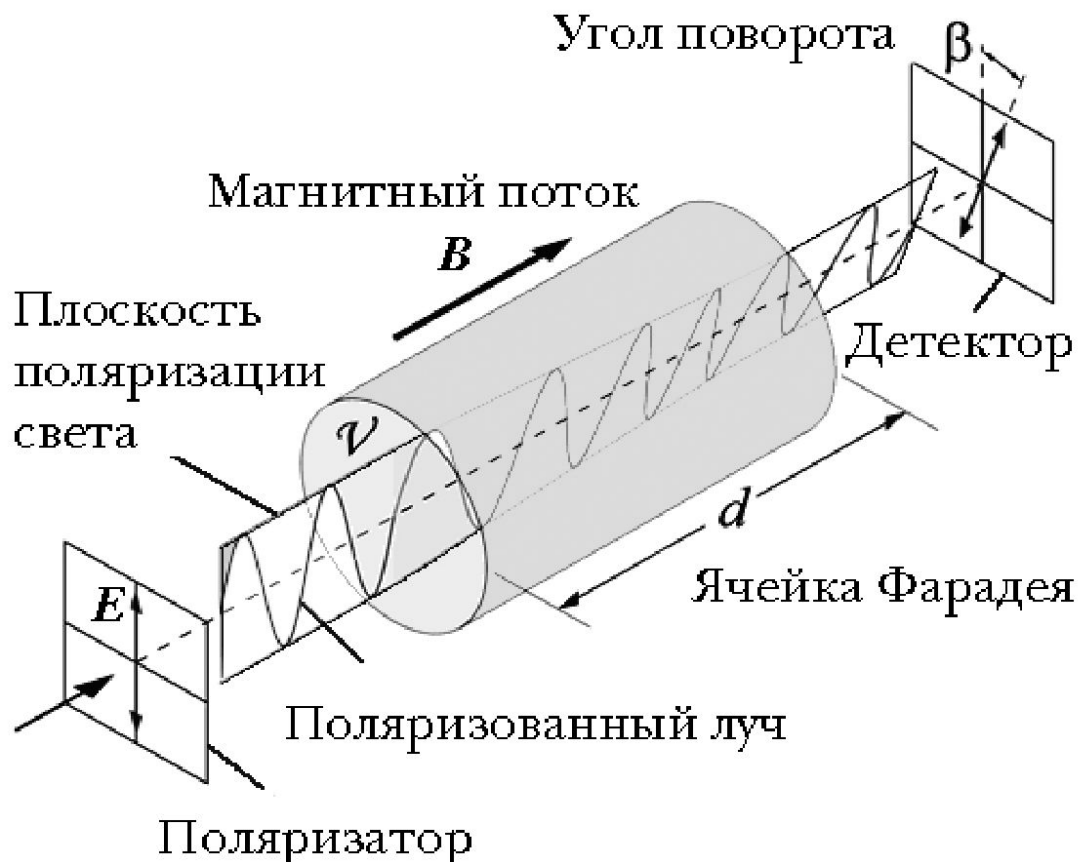
Для устранения влияния обратного света на излучение лазера используется оптический изолятор, принцип действия которого основан на невзаимном повороте плоскости поляризации в результате эффекта Фарадея. Основным элементом изолятора – это стержень из ферромагнитного материала, например, железиттриевого граната (ЖИГ). Стержень намагничен продольным полем H_0 , которое вызывает поворот плоскости поляризации оптической волны на 45° . Поворот всегда происходит против часовой стрелки навстречу вектору H_0 . В результате двукратного прохождения оптической волны через стержень плоскость поляризации её оказывается повернутой на 90° . На входе лазера можно поставить поляризатор. Изолятор обеспечивает развязку 50 ... 60 дБ, потери – около 1 дБ.

Принцип действия оптического изолятора

Оптический изолятор состоит из трех элементов: поляризатора 1 (входного поляризатора), ячейки Фарадея 2 и анализатора 3 (выходного поляризатора). Параметры ячейки Фарадея выбираются так, чтобы ось поляризации света, проходящего через нее, разворачивалась на 45° . Под таким же углом устанавливаются оси поляризаторов.

Входной полезный сигнал, проходя через поляризатор 1, оставляет свою вертикальную составляющую без изменения, устраняя горизонтальную составляющую. Далее вертикально поляризованный свет проходит через ячейку Фарадея 2, разворачивает плоскость поляризации на 45° и беспрепятственно проходит через анализатор 3.

При распространении света в обратном направлении он также поляризуется в плоскости анализатора 3, затем, проходя через ячейку Фарадея 2, становится горизонтально поляризованным. Таким образом, оси поляризации света и поляризатора 1 составляют угол 90° , поэтому поляризатор 1 не пропускает обратное излучение.



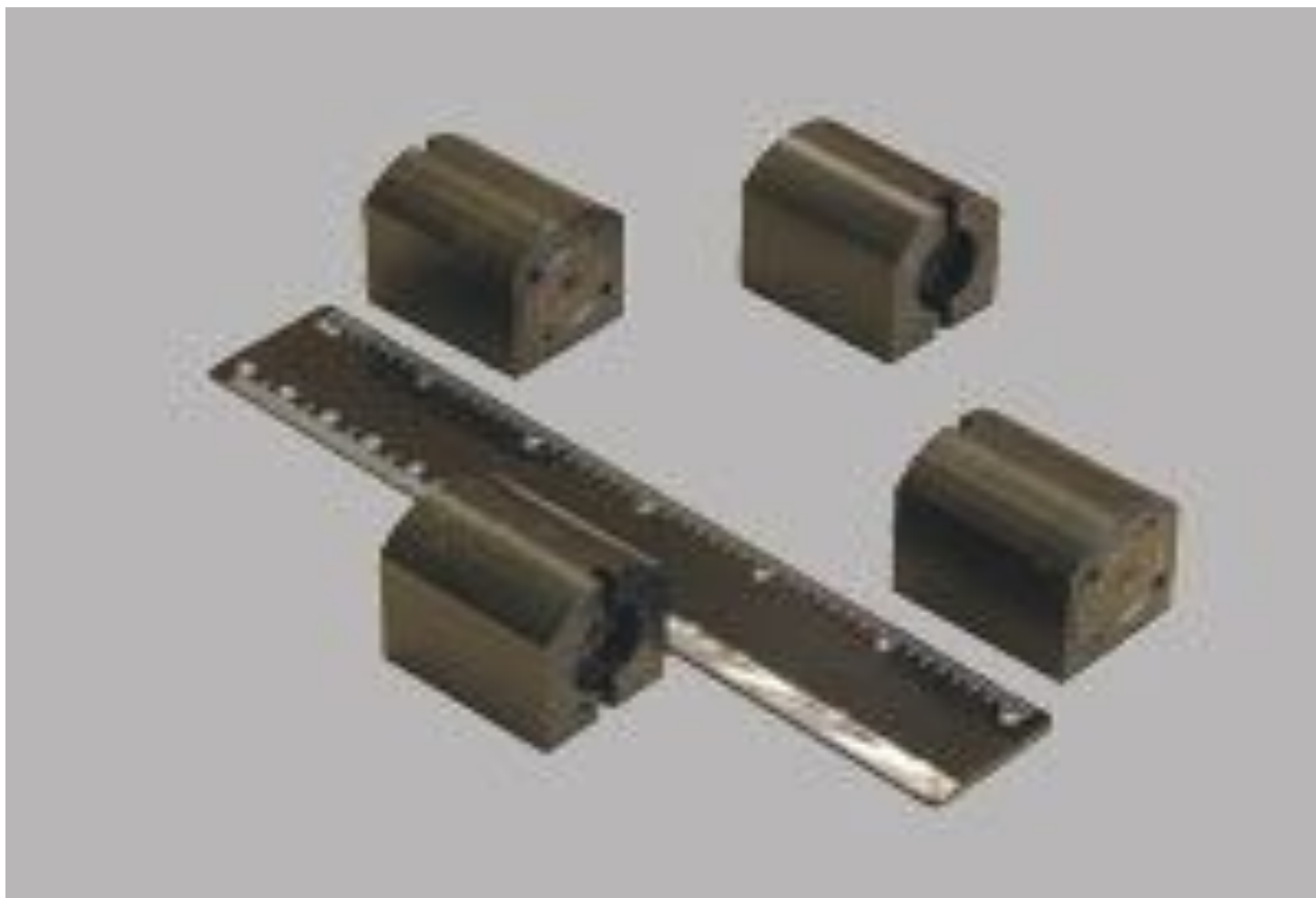
Угол поворота плоскости поляризации света, рад., определяется следующим соотношением:

$$\beta = \nu B d,$$

где B — плотность магнитного потока, Тл;
 d — длина части ячейки Фарадея, взаимодействующей с магнитным потоком, м;
 ν — константа Вердета для данного материала ячейки Фарадея.

В качестве рабочего вещества в магнито-оптических преобразователях используют стекла, содержащие оксид свинца (так называемые флинты, кроны), а также плавленый кварц.

Особенно большую чувствительность к магнитному полю имеют пленки из феррита граната.



Внешний вид изолятора

Потери в оптических волокнах.

Затухание (ослабление) - уменьшение оптической мощности сигнала при его передаче по волокну. Затухание волоконного световода обуславливается главным образом физическими процессами - поглощением и рассеянием.

Потери состоят из собственного поглощения α_c в материале сердечника и поглощения из-за наличия в сердечнике примесей $\alpha_{пр}$.

Рассеяние относится к свету, отклонённому с пути, по которому он распространяется. При рассеянии света в волокне, лучи расходятся в новых направлениях, и часть из которых имеет угол, превышающий предельный угол полного внутреннего отражения волокна. Эти лучи уходят из сердечника волокна в окружающее его вещество, а другие остаются в сердечнике, но изменяют направление - начинают распространяться назад к источнику.

Частично рассеяние неизбежно для волокна (Релеевское рассеяние).

Частично вызывается изгибами волокна и неоднородностями в волокне, вызванными процессом производства.

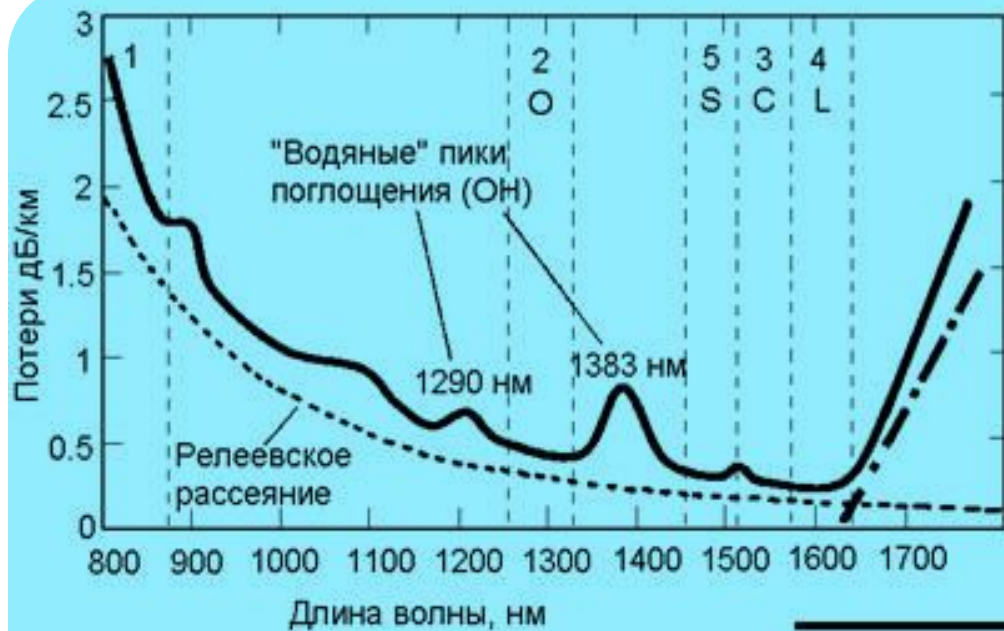
Полный коэффициент затухания световода определяют из формулы $\alpha = \alpha_c + \alpha_{пр} + \alpha_r + \alpha_k$, где $\alpha_{пр}$ - учитывает потери за счет примесей, α_c - собственное поглощение, α_r - потери на рассеивание, зависящие от материала световода и рабочей длины волны, α_k - кабельные потери, возникающие из-за различных нарушений геометрий световода (соединения, изгибы, микроизгибы). Потери волокна зависят от длины волны оптического излучения и минимальны в диапазоне от 800нм. до 1700нм

- Оптические потери** характеризуются величиной затухания световой мощности (или интенсивности) на единичной длине световода, выраженной в децибеллах на километр (дБ/км):

$$B = 10 \lg(P_{вх}/P_{вых})/L ;$$

$P_{вх}$ и $P_{вых}$ мощности светового излучения на входе и на выходе световода длиной L , измеряемой в км.

Причинами потерь являются различные виды поглощения света в сердцевине волокна, а также вытекание лучей из сердцевины в оболочку и потери в оболочке.



Окна прозрачности и диапазоны длин волн:

Первое окно	780...860 нм
Второе окно (O)	1260...1360 нм
Третье окно (C)	1530...1565 нм
Четвертое окно (L)	1565...1625 нм
Пятое окно (S)	1460...1530 нм

- потери
- релеевское рассеяние
- . - . - . поглощение на колебаниях решетки

Релеевское рассеяние, значение которого убывает пропорционально четвертой степени длины волны: $B_{\text{рел}} = \alpha_{\text{рел}} \lambda^{-4}$

Собственное межзонное поглощение. Заметно лишь в коротковолновой области $\lambda < 0,6 \text{ мкм}$.

Поглощение на колебаниях решетки: ограничивает пропускание световода с длинноволновой стороны спектра.

Примесное поглощение. Полосы примесного поглощения элементов группы железа (Fe^{+2} , Cr^{+2} , Cu^{+2} , Ni^{+2}) попадают в область наивысшей прозрачности кварцевого волокна. Заметное примесное поглощение, от которого трудно избавиться в кварцевом волокне, обусловлено гидроксильной группой (ОН).

Кроме указанных причин затухание света может быть связано, как с качеством изготовления световода, так и с условиями его эксплуатации. Среди них: технологические разбросы параметров световода (эллиптичность сердцевины, флуктуации ее диаметра и показателя преломления); явления связанные с дефектами эксплуатации (микроизгибы, микротрещины, механические напряжения, в том числе вследствие флуктуаций температуры и т.п.); явления связанные с деградацией (старением) и действием ионизирующего излучения. В современных волоконных световодах эти потери могут быть сведены до минимума и заметных деградационных явлений в них за период эксплуатации не наблюдается.

Основные нелинейные эффекты

В системах WDM с высокой степенью когерентности оптические сигналы даже умеренной мощности могут приводить к нелинейным явлениям.

Нелинейность волокна становится ощутимой, когда интенсивность лазерного излучения (мощность на единицу поперечного сечения) достигает порогового значения.

Вынужденное комбинационное рассеяние.

Эффект Керра

Простейшим видом нелинейного взаимодействия световой волны со средой является эффект Керра – зависимость показателя преломления среды от интенсивности световой волны. Следствием эффекта Керра являются два нелинейных эффекта: фазовая самомодуляция и самофокусировка света.

Фазовая самомодуляция – это зависимость фазы световой волны от ее интенсивности. Фазовая задержка световой волны при известной мощности - P в ОВ длиной L может быть рассчитана. Фазовая самомодуляция приводит к тому, что оптический импульс в волокне приобретает паразитную частотную модуляцию. При сильно выраженном эффекте фазовой самомодуляции спектр импульса уширяется, что усиливает влияние хроматической дисперсии. Эффект Керра приводит к искажению профиля показателя преломления и вызывает изменение распределения интенсивности света в поперечном сечении волокна. Это явление называют самофокусировкой света. Эффект самофокусировки становится заметным только при очень высоких интенсивностях излучения и даже может приводить к разрушению ОВ.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна

Сравнительно сильное взаимодействие между частицами стекла ОВ приводит к тому, что эти частицы не могут двигаться независимо — любое их возбуждение распространяется в среде в виде волны. Однако при любой отличной от абсолютного нуля температуре частицы находятся в тепловом движении. В результате по всевозможным направлениям в среде распространяются упругие акустические волны различных частот. Наложение таких волн друг на друга вызывает появление флуктуаций плотности среды (малых локальных отклонений плотности от ее среднего значения). Направленный внутрь среды свет будет рассеиваться на этих неоднородностях. Возникнет рассеянное излучение, частота которого будет сдвинута относительно возбуждающего излучения на величину частоты звуковой волны, а направление распространения противоположно. В некоторых случаях необходимо увеличить мощность излучения, вводимого в волокно, например, для достижения большей длины регенерационного участка. Такая задача наиболее актуальна для подводных линий, где нужно минимизировать число регенераторов, требующих дистанционного питания. В этом случае используют специально разработанные ОВ с увеличенным диаметром модового поля. Такие волокна обеспечивают ту же плотность мощности излучения при большей ее абсолютной величине.

Комбинационное (рамановское) рассеяние

Рамановское или комбинационное рассеяние – это нелинейный эффект, приводящий к тому, что часть мощности излучения преобразуется в излучение с более низкой частотой

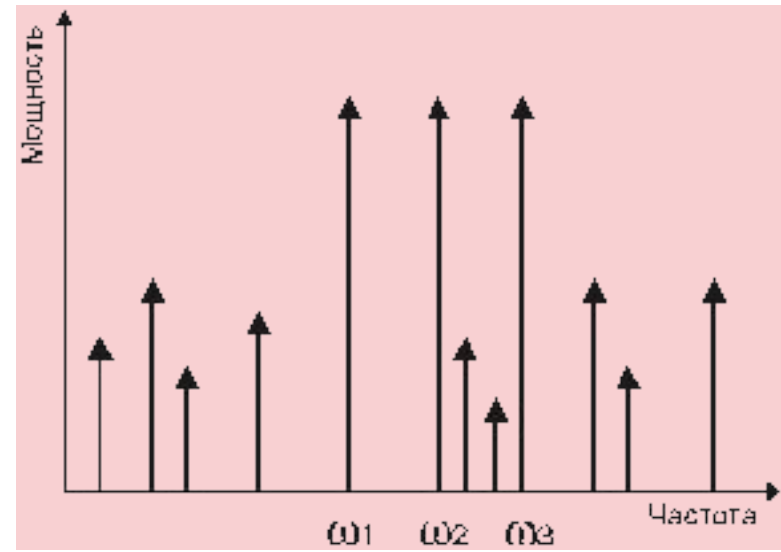
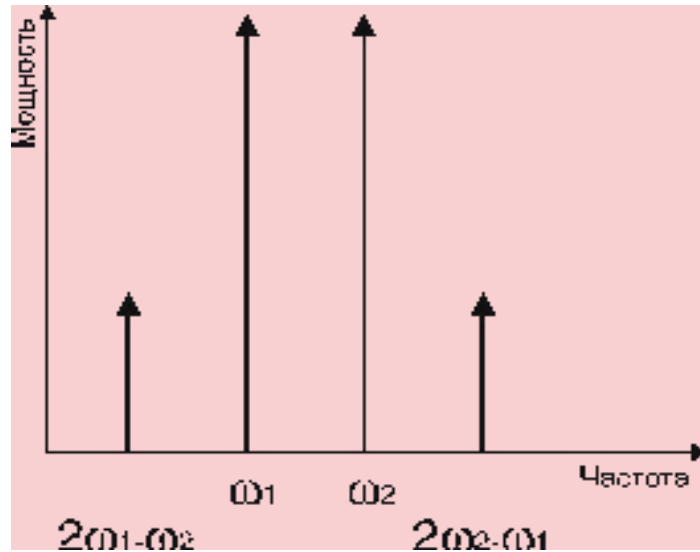
Четырехволновое смешение

Фазовая кроссмодуляция, четырехволновое смешение

Если по ОВ одновременно распространяются два световых пучка с длинами волн λ_1 и λ_2 , то нелинейные эффекты могут приводить к изменению фазы пучка 1 пропорционально интенсивности пучка 2 и наоборот. Это явление называется **фазовой кроссмодуляцией**.

Фазовая кроссмодуляция приводит к нежелательным перекрестным помехам в каналах - **Четырехволновому смешению**, которое возникает при нелинейном взаимодействии в ОВ световых волн с разными частотами. Если в ОВ распространяются только две волны с частотами ν_1 и ν_2 , четырехволновое смешение приведет к генерации новых гармоник с частотами $3-\nu_1$, $(2-\nu_1)$, $1-\nu_2$, $\nu = \nu_1 - \nu_2 - \nu_2 = 2\nu_1 - \nu_2$ и $4+\nu_2$, $2+\nu_1$, $2-\nu_1$ $\nu = \nu_1 + \nu_2 - \nu_2 = 2\nu_1 - \nu_2$. Если в спектре сигнала эти частоты уже присутствуют, они могут усиливаться (это так называемое параметрическое усиление). Сложение гармоник происходит с учетом их фазы, поэтому четырехволновое смешение оказывает реальное влияние только при согласовании фаз световых волн. Эффект четырехволнового смешения наиболее выражен вблизи длины волны нулевой дисперсии волокна. Поэтому, для систем спектрального уплотнения используют волокна с ненулевой смещенной дисперсией, имеющие во всем рабочем диапазоне меньшую, но ненулевую хроматическую дисперсию.

Появление новых частот



Влияние четырехволнового смешения уменьшается при:

- увеличении эффективной площади волокна;
- увеличении абсолютного значения хроматической дисперсии.

Результирующая таблицы параметров одномодовых волокон по рекомендациям МСЭ-T

Характеристики волокон по Рекомендации G.652.

Характеристика	G.652.A		G.652.B		G.652.C		G.652.D	
Длина волны, нм	1310		1310		1310		1310	
Диаметр модового пятна, мкм	8,6–9,5±0,6		8,6–9,5±0,6		8,6–9,5±0,6		8,6–9,5±0,6	
Диаметр оболочки, мкм	125,0±1		125,0±1		125,0±1		125,0±1	
Диаметр защитного покрытия, мкм	250,0±15		250,0±15		250,0±15		250,0±15	
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,6 максимум		0,6 максимум		0,6 максимум		0,6 максимум	
Сплюсненность оболочки	1,0% максимум		1,0% максимум		1,0% максимум		1,0% максимум	
Длина волны отсечки кабеля, нм	1260 максимум		1260 максимум		1260 максимум		1260 максимум	
Потери на макроизгибе, дБ	0,1 максимум на 1550 нм		0,1 максимум на 1550 нм		0,1 максимум на 1550 нм		0,1 максимум на 1550 нм	
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум	
Длина волны нулевой дисперсии, нм	от 1300 до 1324		от 1300 до 1324		от 1300 до 1324		от 1300 до 1324	
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн: 1285-1330 1525-1575	3,5 18		3,5 18		3,5 18		3,5 18	
Знак дисперсии	+		+		+		+	
Коэффициент затухания, дБ/км; на длине волны, нм	0,5	1310	0,4	1310	0,4	all*	0,4	all*
	-	-	0,35	1550	0,35	1383	0,35	1383
	0,4	1550	0,4	1625	0,3	1550	0,3	1550
Коэффициент Pm, дБ/км	0,5		0,2		0,5		0,2	

Характеристики волокон по Рекомендации G.653.

Характеристики волокон				
Характеристика	G.653.A		G.653.B	
Длина волны, нм	1550		1550	
Диаметр модового пятна, мкм	7,8–8,5±0,8		7,8–8,5±0,6	
Диаметр оболочки, мкм	125,0±1		125,0±1	
Диаметр защитного покрытия, мкм	250,0±15		250,0±15	
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,8 максимум		0,6 максимум	
Сплюсненность оболочки	2,0% максимум		1,0% максимум	
Длина волны отсечки кабеля, нм	1270 максимум		1270 максимум	
Потери на макроизгибе, дБ	0,5 максимум на 1550 нм		0,1 максимум на 1550 нм	
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум	
Длина волны нулевой дисперсии, нм	от 1500 до 1600		от 1300 до 1324	
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн: 1525-1575	3,5		3,5	
Коэффициент затухания, дБ/км; на длине волны, нм	0,35	1550	0,35	1550
Коэффициент РМД, пс/√км	0,5 пс/√км		0,20 пс/√км	

Характеристики волокон по Рекомендации G.654.

Характеристика	G.654.A		G.654.B		G.654.C	
Длина волны, нм	1550		1550		1550	
Диаметр модового пятна, мкм	9,5–10,5±0,7		9,5–13±0,7		9,5–10,5±0,7	
Диаметр оболочки, мкм	125,0±1		125,0±1		125,0±1	
Диаметр защитного покрытия, мкм	250,0±15		250,0±15		250,0±15	
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,8 максимум		0,8 максимум		0,8 максимум	
Сплюсненность оболочки	2,0% максимум		2,0% максимум		2,0% максимум	
Длина волны отсечки кабеля, нм	1530 максимум		1530 максимум		1530 максимум	
Потери на макроизгибе, дБ	0,5 макс на 1625 нм		0,5 макс на 1625 нм		0,5 макс на 1625 нм	
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум	
Длина волны нулевой дисперсии, нм	-		-		-	
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн: 1525-1575	20		22		20	
Знак дисперсии	+		+		+	
Коэффициент затухания, дБ/км; на длине волны, нм	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	0,22	1550	0,22	1550	0,22	1550
Коэффициент PMD, пс/нм*км	0,5		0,2		0,2	

Характеристики волокон по Рекомендации G.655.

Характеристики волокон										
Характеристика	G.655.A		G.655.B		G.655.C		G.655.D		G.655.E	
Длина волны, нм	1550		1550		1550		1550		1550	
Диаметр модового пятна, мкм	8,0–11,0 ±0,7		8,0-11,0 ±0,7		8,0–11,0 ±0,7		8,0–11,0 ±0,6		8,0–11,0 ±0,6	
Диаметр оболочки, мкм	125,0±1		125,0±1		125,0±1		125,0±1		125,0±1	
Диаметр защитного покрытия, мкм	250,0±15		250,0±15		250,0±15		250,0±15		250,0±15	
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,8 максимум		0,8 максимум		0,8 максимум		0,6 максимум		0,6 максимум	
Сплюсненность оболочки	2,0% максимум		2,0% максимум		2,0% максимум		1,0% максимум		1,0% максимум	
Длина волны отсечки кабеля, нм	1450 максимум		1450 максимум		1450 максимум		1450 максимум		1450 максимум	
Потери на макроизгибе, дБ	0,5 максимум на 1550 нм		0,5 максимум на 1625 нм		0,5 максимум на 1625 нм		0,1 максимум на 1625 нм		0,1 максимум на 1625 нм	
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум		0,69 минимум	
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн: 1460-1625 1530-1565 1565-1625	0,1-6		1-10		1-10		2,6-6,0		2,6-6,0	
	-		-		-		-		-	
	4,0-8,9		4,0-8,9		4,0-8,9		4,0-8,9		4,0-8,9	
Знак дисперсии	+ и –		+ и –		+ и –		+ и –		+ и –	
Коэффициент затухания, дБ/км; на длине волны, нм	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	0,35	1550	0,35	1550	0,35	1550	0,35	1550
	0,35	1550	0,4	1625	0,4	1625	0,4	1625	0,4	1625
Коэффициент PMD, пс/√км	0,5		0,5		0,2		0,2		0,2	

Характеристики волокон по Рекомендации G.657. волокно обладающее низкой восприимчивостью к изгибам.

Характеристики волокон					
Характеристика	G.657.A		G.657.B		
Длина волны, нм	1310		1310		
Диаметр модового пятна, мкм	8,6–9,5±0,4		6,3–9,5±0,4		
Диаметр оболочки, мкм	125,0±0,7		125,0±0,7		
Эксцентриситет сердцевины, мкм	0,5 максимум		0,5 максимум		
Сплюсненность оболочки	1,0% максимум		1,0% максимум		
Длина волны среза кабеля, нм	1260 максимум		1260 максимум		
Потери на макроизгибе, дБ:					
радиус, мм	15	10	15	10	7,5
количество витков	10	1	10	1	1
макс. при 1550 нм	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5
макс. при 1625 нм	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0
Проверочное напряжение, ГПа	0,69 минимум		0,69 минимум		
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм*км, не более, в интервале длин волн:			Не является определяющей		
1285-1330	3,5				
1525-1575	18				