

# DWDM технологии

Учебный курс

# Уровни транспортных сетей

- магистральный,
- распределения
- доступа.

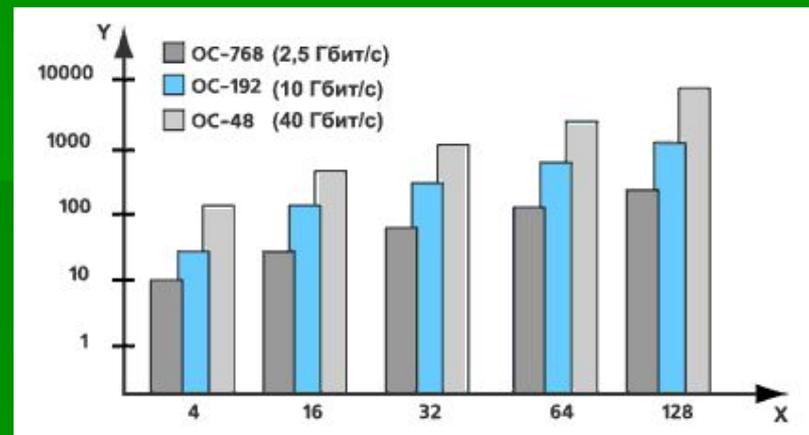
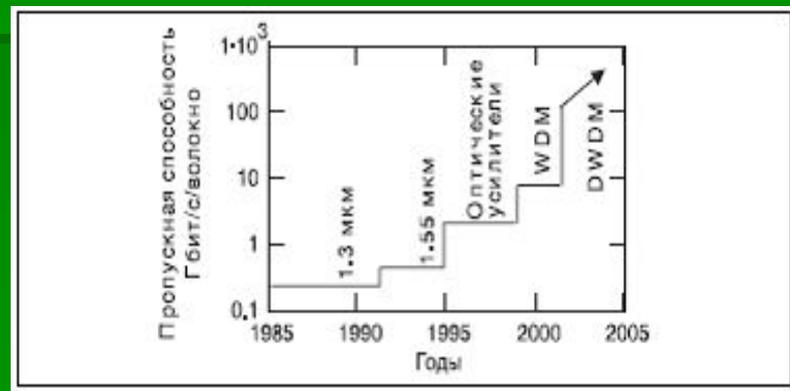
**Магистральный** уровень используется для передачи трафика в пределах региона или города, характерна большая пропускная способность и возможность ее быстрого увеличения.

Уровень **распределения** характеризуется меньшей пропускной способностью, меньшими расстояниями и более сложной сетевой топологией, объединением разнородного трафика с его диспетчеризацией.

Уровень **доступа** используется для подключения корпоративных сетей и характеризуется небольшой пропускной способностью, важны гибкость и экономичность.

# Технические решения для наращивания пропускной способности транспортной сети

- прокладка оптических кабелей с улучшенными параметрами (большие капиталовложения, долгосрочное планирование)
- использование оконечного оборудования с большим быстродействием (10 Гбит/с, 40 Гбит/с, > 100 Гбит/с).
- переход от электронных к оптическим компонентам при построении сети
- применение технологии уплотнения каналов по длинам волн - WDM - wavelength division multiplexing



X — число спектральных каналов  
Y — скорость передачи информации (Гбит/с) по одному волокну

# Иерархия скоростей PDH

Уровень	Американская		Японская		Европейская	
	Скорость	Количество	Скорость	Количество	Скорость	Количество
1	DS1 (24DS0)	1,544	DS1 (24DS0)	1,544	E1 (30DS0)	2,048
2	DS2 (4DS1)	6,312	DS2 (4DS1)	6,312	E2 (4E1)	8,448
3	DS3 (7DS2)	44,736	DSJ3 (5DS2)	32,064	E3 (4E2)	34,368
4			DSJ4 (3DSJ3)		E4 (4E3)	139,264

DS0 – ОЦК со скоростью 64 кбит/с

# Иерархия скоростей SDH

Уровень SDH	Скорость передачи, Мбит/с	Длительность такта, пс	Год
STM-1	155,520	6430	1990
STM-4	622,08	1607,5	1992
STM-16	2488,32	401,88	1993
STM-64	9953,28	100,47	1995
STM-256	39813,12	25,12	2002

# Список сокращений

- STM – Synchronous Transfer Mode
- ATM - Asynchronous Transfer Mode
- TDM – Time Division Multiplexing
- PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy
- SDH -Synchronous Digital Hierarchy
- WDM - Wavelength division multiplexing
- HDWDM – High Density wavelength division multiplexing
- DWDM - Dense wavelength division multiplexing
- CWDM - Coarse wavelength division multiplexing

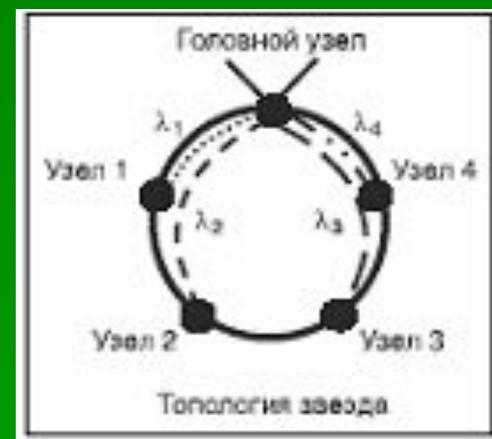
# Достоинства DWDM

- Простота наращивания пропускной способности транспортной сети:  $C=NB$  ( $N$  – количество оптических каналов,  $B$  – скорость передачи в канале)
- Гибкость сети: использование спектральных каналов для передачи разнородного трафика и возможность организации различных логических топологий на основе заданной физической топологии
- Возможность усиления всех спектральных каналов с помощью одного оптического усилителя

Оптимальный путь создания оптических сетей – одновременное использование методов спектрального и временного уплотнений.

TDM-технологии – оптимальность передачи в отдельном спектральном канале с точки зрения стоимости и доступности.

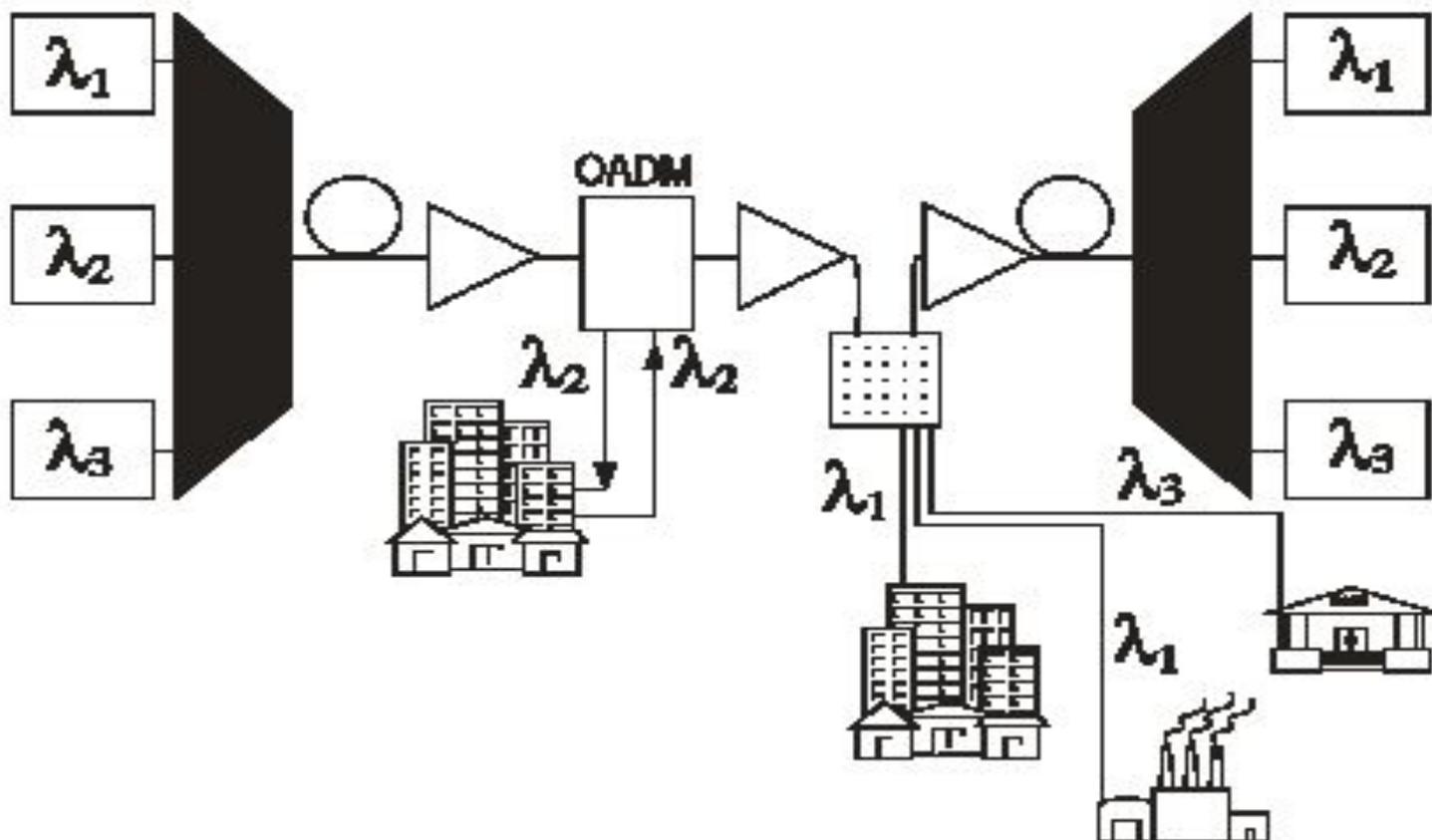
WDM-технология – оптимальная передача каналов в полосе передачи ОВ



# Модель взаимодействия **DWDM** с транспортными технологиями

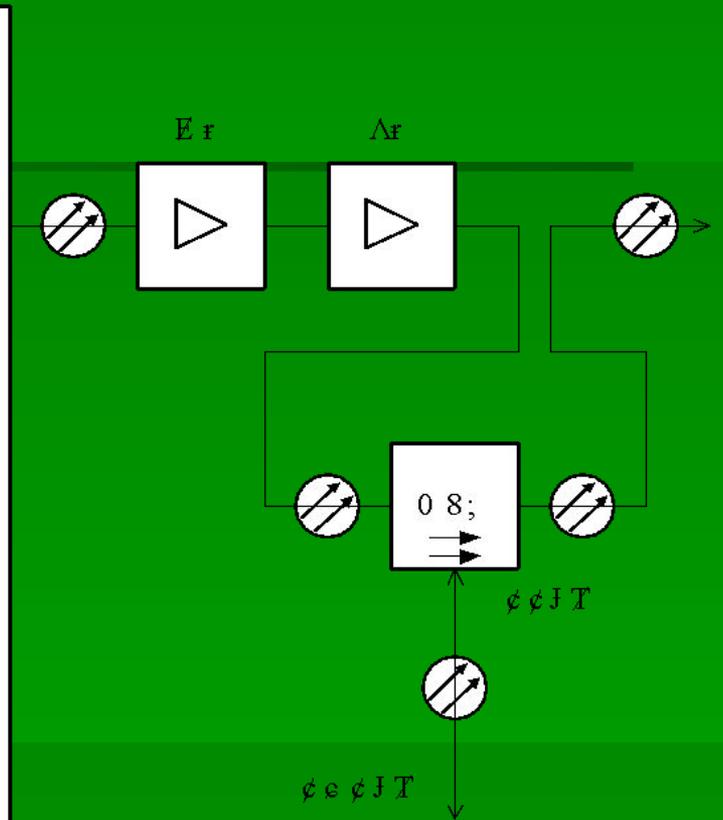
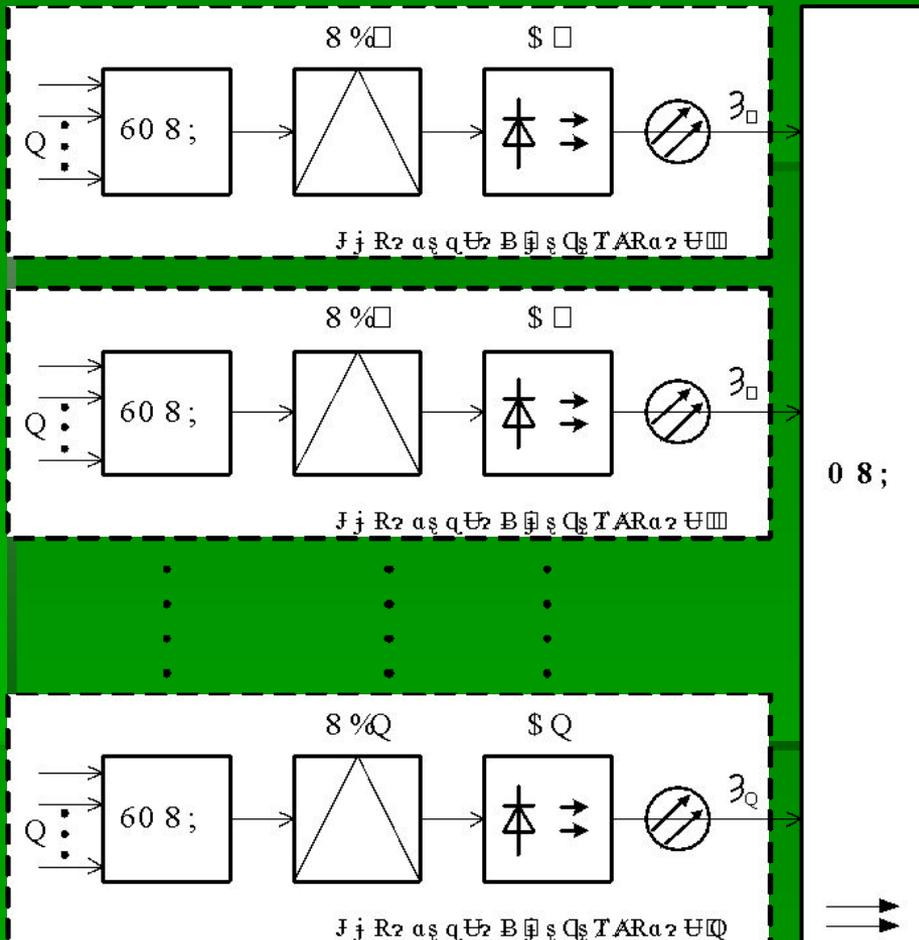
ATM	IP, Ether net	PDH		ATM	IP, Ether net	TDM	ATM	IP, Ether net	PDH			
SDH				SDH			SDH					
Физический уровень				WDM						Физический уровень		
Оптическая среда передачи				Оптическая среда передачи						Оптическая среда передачи		

# Общая структура системы DWDM



# Система DWDM

- Сигналы разных длин волн объединяются оптическим мультиплексором в многоканальный составной сигнал, который далее распространяется по оптическому волокну.
- При больших расстояниях используется один или несколько оптических усилителей.
- Оптический демультиплексор принимает составной сигнал, выделяет из него исходные каналы разных длин волн и направляет их на соответствующие фотоприемники.
- На промежуточных узлах некоторые каналы могут быть добавлены или выделены из составного сигнала посредством оптических мультиплексоров ввода/вывода (OADM) или устройств оптической кросс-коммутации (ОХС).
- В качестве составных могут использоваться любые сигналы (аналоговые и цифровые)



0 ' 0 e i l f e e i i r e n e o f e j i e



# Компоненты системы DWDM

- N оптических передатчиков
- Оптический мультиплексор
- Оптическое волокно
- Один или несколько оптических усилителей
- Оптические мультиплексоры ввода/вывода
- Оптический кросс-коммутатор
- Оптический демultipлексор
- N оптических приемников
- Электронное оборудование для передачи цифровых сигналов в соответствии с используемым протоколом
- Система сетевого управления

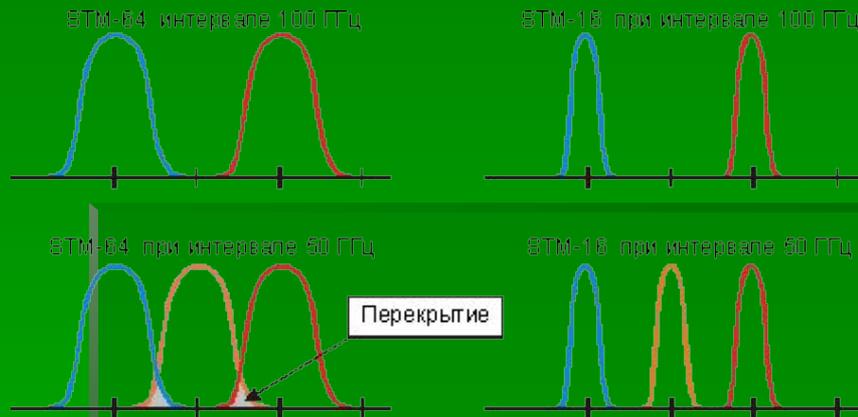
Все оптические компоненты системы DWDM должны ***одинаково обрабатывать*** все каналы на всем протяжении оптической линии

# Частотный план DWDM

- Широкополосные WDM - объединение двух основных несущих 1310 нм и 1550 нм (2-го и 3-го окон прозрачности) в одном оптоволокне - разнос по длине волны – 240 нм – начало 1980х
- Узкополосные WDM – объединение 4 оптических каналов в 3 окне (1550 нм) - разнос по длине волны – 24-12 нм – 1987...1990 гг.

Широкополосные в современном понимании – в полосе 1528...1612 нм (84 нм)

- системы CWDM – системы с частотным разнесом каналов не менее 200 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 16 каналов,
- системами DWDM – системы с разнесом каналов не менее 100 ГГц, позволяющие мультиплексировать не более 64 каналов,
- системами HDWDM – системы с разнесом каналов 50 ГГц и менее, позволяющие мультиплексировать не менее 64 каналов.



G.692 - стандартизован диапазон длин волн

от 1528,77 нм (196,1 ТГц)

до 1612,65 нм (185,9 ТГц)

204 канала с разносом 50 ГГц

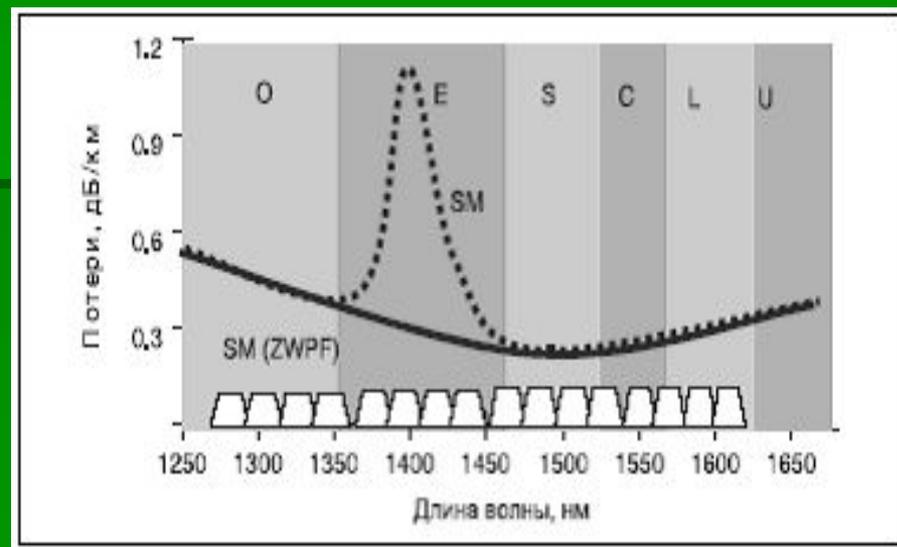
102 канала с разносом 100 ГГц

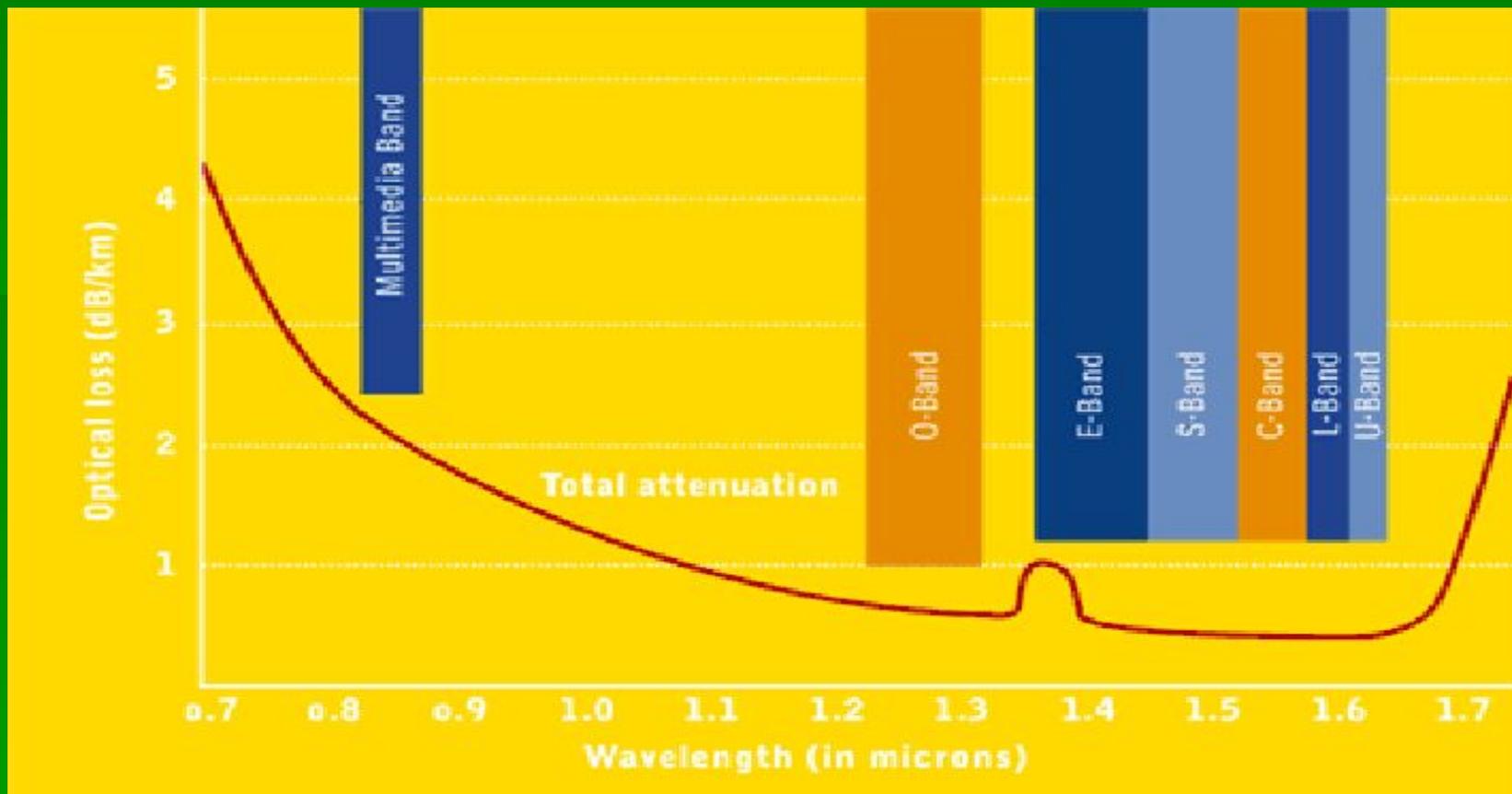
S-Band – 1460...1530 нм

C-Band – 1530...1560 нм

S-Band – 1561...1625 нм

$$\lambda = c/v, \quad c = 299792458 \text{ м/с}$$





- 100 ГГц = 0.8 нм
- 50 ГГц = 0.4 нм
- 25 ГГц = 0.2 нм
- 12,5 ГГц = 0.1 нм

- S-Band – 1460 нм to 1530 нм
- C-Band – 1530 нм to 1565 нм
- L-Band – 1561 нм to 1625 нм

Реализация сетки частотного плана зависит от:

- Типа используемых оптических усилителей
- Скорости передачи на канал
- Влияния нелинейных эффектов

Частота, ТГц	Интервал, ГГц							Длина волны, нм
	50	100	200	400	400/500	600	1000	
196,10	*	*	*					1528,77
196,05	*							1529,16
196,00	*	*						1529,55
195,95	*							1529,94
195,90	*	*	*					1530,33
195,85	*							1530,72
195,80	*	*						1531,12

# Оптический передатчик DWDM

- Источник оптического излучения (лазерный диод)
- Стабилизатор длины волны
- Оптический модулятор (внутренний или внешний)
- Термохолодильник
- Терморезистор (датчик температуры)
- Фотодиод обратной связи
- Оптический изолятор
- Оптический аттенюатор

Оптический передающий модуль – в одном корпусе – мультилазеры, генерирующие на разных длинах волн, мультиплексор, оптический усилитель.

# Источники оптического излучения

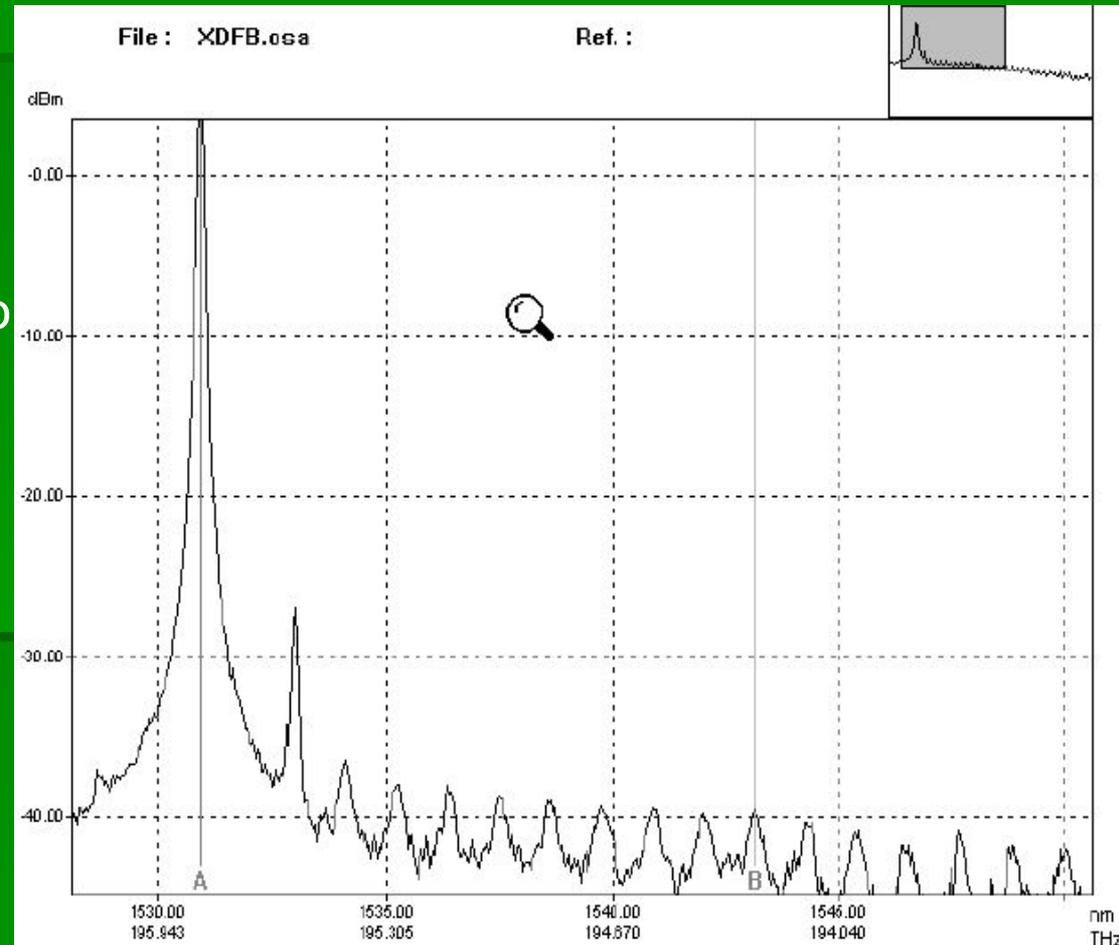
Лазер с распределенной обратной связью DFB (Distributed Feed Back)

Мощность излучения - более 0 дБм (1 мВт)

Ширина спектра излучения по уровню половинной мощности - не более 100 МГц (0,8 пм)

Коэффициент подавления боковых мод не менее 40 дБ

Чувствителен к обратно отраженному сигналу – нарушается стабильность генерации



# Стабилизатор длины волны

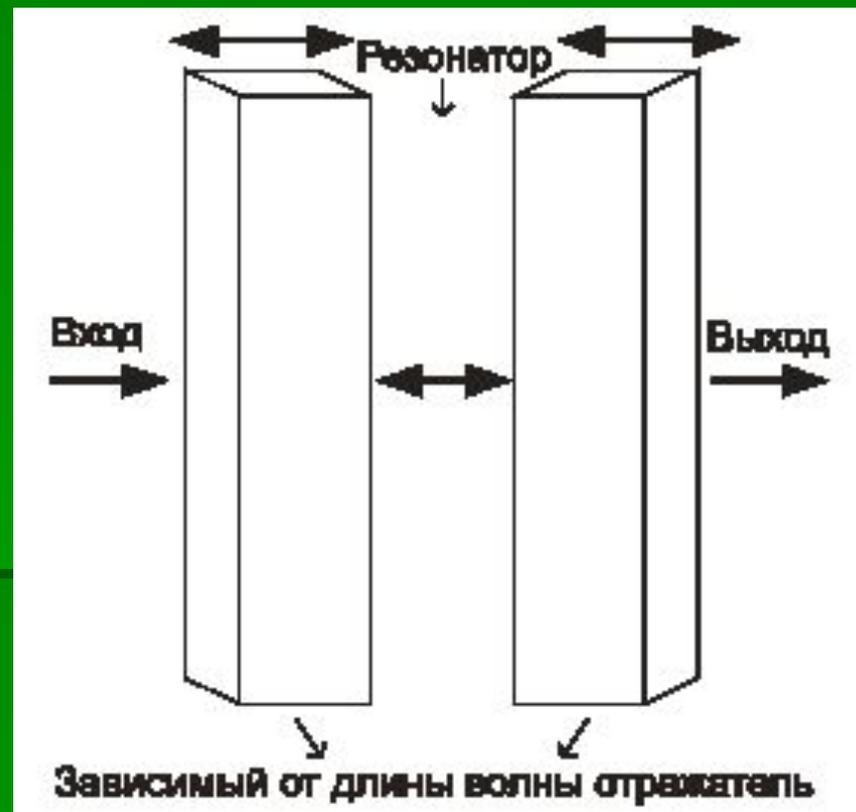
Стабилизатор состоит из двух последовательно расположенных диэлектрических оптических фильтров.

Один фильтр настроен на частоту, выше номинальной, другой – на частоту, на то же значение ниже номинальной.

При прохождении оптического сигнала через эти фильтры выдается управляющий электрический сигнал, показывающий, насколько далеко длина волны источника сместилась от номинального значения.

Диэлектрические фильтры обладают исключительно высокой стабильностью и могут быть настроены на пропускание очень узкого, точно позиционированного диапазона длин волн.

Стабильность – не более 10% от разноса частот между каналами



# Оптический приемник

Оптический приемник (ОПр) преобразует входные оптические сигналы в электрические.

ОПр должен быть полностью совместим с передатчиком:

- по спектральной области чувствительности в пределах номинальных длин волн,
- по временным характеристикам модуляции излучения.

Чувствительность оптического приемника – та минимальная падающая оптическая мощность, при которой обеспечивается заданное качество принимаемого сигнала. Измеряется в дБм.

Фотодетектор непосредственно соединяется с ОВ и для обеспечения оптимальных характеристик приемника (минимум шума в заданной полосе пропускания) выполняется в одном корпусе с предварительным усилителем.

Далее электрический сигнал корректируется в частотном корректоре и восстанавливается (регенерируется) – преобразуется в цифровую форму, из него выделяется сигнал синхронизации.

# Оптоэлектронный преобразователь (ОЭП)

## Основные характеристики ОЭП:

- спектральная чувствительность (отношение тока фотодиода к мощности оптического сигнала  $A/Wt$  в зависимости от длины волны),
- пороговая чувствительность (уровень входного сигнала, при котором он перестает различаться из-за шумов ОПР), ОСШ=1.
- спектральная и электрическая полосы пропускания,
- динамический диапазон,
- уровень шумов.

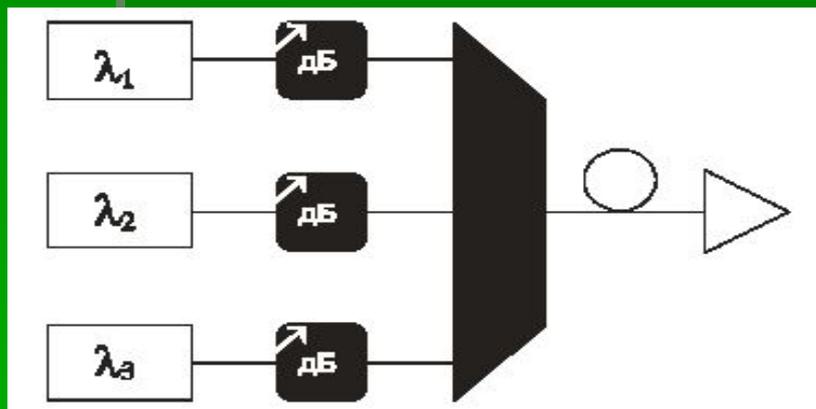
## PIN-фотодиоды:

- работают со стандартными низковольтными источниками питания (5 В);
- имеют меньшую спектральную чувствительность
- имеют более узкую область спектральной чувствительности по сравнению с лавинными фотодиодами.
- используются на линиях связи со скоростями передачи 10 Гбит/с и 40 Гбит/с

## Лавинные фотодиоды:

- применяются на линиях связи большой протяженности, где оправданы их высокая стоимость и значительно более сложные схемы регистрации оптических сигналов.
- использование ЛФД позволяет отказаться от оптического предусилителя, необходимого в фотоприемнике с PIN-фотодиодом.

# Аттенюаторы



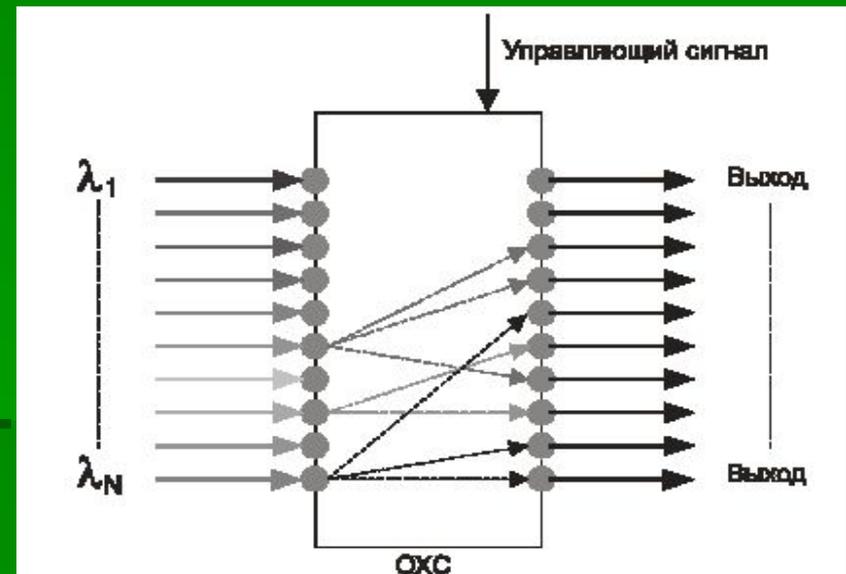
Обеспечивают:

- уменьшение выходной мощности оптического передатчика до уровня, соответствующего возможностям расположенных далее мультиплексоров и усилителей EDFA.
- ослабление мощности сигнала на определенных участках оптической сети для устранения нелинейных явлений в компонентах систем WDM.
- Избирательное (по длинам волн) ослабление мощности для выравнивания спектра сигнала на входе усилителя EDFA для обеспечения равномерного усиления для всех каналов

# Устройства оптической кросс-коммутации **ОКС**

Обеспечивают селективную маршрутизацию каналов на оптическом уровне.

- оптомеханические коммутаторы
- коммутаторы на основе систем MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) -коммутирующие линзы и микрзеркала вместе с их приводами на одном кремниевом кристалле.
- полностью оптические технологии на основе оптических волноводов, жидких кристаллов и технологии цилиндрических магнитных доменов.



# Мультиплексоры и демультиплексоры

- Оптический мультиплексор - выполняет функцию мультиплексирования (объединения) оптических сигналов в единый составной сигнал.
- Оптический демультиплексор - выполняет функцию демультиплексирования (разделения) составного оптического сигнала на компонентные.

Оптическое мультиплексирование и демультиплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. Для фильтрации применяют:

- тонкопленочные фильтры,
- волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки,
- сварные биконические волоконные разветвители,
- фильтры на основе жидких кристаллов,
- устройства интегральной оптики (матрицы фазовых волноводных дифракционных решеток или фазары).

# Параметры оптических мультиплексоров

## Технологии выделения несущих

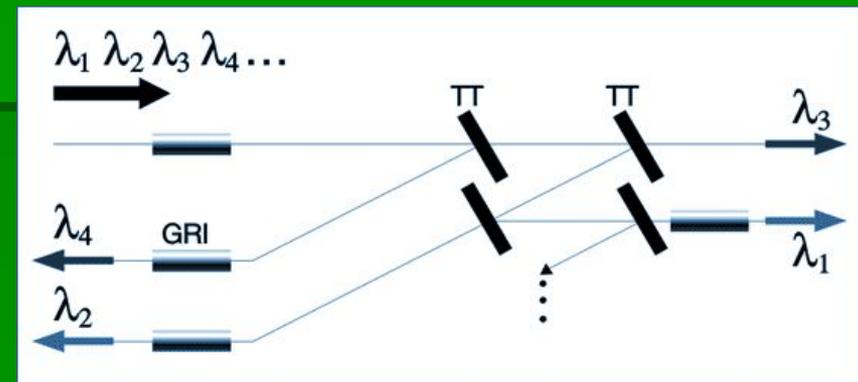
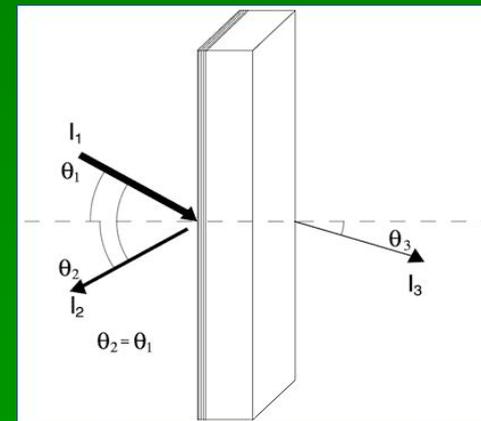
- на основе интегральной оптики
  - Дифракционные решетки на основе массива волноводов AWG – Arrayed Waveguide Grating
  - Вогнутая дифракционная решетка CG – Concave Grating
- на основе дискретной микрооптики
  - Трехмерное оптическое мультиплексирование – 3DO – 3-D-Optics WDM

Технология	Максимальное число каналов	Разнос между каналами, нм	Вносимые потери, дБ	Переходное затухание, дБ
AWG	32...64	0,1...15	6...8	-5...-29
CG	78	1...4	10...16	-7...-30
3DO	256	0,4...250	2...6	-30...-55

# Тонкопленочный фильтр

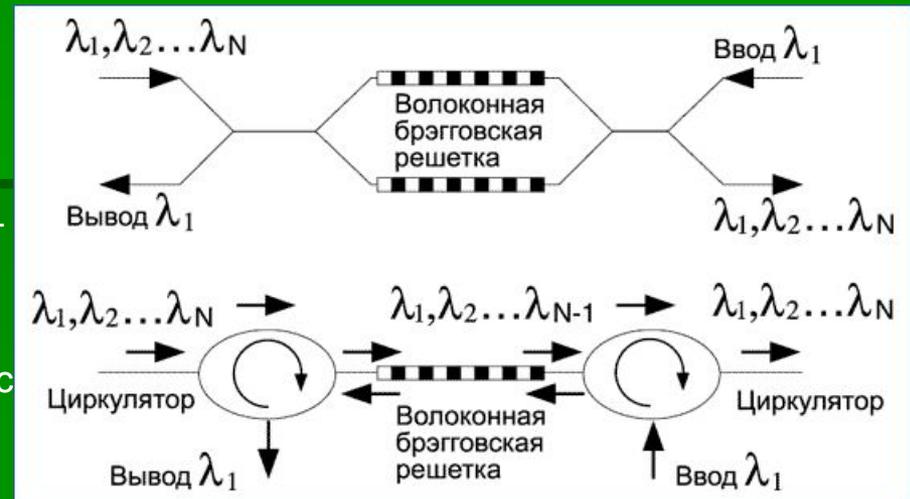
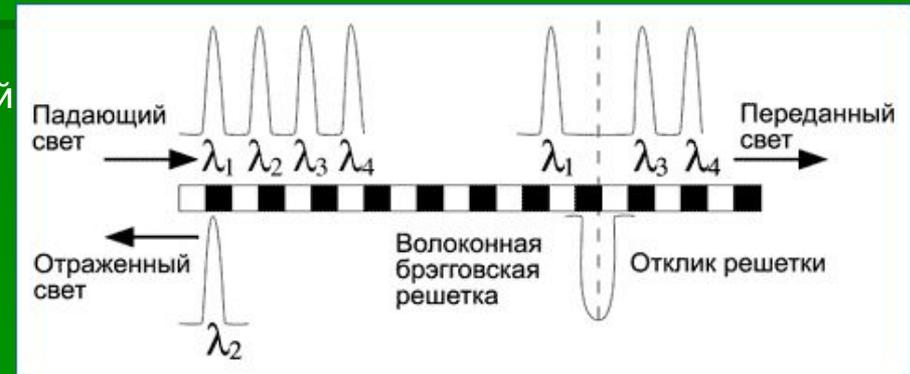
Состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления. На каждой границе раздела между слоями из-за различия показателей преломления часть падающего светового пучка отражается. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны. Соответствующим образом подобрав показатель преломления и толщину каждого слоя, можно получить фильтр, пропускающий заданный диапазон длин волн.

используются в системах WDM с 16-ю или 32-мя каналами



# Волоконные брэгговские решетки

- Волоконная брэгговская решетка – это оптический интерферометр, встроенный в волокно.
- Волокно, легированное, например, германием, изменяет свой показатель преломления под воздействием ультрафиолетового света.
- Если облучить такое волокно ультрафиолетовым излучением с определенной пространственной периодической структурой, то волокно превращается в своего рода дифракционную решетку.
- Это волокно будет практически полностью отражать свет определенного, наперед заданного диапазона длин волн, и пропускать свет всех остальных длин волн.
- В мультиплексорах ввода/вывода каналов волоконная брэгговская решетка может использоваться вместе с циркуляторами



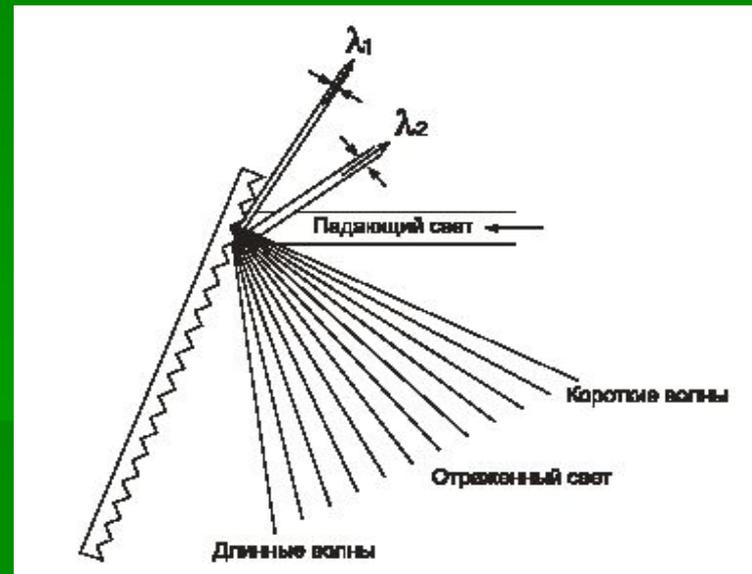
# Дифракционные решетки

дифракционные решетки отражают световой пучок под разными углами в плоскости падения. Угол, в которых отраженный свет достигает максимальной интенсивности, зависит от длины волны.

Устройства на основе дифракционных решеток:

дороги и сложны в производстве, вносимые ими потери не зависят от числа каналов, что делает эту технологию одной из наиболее привлекательных для использования в системах с большим числом каналов.

требуется тщательно контролировать поляризацию падающего оптического излучения.



# Устройства интегральной оптики

Оптический эквивалент интегральных схем в электронике. Оптические волноводы в несколько слоев помещаются на подложку из кремния или ниобата лития.

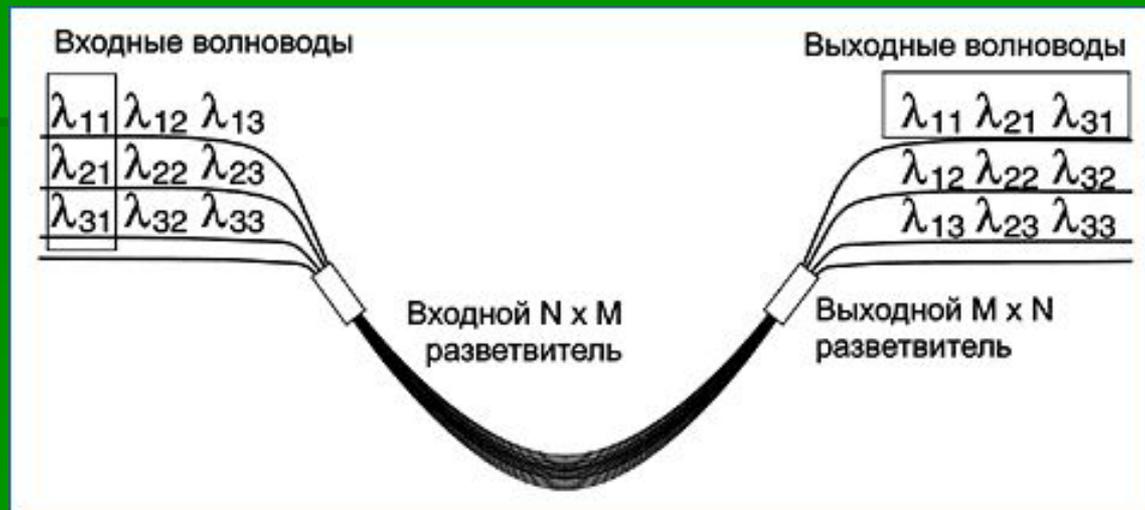
Входной составной сигнал попадает во входной разветвитель, где расщепляется на  $N$  оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал.

Все  $N$  волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны.

В выходном разветвителе световые пучки из отдельных волноводных каналов объединяются и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

Решетки на основе массива волноводов AWG (Arrayed Waveguide Gratings) используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон или выделить отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна.

Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультиплексоров систем DWDM.



# Сварные биконические разветвители

Биконический разветвитель FBT (Fused Biconic Tapered) – пара одномодовых оптических волокон, на определенном участке сваренных друг с другом по длине.

Практически не вносит потерь

Соотношение мощностей выходных сигналов определяется интерференцией в области сварки волокон и зависит от длины этой области

- Если на вход поступает составной сигнал, используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.



# Оптические мультиплексоры ввода/вывода

- Оптические мультиплексоры ввода/вывода каналов OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) выполняют функцию добавления в составной сигнал или выделения из него только одного канала, не меняя при этом структуру составного оптического сигнала.



# Основные параметры ОМУХ/DMUX

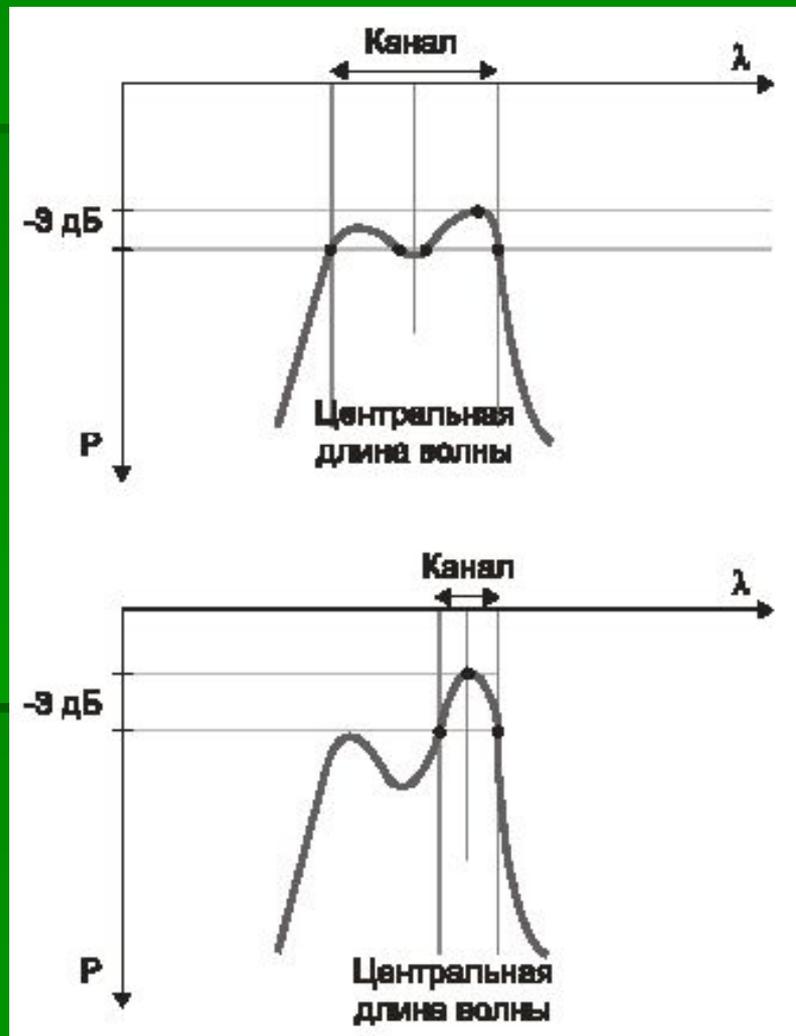
1. Полоса пропускания канала

1.1 Центральная длина волны канала – это среднее арифметическое значение верхней и нижней длин волны отсечки:  $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$

1.2 Интервал между каналами должен соответствовать частотному плану системы WDM

1.3 Полоса пропускания по уровню  $-3 \text{ dB}$

1.4 Неравномерность пика мощности в спектре канала



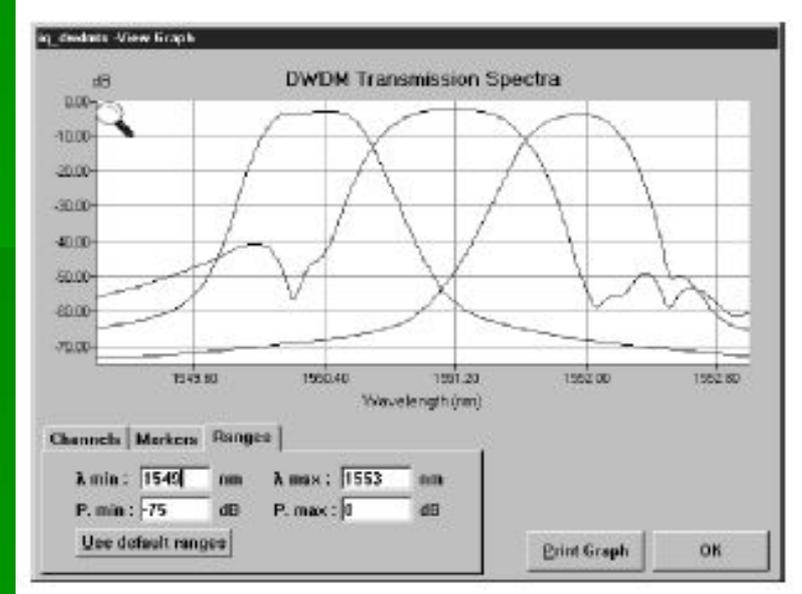
## 2 Изоляция и дальние перекрестные помехи FEXT (Far-End Crosstalk)

Изоляция определяется как минимальная величина ослабления мощности сигнала с выборкой по всем неосновным выходным каналам по отношению к основному входному каналу, измеряется в дБ. Для демультиплексора.

Перекрестные помехи определяют превышение уровня мощности входного сигнала на длине волны  $\lambda$  над всей суммарной утекающей мощностью этого сигнала в неосновные каналы, измеряются в дБ. Для мультиплексора.

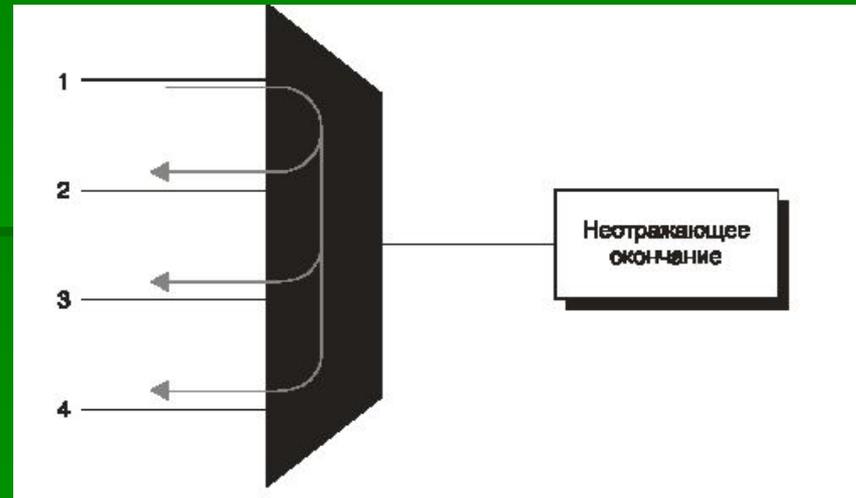
$$Isolation_i = \min_{j \neq i} 10 \lg \frac{P_{in_i}(\lambda_i)}{P_{out_j}(\lambda_i)},$$

$$Crosstalk_i = 10 \lg \left[ \frac{P_{in_i}(\lambda_i)}{\sum_{j \neq i} P_{out_j}(\lambda_i)} \right]$$



3. Направленность (Directivity), или ближние перекрестные помехи NEXT (Near-End Crosstalk), является мерой изоляции входных портов многопортового устройства. Это характеристика присуща мультиплексорам.

4. Вносимые потери - IL количественно определяют потери мощности на какой-то конкретной длине волны или в заданном спектральном диапазоне. Для полного описания вносимых потерь DWDM-устройства требуется зависимость потерь от длины волны.



$$Directivity_i = \min_{j \neq i} 10 \lg \frac{P_{in i}(\lambda_i)}{P_{out j}(\lambda_i)},$$

$$IL = 10 \lg(P_{in} / P_{out}),$$

## 5. Потери на отражение

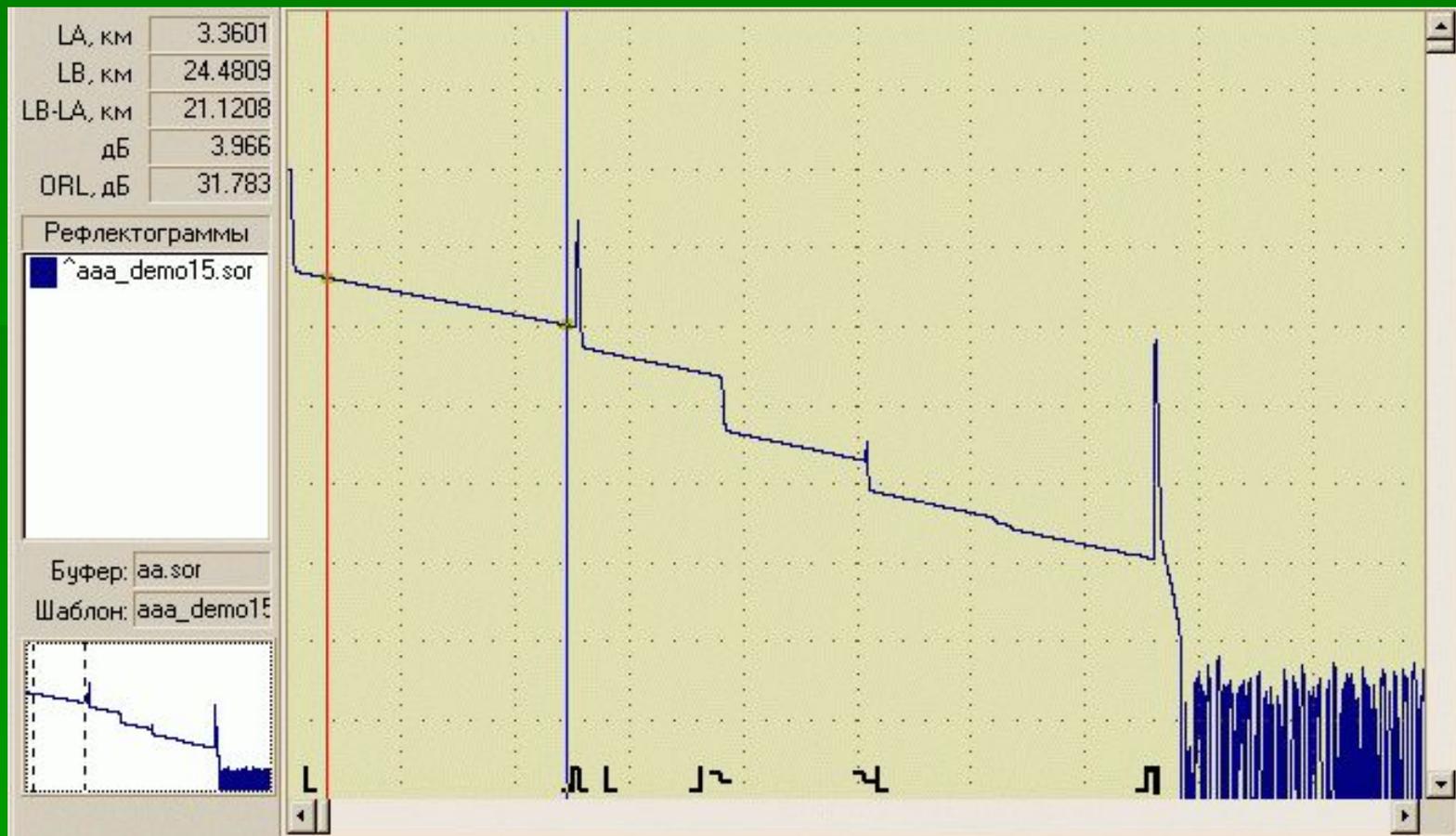
Возникают при вводе оптического излучения в оптический компонент (соединитель, мультиплексор или в само волокно) основная часть мощности передается по физическому каналу, часть поглощается, а часть отражается.

В оптических системах излучение отражается по двум причинам:

- в результате рэлеевского рассеяния
- в результате френелевского отражения.

Рэлеевское рассеяние возникает внутри волокна в результате неизбежного взаимодействия передаваемых световых волн с молекулами материала волокна. Поэтому рэлеевское рассеяние зависит от состава материала волокна. Оно также зависит от длины волны. Амплитуда рэлеевского рассеяния составляет около  $-75$  дБ на метр обычного волокна на длине волны 1550 нм, и на больших расстояниях его влияние может оказаться существенным.

Френелевское отражение возникает на границе раздела сред (разъемы, соединители и др.) в результате воздушных зазоров, рассогласования или несовпадения показателей преломления по обе стороны границы раздела.

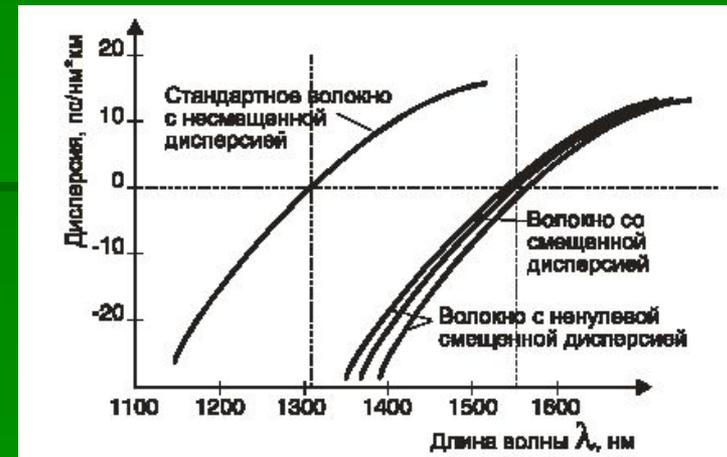


## Отраженный сигнал:

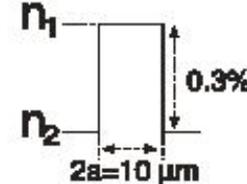
- Ухудшает стабильность излучения ЛД
- Приводит к многолучевой интерференции
- Увеличивает шумы усилителя

# Оптические волокна (ОВ)

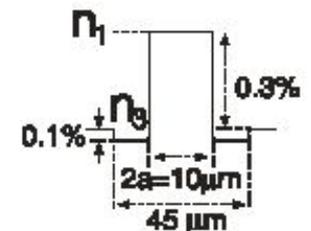
- **Стандартное ОВ (G.652).** – одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления и нулевой дисперсией на длине волны 1310 нм. Дисперсия на длине волны 1550 нм - 18 пс/нм\*км.
- **Волокно со смещенной дисперсией (G.653)** - одномодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления и нулевой дисперсией на длине волны 1550 нм.
- **Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (G.655)** - длина волны нулевой дисперсии выведена из рабочего диапазона усилителей EDFA (1530-1565 нм) за счет специальных профилей показателя преломления. В пределах рабочего диапазона EDFA волокно имеет небольшую, хорошо контролируемую хроматическую дисперсию (от более чем 3 пс/нм\*км на 1530 нм до менее чем 0,7 пс/нм\*км на 1560 нм).



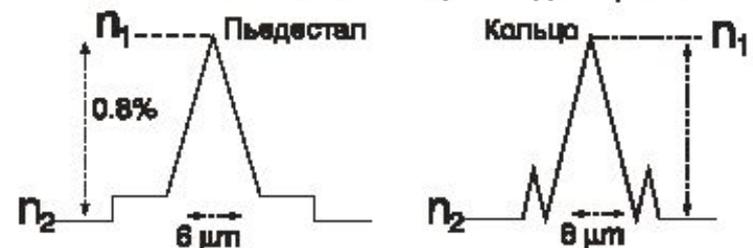
Волокно с согласованной оболочкой



Волокно с пониженной оболочкой



Волокно со смещенной дисперсией



## Типы одномодовых волокон.

ОМ волокна, как известно, изготавливаются из кварцевого стекла, имеют постоянный диаметр оболочки 125 мкм и диаметр сердцевины 7-9 мкм, при этом нормируемым параметром является диаметр поля моды - световой волны, распространяющейся вдоль сердцевины. Этот диаметр (8-11 мкм) характеризует потери при вводе света в волокно и зависит от длины волны.

По профилю показателя преломления ОМ волокна делятся на:

- волокна со ступенчатым (прямоугольным) профилем;
- волокна с профилем специального типа, например, в форме трезубца, треугольника, W-образного профиля и др.

Иногда профили показателя преломления делят по-другому — на три типа: профили для ОВ без сдвига дисперсии, со сдвигом дисперсии и со сглаживанием дисперсии.

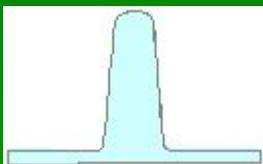
По дисперсии ОМ ОВ делятся на:

- стандартное волокно СВ (SF - Standard Fiber) или волокно с несмещенной дисперсией (SSMF - Standard Single Mode Fiber);
- волокно со смещенной нулевой дисперсией ВСД (DSF - Dispersion-Shifted Fiber);
- волокно с ненулевой смещенной дисперсией ВНСД (NZDSF - Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber).

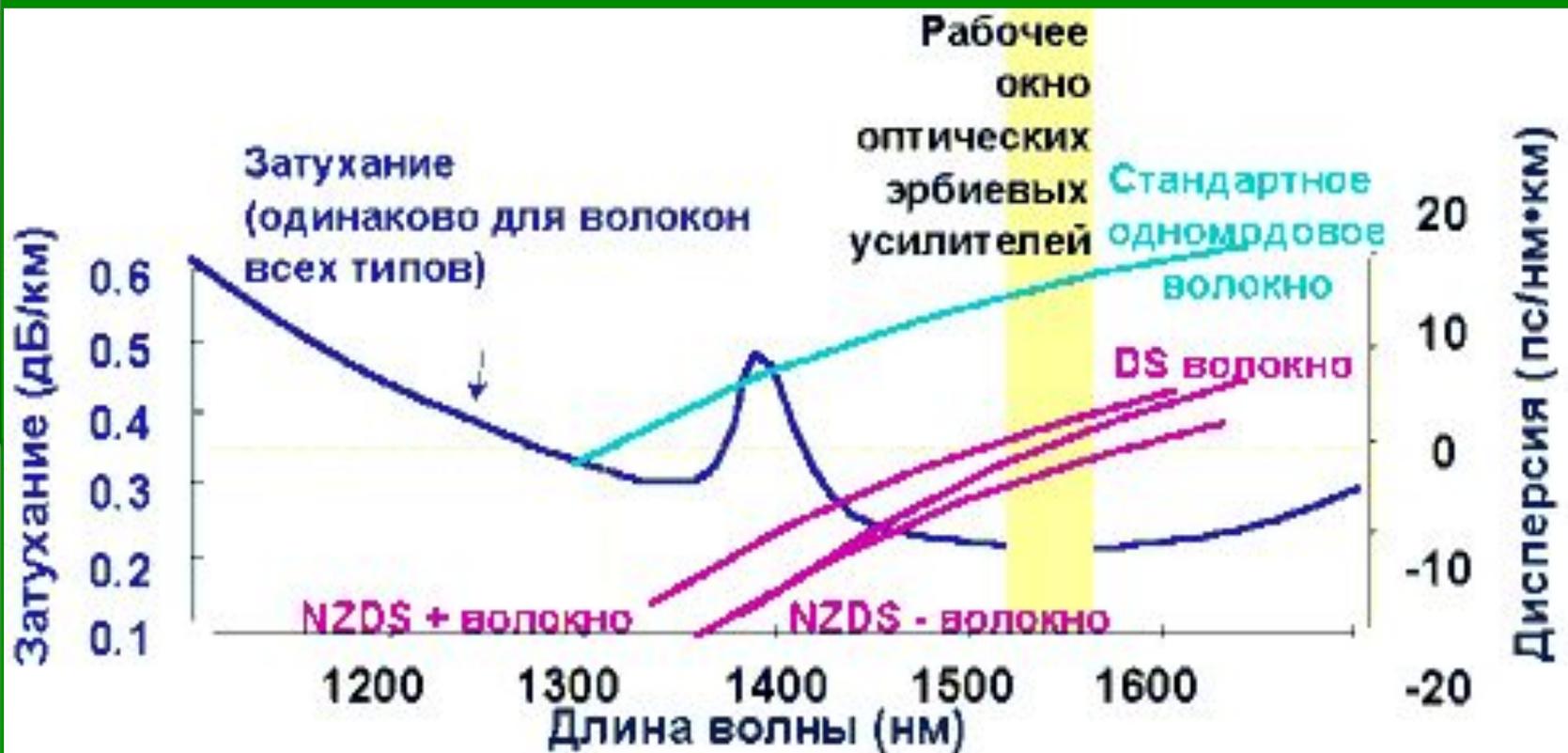
В последнее время в связи с развитием ОУ и систем с WDM появились специальные типы кварцевого волокна:

- волокно для компенсации дисперсии - ВКД (DCF — Dispersion Compensating Fiber) используется в специальных модулях (например, DCM — Dispersion Compensating Module — модуль для компенсации дисперсии — МКД);
- волокно, легированное эрбием, - ВЛЭ (EDF — Erbium-Dopped Fiber), используется в оптических усилителях (ОУ) типа EDFA — Erbium-Dopped Fiber Amplifier;
- волокно, легированное неодимом, — ВЛН (NDF — Neodim-Dopped Fiber), используется в ОУ типа NDFA — Neodim-Dopped Fiber Amplifier;
- волокно, сохраняющее состояние поляризации, — ВСП (PMF — Polarization Maintaining Fiber), используется в целом ряде ОВ, датчиков, требующих сохранения состояния поляризации;
- волокно для ультрафиолетовой области спектра, например волокно, используемое в диапазоне 190 — 250 нм для различных специальных применений;
- волокно с большой площадью сечения сердечника — порядка 300-800 мк для целей создания световых потоков большой яркости и мощности, используемых для измерений и спецприложений.

# Волокно со смещенной, но ненулевой дисперсией (NZDS\*)



Модификация профиля показателя преломления волноводную дисперсии увеличивает составляющую дисперсии



# Волокно со смещенной, но ненулевой дисперсией **(NZDS)** уменьшает искажения при передаче сигнала

Скорость передачи	Предельное расстояние передачи сигнала без компенсации дисперсии в волокне	
	NZDS (G.655)	Стандартное одномодовое (G.652)
STM-16 (2,5 Гбит/с)	4400 км	640 км
STM-64 (10 Гбит/с)	300-500 км	50-100 км
STM-256(40 Гбит/с)	20-30 км	~ 5 км

# Основные характеристики ОВ

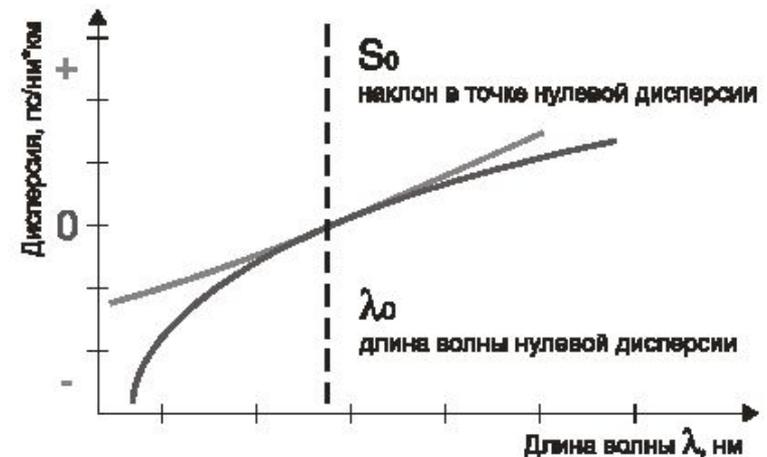
явления в оптическом волокне,  
ограничивающие характеристики  
систем WDM:

- хроматическая дисперсия,
- поляризационная модовая дисперсия,
- нелинейные оптические эффекты.

# Хроматическая дисперсия

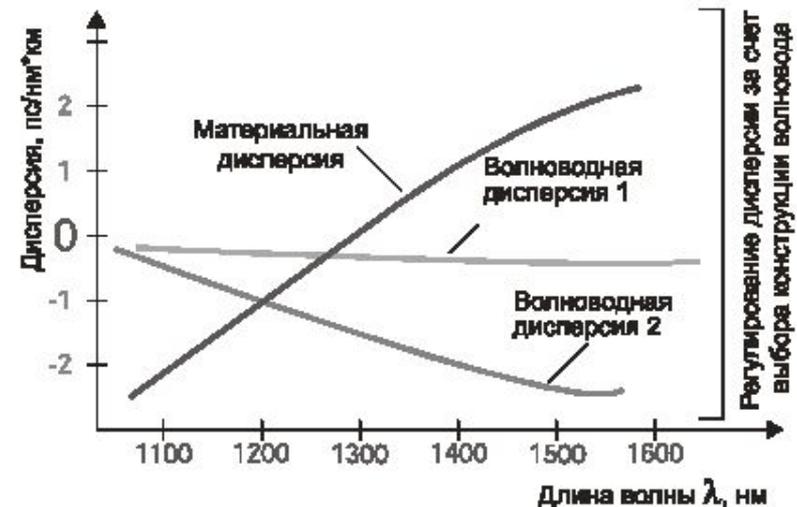
- материальная дисперсия - дисперсия показателя преломления, проявляющаяся в зависимости скорости распространения сигнала от длины волны.
- волноводная дисперсия - зависимость скорости распространения сигнала от длины волны при отклонениях в геометрии волокна и в радиальном профиле показателя преломления от идеального профиля.
- хроматическая дисперсия волокна - совместное влияние материальной и волноводной дисперсий.

$$\tau_{chr} = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L,$$



$$T_{\text{ВЫХ}} = (T_{\text{ВХ}}^2 + T_{\text{ХР}}^2)^{1/2}$$

$$T_{\text{ХР}} = (Y_m + Y_w)(\Delta n / (nc))L$$



# Хроматическая дисперсия

Чувствительна к:

-  Увеличению длины линии
-  Увеличению скорости передачи

Нечувствительна к:

-  Уменьшению частотного интервала между каналами
-  Увеличению числа каналов

Уменьшается при

-  Уменьшении хроматической дисперсии ОВ
-  Использовании устройств компенсации дисперсии

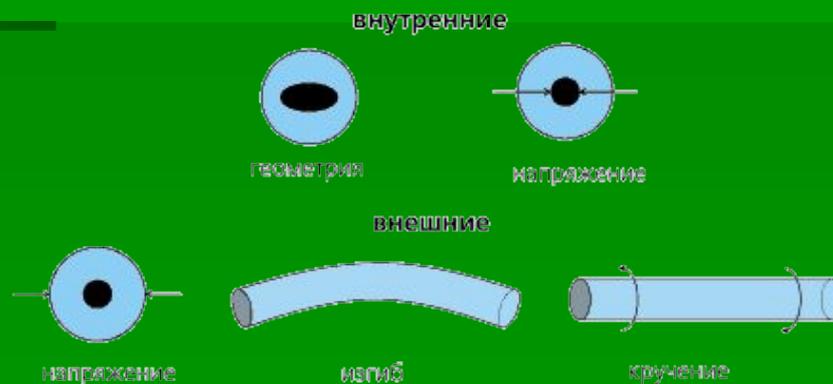
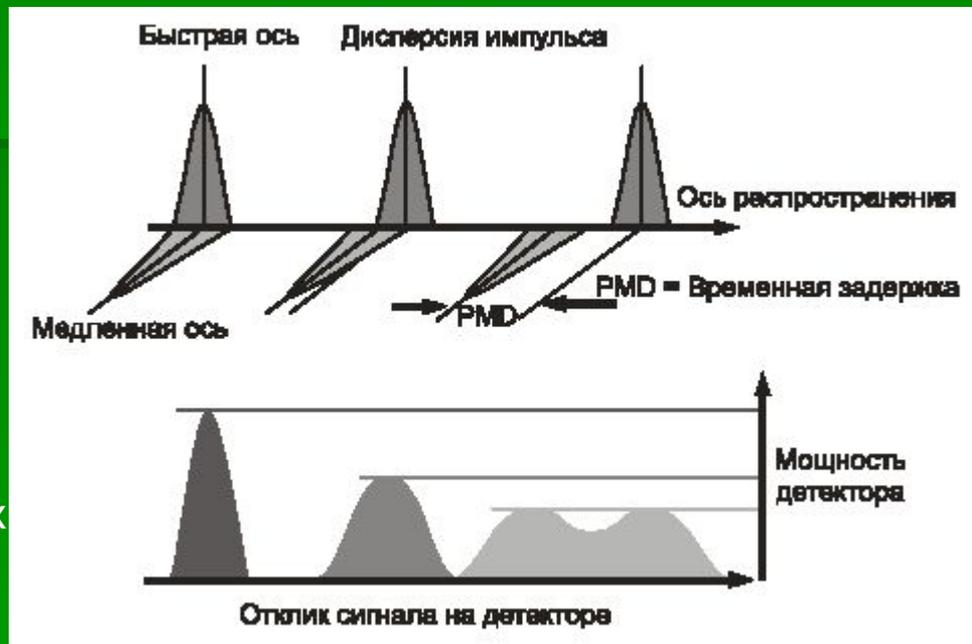
# Поляризационно-модовая дисперсия

Поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion) возникает из-за различной скорости распространения двух взаимно перпендикулярных составляющих излучения. Различие в скорости вызвано отклонениями от идеального кругового сечения волокна и как следствие различными эффективными показателями преломления для двух ортогональных направлений линейной поляризации.

Механические воздействия при производстве и прокладке ОВ ведут к локальным, псевдослучайно распределенным деформациям волокна, которые нарушают геометрию волокна или соосность сердцевин и оболочек.

PMD первого порядка – связана с геометрией и напряжениями в ОВ.

PMD второго порядка – зависимость PMD от длины волны.



Возникает вследствие наличия эффекта двойного лучепреломления

Двойное лучепреломление – раздвоение световых лучей при прохождении через анизотропную среду, обусловленное зависимостью показателя преломления от направления электрического вектора световой волны

В оптической линии связи PMD накапливается статистически, а не линейно. Полное значение PMD имеет размерность времени (обычно измеряется в пс).

Существуют два взаимно ортогональных состояния поляризации - основные состояния поляризации PSP (Principal State of Polarization).

Одно из них соответствует самому быстрому, а другое - самому медленному времени распространения импульса по волокну.

Разница времен распространения - дифференциальная групповая задержка DGD (Differential Group Delay), соответствующая данной длине волны.

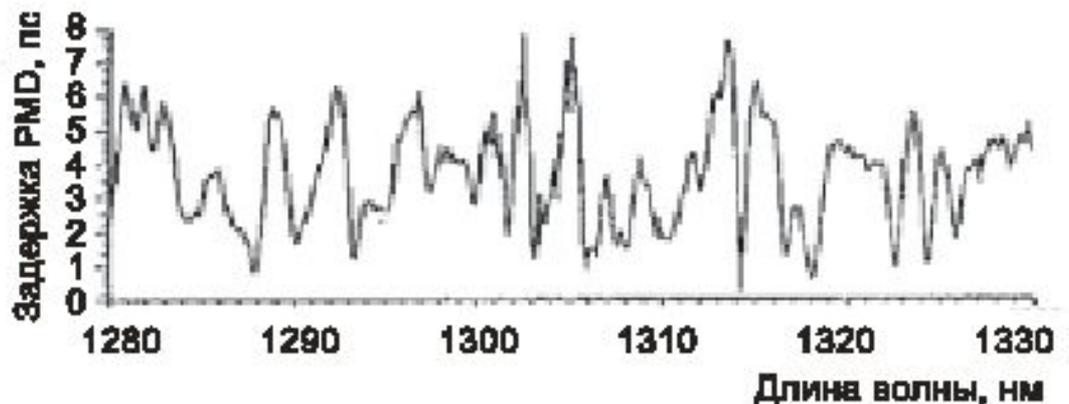
Величина задержки PMD определяется как значение DGD, усредненное по длинам волн.

Для вычисления PMD линии связи, состоящей из нескольких участков, выполняют процедуру статистического суммирования.

Общая поляризационно-модовая дисперсия линии определяется как квадратный корень из суммы квадратов PMD отдельных участков, образующих линию связи

$$PMD = K_{PMD} \sqrt{L},$$

$$PMD_{total} = \left( \sum_{n=1}^N PMD_n^2 \right)^{1/2}$$



Влияние PMD на качество сигнала в линии связи возрастает при:

- увеличении скорости передачи (один из важнейших факторов);
- увеличении количества участков линии (равносильно увеличению длины оптического канала);
- увеличении количества каналов (при большем числе каналов возрастает вероятность большого отклонения дифференциальной групповой задержки от среднего значения хотя бы в одном канале).

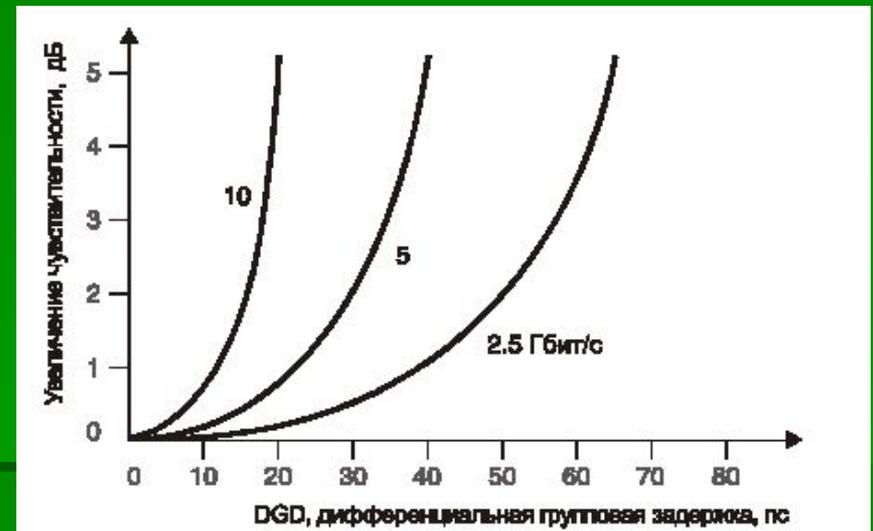
Уменьшение частотного разнесения каналов влияет на PMD незначительно (если такое уменьшение не ведет к увеличению числа каналов в фиксированной полосе пропускания, как, например, в полосе усиления EDFA, равной 40 нм).

PMD можно уменьшить, тщательно контролируя геометрию волокна или увеличивая связь мод в волокне (уровень обмена мощностью между основными состояниями поляризации).

# Максимальное значение **PMD** для заданной скорости передачи

Рекомендуемый коэффициент PMD обеспечивающий с вероятностью 99,994% дифференциальную задержку менее 0,1 длительности бита

Скорость, Гбит/с	Максимальная задержка PMD, пс	Коэффициент PMD для волокна длиной 400 км, пс/км
2,5	40	2,0
10	10	0,5
20	5	0,25
40	2,5	0,125

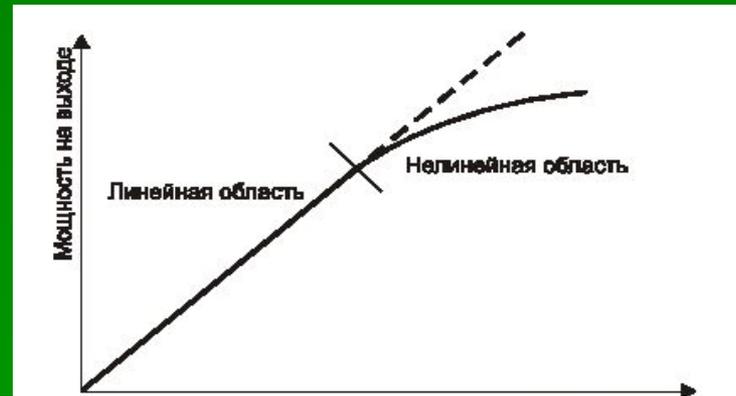


# Нелинейные явления в ОВ

Нелинейность волокна – это неотъемлемое свойство материальной среды при распространении в ней электромагнитной энергии.

В зависимости от характера поведения нелинейного коэффициента  $\gamma$  все нелинейные явления можно разделить на две категории.

- явления рассеяния, когда действительная часть коэффициента  $\gamma$  дает усиление или затухание,
- явления преломления, когда мнимая часть коэффициента  $\gamma$  приводит к фазовой модуляции.



$$E(z + dz) = E(z) \exp\left[(-\alpha/2 + i\beta + \gamma P(z, t)/2) dz\right],$$

$\alpha$  – затухание в волокне,  
 $\beta$  – фаза распространяющейся волны,  
 $\gamma = (2\pi/\lambda)(n^2/A_{\text{eff}})$  – коэффициент нелинейности,

В явлениях рассеяния сигнал лазера рассеивается на звуковых волнах (акустических фонах) или на молекулярных колебаниях волокна (оптических фонах) и смещается в область более длинных волн.

Имеют место два следующих эффекта рассеяния:

- вынужденное обратное рассеяние Бриллюэна–Мандельштама (на акустических фонах); обнаруживается в форме обратно рассеянного света с понижением частоты (сдвигом в область длинных волн), учитывается, если мощность оптического сигнала в ОВ превышает 6 дБм.
- вынужденное рамановское или комбинационное рассеяние (на оптических фонах).

В явлениях, зависящих от показателя преломления, при высоком уровне мощности сигнала необходимо учитывать нелинейность показателя преломления:

$$n = n_0 + n_1 \cdot J$$

где  $n_0$  – показатель преломления волокна,

$n_1$  – коэффициент нелинейности показателя преломления волокна ( $(2 \dots 3) \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>/Вт для кварцевого волокна),

$J$  – интенсивность оптического сигнала.

К явлениям, зависящим от показателя преломления, относятся:

фазовая автомодуляция или воздействие сигнала на собственную фазу;

перекрестная фазовая модуляция или воздействие сигнала одного канала на фазу сигнала в другом канале;

четырёхволновое смешение или смешение некоторого числа волн с возникновением излучения на новых длинах волн.

# Четырехволновое смешение

Четырехволновое смешение FWM (Four-Wave Mixing) является одним из самых вредных нелинейных оптических явлений в системах WDM. При достижении критического уровня мощности излучения лазера нелинейность волокна приводит к взаимодействию трех волн с частотами  $\omega_i$ ,  $\omega_j$ ,  $\omega_k$  и появлению новой четвертой волны на частоте  $\omega_k \pm \omega_j \pm \omega_i$ .

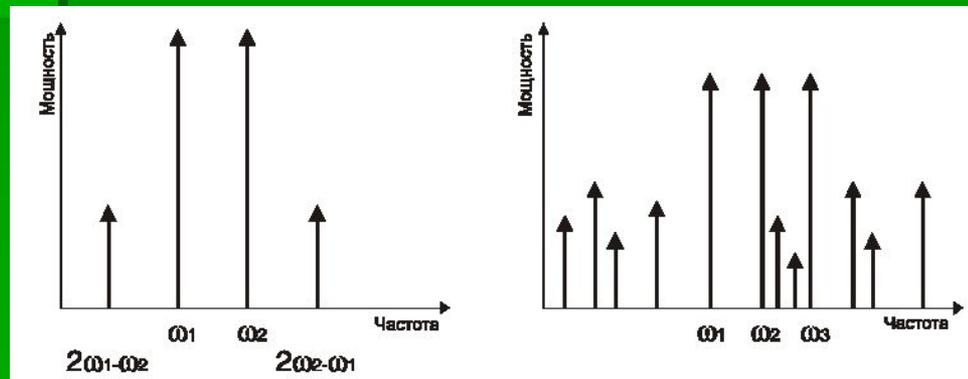
Четырехволновое смешение чувствительно к:

- увеличению мощности канала;
- уменьшению частотного интервала между каналами;
- увеличению числа каналов (несмотря на то, что может быть достигнут уровень порога насыщения).

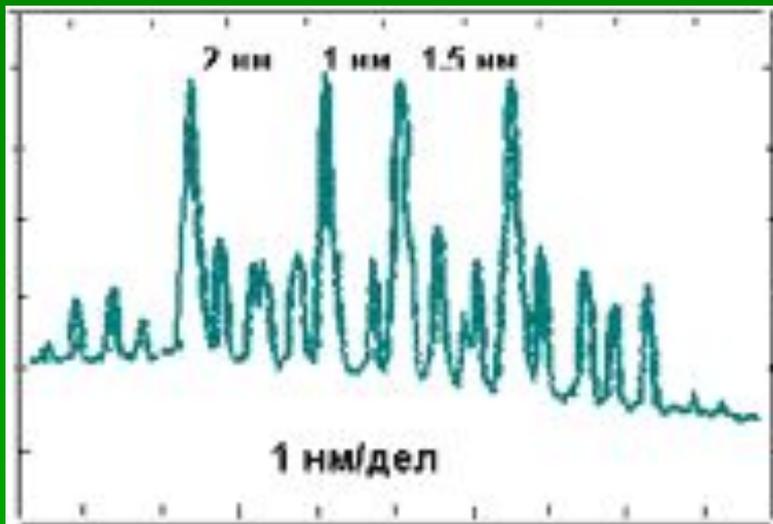
Действие четырехволнового смешения необходимо учитывать в системах, использующих волокно со смещенной дисперсией (Рек. G.653). Оно менее критично в волокнах с ненулевой смещенной дисперсией (Рек. G.655),. Увеличение скорости передачи в канале незначительно влияет на эффективность четырехволнового смешения.

Влияние четырехволнового смешения уменьшается при:

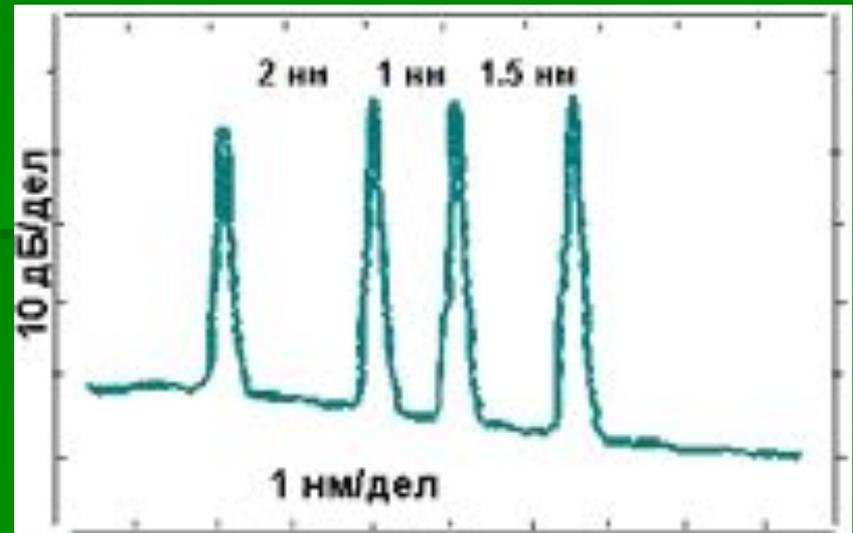
- увеличении эффективной площади волокна;
- увеличении абсолютного значения хроматической дисперсии.



$$N^2(N-1)/2$$

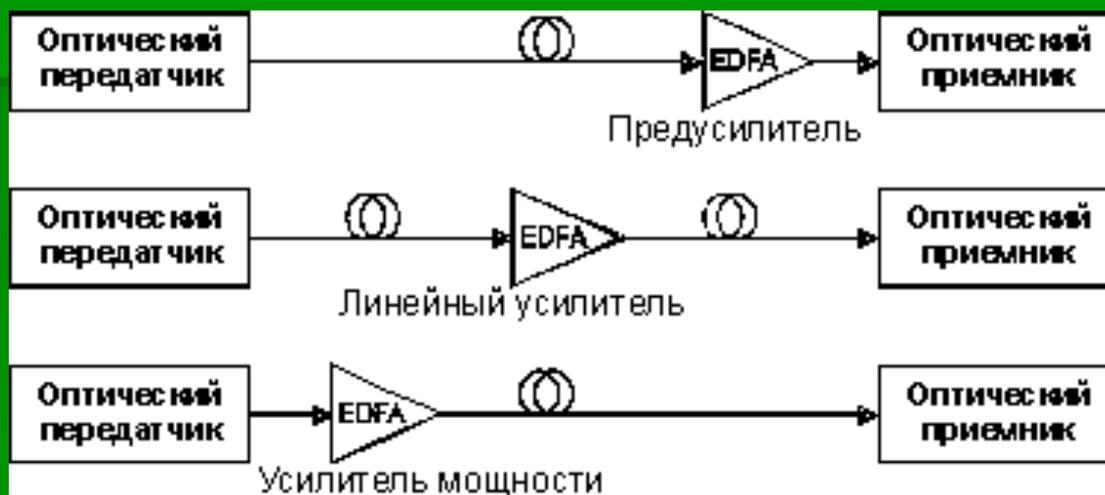


Волокно со смещенной (нулевой) дисперсией. Спектр сигнала после прохождения 25 км искажен четырехволновым смешением.



Волокно со смещенной, но ненулевой дисперсией. Спектр сигнала после прохождения 50 км не искажен.

# Оптические усилители



# Преимущества сети с усилителями **EDFA**

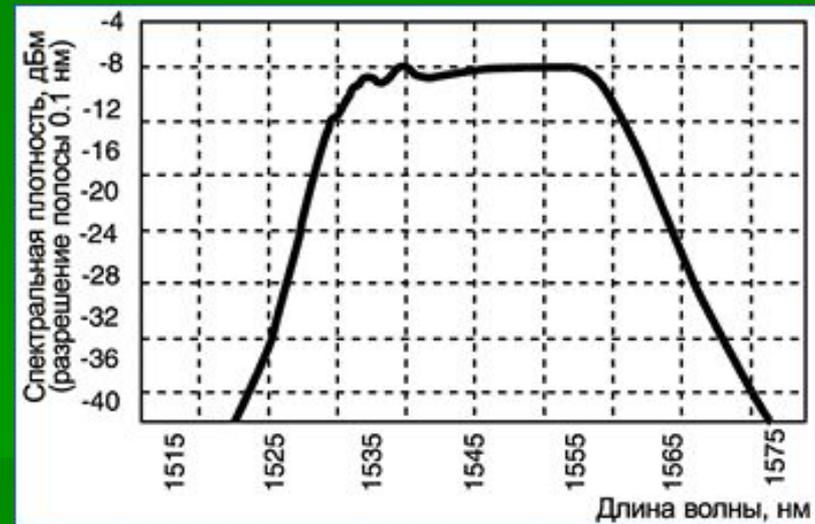
- Пропускную способность таких сетей можно наращивать экономично и постепенно, добавляя новые каналы по мере роста потребности.
- Применение усилителей EDFA позволяет создавать полностью оптические сети, в которых обработка сигнала электронными компонентами происходит только в начальной (где информация впервые попадает в сеть) и конечной (где информация достигает конечного получателя) точках сети.
- Каждая линия связи обрабатывается в системе DWDM как отдельный канал на отдельной длине волны, благодаря чему большая часть существующего сетевого оборудования непосредственно включается в состав систем DWDM. За счет этого начальная стоимость ввода систем DWDM в эксплуатацию достаточно низка.

# Усилители на волокне, легированном эрбием **EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier).**

## Усилители EDFA:

- обеспечивают непосредственное усиление оптических сигналов, без их преобразования в электрические сигналы и обратно,
- обладают низким уровнем шумов,
- рабочий диапазон длин волн практически точно соответствует третьему окну прозрачности кварцевого оптического волокна (от 1525 нм до 1565 нм)

LWEDFA (Long Wavelength EDFA) – ОУ с расширенным диапазоном от 1570 нм до 1605 нм (L-диапазон).



# Структура EDFA

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки, который является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал. Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность сигнала накачки.

В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, может использоваться несколько лазеров накачки.

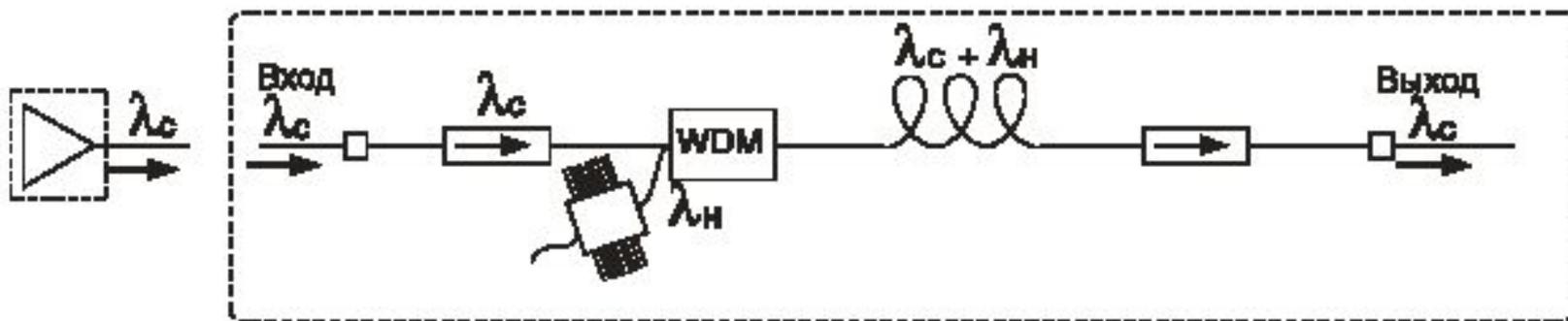
Для накачки усилителей EDFA подходят лазеры с длинами волн излучения 980 нм и 1480 нм. Излучение обеих длин волн соответствует уровням энергии возбужденных ионов и хорошо поглощается волокном, легированным эрбием.

Усилители EDFA с лазерами 980 нм обладают более низким коэффициентом шума.

Усилители EDFA с лазерами 1480 нм обладают более высоким коэффициентом усиления.

В составе усилителей EDFA имеется ряд компонентов, которые увеличивают их надежность:

- Изоляторы подавляют обратное распространение усиленной спонтанной эмиссии ASE и предохраняют усилитель от попадания всевозможных отраженных сигналов и излучения накачки от EDFA, расположенных ниже по линии связи.
- Устройства компенсации дисперсии выравнивают временные задержки, возникающие при распространении сигналов различных длин волн, особенно между двумя каскадами двухкаскадного EDFA.

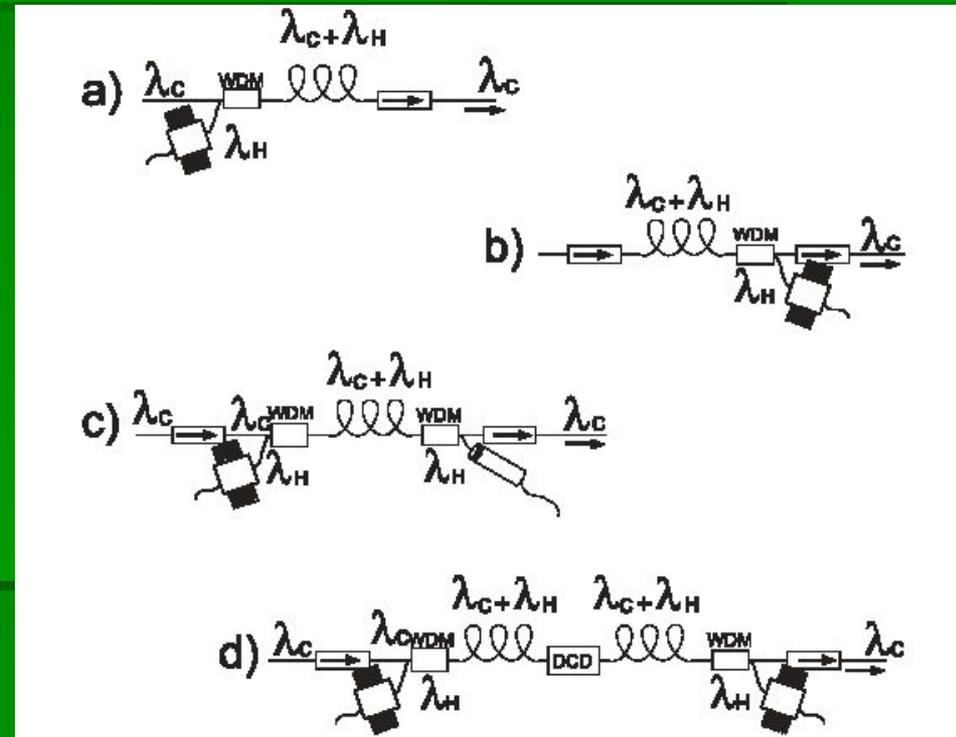


# Схемы накачки EDFA

Прямое направление накачки (рис. а) дает наиболее низкий уровень шума. Это предпочтительно при небольшой мощности входного сигнала и максимальных значениях коэффициента усиления

При обратном направлении накачки (рис.б) проще достигается режим насыщения. Это предпочтительно в тех случаях, когда требуется на выходе сигнал максимально возможную мощность.

При совместном применении двух лазеров накачки различных длин волн (рис.с и d) рекомендуется осуществлять накачку на 1480 нм в обратном направлении, а накачку на 980 нм – в прямом. Это позволяет наилучшим образом использовать преимущества обоих методов. Лазер накачки 1480 нм обладает более высокой квантовой эффективностью, но при этом и несколько более высоким коэффициентом шума, в то время как для лазера 980 нм можно снизить уровень шумов почти до уровня квантовых флуктуаций.



# Применение EDFA

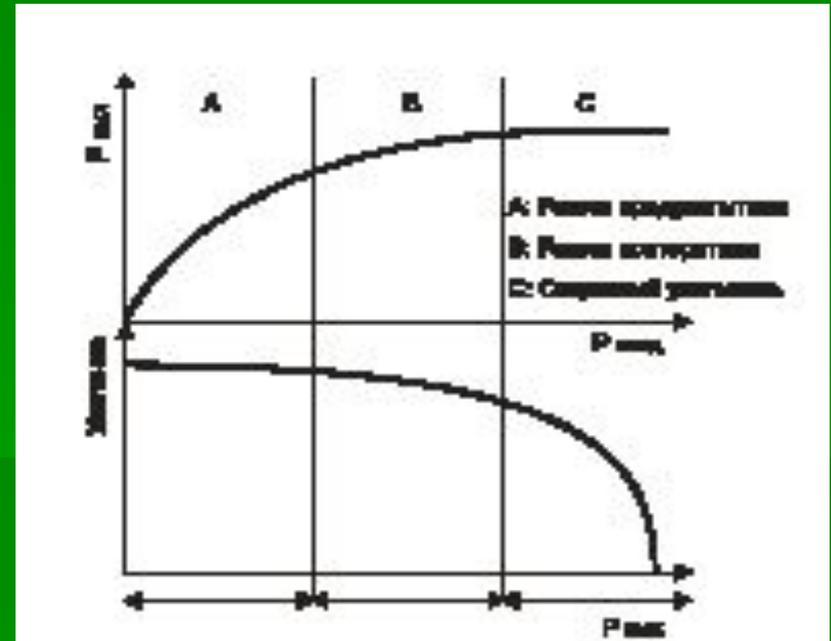
Усилители EDFA используются по-разному в зависимости от выбранной области коэффициента усиления

- В режиме насыщения (область С) – как усилитель мощности (бустер) сразу после лазера передатчика. Бустер повышает мощность сигнала и позволяет максимально увеличить расстояние до первого повторителя.

В режиме промежуточных значений усиления и шума (область В) – как повторитель. Повторитель усиливает сигнал, насколько это возможно, внося при этом как можно меньше шума.

В режиме наименьшего шума (область А) – как предусилитель перед приемником. Предусилитель повышает мощность слабого сигнала в конце линии связи. Предусилитель практически всегда используется вместе с узкополосным фильтром.

$$\text{Усиление} = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$$



# Методы усиления оптических сигналов

Альтернативные разработки направлены на:

- расширение или смещение рабочего диапазона,
- упрощение конструкции
- уменьшение стоимости оптических усилителей.

Один из подходов – использование в качестве легирующей добавки празеодима. Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном празеодимом PDFFA (Praseodymium Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) усиливает сигналы в области длины волны 1310 нм.

Усилители PDFFA обладают низким уровнем коэффициента шума, но энергетически менее эффективны, чем усилители EDFA. Мощность выходного сигнала усилителя PDFFA в режиме насыщения достаточно высока, а коэффициент его усиления не зависит от поляризации.

Усилитель на волокне на фторидной основе, легированном тулием TDFFA (Thulium

- Doped Fluoride-based Fiber Amplifier) имеет два рабочих диапазона: в области длины волны 1460 нм и в области длины волны 1650 нм. Его преимущества:
- высокая мощность выходного сигнала в режиме насыщения,
- не зависящий от поляризации коэффициент усиления,
- низкий коэффициент шума.

# Основные характеристики ОУ

Для практического использования в ВОСП наибольшее значение имеют следующие параметры ОУ:

- выходная мощность сигнала
- коэффициент усиления
- мощность спада усиления
- мощность насыщения
- шум-фактор
- мощность усиленного спонтанного излучения
- спектральная ширина и равномерность полосы усиления.

# Коэффициент усиления

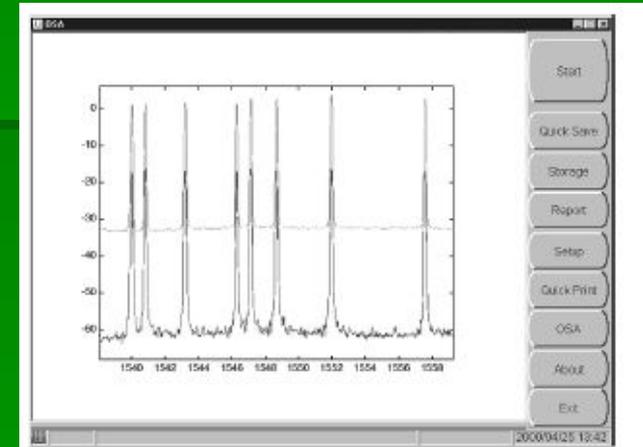
Один из самых важных измеряемых параметров оптического усилителя. Коэффициент усиления зависит от:

- длины волны сигнала,
- состояния поляризации на входе
- мощности сигнала.

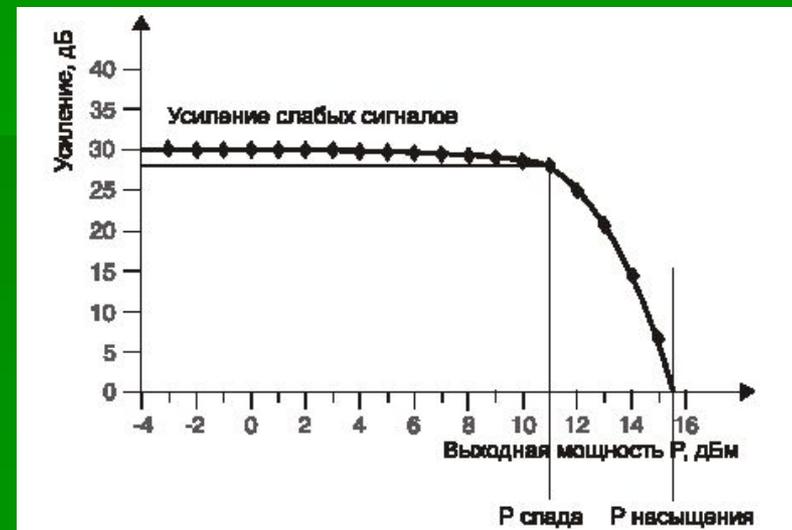
Коэффициент усиления  $G$  (измеряется в дБ) определяется как отношение средних выходной  $P_{out}$  и входной  $P_{in}$  мощности, за вычетом вклада усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission) самого усилителя

*Мощность насыщения* (saturation output power) - определяет максимальную выходную мощность усилителя и соответствует выходной мощности усилителя, равной входной -мощность при которой коэффициент усиления равен 1.

*Точка спада усиления* определяет выходную мощность усилителя при которой коэффициента усиления уменьшается на 3 дБ



$$G = 10 \lg \left[ \frac{P_{out}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{in}(\lambda_c)} \right]$$

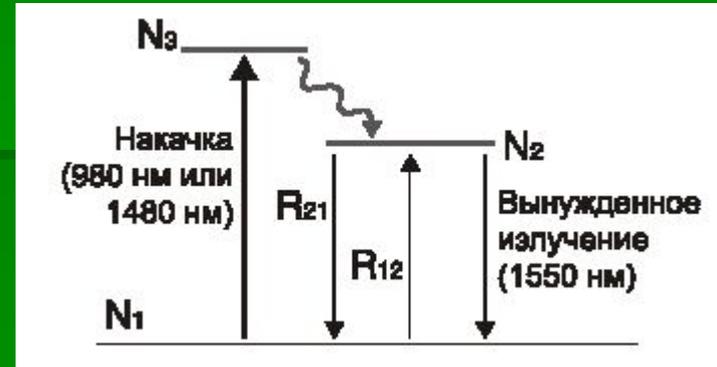


# Усиленное спонтанное излучение

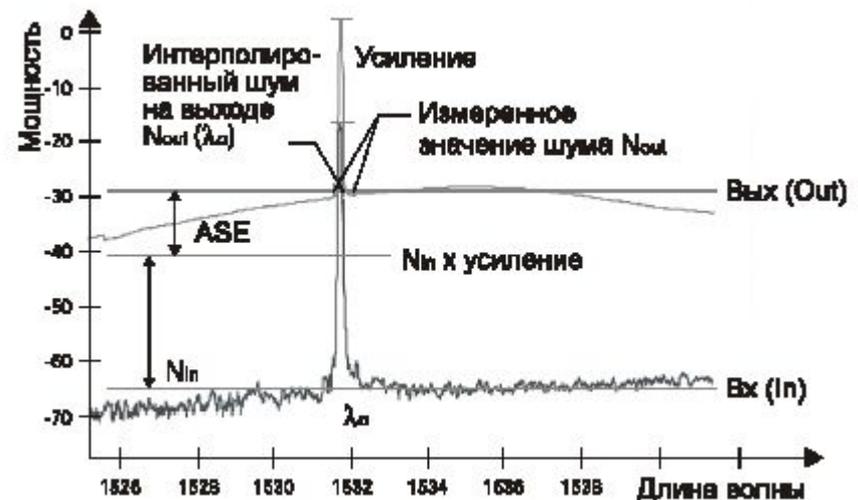
Основной источник шумов оптического усилителя - усиленное спонтанное излучение ASE (Amplified Spontaneous Emission). Усиленное спонтанное излучение приводит к появлению ВЧ-шумов в (системе связи - высокочастотных шумов в электрическом сигнале на выходе приемника).

ASE проявляется как **спонтанное** (самопроизвольное) излучение при переходе иона эрбия с уровня N2 на основной уровень N1. Это спонтанное излучение усиливается так же, как слабый сигнал, распространяющийся по усилителю.

ASE необходимо учитывать при расчете шумов (чувствительности) оптического приемника, обеспечивающего заданную вероятность ошибки. Учитываются шумы дробовые, тепловые и усиленного спонтанного излучения.



$$N_{out}(\lambda) = N_{in}(\lambda) \cdot G + P_{ASE}$$



# Шум-фактор ОУ

Шум-фактор NF (Noise Figure) определяется как ухудшение отношения сигнал/шум после прохождения идеального когерентного сигнала через оптический усилитель. Предполагается, что во входном оптическом сигнале отсутствуют флуктуации фототока, связанные с усиленным спонтанным излучением ASE.

Минимально возможное значение шум-фактора для усилителей с большим коэффициентом усиления – 3 дБ.

Типичное значение для серийных EDFA – 5 дБ.

На ухудшение отношения сигнал/шум влияют:

- дробовой шум;
- спонтанно-спонтанный шум биений (гетеродинный шум) – флуктуации фототока, вызванные биениями между различными спектральными компонентами усиленного спонтанного излучения;
- сигнал-спонтанный шум биений (гетеродинный шум) – флуктуации фототока, вызванные биениями между сигналом и усиленным спонтанным излучением;
- интерференционный шум;
- дополнительные шумы (шумы источника)

$$NF = \frac{P_{S \text{ in}}}{P_{N \text{ in}}} / \frac{P_{S \text{ out}}}{P_{N \text{ out}}}$$

$$P_{N \text{ out}} = ASE_{\Delta\nu} + h\nu \cdot \Delta\nu$$

$$P_{S \text{ out}} / P_{S \text{ in}} = G$$

$$P_{N \text{ in}} = h\nu \cdot \Delta\nu$$

$$NF = \frac{1}{G} \left( 1 + \frac{ASE}{h\nu} \right)$$

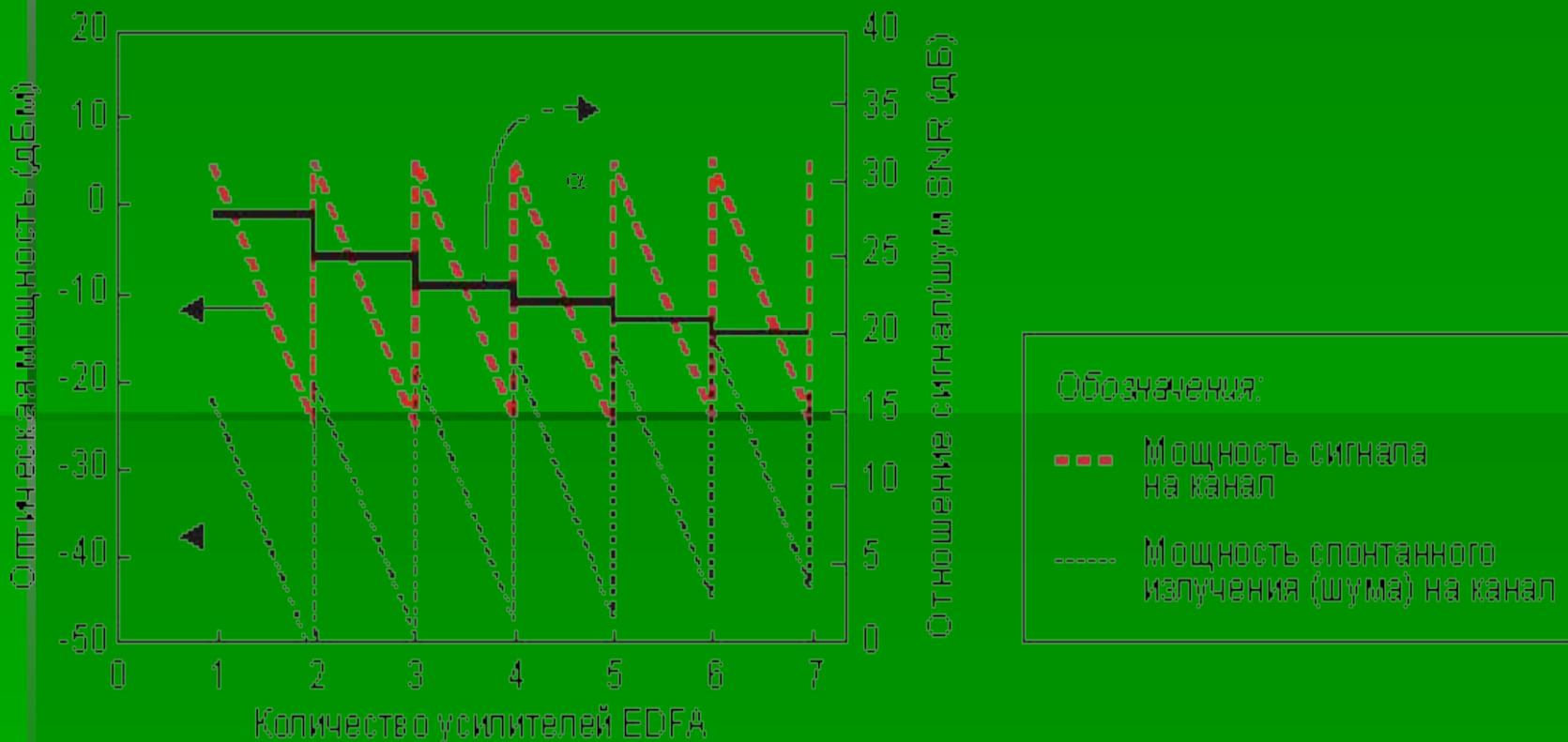
# Технические характеристики EDFA

## EAU-200

▪ Зона усиления, нм	1530...1570	
▪ Мощность насыщения $P_{\text{outsat}}$ при ( $P_{\text{in}} = -3$ дБм), дБм:		23,0
▪ Коэффициент усиления при малом входном сигнале, дБ (1545 нм)		42
▪ Неравномерность коэффициента усиления в диап 1553-1567 нм ( $P_{\text{in}} = -3$ дБм), дБ	$\pm 0,3$	
▪ Поляризационная чувствительность насыщенного входного сигнала, дБ		0,2
▪ Максимальные значения коэффициента шума $n_f$ в диапазоне 1545-1565 нм, дБ при $P_{\text{in}} = -4$ дБм	6,0	
при $P_{\text{in}} = +4$ дБм	5,5	
▪ Поляризационная модовая дисперсия, пс		0,2
▪ Оптическая изоляция вход/выход, дБ		50
▪ Тип входного/выходного волокна		SMF-28™
▪ Тип оптических соединителей	FC/PC, FC/SPC, FC/APC	
▪ Номинальная длина волны накачки, нм		965
▪ Полоса накачки, мкм	1x100	
▪ Время наработки на отказ, часы	500000...1000000	
▪ Рабочее напряжение, В (постоянный ток)	5...7	

# Расчет числа каскадов ОУ

типовая диаграмма мощности оптического сигнала в процессе распространения



# Расчет числа каскадов линейных ОУ

$\alpha$ , дБ/км – километрическое затухание ОВ

$L$ , км – протяженность сегмента оптической линии между двумя ОУ

$\alpha L$ , дБ – затухание сегмента оптической линии

$$\alpha L = 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}_{i-1}} / P_{\text{ВХ}_i}) = 10 \lg(N_{\text{ВЫХ}_{i-1}} / N_{\text{ВХ}_i})$$

$$G = 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}_i} / P_{\text{ВХ}_i}) = 10 \lg((N_{\text{ВЫХ}_i} - N_0) / N_{\text{ВХ}_i})$$

Для сбалансированной линии

$$G = \alpha L, P_{\text{ВЫХ}_i} = P_{\text{ВЫХ}_{i-1}}, N_{\text{ВЫХ}_i} = N_0 + N_{\text{ВЫХ}_{i-1}}$$

Тогда ОСШ на выходе  $k$ -го усилителя

$$\begin{aligned} \text{ОСШ} &= 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}_k} / N_{\text{ВЫХ}_k}) = 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}_k} / kN_0) = \\ &= p_{\text{ВЫХ}_k} - 10 \lg(k) - n_{\text{ВЫХ}} \end{aligned}$$

$$n_{\text{ВЫХ}} = 10 \lg(N_0) = 10 \lg(h\nu) + 10 \lg(\Delta\nu) + G + nf$$

$$10 \lg(h\nu) = -158,9 \text{ дБм}$$

# Изоляторы

Изоляторы используются, когда рассеянное назад или отраженное оптическое излучение может ухудшить рабочие характеристики чувствительных компонентов системы, таких как DFB-лазер.

Оптические свойства используемых материалов и конструктивные особенности изоляторов обеспечивают пропускание оптического излучения при его распространении в одном направлении и сильное его подавление при его распространении в обратном направлении.

Параметры оптических изоляторов :

- Зависимость от длины волны, особенно для узкополосных изоляторов, предназначенных для работы в спектральной полосе менее 20 нм.
- Коэффициент затухания в обратном направлении (максимальное значение),
- Полоса пропускания обратного сигнала по уровню 3 дБ.
- Вносимые потери в прямом направлении (менее 1 дБ), и более 35 дБ (однокаскадный) или 60 дБ (двухкаскадный) для обратного направления при малой зависимости от поляризации.
- Поляризационная модовая дисперсия PMD. Однокаскадные изоляторы выполнены из элементов с высоким двулучепреломлением, в силу чего подвержены PMD (обычно от 50 до 100 фс). Двухкаскадные изоляторы обычно выполнены таким образом, чтобы PMD, появившаяся на первом каскаде, компенсировалась во втором каскаде.
- Потери, зависящие от поляризации PDL, ухудшают характеристики оптических изоляторов.

# Основные параметры системы DWDM

Зависят от следующих параметров оптических компонентов

- **Мощность и стабильность лазерного передатчика.** Чем выше эти параметры, тем больше допустимая дальность линии связи. Однако мощность сигнала не должна быть настолько большой, чтобы стало проявляться негативное влияние нелинейных явлений в волокне.
- **Число каналов.** Полная полоса пропускания системы определяется произведением числа каналов на скорость передачи по каналу. Например, система с 40 каналами и скоростью передачи по каждому каналу 2,5 Гбит/с (STM-16) имеет полную полосу пропускания 100 Гбит/с.
- **Частотный интервал между каналами.** В частотном плане ITU-T стандартный частотный интервал между каналами составляет 100 ГГц (около 0,8 нм по длине волны). В настоящее время рассматриваются предложения по стандартизации частотного плана с расстоянием 50 ГГц (около 0,4 нм) и даже 25 ГГц.
- **Скорость модуляции лазерного передатчика.** На линиях связи большой протяженности в настоящее время используются скорости передачи (модуляции) 2,5 Гбит/с (STM-16) и 10 Гбит/с (STM-64).
- **Коэффициент усиления EDFA.** Стандартные усилители EDFA в пределах рабочего диапазона (шириной 40 нм) имеют типичный коэффициент усиления 30-40 дБ для слабых сигналов.
- **Коэффициент усиления приемника** должен быть максимально высоким и стабильным.
- **Характеристики оптического волокна.** Тип и характеристики оптического волокна сильно влияют на такие параметры системы, как скорость передачи и максимально возможное число каналов.

# Расчет бюджета волоконно-оптической ЛИНИИ СВЯЗИ

<i>Характеристика</i>	<i>Значение</i>	<i>Примечания</i>
Выходная мощность сигнала источника излучения (P1)	3 дБм	Определяется производителем
Потери на стыковку источника с соединителем	-5 дБ	Отражение, несоответствие площадей и т.д.
Потери на соединителе передатчик - оптический кабель	-1 дБ	ST-соединитель, несоосность
Потери на стыке волокон	-0,25 дБ	Механический стык
Затухание в кабеле	-20 дБ	На основе паспортных характеристик или измерений оптического кабеля
Потери на соединителе оптический кабель – приемник	-1 дБ	ST-соединитель, несоосность
Бюджет линии связи (B)	-27,25 дБ	Сумма всех потерь в линии связи
Мощность сигнала, поступающего в приемник (P2=P1-B)	-24,25 дБм	Мощность передатчика за вычетом полных потерь
Чувствительность приемника (N)	-40 дБм	Определяется паспортной характеристикой линии
Запас потерь линии (P2-N)	15,75 дБ	не менее 10 дБ.

# Коэффициент ошибок

- Технические требования к линии связи задаются с помощью допустимого значения коэффициента ошибок BER (Bit Error Rate), который зависит от конкретного приложения и может меняться от  $10^{-3}$  для случая цифровой передачи голоса до  $10^{-12}$  для передачи данных.
- Система WDM должна иметь низкое значение BER на каждом из каналов по отдельности.



# Измерение потерь

Величина потерь зависит от конкретного элемента системы и общей длины оптического пути сигнала от передатчика.

Когда оптическое излучение попадает в какой-либо компонент системы связи, часть энергии излучения отражается обратно. Потери на отражение возникают на границах раздела оптических сред в компонентах, соединителях и стыках из-за воздушных зазоров, несоосности или различия показателей преломления.

Потери на отражение уменьшают мощность сигнала и приводят к возникновению многолучевой интерференции, которая нарушает целостность передачи данных и снижает стабильность источника излучения.

Потери на отражение зависят от качества и точности установки компонентов. Они изменяются от канала к каналу, поэтому проводить измерение потерь на отражение необходимо во всем рабочем спектральном диапазоне.

Лазеры, используемые в системах DWDM, чувствительны к отраженному излучению. Нежелательные отражения в усилителях EDFA могут привести к значительному увеличению коэффициента шума.

Потери на отражение в линии необходимо тщательно измерять до начала эксплуатации системы и постоянно контролировать в процессе эксплуатации.

Потери на отражение ORL (Optical Return Loss) определяют интегральную характеристику линии связи – полное отражение в волоконно-оптической системе или подсистеме правее некоторой точки, в которой происходит измерение. Потери на отражение измеряются в дБ, всегда являются положительной величиной. :

Большее значение ORL соответствует меньшему количеству отраженной мощности и лучшим характеристикам системы.

Коэффициент отражения обычно используется для определения отражательных характеристик компонента системы (соединителя, ответвителя и т. д.)

Для того, чтобы исследовать характеристики отдельного компонента, его тестируют перед монтажом, помещая выходные участки волокон в иммерсионную жидкость с согласованным показателем преломления и высоким коэффициентом поглощения.

Коэффициент отражения измеряется в дБ и всегда является отрицательной величиной, так как отраженная мощность всегда меньше, чем падающая. Большее отрицательное значение означает меньшую отраженную энергию и, следовательно, лучшие характеристики компонента.

$P_{ref}$  – мощность излучения, отраженного от исследуемого компонента (только от него!),

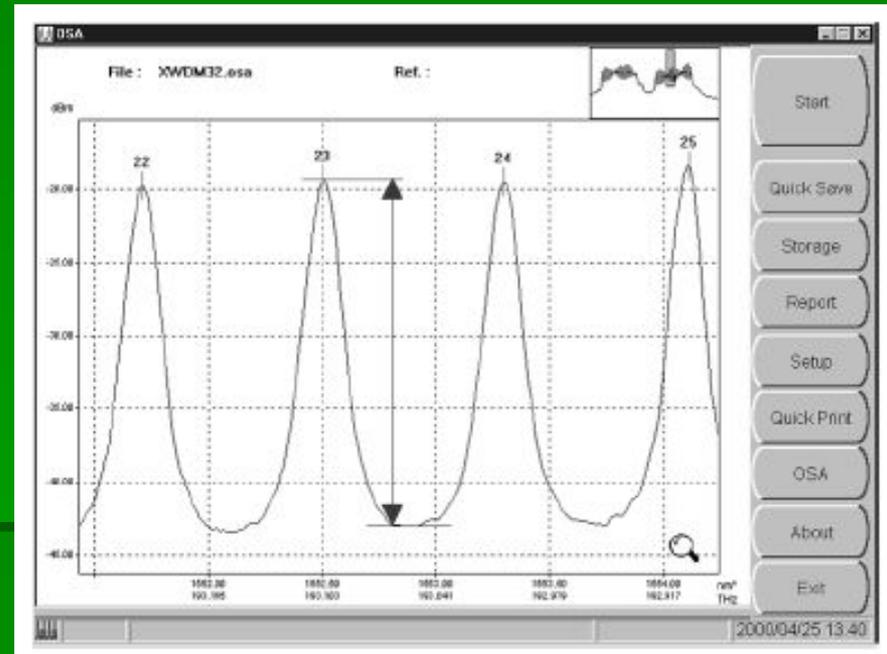
$P_{in}$  – мощность падающего излучения.

$$ORL = 10 \lg(P_{in} / P_{ref})$$

$$K = 10 \lg(P_{ref} / P_{in})$$

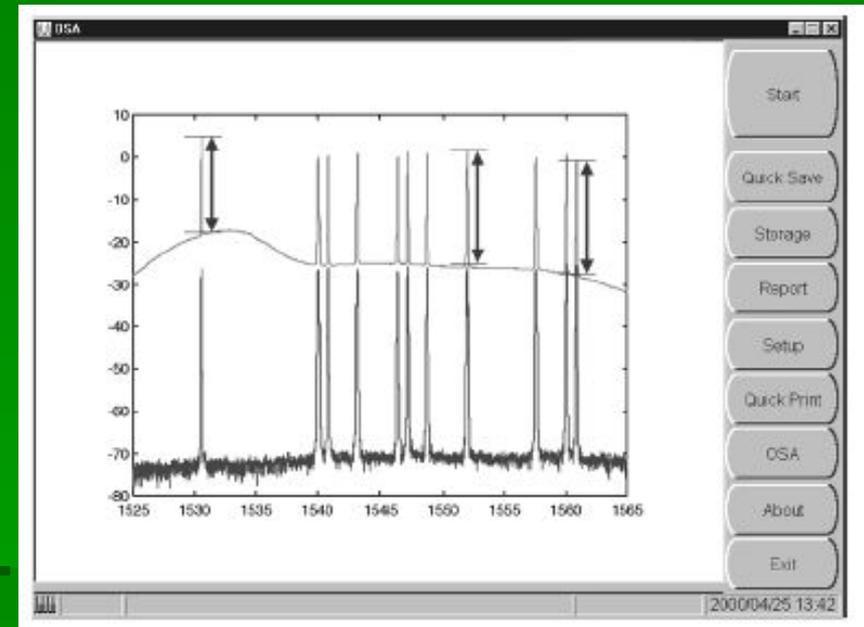
# Отношение сигнал/шум

- Отношение сигнал/шум OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) является неотъемлемой характеристикой любой системы WDM и отражает превышение мощности принимаемого сигнала над шумовым фоном для каждого оптического канала
- На выходе из первого мультиплексора это отношение должно быть не меньше 40 дБ для каждого канала.
- Оптические усилители в линии связи ухудшают OSNR. По мере прохождения сигнала по линии связи значение OSNR может снижаться в зависимости от протяженности линии, числа усилителей EDFA и скорости передачи.
- Каждый отдельный усилитель EDFA не должен ухудшать значение OSNR больше чем на 3-7 дБ. На входе в приемник значение OSNR должно быть не хуже 20 дБ.



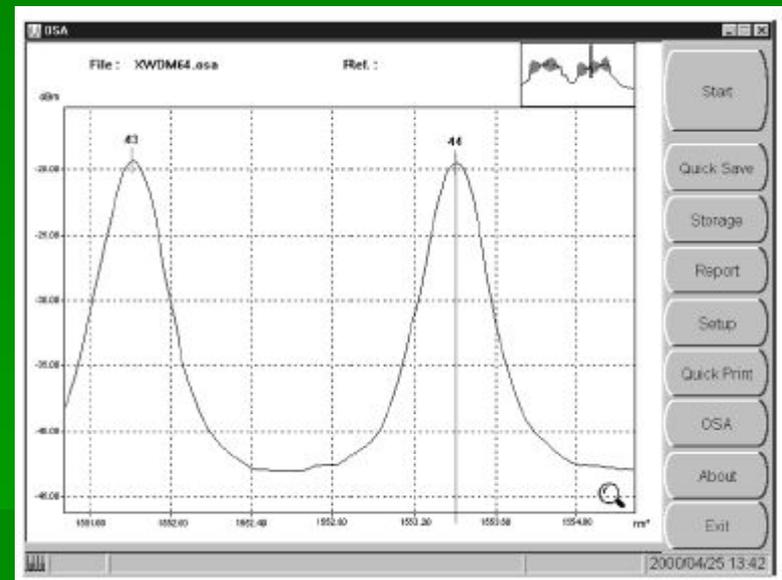
# Коэффициент усиления

- В оптической сети с усилителями EDFA коэффициент усиления для каждого канала зависит от количества каналов, проходящих через усилитель. Поэтому необходимо иметь возможность определять отношение сигнал/шум на входе приемника для каждого канала.
- Вывод о работоспособности или неработоспособности системы можно сделать на основе измерения полной мощности сигнала и мощности сигналов в каждом канале. Для выяснения причин появления каналов с малым уровнем мощности в первую очередь потребуется проверить равномерность усиления отдельных усилителей, изучить изменение поляризации и определить нелинейные эффекты вдоль всей линии связи.
- Все это требует получения точной спектральной информации об оптическом сигнале в линии связи.



# Центральная длина волны канала в составном оптическом сигнале

- После монтажа системы DWDM необходимо точно измерить значения центральных длин волн для каждого канала, чтобы убедиться, что они соответствуют техническим требованиям.
- Их также необходимо постоянно контролировать в процессе эксплуатации сети для выявления недопустимых их смещений.
- Точность измерения центральной длины волны отдельного канала должна быть тем выше, чем уже полоса частот отдельного канала и меньше интервал между каналами.
- Необходима продуманная стратегия выбора длин волн, позволяющая избежать конфликтов в распределении каналов и минимизировать возможное взаимодействие между ними.

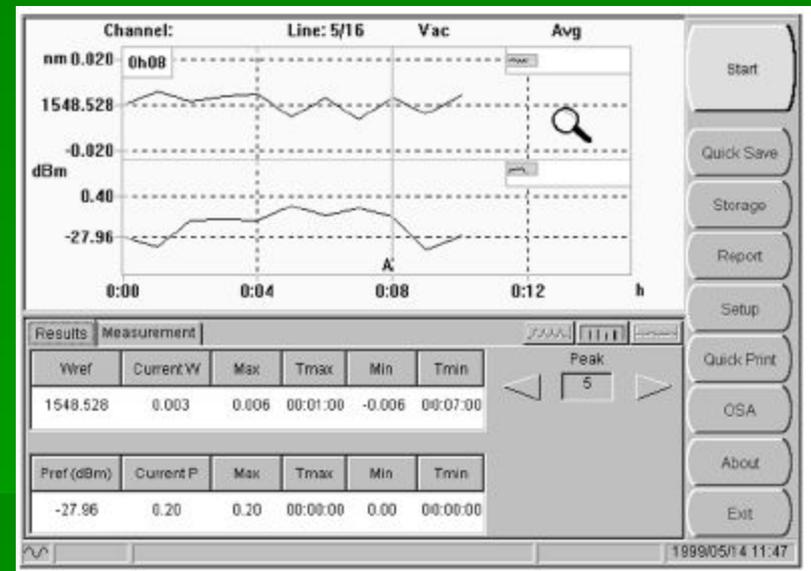


# Дрейф длины волны и мощности сигнала

Параметры сигнала каждого канала ни при каких обстоятельствах не должны выходить за пределы диапазона допустимых отклонений.

Слишком большой уход длины волны может привести к полной потере сигнала в канале, а также к интерференции с сигналом соседнего канала и значительному ухудшению его качества.

Для того чтобы избежать потерь данных в линии связи, необходимо постоянно измерять и контролировать уход мощности и длины волны излучения оптического сигнала



Перекрестные помехи – это нежелательный вклад сигнала одного канала в сигналы других каналов. Уровень перекрестных помех достаточно сложно точно определить до завершения монтажа и запуска системы. Перекрестные помехи необходимо измерять в реальной ситуации при наличии (или, по крайней мере, симуляции) фактических сигналов.

Нормальным считается различие по мощности между полезным сигналом и суммарным паразитным сигналом от остальных каналов в 25 дБ. Для линий связи большой протяженности допустимым значением является уровень перекрестных помех в 17 дБ, а для подводных линий связи считается достаточным уровень в 13 дБ.

Нелинейные эффекты, которые не проявляются при тестировании волокон, могут стать существенными только после ввода сети связи в эксплуатацию.

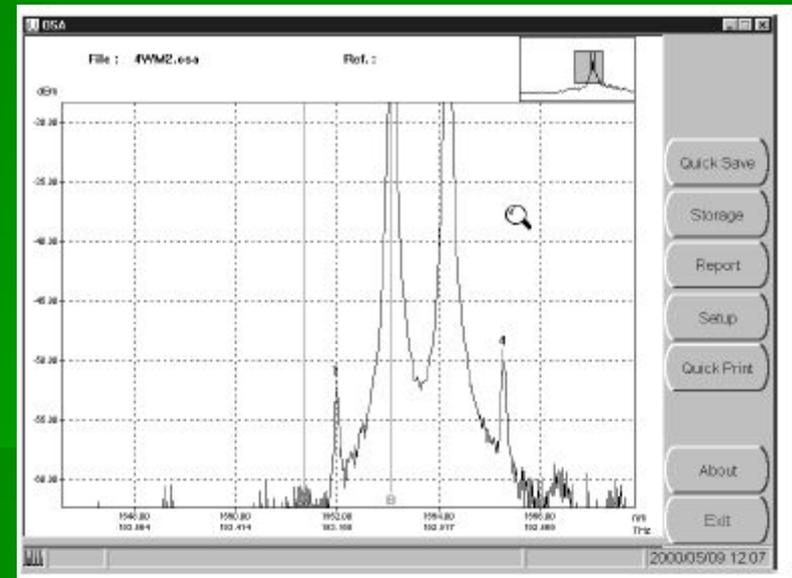
Четырехволновое смешение FWM требует особого внимания из-за серьезности последствий его воздействия на работу сети. Нелинейное взаимодействие оптических сигналов может приводить к появлению паразитных сигналов, длины волн которых могут совпадать с длинами волн соседних каналов и нарушить работу сети

# Нелинейные эффекты

Четырехволновое смешение

Эффект FWM может быть уменьшен за счет

- увеличения частотного интервала между каналами
- использования неравномерных частотных интервалов между каналами.
- используя волокно с подходящей хроматической дисперсией, если система еще не смонтирована



# Поляризационно-модовая дисперсия

На участках волокна большой протяженности, типичных для реальных сетей связи, поляризационная модовая дисперсия PMD (Polarization Mode Dispersion) возникает : из-за внутренних неоднородностей волокна, механических возмущений в местах сгибов и напряжений волокна, разнообразных температурных эффектов.

Эти эффекты имеют псевдослучайную природу, поэтому явление PMD удобно описывать с помощью формулы 1, где DGD (Differential Group Delay) – дифференциальная групповая задержка. Величина DGD зависит как от длины волны, так и от температуры, однако достаточно знать ее среднее значение, чтобы определить длину волокна, при которой явление PMD начнет приводить к ухудшению характеристик сети связи.

В этом случае PMD зависит от расстояния по формуле 2, где  $K_{PMD}$  – коэффициент PMD, имеющий размерность пс/км. Физический смысл коэффициента PMD – дисперсия PMD на 1 км волокна.

Особое внимание следует уделять явлению PMD в оптических кабелях, проложенных в конце 80-х годов.

$$PMD = \sqrt{\langle DGD^2 \rangle}$$

$$PMD = K_{PMD} \sqrt{L}$$

# Тестирование системы в целом

Измерения проводятся при помощи анализатора OSA в нескольких точках линии связи.

1. С помощью анализатора OSA определяют среднее по времени значение OSNR на входе в демультиплексор. OSNR измеряется во всей спектральной полосе рабочего диапазона, для чего мощность сигнала в канале сравнивается с мощностью шума непосредственно рядом с каналом. Обычно приемлемым считается значение 18 дБ и больше.
2. OSNR измеряют на входах и выходах всех оптических усилителей в линии. Для систем со скоростью передачи 2,5 Гбит/с эти значения должны быть не менее 21 дБ.
3. Измерение распределения мощности сигналов передатчиков по каналам. Степень неоднородности распределения составного сигнала по мощности определяют как максимальную разность между максимальными значениями мощности отдельных каналов. Ее измеряют с помощью анализатора OSA на выходе из первого оптического усилителя (на который поступает сигнал с мультиплексора). В этой точке значение OSNR должно быть достаточно большим (не менее 28 дБ для полосы 0,1 нм), а неоднородность распределения мощности между каналами не должна превышать 2 дБ.
4. Коэффициент ошибок BER измеряют за короткий и длительный период времени. Для измерения BER за короткий период времени (15 минут) используют стандартная конфигурация линии, например, шесть каналов с расстоянием между каналами 50 ГГц и полными потерями в каждом канале 25 дБ. С помощью тестера BER необходимо убедиться, что BER для каждого канала не превышает максимально допустимого значения (10–12 для полных потерь 25 дБ). Измерение BER за длительный период времени также происходит с помощью тестера BER при уровне сигнала близком к рабочему (–15 дБм). Время измерения должно составлять 24 часа, а потому на практике обычно невозможно протестировать каждый канал. Чаще всего тестируют канал с самым низким уровнем OSNR и канал с сигналом самого высокого уровня мощности.
5. Для проверки устойчивости работы линии связи случайным образом убирают и вновь добавляют компоненты какого-либо канала и наблюдают за поведением составного сигнала. Изменения конфигурации одного канала никак не должны отражаться на уровне сигнала во всех остальных каналах.
6. Стабильность частоты (длины волны) каналов проверяется с помощью многоволнового измерителя MWM. Для систем с интервалом между каналами 50 ГГц частота каждого канала не должна отклоняться от номинальной более чем на  $\pm 5$  ГГц.
7. Следует также провести контрольный холодный старт системы.
8. Наряду с измерением BER по каналам также проводят тестирование единой системы WDM на более высоком уровне при помощи анализатора протоколов, соответствующих используемым сетевым стандартам.

# Мониторинг системы WDM

Мониторинг системы WDM – это непрерывный контроль состояния активных каналов при помощи соответствующего набора тестов. Мониторинг ведется как для выявления любых отклонения в оптических характеристиках сети, которые могут повлиять на ее работоспособность, так и для сбора статистической информации.

Мониторинг включает в себя широкий спектр действий, начиная от планирования последовательности тестов и управления их проведением и заканчивая анализом полученных данных.

Мониторинг особенно важен для систем DWDM, которые очень чувствительны к таким оптическим явлениям, как дисперсия, перекрестные помехи, смещение центральной длины волны и т.д. Для оперативного выявления отклонений важнейших характеристик от заданных, необходимо непрерывно их контролировать. Хорошая система мониторинга активных волокон постоянно выдает как текущие значения основных характеристик, так и статистическую информацию о состоянии системы.

# Контрольный оптический канал

- Для контроля состояния системы можно использовать специально выделенный контрольный оптический канал OSC (Optical Supervisory Channel). С помощью канала OSC ведется постоянное наблюдение за работой системы и эффективностью передачи данных, выявляются различные неполадки, потери мощности и другие нарушения целостности сигнала.
- Канал OSC позволяет проводить все необходимые тесты непрерывно, а не по расписанию, и без отключения каналов. Чтобы гарантировать целостность канала OSC, по которому могут передаваться сигналы управления, длину волны для него обычно выбирают вне рабочего диапазона усилителей EDFA.
- При мониторинге с использованием канала OSC нет непрерывного потока сообщений и статистических данных: если система работает нормально. Канал OSC - это средство постоянного наблюдения за состоянием сети в целом. Использование канала OSC помогает системному контроллеру поддерживать постоянную мощность оптического сигнала и качество передачи, максимально эффективно использовать ресурсы сети. Если тестирование с помощью канала OSC выявляет отклонения в целостности сигнала, администратору сети выдается соответствующее сообщение.
- В отношении канала OSC пока не существует каких-либо стандартов. В настоящее время канал OSC обычно имеет длину волны 1510 нм или 1625 нм, так как эти длины волн лежат вне рабочего диапазона усилителей EDFA и при этом достаточно близко к нему, чтобы их можно было использовать для мониторинга. рассматривается возможность выделения под канал OSC и других длин волн – 1480 нм или 1310 нм (в зависимости от производителя).
- Для тестирования с помощью канала OSC не требуется какого-то специального тестового оборудования. Для мониторинга потерь в соединителях и местах сварки волокон можно использовать измеритель мощности или оптический рефлектометр OTDR. Мониторинг энергетического потенциала системы связи ведут с помощью перестраиваемого аттенюатора и тестера оптических потерь.
- Другой подход заключается в применении для мониторинга состояния системы одного из каналов системы DWDM. В отличие от метода с использованием канала OSC, этот метод чувствителен к неисправностям усилителя EDFA. Однако он соответствует стандартам SONET/SDH и может использоваться для обнаружения ошибок маршрутизации и передачи.
- Одно из решений проблемы чувствительности к выходу из строя усилителя EDFA заключается в том, чтобы параллельно вести мониторинг спектральных характеристик еще одного или нескольких каналов. Добавление спектрального измерительного оборудования в блок дистанционного тестирования RTU (Remote Test Unit) системы дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System) позволяет в полном объеме вести мониторинг системы передачи.

# Система дистанционного тестирования волокон

## RFTS

Для мониторинга сетей связи используется разнообразное тестовое и измерительное оборудование:

- многоволновые измерители MWM
- анализаторы оптического спектра OSA.
- анализаторы PMD,
- оптические рефлектометры OTDR
- измерители мощности потерь на отражение.

Система RFTS объединяет практически все возможности отдельных измерительных приборов. Система RFTS позволяет экономично и эффективно контролировать состояние сети и проводить ее техническое обслуживание. Возможно, на настоящий момент это лучшее решение для полного мониторинга сети,

Система мониторинга RFTS постоянно и автоматически ведет контроль характеристик волокон в сети связи, оперативно обнаруживает их неисправности и определяет их местоположение. Это позволяет:

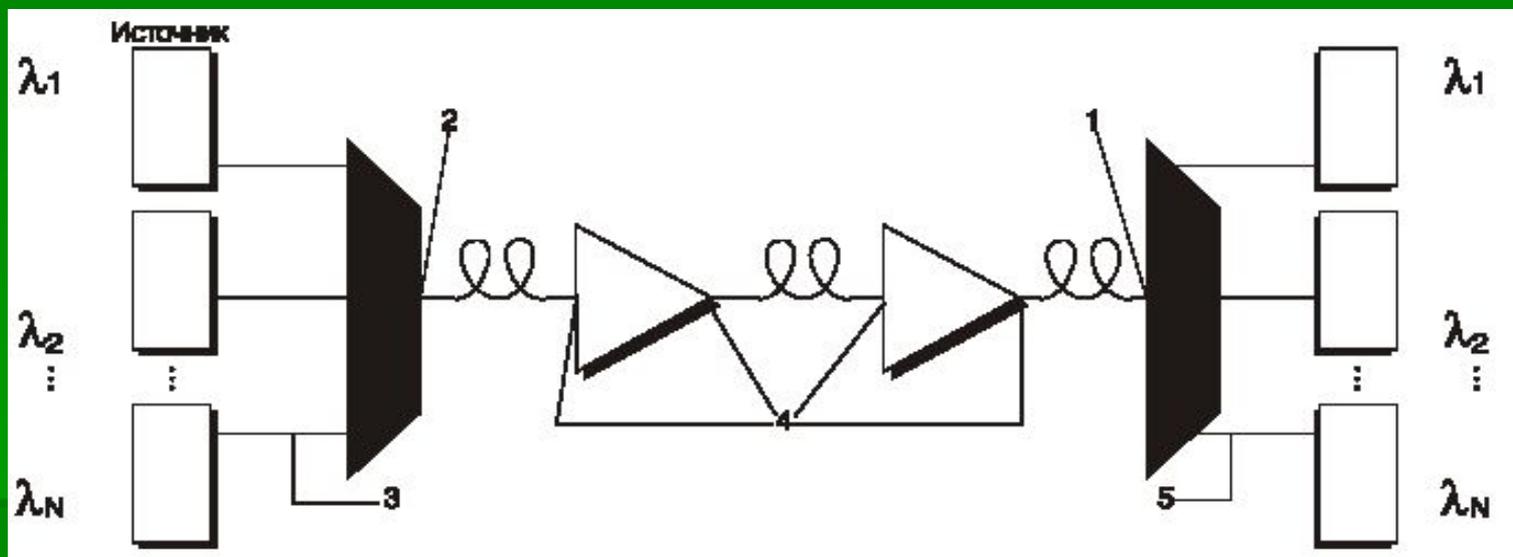
- Непрерывно контролировать качество обслуживания (важное стратегическое преимущество для поставщика услуг связи).
- Увеличить экономическую эффективность сети связи (за счет полного использования всех преимуществ систем DWDM (STM-16 и STM-64) и постоянного поддержания высокой работоспособности).
- Уменьшить нагрузку на технический персонал и увеличить эффективность его работы.
- В обычных волоконно-оптических сетях связи, не использующих технологию DWDM, системы RFTS пока редко используются для обнаружения неполадок в передаче данных. Эту функцию берет на себя система контроля, встроенная в сетевое оборудование (например оборудование SDH). Система контроля достаточно быстро реагирует на отказы связи (менее чем за 120 мс), после чего для восстановления связи используются методы резервирования линий и каналов на основе соответствующей сетевой топологии и протоколов.
- В сетях связи DWDM для восстановления связи недостаточно принятия мер на протокольном уровне. При использовании технологии DWDM в иерархии сети появляется новый уровень – оптический спектр. Обеспечить защиту каналов WDM на физическом уровне невозможно, а потому операторам сетей связи на основе систем DWDM необходимо вести наблюдение за спектром составного сигнала. В системе RFTS реализовано несколько различных методов мониторинга систем передачи, что вносит совершенно новое измерение в мониторинг состояния волокна.



RTU (Remote Test Unit) - блок дистанционного тестирования

RFTS (Remote Fiber Test System) - системы дистанционного тестирования ВОЛОКОН

# Пример мониторинга и устранения неисправностей



1. Тестирование демультиплексора на конце линии связи. Это позволяет определить, требуются ли еще какие-либо дополнительные тесты. С помощью многоволнового измерителя MWM измеряют значение OSNR и точность длины волны каждого канала. Для приемлемого значения BER (например,  $10^{-13}$ ) значение отношения сигнал/шум OSNR на конце линии связи должно быть не менее 18 дБ (типичные значения OSNR составляют 22 дБ и больше). В зависимости от системы и типа фотодетектора, мощность сигнала в канале должна составлять около  $-18$  дБм. Длина волны канала должна соответствовать номинальному значению с точностью несколько десятков пм.
2. Если на первом этапе измерений в линии связи обнаружены проблемы, следует измерить уровень мощности сигнала на выходе из мультиплексора. Его номинальное значение может составлять от  $-5$  до  $2$  дБм в зависимости от требований оператора связи. Если измеренное значение отличается от номинального, необходимо измерить потери в мультиплексоре.
3. После того, как на основе результатов предыдущих измерений определен неисправный канал (каналы), следует проверить мощность сигнала и центральную длину волны соответствующего лазерного передатчика.
4. Проверка усилителей EDFA. Их коэффициент усиления должен быть линейным и одинаковым для всех каналов. Разброс коэффициента усиления более чем на  $3$  дБ недопустим.
5. Проверка качества передачи цифровых систем (SDH, SONET, IP и др.). Для приемлемого уровня BER мощность принимаемого сигнала должна быть не менее  $-20$  дБм. Это измерение уже не относится к оптическим: для его проведения требуется электронное оборудование.

# Список литературы

1. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2000. - 268 с.
2. Слепов Н.Н. "Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны" // Сети, 1999, №4, стр.24-31
3. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. - М.: Эко-Трендз, 1999. - 150 с.
4. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. - М.: Радио и связь, 2000. - 468 с.
5. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. – 251 с.
6. Анпилогов В.Р., Гольберг Б.С. Диденко М.Г. Волоконно-оптические линии связи в современных телекоммуникационных системах // Технология и средства связи, № 1,2000
7. Потапов В.Т. Технологии DWDM призваны обеспечивать бурное развитие волоконно-оптических систем связи(ВОСС). Информационный бюллетень "Фотон-Экспресс", декабрь 1999, № 17
8. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы./Сборник статей под редакцией Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. М.:Издательство "Connect", 2000г
9. WDM и оптические сети связи // Lightwave. Russian edition. 2003, №1 – С.14-31.
10. ITU-T. Rec.G.692 - Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers (10/98)

# Структура WDM-сети

## Сравнительная мощность сигналов

