

КПИ им. Игоря Сикорского, каф. микроэлектроники.

М. Р. Домбругов. Информатика-1.

Персональные компьютеры и основы сетевых технологий

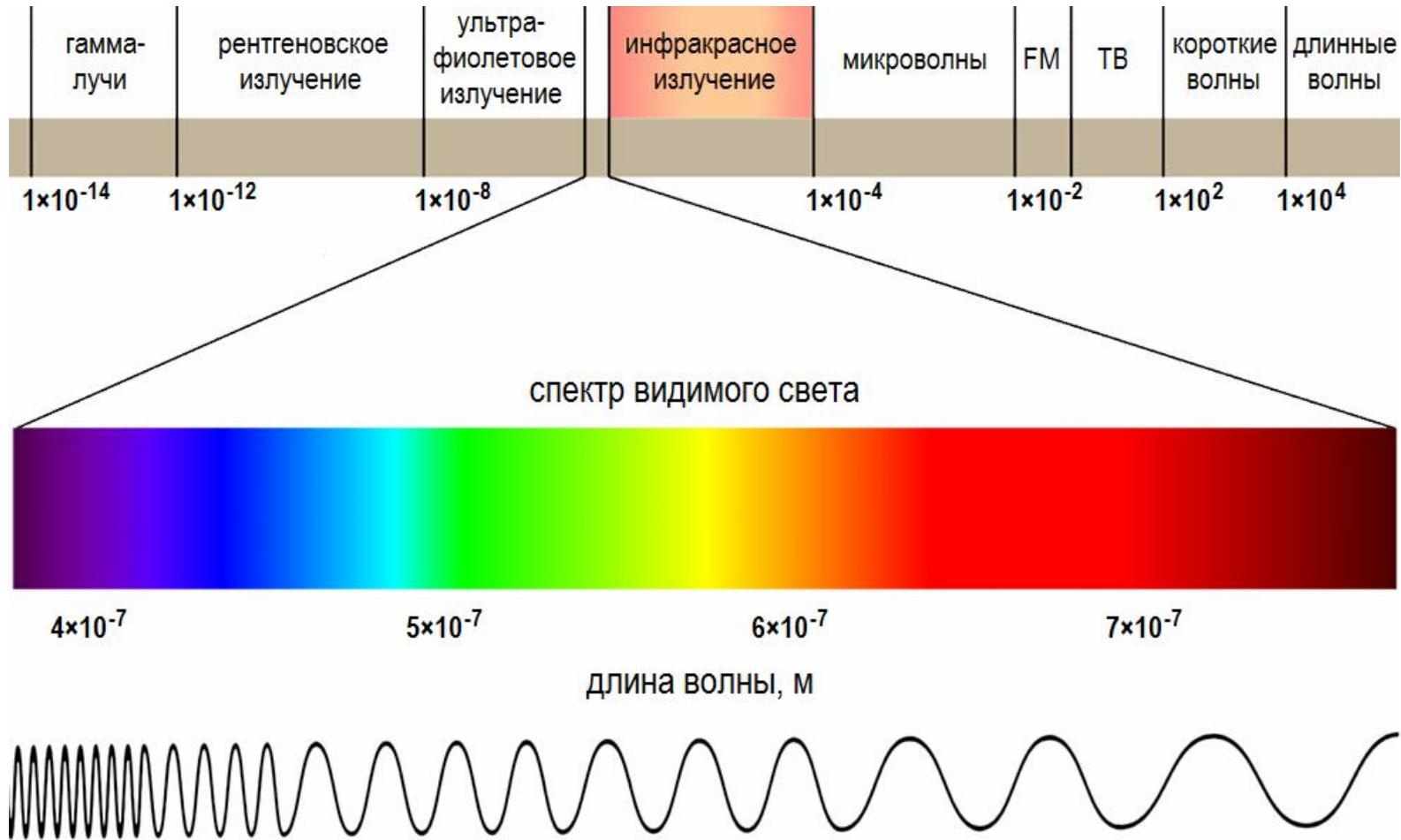


# **Лекция 5.**

## **Волоконно-оптические линии связи**

19 октября 2020

# Волоконно-оптические линии связи



# Отвлечемся: что такое децибел?

## Бел (децибел)

выражает **отношение** двух значений мощности десятичным логарифмом этого отношения

	1 бел = 10 дБ	2 бел = 20 дБ	3 бел = 30 дБ	4 бел = 40 дБ	5 бел = 50 дБ
$P_0$	$P_1=10P_0$	$P_2=10P_1=$ $=100P_0$	$P_3=10P_2=$ $=1000P_0$	$P_4=10P_3=$ $=10^4P_0$	$P_5=10P_4=$ $=10^5P_0$



0.5 бел =  
5 дБ  
 $P = \sqrt{10}P_0 =$   
 $= 3.16P_0$

2.5 бел =  
25 дБ  
 $P = 10^{2.5}P_0 =$   
 $= 316P_0$

$$D_P = 10 \lg \frac{P}{P_0}$$

Усиление	
разы $P/P_0$	децибелы $10 \lg(P/P_0)$
1	0.0
$\sqrt[10]{10} = 1.26$	1.0
2	3.0
3	4.8
$\sqrt{10} = 3.16$	5.0
4	6.0
5	7.0
8	9.0
10	10.0
20	13.0
31.6	15.0
50	17.0
100	20.0
200	23.0
500	27.0
1000	30.0

# Отвлечемся: что такое децибел?

**В теории передающих линий дБ применяют для величин:**

**коэффициент усиления усилителей и аттенюаторов**  
(для понижения интенсивности сигнала) – в дБ (соотв.  $>0$  и  $<0$ );

**затухание в кабеле** – в дБ/км;

**мощность излучателя и чувствительность приемника** – в децибел-мВт (дБм), за эталонную величину выбран 1 мВт.

# Отвлечемся: что такое децибел?

**В акустике в дБ выражают интенсивность звука:**

- 0 — порог слышимости (звуковое давление = 20 мкПа);
- 30 — тикание настенных часов,
- 50 — тихая улица, стиральная машина;
- 70 — шумная улица, пишущая машинка, пылесос;
- 90 — громкие крики, пневматический молоток,
- 110 — громкая музыка на дискотеке, вертолёт;
- 130 — болевой порог — мотоцикл без глушителя, рекорд по самому громкому крику;
- 150 — контузия, травмы — старт ракеты;
- 170 — шок, разрыв барабанной перепонки — светозумовая граната;
- 200 — смерть.

# Отвлечемся: что такое децибел?

- <https://www.ruselectronic.com/что-такое-децибел/>
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/Децибел>
- [https://ru.wikipedia.org/wiki/Звуковое\\_давление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Звуковое_давление)

# Александр Грэхем Белл (Alexander Graham Bell; 1847-1922)

Изобретатель телефона (1876)

Основатель Bell Telephone Company (1877)  
и American Telephone and Telegraph Company,  
AT&T (1885)

Основатель журнал National Geographic (1888)

В 1925 году AT&T основала Лаборатории  
Белла (Bell Telephone Laboratories, Bell Labs).

Здесь изобретены транзистор и лазер,  
положено начало радиоастрономии,  
разработаны операционная система Unix  
и язык программирования Си и др.

Ученые Bell Labs удостоены  
семи Нобелевских премий.



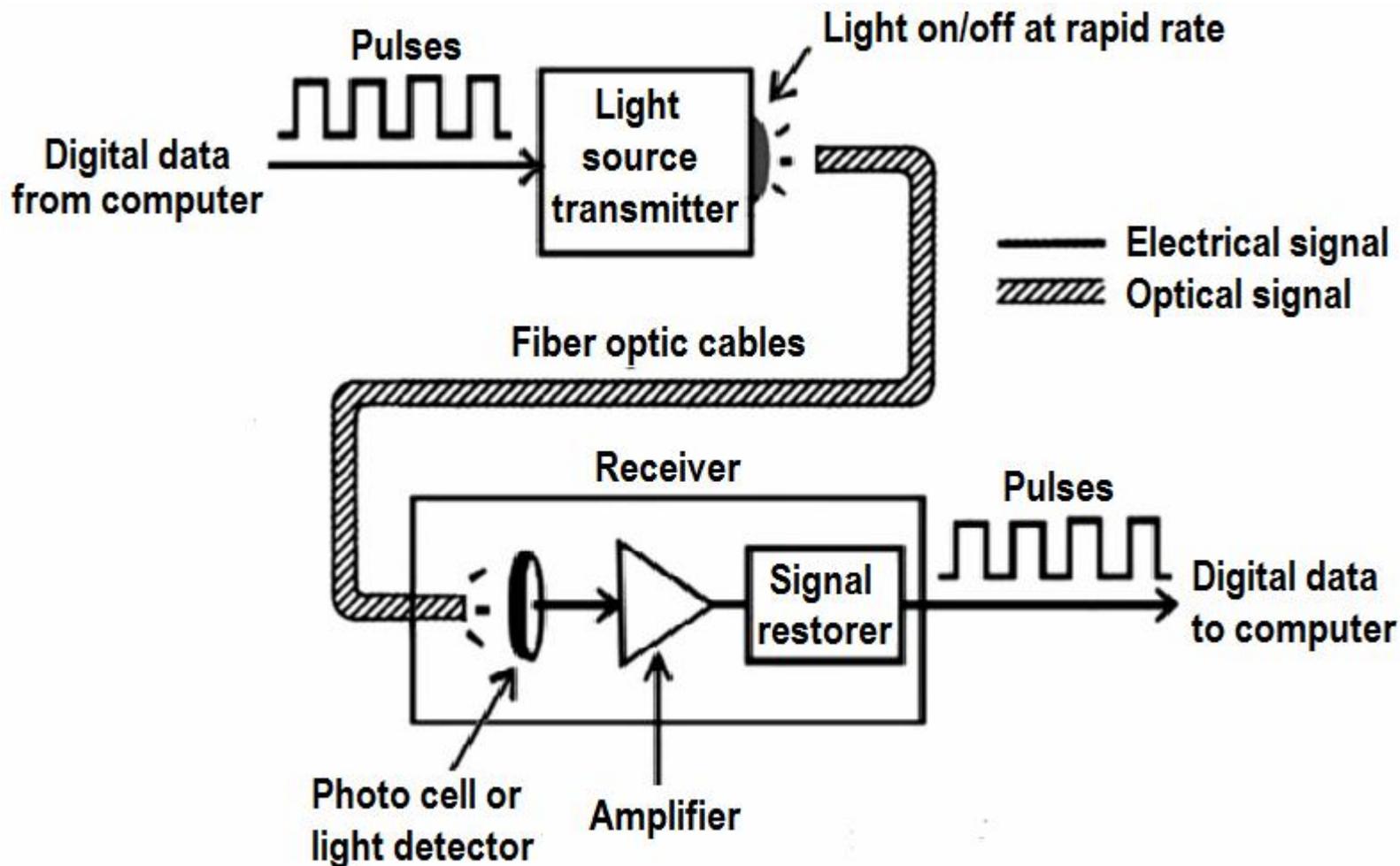
**Штаб-квартира AT&T.  
Даллас, Техас**

# Волоконно-оптические линии связи

## Основные компоненты ВОЛС

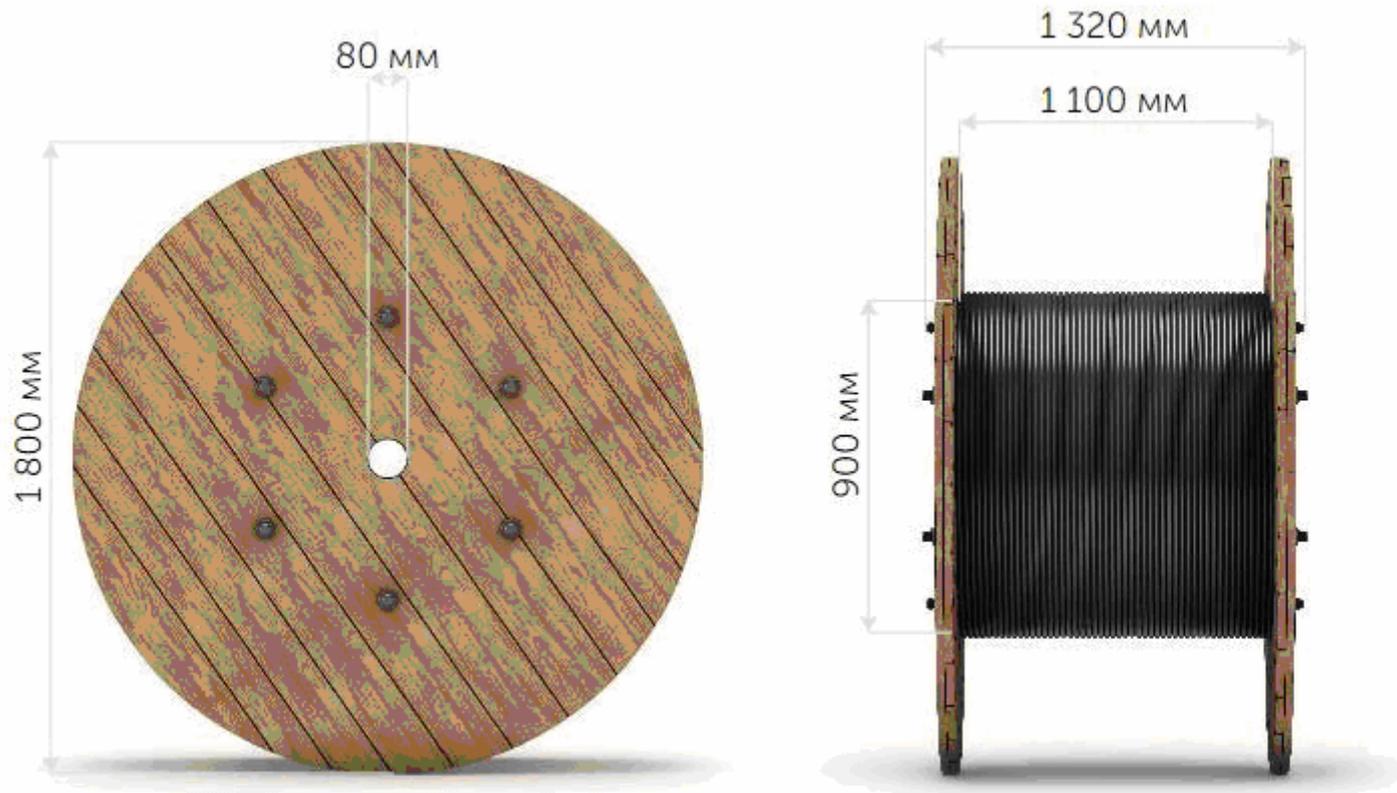
- Волоконно-оптический кабель
- Оптический передатчик
- Оптический приемник
- Повторитель, Регенератор
- Оптический усилитель

# Волоконно-оптические линии связи



# Волоконно-оптический кабель

Строительная длина ВОК (длина непрерывного кабеля на одном барабане) – 2...10 км. Для соединения волокон применяют сварку, места соединений защищаются муфтами.

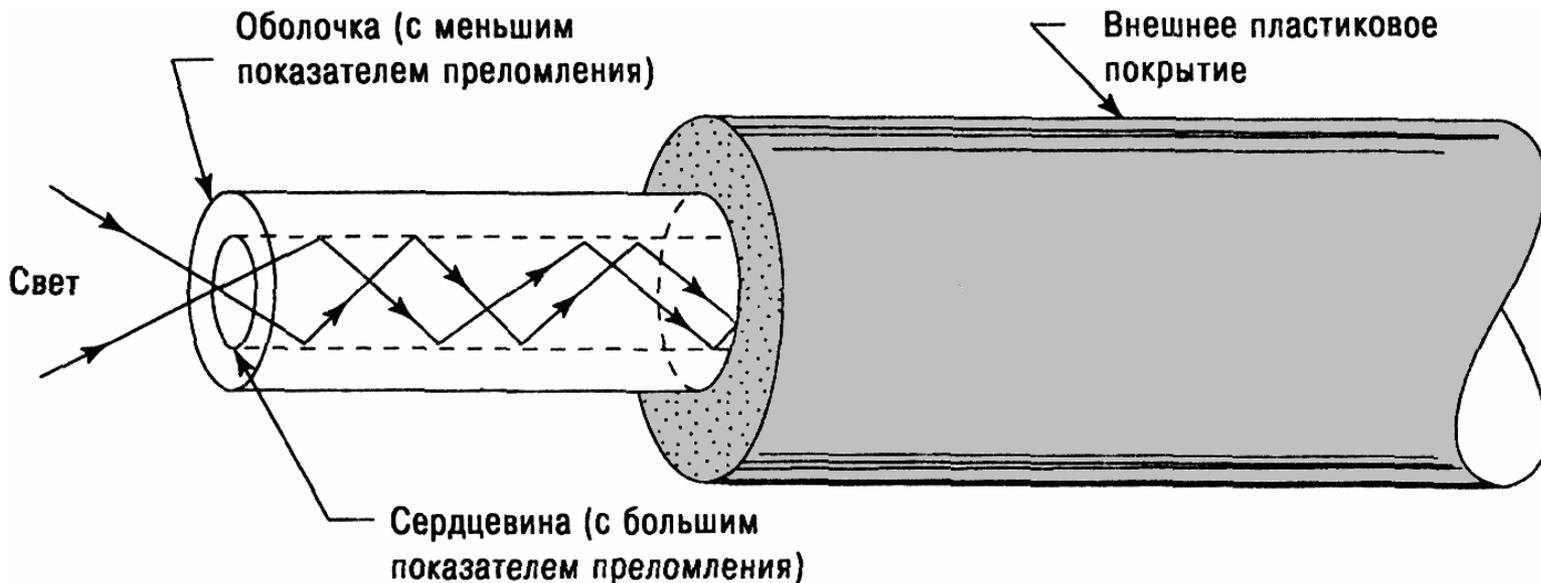


# Волоконно-оптический кабель

Содержит от 4 до 144 и более **оптических волокон (световодов)** для передачи света с длинами волн  $0,85...1,6$  мкм ( $850...1600$  нм), что соответствует частотам  $(2.3...1.2) \times 10^{14}$  Гц ( $230...120$  ТГц).

Сердцевина - из кварца (в одномодовом волокне  $\varnothing \sim 9$  мкм), а оболочка - кварцевая или полимерная ( $\varnothing \sim 125$  мкм).

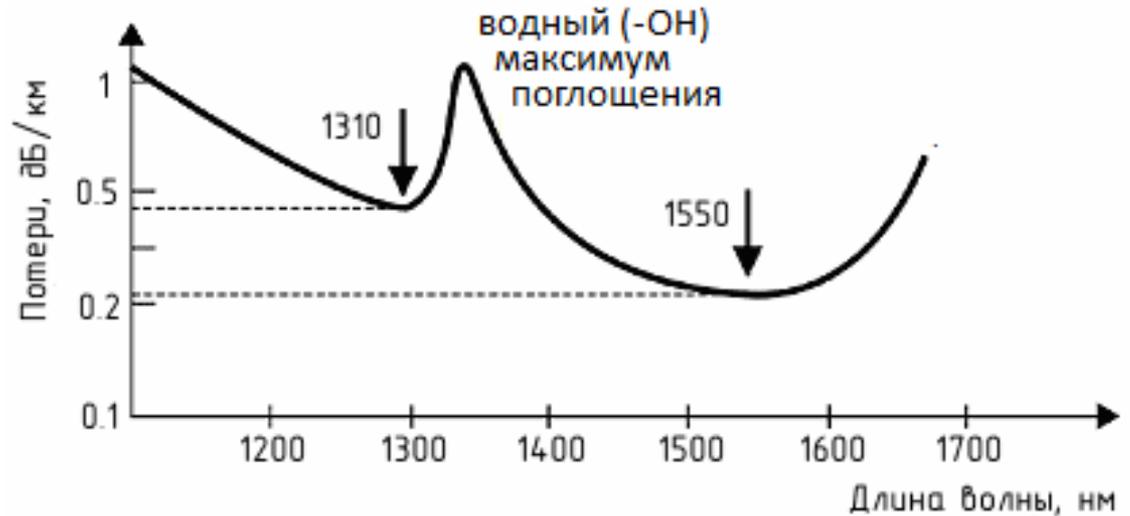
За счет полного внутреннего отражения световой поток канализируется в сердцевине волокна.



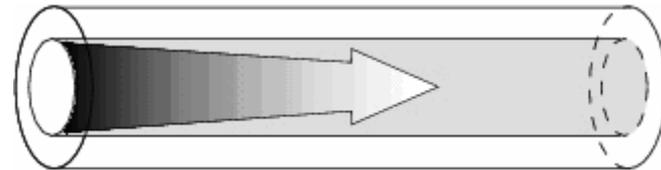
# Волоконно-оптический кабель

## Деградация сигнала: затухание.

Уменьшение мощности сигнала.  
Типичные величины  
 $\sim 0.2 \dots 0.3$  дБ/км.



**Поглощение** (переход части энергии светопотка в тепло)



**Рассеяние** (выход части светопотока из сердцевины)



# Волоконно-оптический кабель

## Деградация сигнала: дисперсия.

Расползание оптического сигнала, которое приводит к увеличению длительности импульса при его распространении по оптическому волокну.

При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме.



# Волоконно-оптический кабель

## Виды монтажа ВОК:

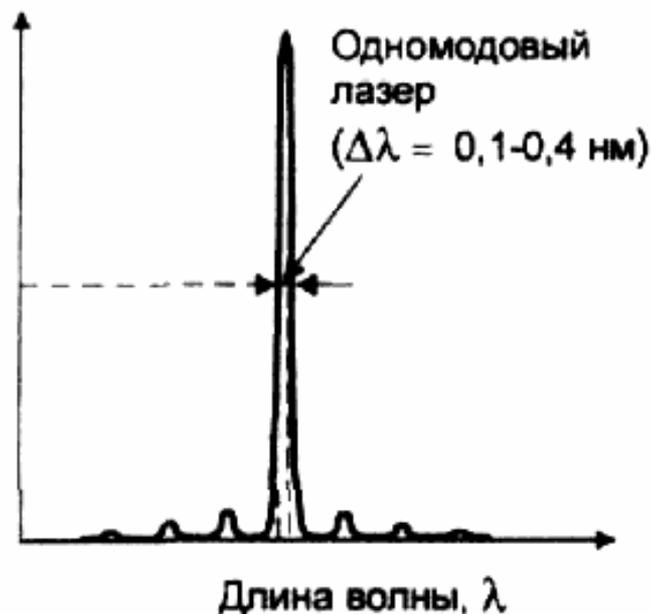
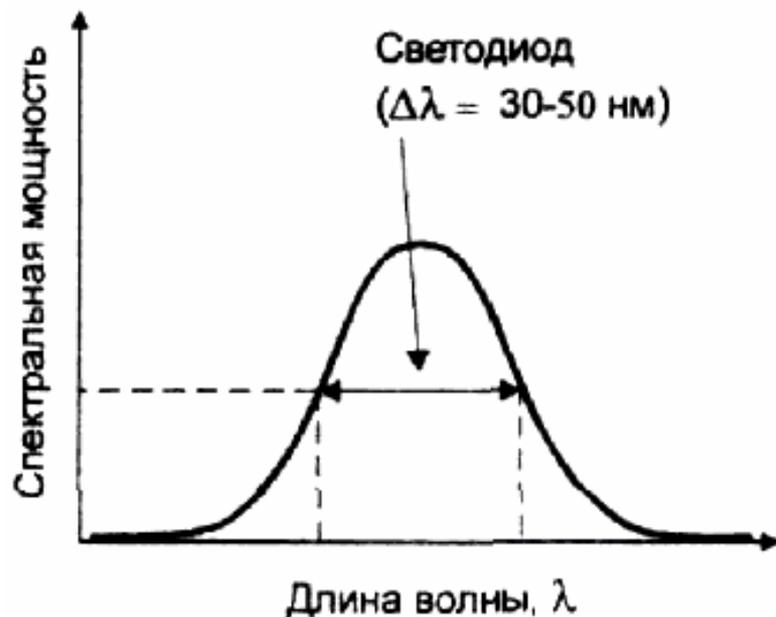
- монтаж кабеля внутри зданий (простейший кабель);
- подземная прокладка (защита от грызунов...):
  - в городе - прокладка в подземной кабельной канализации;
  - за городом - закапывание в грунт (защита от злоумышленников, сигнальная лента над кабелем);
- подвешивание на опорах (самонесущий кабель со стальной жилой, особый кабель для опор ЛЭП);
- прокладка по морскому дну (стойкая к морской воде оболочка, длинные строительные длины участков, дополнительная медная жила для питания промежуточных усилителей...).

# Оптические передатчики

ИК светоизлучающий диод (Light-emitting diode, LED) или полупроводниковый лазерный диод (LD), преобразующий электрический сигнал в световой поток.

Типичная мощность оптического передатчика  $\sim -5 \dots +5$  дБм

Главная отличительная черта между светодиодами и лазерными диодами - это **ширина спектра излучения**.



# Оптические приемники

Фотодиод с малой инерционностью,  
преобразующий светопоток в электрический сигнал.

Как правило, широкодиапазонные (1260 ... 1600 нм).  
В основном, фотодиоды разных типов на  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$

Типичная чувствительность  $\sim -15\dots-45$  дБм  
(чем выше частота, тем хуже чувствительность)

# Трансиверы

**Transceiver = Transmitter+Receiver,**  
излучатель+приемник в одном корпусе

Главный параметр:

**(оптический бюджет, Link Budget) =**  
**= (минимальная мощность излучателя, дБм) –**  
**– (предельная чувствительность приемника, дБм).**

Исходя из этого параметра можно рассчитать максимальную дальность передачи (без учета дисперсии)

Обычно максимальная дальность связи от 5 до 200 км.

Могут быть двуволоконными или  
одноволоконными двунаправленными **bi-directional**, «**BiDi**».

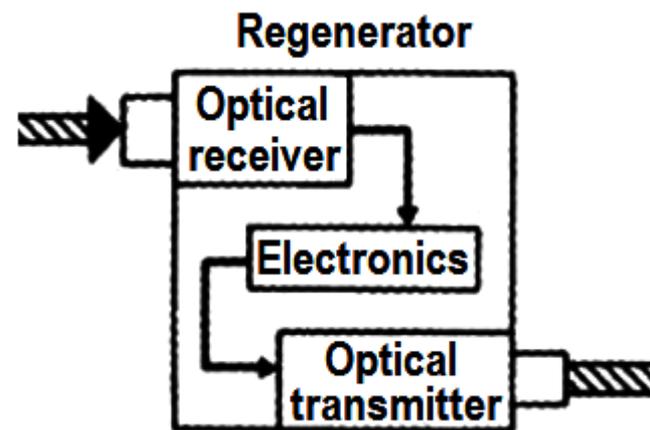
**BiDi** включаются в одно волокно, работают парами, напр.:  
тип А: излучатель – 1310 нм, приемник 1550 нм;  
тип В: излучатель – 1550 нм, приемник 1310 нм.

# Оптические усилители и регенераторы

## Повторитель =

= оптический приемник +  
+ электрический усилитель +  
+ оптический передатчик.

Если электрическое усиление сопровождается восстановлением формы (фронтов и длительностей) передаваемых импульсов до первоначальной, такой повторитель наз. **регенератором**.



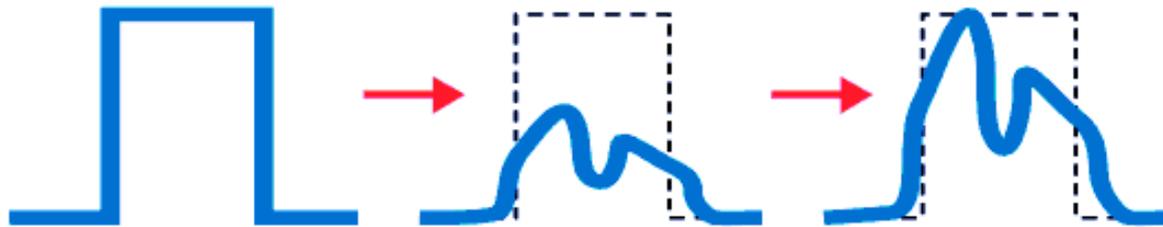
## Оптический усилитель

не осуществляет оптоэлектронного преобразования, а непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал.

На практике на один регенератор приходится несколько (5...10) оптических усилителей, последовательно расположенных через каждые 30...150 км.

# Оптические усилители и регенераторы

## Усиление

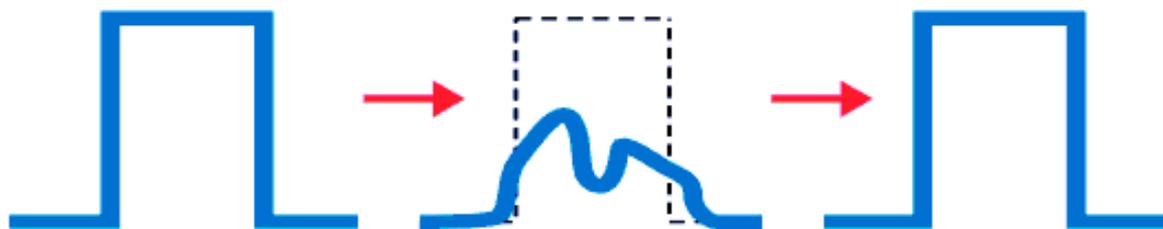


Исходный импульс

Полученный импульс

Усиленный импульс

## Регенерация



Исходный импульс

Полученный импульс

Восстановленный  
импульс

# Волоконно-оптические линии связи

- <https://skomplekt.com/solution/vols.htm/>
- [https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая\\_линия\\_передачи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптическая_линия_передачи)
- <https://iron-harry.ua/solution/vols.htm/>
- <https://www.tls-group.ru/services/inzhenernaya-infrastruktura-zdaniy/strukturirovannyye-kabelnye-sistemy/opt-set/>

# EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier

## Принцип действия

Если в среду попадает излучение с энергией фотона  $\Delta E_{21} = E_2 - E_1$ , то оно с равной вероятностью стимулирует переходы  $1 \rightarrow 2$  (поглощение этого фотона) и  $2 \rightarrow 1$  (излучение еще одного фотона).

Поэтому если электронов на уровне 1 больше, чем на 2 («нормальная населенность»,  $N_1 > N_2$ ), среда поглощает, а если на 2 больше, чем на 1 («инверсная населенность»,  $N_2 > N_1$ ) – среда усиливает.

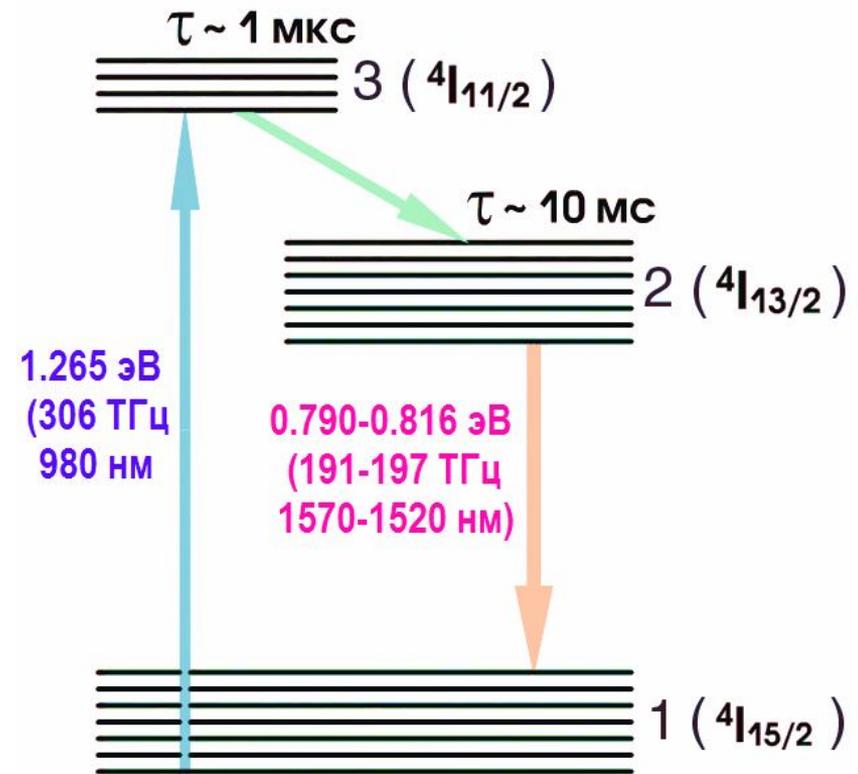


Схема уровней энергии ионов эрбия  $\text{Er}^{3+}$  в кварцевом стекле

# EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier

## Принцип действия (продолжение)

При термодинамическом равновесии  $N_2 = N_1 \exp(-\Delta E_{21}/kT) < N_1$ .

Для создания инверсной населенности среду облучают более коротковолновым излучением с энергией фотона  $E_3 - E_1$  («накачка»), которое, поглощаясь, переводит электроны из состояния 1 в возбужденное состояние 3.

Время жизни на уровне 3  $\tau_3 \approx 1$  мкс.

Затем электрон спонтанно релаксирует на уровень 2, где время жизни значительно дольше:  $\tau_2 \approx 10$  мс  $\sim 10^4 \tau_3$ .

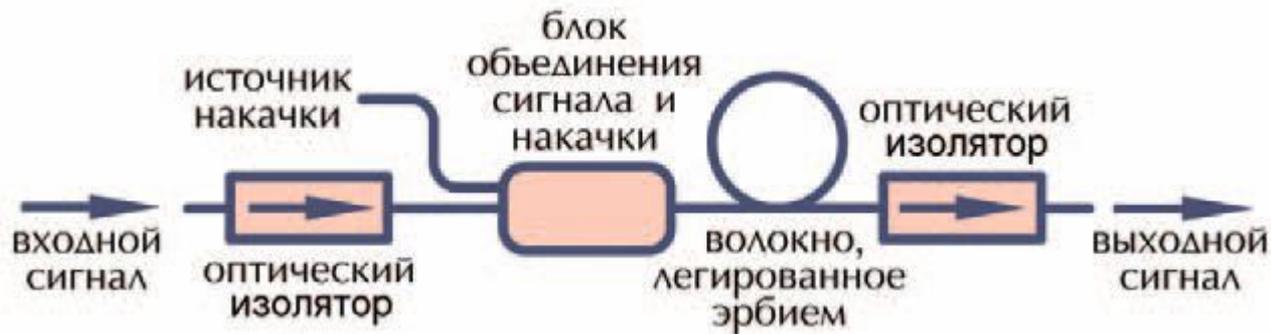
Если мощность накачки достаточно велика, то больше половины электронов с уровня 1 возбуждаются до состояния 3 и после скорой релаксации создадут инверсную населенность на уровнях 2 – 1.

# EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier

Рабочий диапазон EDFA 1530 ...1570 нм соответствует области минимальных оптических потерь кварцевых световодов



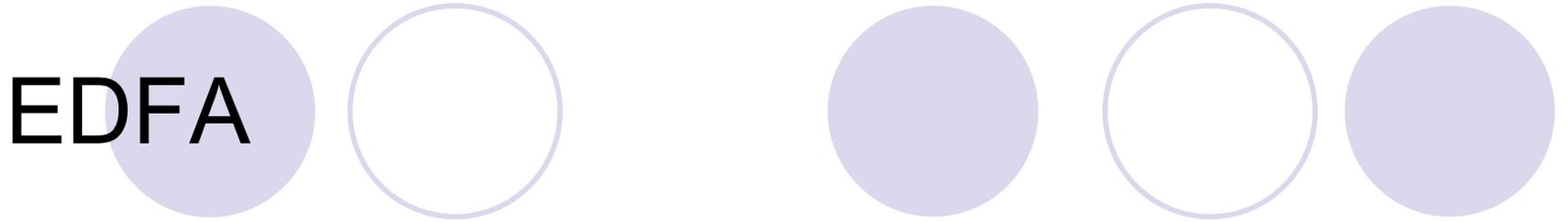
# EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier



EDFA усиливает непосредственно оптические сигналы, без их преобразования в электрические сигналы и обратно.

Может одновременно усиливать сигналы с различными длинами волн.

Коэффициент линейного усиления (малосигнального) – 30-40 дБ; мощность насыщения – до 500 мВт (+27дБм).



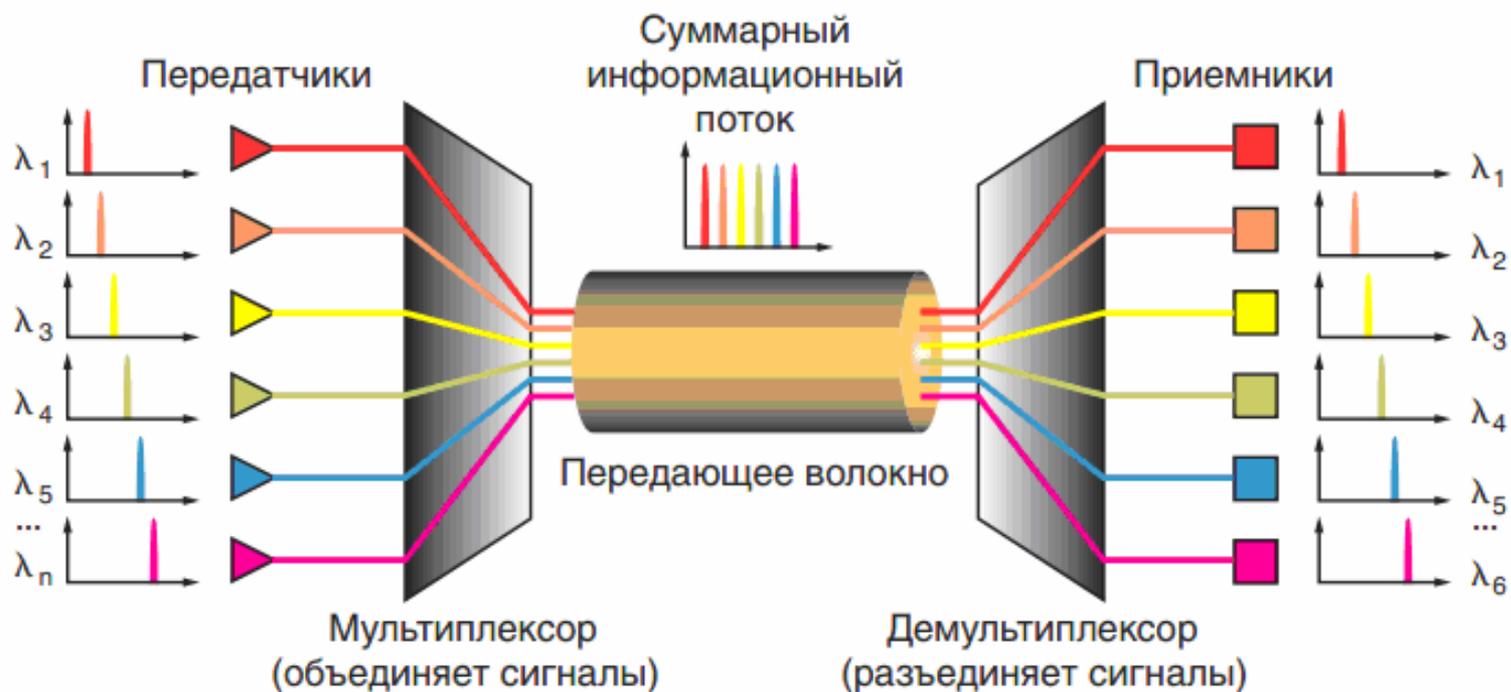
# EDFA

- <http://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/28.pdf>
- <https://kurs.znate.ru/docs/index-165726.html?page=2>

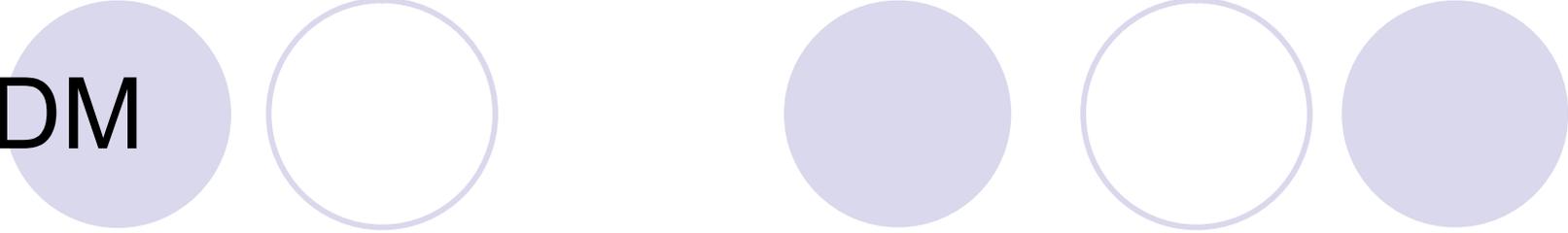
# WDM, Wavelength-division multiplexing

## Wavelength-division multiplexing

## Мультиплексирование по длинам волн



# WDM



## Функции WDM-системы:

**Генерирование сигнала.** Источник генерирует излучение, смодулированное как аналоговый сигнал, несущий цифровой сигнал.

**Комбинирование сигналов.** Мультиплексор направляет несколько световых потоков разных длин волн в одно волокно.

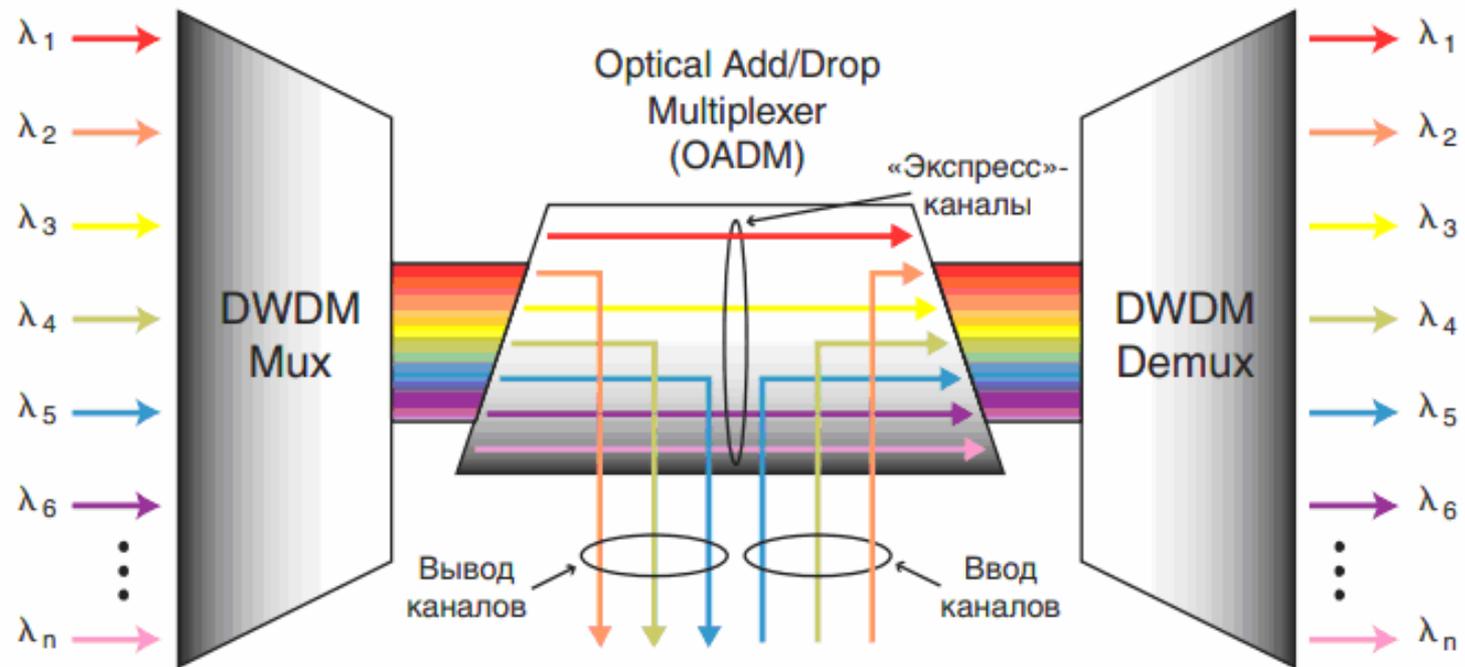
**Передача сигналов.** Может потребоваться усиление оптическими усилителями, которые усиливают сигнал на всех длинах волн одновременно, без преобразования в электрическую форму.

**Разделение полученных сигналов.** На стороне приемника сигнал разделяется на отдельные составляющие световые потоки разных длин волн. (Технически демультимплексирование намного сложнее, чем мультиплексирование);

**Прием сигналов.** Демультимплексированный сигнал принимается фотодетектором и преобразуется в электрическую форму.

# WDM

## Optical add-drop multiplexer (OADM) Оптический мультиплексор ввода/вывода

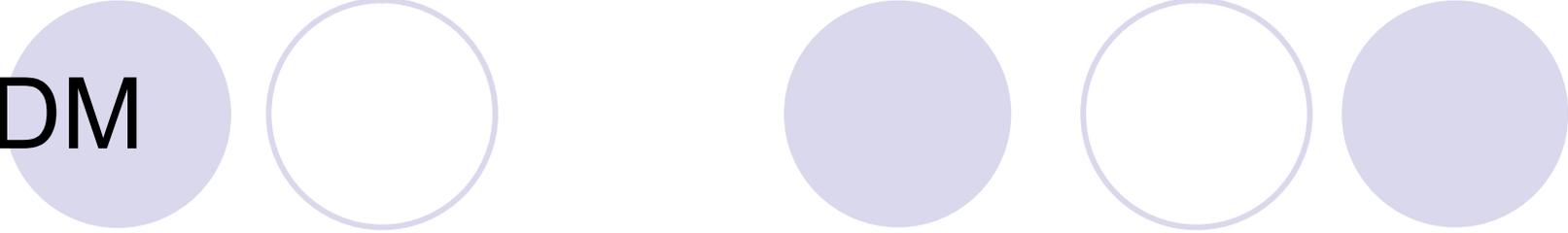


# WDM



## Основные случаи использования WDM-систем:

- городские и региональные оптические сети (Metropolitan Area Network, MAN);
- сеть строится в условиях дефицита оптического волокна (или высокой стоимости аренды волокна);
- требуется увеличить пропускную способность существующей сети;
- предоставление многочисленных волоконно-оптических услуг (коммутация световых потоков по запросу...);
- аренда «лямбды» – виртуального волокна.



# WDM

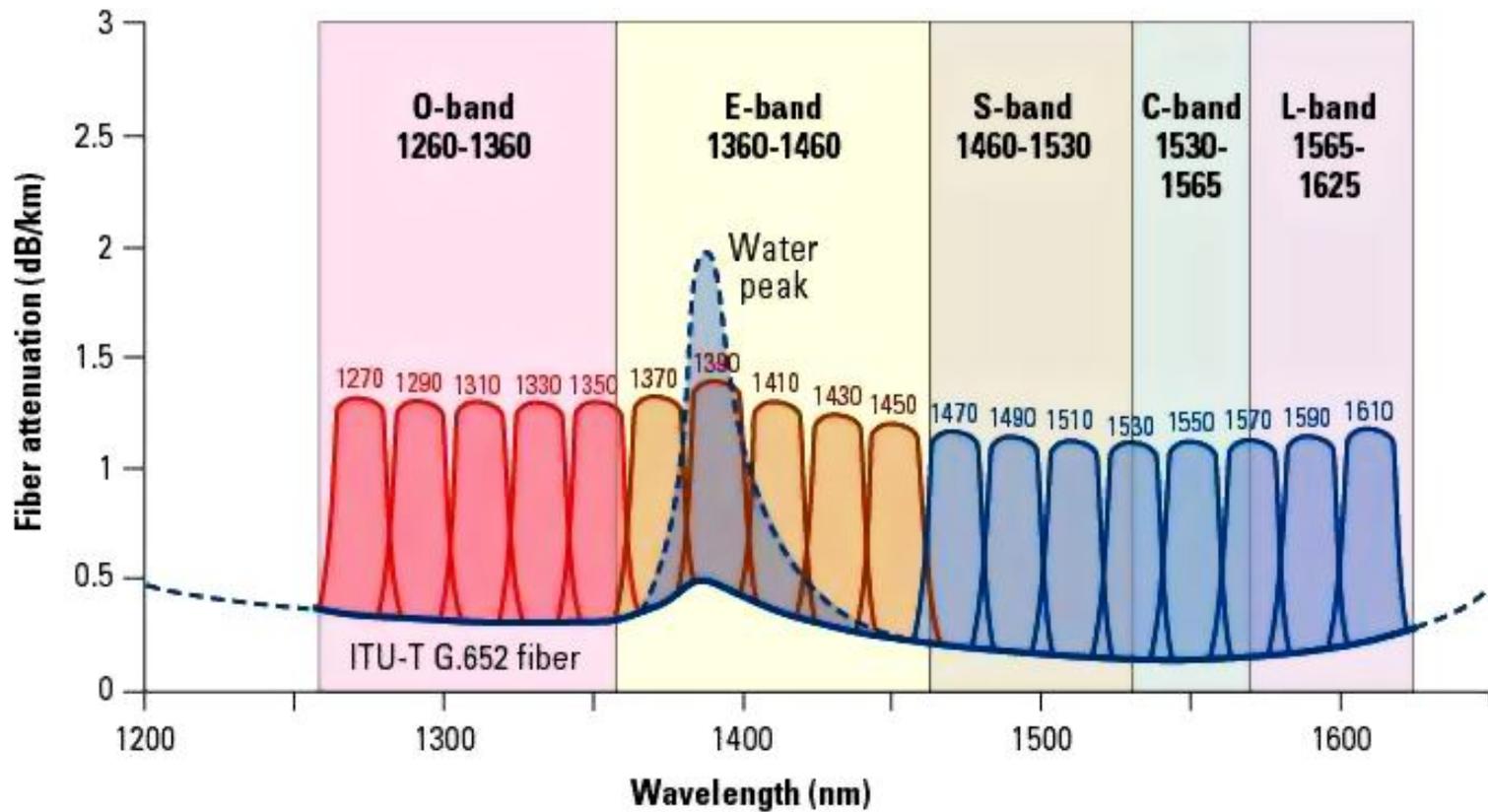
## **Coarse WDM, CWDM** **Разреженные WDM-системы**

18 оптических каналов в диапазоне от 1270 до 1610 нм с шагом 20 нм («сетка длин волн» или «волновой план»).

Источником излучения могут служить светодиоды.

# WDM

## CWDM wavelength grid as specified by ITU-T G.694.2

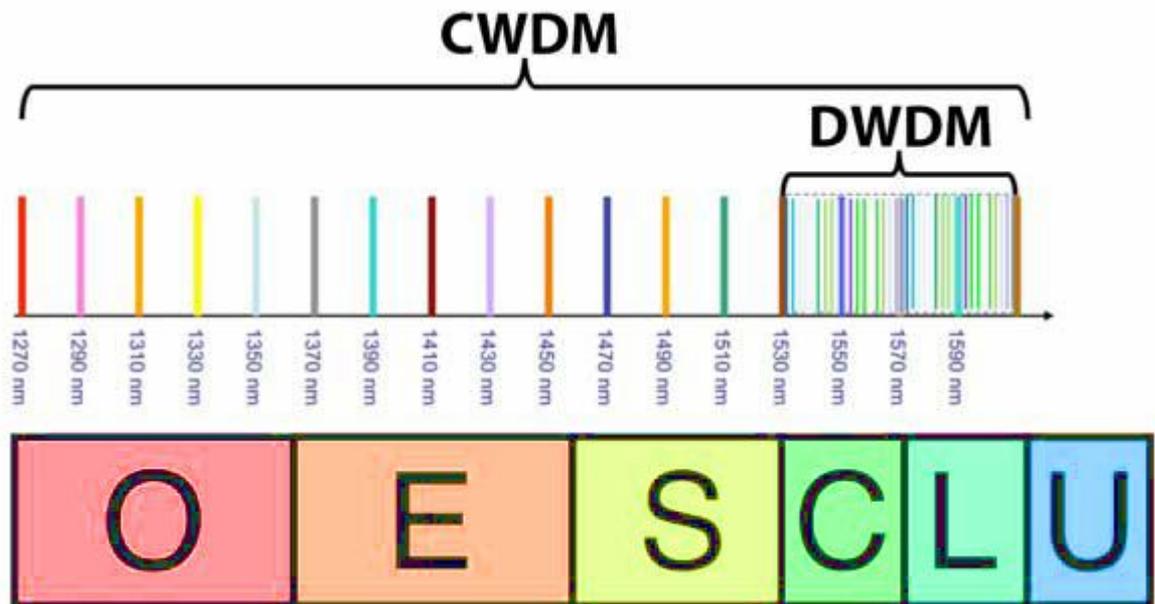


# WDM

## Dense WDM, DWDM Плотные WDM-системы

40 каналов с шагом 100 ГГц в окне прозрачности 1550 нм.

Оптимизированы  
под рабочий  
диапазон EDFA



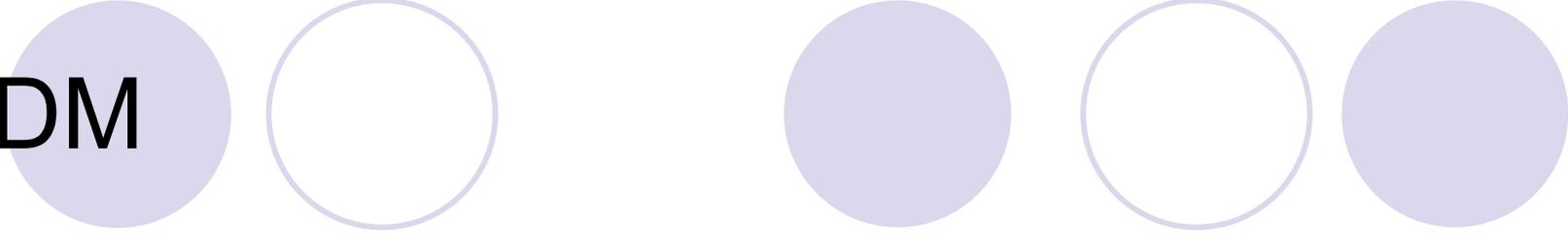
# WDM

## Частотный план DWDM с расстоянием между соседними каналами 100 ГГц

( $\lambda = c/f$ ,  $\Delta\lambda \approx 0.8$  нм, передатчик – одномодовый лазер)

Частота, ТГц	Длина волны, нм	Частота, ТГц	Длина волны, нм	Частота, ТГц	Длина волны, нм	Частота, ТГц	Длина волны, нм
196.1	1528.77						
196	1529.55	195	1537.39	194	1545.32	193	1553.33
195.9	1530.33	194.9	1538.18	193.9	1546.12	192.9	1554.13
195.8	1531.11	194.8	1538.97	193.8	1546.91	192.8	1554.94
195.7	1531.90	194.7	1539.76	193.7	1547.71	192.7	1555.74
195.6	1532.68	194.6	1540.55	193.6	1548.51	192.6	1556.55
195.5	1533.46	194.5	1541.35	193.5	1549.31	192.5	1557.36
195.4	1534.25	194.4	1542.14	193.4	1550.11	192.4	1558.17
195.3	1535.03	194.3	1542.93	193.3	1550.92	192.3	1558.98
195.2	1535.82	194.2	1543.73	193.2	1551.72	192.2	1559.79
195.1	1536.61	194.1	1544.52	193.1	1552.52	192.1	1560.60

# WDM



- <http://www.mlaxlink.ru/info/cwdm>
- <http://www.mlaxlink.ru/info/oadm>
- <http://www.mlaxlink.ru/info/dwdm>
- <http://ic-line.ua/wiki/cwdm-glava1>
- <https://habr.com/ru/post/113314/>

# Волоконно-оптические линии связи

## Преимущества

- широкая полоса пропускания (несущая  $\sim 10^{14}$  Гц);
- малое затухание светового сигнала ( $\sim 0,2$  дБ/км);
- низкий уровень шумов;
- долговечность;
- высокая помехозащищенность (от ЛЭП, электродвигателей, радиостанций...);
- информационная безопасность (невозможно прослушать);
- гальваническая развязка элементов сети (нет проблем с заземлением);
- взрыво- и пожаробезопасность;
- экономичность.

# Волоконно-оптические линии связи

## Недостатки

- сложность и дороговизна интерфейсного оборудования;
- дороговизна прецизионного монтажного оборудования, как следствие – и работ по монтажу и обслуживанию ВОЛС;
- хрупкость оптического волокна;
- сложность соединения в случае разрыва;
- требование специальной защиты волокна (от грызунов, грунтовых вод...).