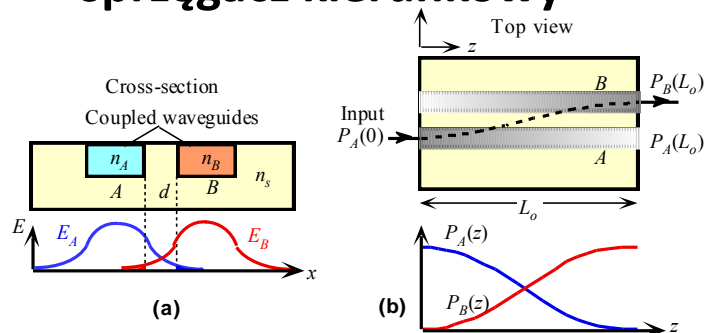


Elementy pasywne: rozgałęźniki, sumatory, sprzęgacze, multipleksery WDM

Zadania 1-3

Coupled Waveguide Devices – sprzęgacz kierunkowy



(a) Cross section of two closely spaced waveguides A and B (separated by d) embedded in a substrate. The evanescent field from A extends into B and vice versa. Note: n_A and $n_B > n_s$ (= substrate index).

(b) Top view of the two guides A and B that are coupled along the z -direction. Light is fed into A at $z = 0$, and it is gradually transferred to B along z . At $z = L_o$, all the light has been transferred to B . Beyond this point, light begins to be transferred back to A in the same way.

© 1999 S.O. Kasap, *Optoelectronics* (Prentice Hall)

Coupled Waveguide Devices – sprzęgacz kierunkowy

The principle of couplers, for both fused fiber and waveguide types, is the coupling of light. The equations of coupled waveguides are:

$$\frac{dA_0(z)}{dz} = -i\beta A_0(z) - i\chi A_1(z)$$

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -i\beta A_1(z) - i\chi A_0(z)$$

- where: A - wave amplitude
- β - propagation constant,
- χ - coupling coefficient.

Coupled Waveguide Devices – sprzęgacz kierunkowy

The solutions of coupled equations for $A_0(0)=1$ and $A_1(0)=0$ are:
The amplitude transmitted in fibers can be expressed as follow:

$$A_0(z) = \cos(\chi z) e^{i\beta z}$$

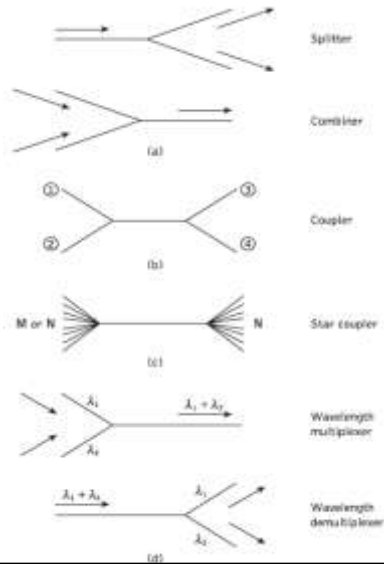
$$A_1(z) = -i \sin(\chi z) e^{i\beta z}$$

Thus the power flow in the guides is given by:

$$P_0(z) = \cos^2(\chi z) e^{-\alpha z}$$

$$P_1(z) = \sin^2(\chi z) e^{-\alpha z}$$

Elementy pasywne: rozgałęźniki, sumatory, sprzęgacze, multipleksery WDM



Sprzęgacz kierunkowy – parametry

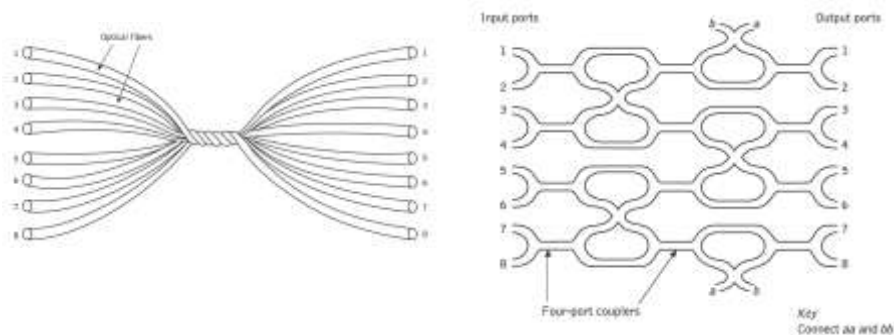
- Excess loss – straty wewnętrzne
$$L_E = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4}$$
- Insertion loss – straty wtrąceniowe
$$L_I = 10 \log \frac{P_1}{P_4}$$
- Directionality - kierunkowość
$$L_D = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$
- Split ratio – współczynnik podziału
$$SR = \left[\frac{P_3}{P_3 + P_4} \right] * 100\%$$

$$= \left[1 - \frac{P_4}{P_3 + P_4} \right] * 100\%$$

Zadanie 1

Oblicz parametry sprzęgacza kierunkowego L_E , L_I , L_D oraz SR dla następujących wartości zmierzonych mocy:

$P_1=60 \mu W$ (sygnał wejściowy); $P_2=0,004 \mu W$; $P_3=26 \mu W$; $P_4=27,5 \mu W$;
(P_1 i P_2 porty wejściowe, P_3 i P_4 porty wyjściowe)

Star coupler N*N

Rozgałęźnik M:N – parametry

- Splitting losses – straty podziału (star coupler) $L_S = 10 \log(N)$
- Excess loss – straty wewnętrzne (star coupler) $L_E = 10 \log \left[\frac{P_i}{\sum_1^N P_j} \right]$
- Total loss – straty całkowite $L_T = L_S + L_E$
- Insertion loss – straty wtrąceniowe $L_I = 10 \log(P_i/P_j)$

Zadanie 2

Oblicz straty podziału L_S idealnych ($L_S = L_T$) rozgałęźników:

a/ 1:16

b/ 1:32

c/ 1:64

Zadanie 3

Rozgałęźnik typu SC: 32*32; $P_i=1$ mW (moc doprowadzona do wejścia P_i) ; $P_j=0,014$ mW (moce wyjściowe, identyczne dla każdego z wyjść)

Oblicz parametry sprzęgacza SC 32*32: L_S , L_E , L_T , oraz L_I

Lab sieci PON

Optical frequency
zależność $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$

Optical frequency zależność $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$

Problem:

na analizatorze widma (i w **Waszych obliczeniach**) widmo jest w dziedzinie długości fal λ , a z drugiej strony równie często posługujemy się dziedziną częstotliwości f

Pytanie:

Jak wygląda zależność pomiędzy $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$ lub/ oraz $\Delta \lambda \rightarrow \Delta f$

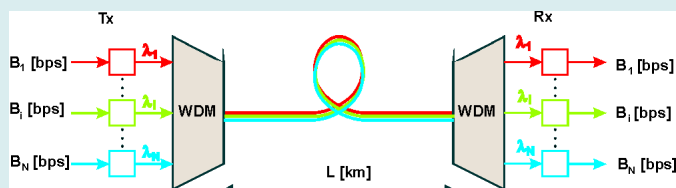
Pamiętamy, że:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Ale oczywiście:

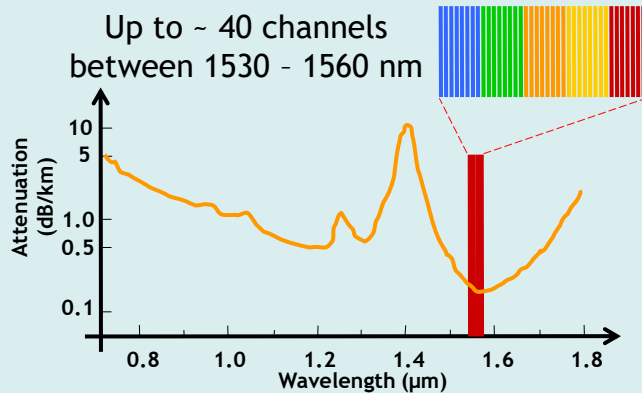
$$\Delta f \neq \frac{c}{\Delta \lambda} \quad !!!$$

Technologia WDM WDM technology



WDM Concepts

Dense WDM (DWDM)



Higher capacity, greater design challenges

5

Optical frequency zależność $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$

Problem I:

w standardzie ITU w III oknie, ($\lambda=1550$ nm), $\Delta f=100$ GHz,

Pytanie:

ile wynoszą odstęp w dziedzinie długości fali: $\Delta \lambda = ?$

(ITU-T, G.692, dopuszcza: $\Delta f=100$ GHz, $\Delta f=50$ GHz, $\Delta f=25$ GHz)

„Proste” wyprowadzenie zależności $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$:

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{c}{f_2} - \frac{c}{f_1} = -\frac{c \Delta f}{f^2}$$

Dla III okna dla środkowej długości fali (1550 nm) oraz skrajnych dla otrzymamy:

$$\Delta \lambda(1,550) = 0,8008 \text{ nm}$$

$$\Delta \lambda(1,530) = 0,7803 \text{ nm}$$

$$\Delta \lambda(1,565) = 0,8178 \text{ nm}$$

Optical frequency zależność $\Delta f \rightarrow \Delta \lambda$

Poprzednio otrzymaliśmy:

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{c}{f_2} - \frac{c}{f_1} = -\frac{c \Delta f}{f^2}$$

A teraz bardziej formalnie (obliczamy pochodną):

$$\frac{d\lambda}{df} = \left(\frac{c}{f} \right)' = -\frac{c}{f^2}$$

Stąd, ostatecznie (identyczny wzór jak wcześniej):

$$\Delta \lambda \approx -\frac{c \Delta f}{f^2}$$

Optical frequency zależność: $\Delta \lambda \rightarrow \Delta f$

Przykład II:

środkowa długość fali widma sygnału optycznego wynosi: $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$,
szerokość w dziedzinie długości fal: $\Delta \lambda = 1 \text{ nm}$,

Pytanie:

Ile wynosi (oblicz) szerokość w dziedzinie częstotliwości $\Delta f = ?$

Analogicznie:

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$$

$$df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

Lub:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{-c(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2} \approx -\frac{c \Delta \lambda}{\lambda^2}$$

$$\Delta f = 180 \text{ GHz}$$

Optical frequency

Przykład III:

pasmo II (O) i III (C) okna wyrażone w GHz

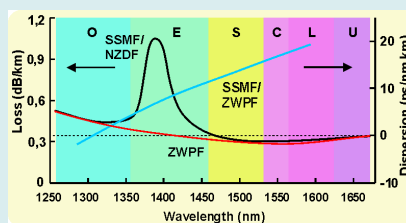
II window, λ : 1260-1360 nm, $\Delta\lambda=100$ nm, $\Delta f=?$

III window, λ : 1530-1565 nm, $\Delta\lambda=35$ nm, $\Delta f=?$

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{-c(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2} \approx -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

$$\Delta f(\text{II w}) = 18\,000 \text{ GHz}$$

$$\Delta f(\text{III w}) = 4\,000 \text{ GHz}$$



SPIS TREŚCI

1. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPONENTÓW I PRZYRZĄDÓW FOTONICZNYCH STOSOWANYCH W SIECIACH ŚWIATŁOWODOWYCH	3
1.1 Dielektryczne struktury okresowe – selektywne zwierciadła Bragga	5

1. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI KOMPONENTÓW I PRZYRZĄDÓW FOTONICZNYCH STOSOWANYCH W SIECIACH ŚWIATŁOWODOWYCH

1.1 Dielektryczne struktury okresowe – selektywne zwierciadła Bragga

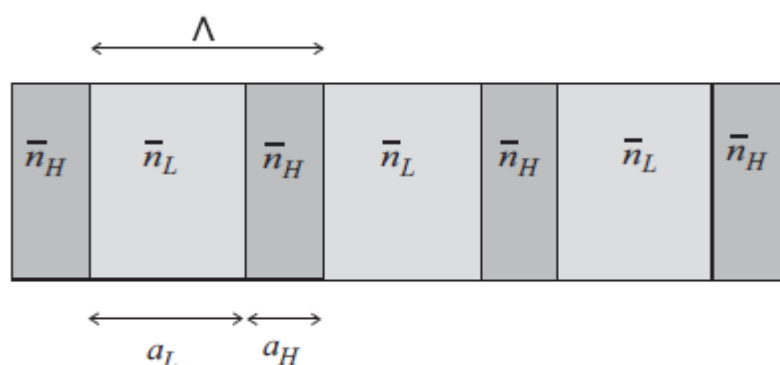
Zwierciadła Bragga składają się z wielu N warstw (obszarów) o na przemian niskim i wysokim współczynniku załamania. Zwykle wszystkie warstwy (obszary) posiadają rozmiar równy $\frac{1}{4}$ długości fali:

$$n_1 a_1 = n_2 a_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad A$$

Lub zgodnie z Rys A:

$$n_L * a_L = n_H * a_H = \frac{\lambda_0}{4} \quad A$$

Jest to warunek fazowej synchronizacji cząstkowych fal odbitych na kolejnych płaszczyznach nieciągłości współczynnika załamania.



Rys. A. Ilustracja struktury okresowej

Parametry struktury Bragga:

N – liczba okresów - number of periods

n_L – Dolna wartość współczynnika załamania - Low refractive index – **proponuję nie zmieniać**

n_H - Górna wartość współczynnika załamania High refractive index

a_L – grubość warstwy - thickness (nm)

a_H - grubość warstwy - thickness (nm)

$\Lambda = a_L + a_H$ – okres struktury- period of the structure

Struktury Bragga można uzyskać stosując różnorodne technologie: epitaksja, napylenie (sputtering) cienkich warstw, implantacja jonów i wreszcie naświetlanie.

Bardzo istotnym parametrem siatki Bragga jest **kontrast współczynnika załamania**:

$$\Delta = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max}} \quad B$$

Struktury o dużym kontraście najczęściej realizowane są metodą epitaksji lub sputteringu. Warstwy tego typu znajdują bardzo szerokie zastosowanie w realizacji dielektrycznych zwierciadeł, warstw antyrefleksyjnych, a także selektywnych elementów odbijających w laserach półprzewodnikowych typu VCSEL.

Niski kontrast uzyskiwany przez naświetlanie jest powszechnie stosowany w światłowodowych strukturach Bragga: filtrach światłowodowych, multiplexerach, krotnicach typu OADM, a także kompensatorach dyspersji chromatycznej.

Stosowany w obliczeniach model bazuje na formalizmie macierzy transmitancyjnych obszarów o jednorodnym współczynniku załamania i spektralną charakterystykę odbicia $R(\lambda)$ można przedstawić następująco:

$$R = \frac{|c|^2}{|c|^2 + \left(\frac{\sin K\Lambda}{\sin NK\Lambda}\right)^2}$$

Gdzie:

$$c = \frac{i}{2} e^{ia_2 k_2} \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(a_1 k_1)$$

$$\Lambda = a_1 + a_2$$

$$k_i^2 = \left(\frac{n_i \omega}{c} \right)^2$$

Obliczenia przeprowadzono dla zwierciadeł o zróżnicowanym kontraście współczynnika załamania oraz różnej liczby okresów N.

Wyniki symulacji dla kontrastu wynoszącego 35% pokazano na Rys 1.2 – 1.5.

Program Bragg an.m. Determines spectrum of reflectivity of a Bragg mirror for TE mode using an analytical method

```
% function bragg_mirror

clear all
N = 2000;
n_L = 1.45;
n_H = 1.46;
a_L = 257.226;
a_H = 255.476;

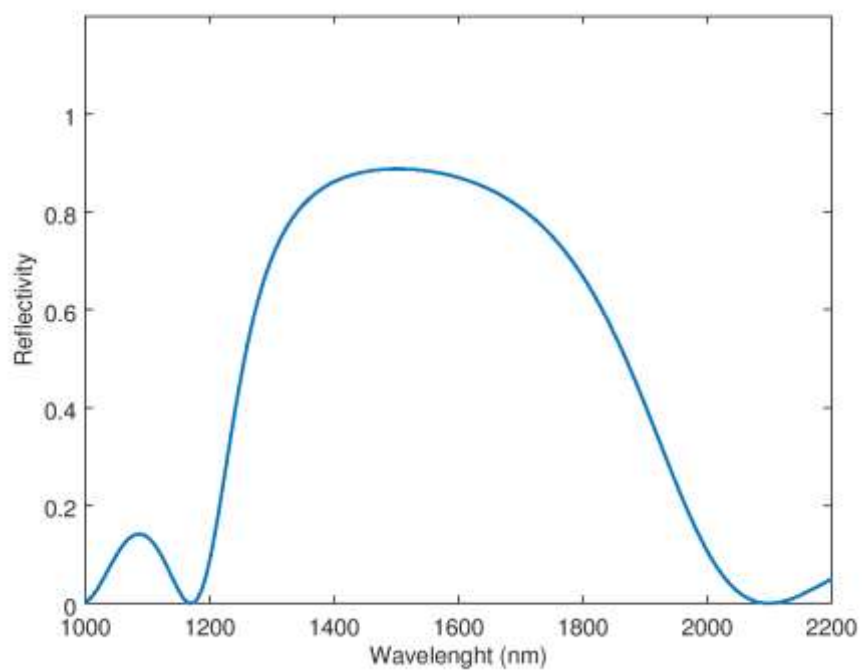
Lambda = a_L + a_H;
lambda = 1000:0.1:2200;

k_L = 2*pi*n_L./lambda;
k_H = 2*pi*n_H./lambda;

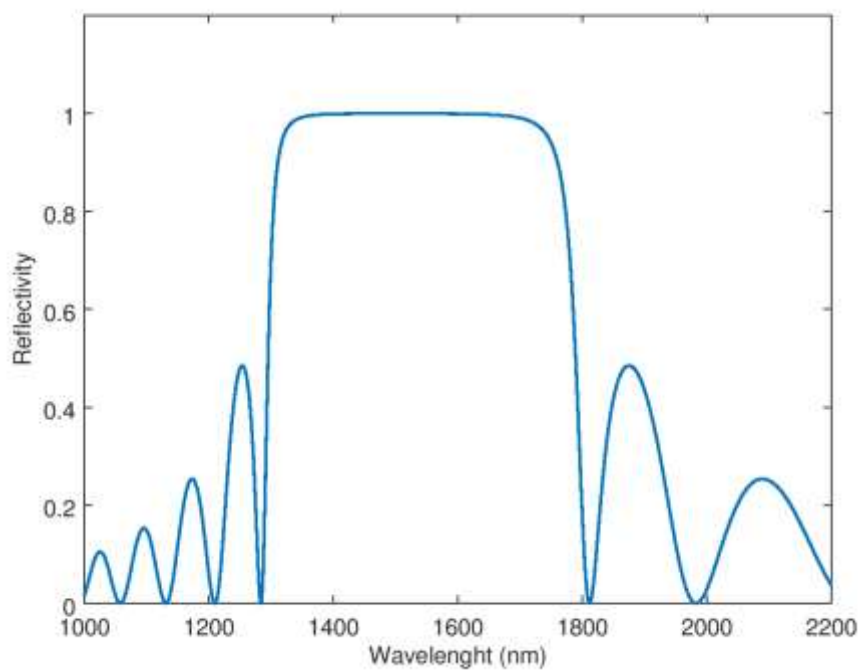
a = exp(1i*a_H*k_H) .* (cos(k_L*a_L)+(1i/2) * (k_H./k_L+k_L./k_H) .*
sin(k_L*a_L));
d = exp(-1i*a_H*k_H) .* (cos(k_L*a_L)-(1i/2) * (k_H./k_L+k_L./k_H) .*
sin(k_L*a_L));
b = exp(-1i*a_H*k_H) .* ((1i/2)*(k_L./k_H - k_H./k_L) .* sin(k_L*a_L));
c = exp(1i*a_H*k_H) .* ((1i/2)*(k_H./k_L - k_L./k_H) .* sin(k_L*a_L));

K = (1/Lambda)*acos((a+d)/2);
tt = (sin(K*Lambda)./sin(N*K*Lambda)).^2;
denom = abs(c).^2 + tt;
R = abs(c).^2 ./ denom;
plot(lambda, R, 'LineWidth', 1.5);
axis([1000 2200 0 1.2]);
xlabel('Wavelength (nm)', 'FontSize', 14);
ylabel('Reflectivity', 'FontSize', 14);
set(gca, 'FontSize', 14);
% pause
% close all
% display(max(R));
% end
```

PRZYKŁADOWE WYNIKI

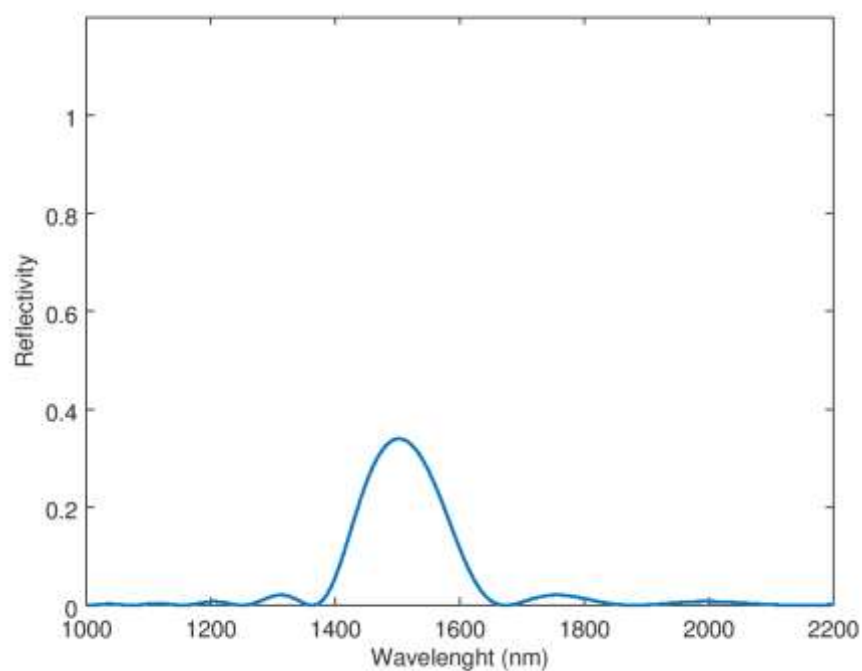


Rys. 1.2 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=35\%$, $N=4$

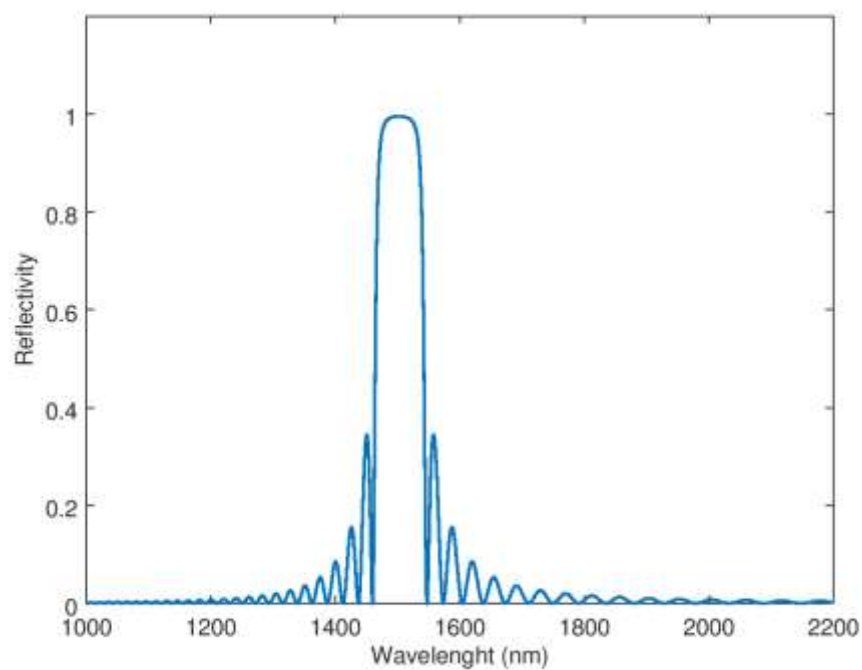


Rys. 1.4 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=35\%$, $N=10$

Wyniki symulacji dla kontrastu wynoszącego 6.5% pokazana Rys 1.6 – 1.9.

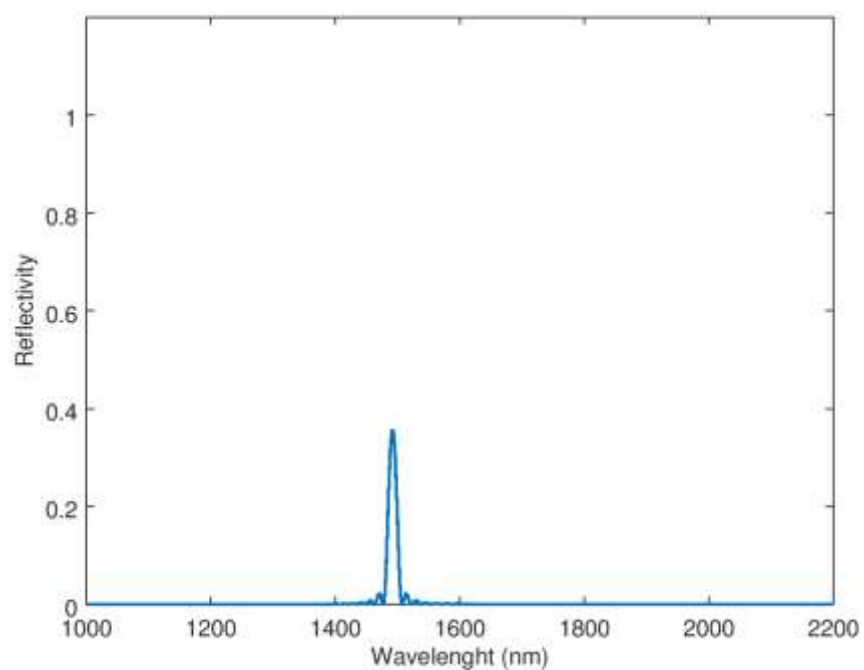


Rys. 1.6 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=6.5\%$, $N=10$

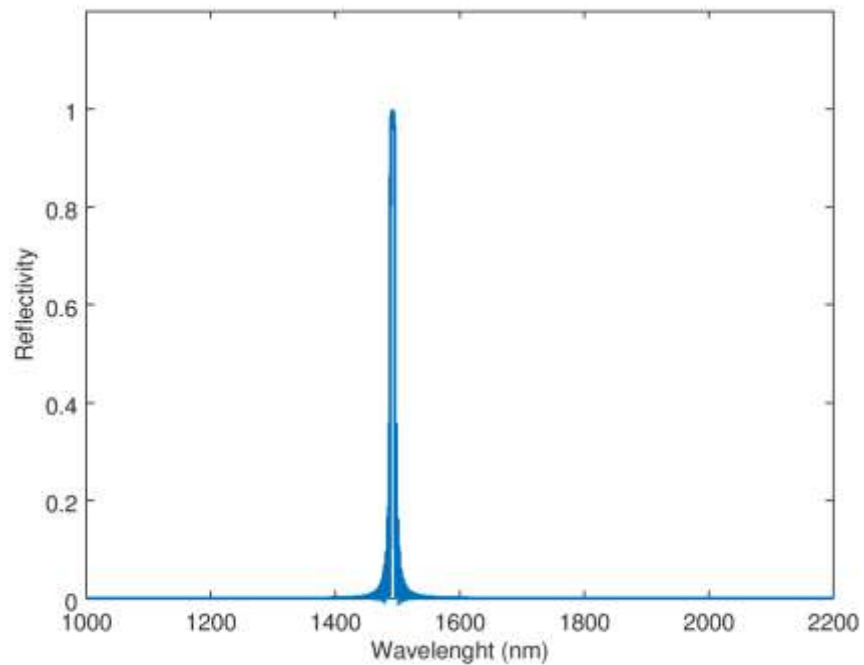


Rys. 1.7 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=6.5\%$, $N=50$

Wyniki symulacji dla kontrastu wynoszącego 0.68% pokazano na Rys 1.15 – 1.19.



Rys. 1.15 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=0.68\%$, $N=100$



Rys. 1.17 Charakterystyka spektralna zwierciadła, $\Delta=0.68\%$, $N=500$

SELECTED APPLICATIONS OF PERIODICAL STRUCTURES

Dielectric Mirrors

https://www.rp-photonics.com/dielectric_mirrors.html

Bragg Mirrors

https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html

Applications:

Laser dielectric mirrors, VCSEL mirrors (https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html), DBR LD distributed Bragg reflector or DFB LD: distributed feedback laser diodes. Thin-film band-pass filters & multiplexers for fiber transmission systems

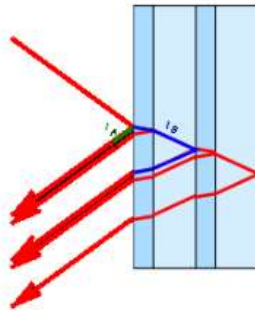
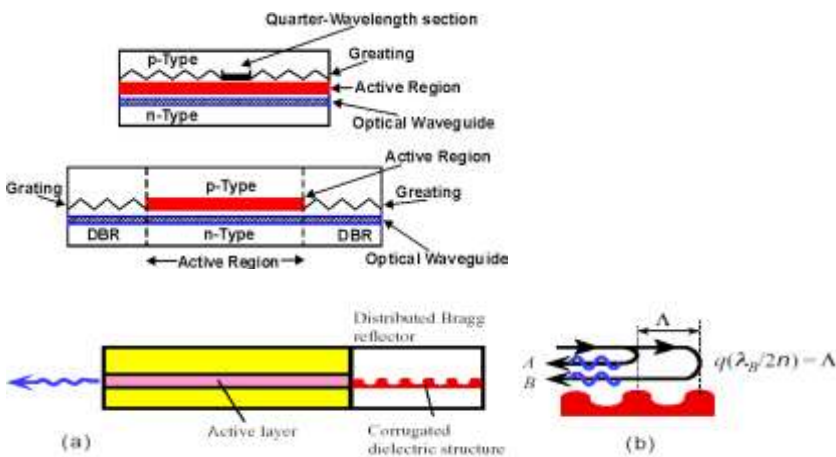


Fig. B



(a) Distributed Bragg reflection (DBR) laser principle. (b) Partially reflected waves at the corrugations can only constitute a reflected wave when the wavelength satisfies the Bragg condition. Reflected waves A and B interfere constructive when $q(\lambda_B/2n) = \Lambda$.

Fig. D'

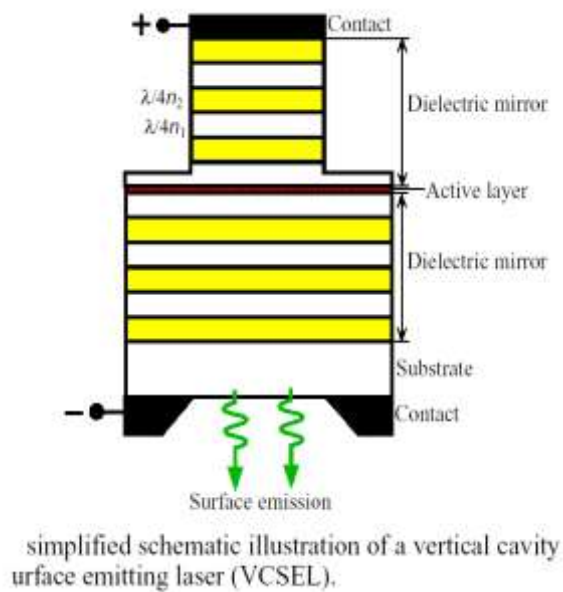


Fig. B'

Fiber Bragg Gratings

https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html

https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating

Applications:

Fiber band-pass filters, stop-band, equalization filters, OADM

https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer

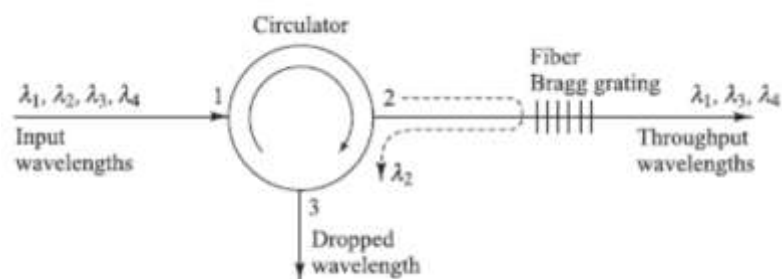


Fig. C

**Dielectric periodical structures – selective
Bragg reflectors
applications in fiber optic telecommunications**

IMPORTANT & PRACTICAL REFERENCES

- A** **DWDM ITU channels in an overview (ITU-T G.694.1)**
<https://www.flexoptix.net/en/dwdm-channels/>
- B** **G.694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid**
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>
- C** **Dielectric Mirrors** https://www.rp-photonics.com/dielectric_mirrors.html
- D** **Bragg Mirrors** https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html
- E** **Laser dielectric mirrors, VCSEL mirrors** (https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html)
- F** **DBR LD** [distributed Bragg reflector](#)
- G** **DFB LD:** [distributed feedback laser diodes](#)
- H** **Fiber Bragg Gratings** https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html
- I** **Fiber Bragg Gratings** https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating
- J** **Fiber band-pass filters, stop-band, equalization filters, OADM**
https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer

Parameters to be optimized in all tasks (Fig. A):

N - number of periods
n_L - Low refractive index
n_H - High refractive index
a_L - thickness (nm)
a_H - thickness (nm)
Lambda = a_L + a_H - period of the structure

GROUP I

Design Fiber Bragg Grating band-pass filter (Fig. C).

Central wavelength: channel 34 -> Ref. A

Bit rate = 10 Gbps

Assume that: n_L=1.5 (Eq. A', Fig. A), Δn<1.3% (Eq. B)

GROUP II

Design Optical Add Drop Multiplexer (OADM) (Fig. C).

Operating at two wavelength: channel 32nd and 34th -> Ref. A

Assume that: n_L=1.5 (Eq. A', Fig. A), Δn<1.3% (Eq. B)

GROUP III

Design VCSEL dielectric mirrors for singlemode laser operation around 1550 nm (Fig. B')

Effective laser cavity length L_{eff}=20 μm -> FSR_{eff}=c/(2n_LL)

Assume that: n_L=3.6 (Eq. A', Fig. A), Δn<35% (Eq. B), N<30, R>70% (R-mirror refl. coefficient)

GROUP VI

Design DBR Laser Diode dielectric mirrors for singlemode laser operation around 1550 nm (Fig. D')

Effective laser cavity length L=200 μm -> FSR_{eff}=c/(2n_HL)

Assume that: n_H=3.6 (Eq. A', Fig. A), Δn<7% (Eq. B), R>50% (R-mirror refl. coefficient)

Parameters to be optimized in all tasks (Fig. A):

N - number of periods
 n_L - Low refractive index
 n_H - High refractive index
 a_L - thickness (nm)
 a_H - thickness (nm)
 $\Lambda = a_L + a_H$ - period of the structure

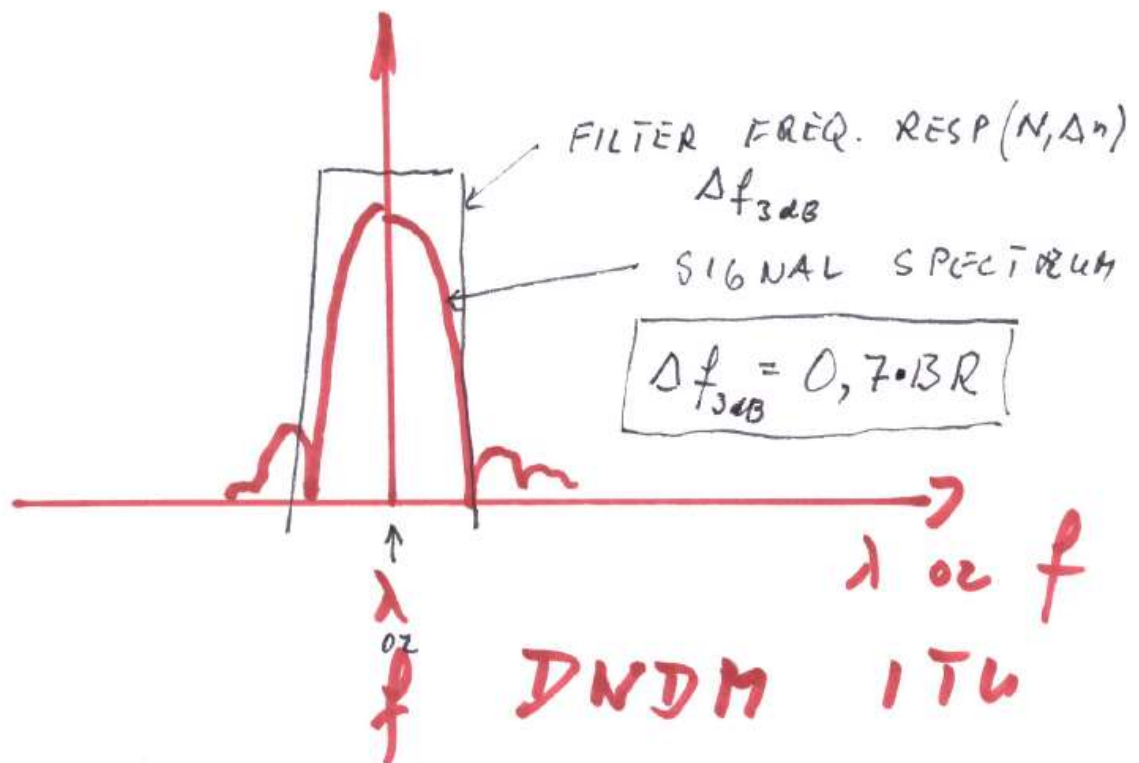
GROUP I

Design Fiber Bragg Grating band-pass filter (Fig. C).

Central wavelength: channel 34 -> Ref. A

Bit rate = 10 Gbps

Assume that: $n_L=1.5$ (Eq. A', Fig. A), $\Delta n < 1.3\%$ (Eq. B)



Parameters to be optimized in all tasks (Fig. A):

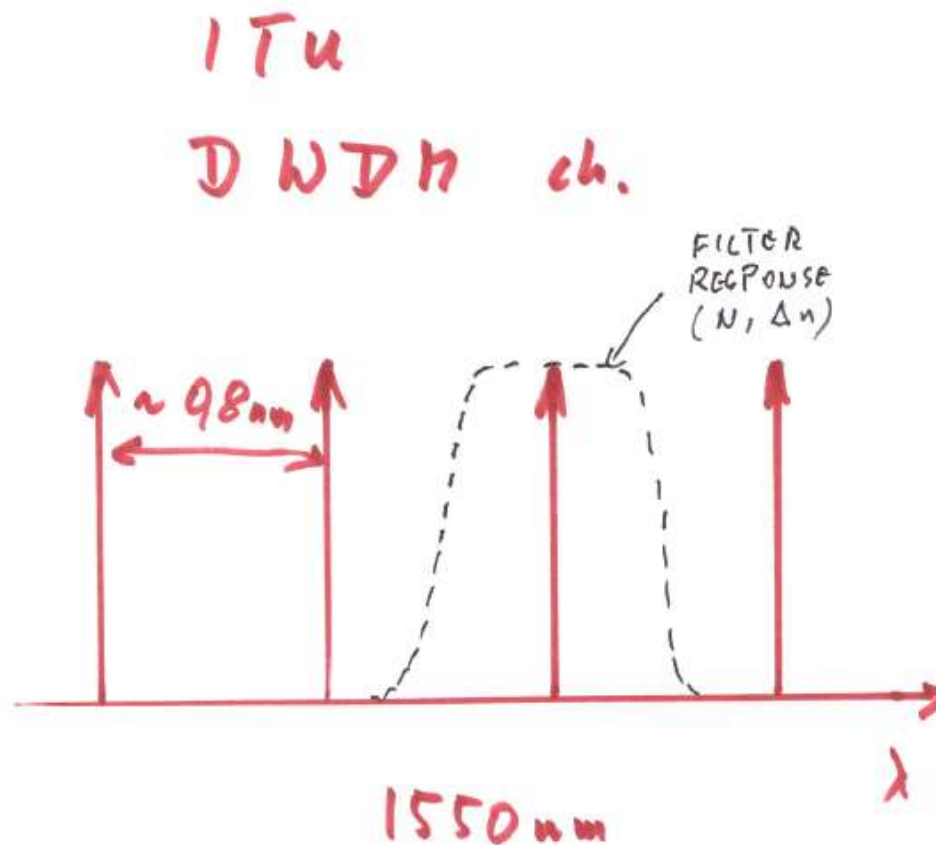
N - number of periods
 n_L - Low refractive index
 n_H - High refractive index
 a_L - thickness (nm)
 a_H - thickness (nm)
 $\lambda = a_L + a_H$ - period of the structure

GROUP II

Design Optical Add Drop Multiplexer (OADM) (Fig. C).

Operating at two wavelength: channel 32nd and 34th -> Ref. A

Assume that: $n_L=1.5$ (Eq. A', Fig. A), $\Delta n < 1.3\%$ (Eq. B)



Parameters to be optimized in all tasks (Fig. A):

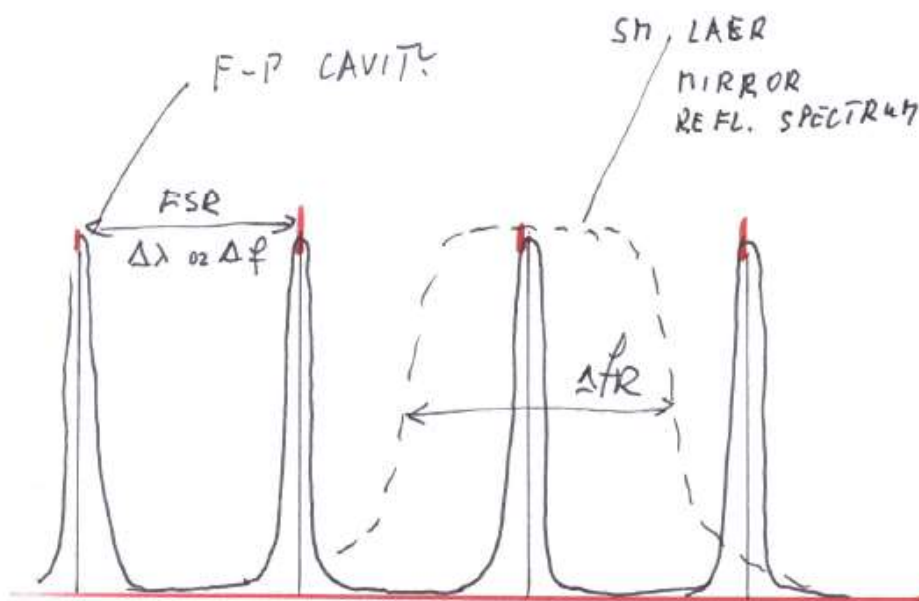
N - number of periods
 n_L - Low refractive index
 n_H - High refractive index
 a_L - thickness (nm)
 a_H - thickness (nm)
 $\lambda = a_L + a_H$ - period of the structure

GROUP III

Design VCSEL dielectric mirrors for singlemode laser operation around 1550 nm (Fig. B')

Effective laser cavity length $L_{\text{eff}} = 20 \mu\text{m} \rightarrow \text{FSR}_{\text{eff}} = c / (2n_L L)$

Assume that: $n_L = 3.6$ (Eq. A', Fig. A), $\Delta n < 35\%$ (Eq. B), $N < 30$, $R > 70\%$ (R-mirror refl. coefficient)



$$\Delta f_R < \text{FSR}(L, n)$$

Parameters to be optimized in all tasks (Fig. A):

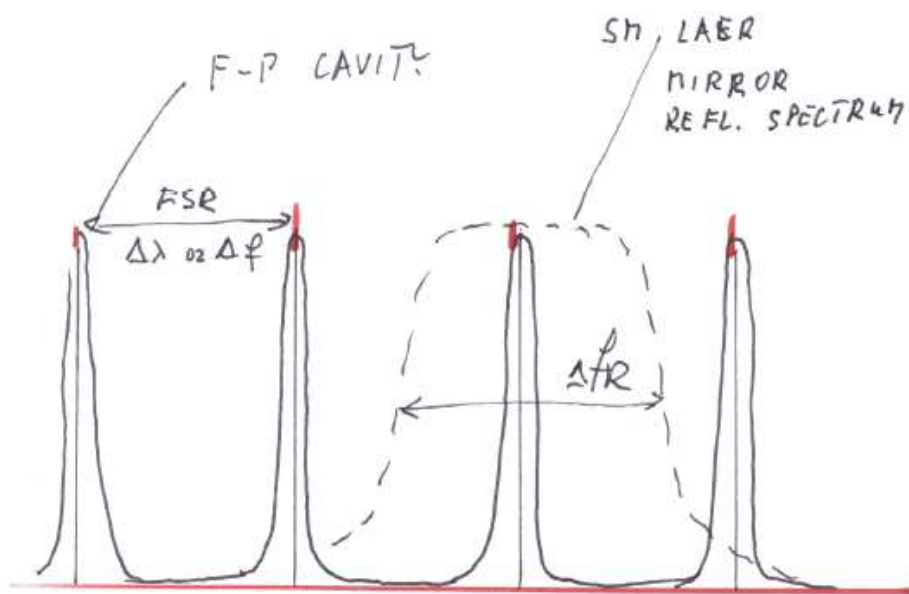
N - number of periods
 n_L - Low refractive index
 n_H - High refractive index
 a_L - thickness (nm)
 a_H - thickness (nm)
 $\lambda = a_L + a_H$ - period of the structure

GROUP VI

Design DBR Laser Diode dielectric mirrors for singlemode laser operation around 1550 nm (Fig. D')

Effective laser cavity length $L=200\text{ }\mu\text{m}$ $\rightarrow FSR_{\text{eff}}=c/(2n_H L)$

Assume that: $n_H=3.6$ (Eq. A', Fig. A), $\Delta n < 7\%$ (Eq. B), $R > 50\%$ (R-mirror refl. coefficient)



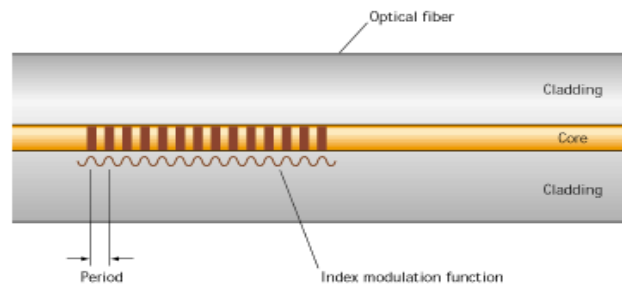
$$\Delta f_R < FSR(L, n)$$

Dielectric periodical structure – selective Bragg reflectors (Fiber Bragg grating filter)

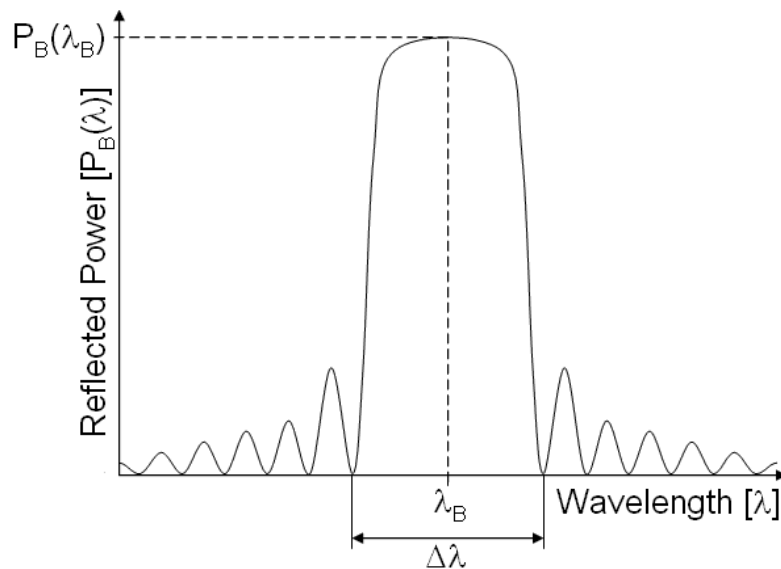
Fiber Bragg gratings are commonly used in optical communication systems. A grating pattern is formed by exposing of a photosensitive fiber by the intensive ultraviolet pattern. Light reflects from the grating when the grating fringe satisfies Bragg conditions:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n}$$

where: Λ - grating period, λ – free space wavelength, n – refractive index.



Fiber Bragg grating filter



FBG reflected power as a function of wavelength - "Fbg2". Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikipedia-
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fbg2.GIF#/media/File:Fbg2.GIF>

Bragg reflectors – theory of operation

The Bragg mirror, also known as the Bragg reflector, consists of identical layers of dielectrics with high and low values of refractive indices. The main interest in fabricating such structures is that they have extremely high reflectivities at optical and infrared frequencies. They are important elements of VCSELs where high reflectivity and bandwidth are required. A typical structure forming Bragg mirror consists of N layers of dielectrics

with refractive indices n_L (low refractive index) and n_H (high refractive index). The ratio of those values, the so-called contrast ratio, plays an important role.

The structure is known as a quarter-wave dielectric stack, which means that the optical thicknesses are quarter-wavelength long; that is:

$$n_1 a_1 = n_2 a_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad \text{Eq. A}$$

or (Fig. A):

$$n_L * a_L = n_H * a_H = \frac{\lambda_0}{4} \quad \text{Eq. A'}$$

Bragga reflectors can be obtain using different technologies: epitaxial layers, sputtering, ion implantation and optical exposition.

One of the most important feature of optical Bragg grating is optical contrast of refractive index:

$$\Delta = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{max}} \equiv \frac{n_H - n_L}{n_H} \quad \text{Eq. B}$$

High contrast can be obtained by epitaxial deposition or sputtering. This kind of structures have a wide applications: antireflection layers, optical mirrors, selective structures of VCSEL SO₂LD.

On the other hand low contrast is useful for the range of fiber based devices: fiber filters, multiplexers, OADM's and chromatic dispersion compensators. Low contrast can be obtained by interference pattern exposition or by using photolithographic mask.

Using transfer matrix approximation of periodical structures the spectral characteristics of reflection $R(\lambda)$ can be expressed by the following equation:

$$R = \frac{|c|^2}{|c|^2 + \left(\frac{\sin K \Lambda}{\sin N K \Lambda} \right)^2}$$

Where:

$$c = \frac{i}{2} e^{i a_2 k_2} \left(\frac{k_2}{k_1} - \frac{k_1}{k_2} \right) \sin(a_1 k_1)$$

$$\Lambda = a_1 + a_2$$

$$k_i^2 = \left(\frac{n_i \omega}{c} \right)^2$$

Program listing: Bragg reflection determines spectrum of reflectivity of a Bragg mirror for TE mode using an analytical method

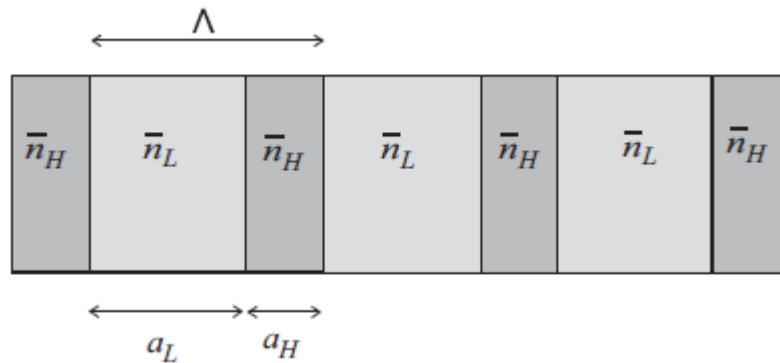


Fig. A. Illustration of a seven-layer dielectric (Bragg) mirror; shown are $N = 3$ periods.

Design parameters:

N - number of periods

n_L - Low refractive index

n_H - High refractive index

a_L - thickness (nm)

a_H - thickness (nm)

$\Lambda = a_L + a_H$ - period of the structure

```
% function bragg_mirror
clear all
N = 2000;
n_L = 1.45;
n_H = 1.46;
a_L = 257.226;
a_H = 255.476;
Lambda = a_L + a_H;
lambda = 1000:0.1:2200;
k_L = 2*pi*n_L./lambda;
k_H = 2*pi*n_H./lambda;
a = exp(1i*a_H*k_H) .* (cos(k_L*a_L) + (1i/2) * (k_H./k_L + k_L./k_H) .*
sin(k_L*a_L));
d = exp(-1i*a_H*k_H) .* (cos(k_L*a_L) - (1i/2) * (k_H./k_L + k_L./k_H) .*
```

```

sin(k_L*a_L));
b = exp(-1i*a_H*k_H) .* ((1i/2)*(k_L./k_H - k_H./k_L) .* sin(k_L*a_L));
c = exp(1i*a_H*k_H) .* ((1i/2)*(k_H./k_L - k_L./k_H) .* sin(k_L*a_L));
K = (1/Lambda)*acos((a+d)/2);
tt = (sin(K*Lambda)./sin(N*K*Lambda)).^2;
denom = abs(c).^2 + tt;
R = abs(c).^2 ./ denom;
plot(lambda, R, 'LineWidth', 1.5);
axis([1000 2200 0 1.2]);
xlabel('Wavelength (nm)', 'FontSize', 14);
ylabel('Reflectivity', 'FontSize', 14);
set(gca, 'FontSize', 14);
% pause
% close all
% display(max(R));
% end

```

SELECTED APPLICATIONS OF PERIODICAL STRUCTURES

Dielectric Mirrors

https://www.rp-photonics.com/dielectric_mirrors.html

Bragg Mirrors

https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html

Applications:

Laser dielectric mirrors, VCSEL mirrors (https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html), DBR LD [distributed Bragg reflector](#) or DFB LD: [distributed feedback laser diodes](#). Thin-film band-pass filters & multiplexers for fiber transmission systems

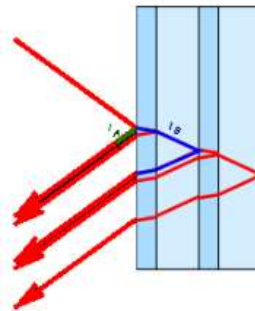


Fig. B

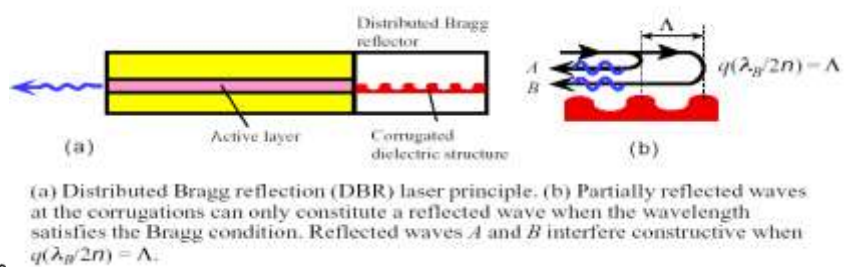
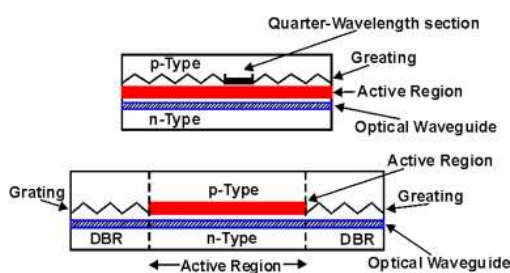
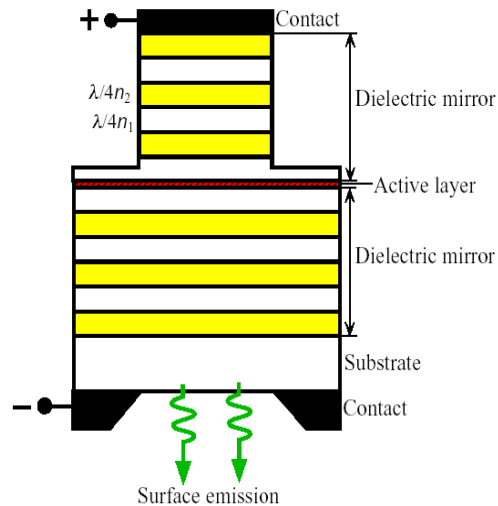


Fig. D'



simplified schematic illustration of a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL).

Fig. B'

Fiber Bragg Gratings

https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html

https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating

Applications:

Fiber band-pass filters, stop-band, equalization filters, OADM

https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer

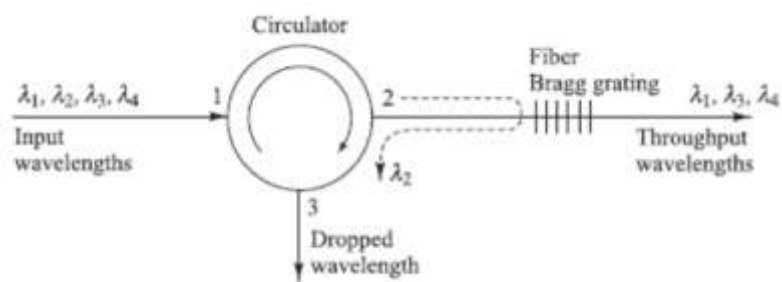
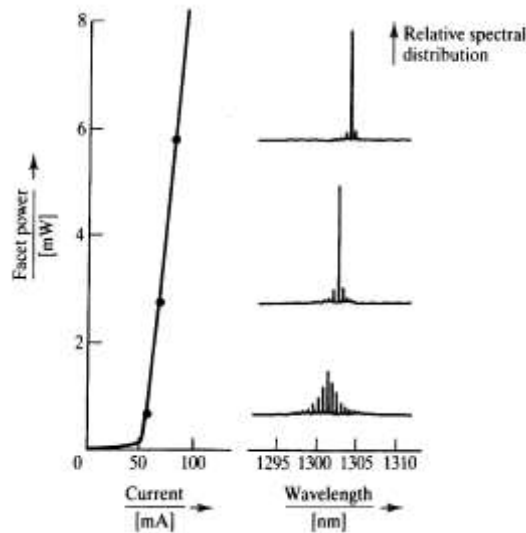


Fig. C

Semiconductor laser diodes

The semiconductor lasers diode structure is analogous to LED. To obtain laser operation it is necessary to realize an inversion of population and positive optical feedback. The inversion of population in the active region may be obtained by the intensive injection of electrons and holes. The active amplification area is located in a resonant cavity.

Semiconductor lasers are threshold devices. For the currents below the threshold, the spontaneous emission is a dominating process. In this region the laser acts as a LED. Exceeding threshold value stimulated emission will dominate and a laser operation occurs.



Evolution of lasing spectrum for different current values.

Optical power above threshold may be expressed by:

$$P_o = \frac{\tau_{ph} \eta S}{e d h \nu} (J - J_{th})$$

where: τ_{ph} – proton lifetime
 η - quantum efficiency,
 e – electron charge,
 d – recombination area thickness,
 S – laser cross section,
 J – junction current density,
 J_{th} – threshold current density.

Lasing wavelength is determined by the bandgap of semiconductor material (amplification bandwidth) and by the selective properties of the resonant cavity.

For Fabry-Perot lasers phase conditions satisfy following equation:

$$L = m \frac{\lambda}{2n}$$

where: - m mode number (integer value), L – cavity length.

Thus, Fabry-Perot lasers are inherently multimode devices. The width of the longitudinal mode can be expressed as:

$$\Delta \nu P_o = \frac{K}{L^2}$$

where: K laser constant.

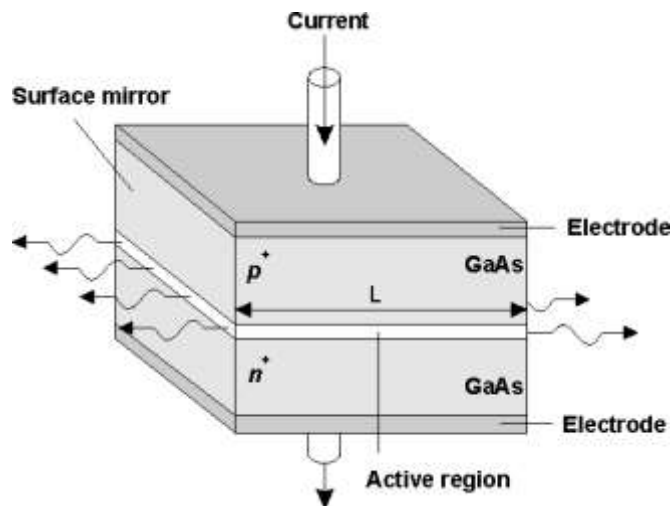
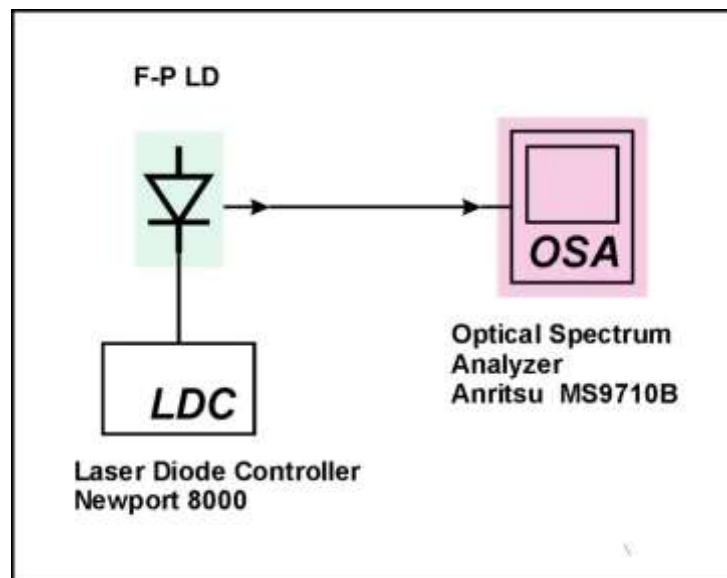


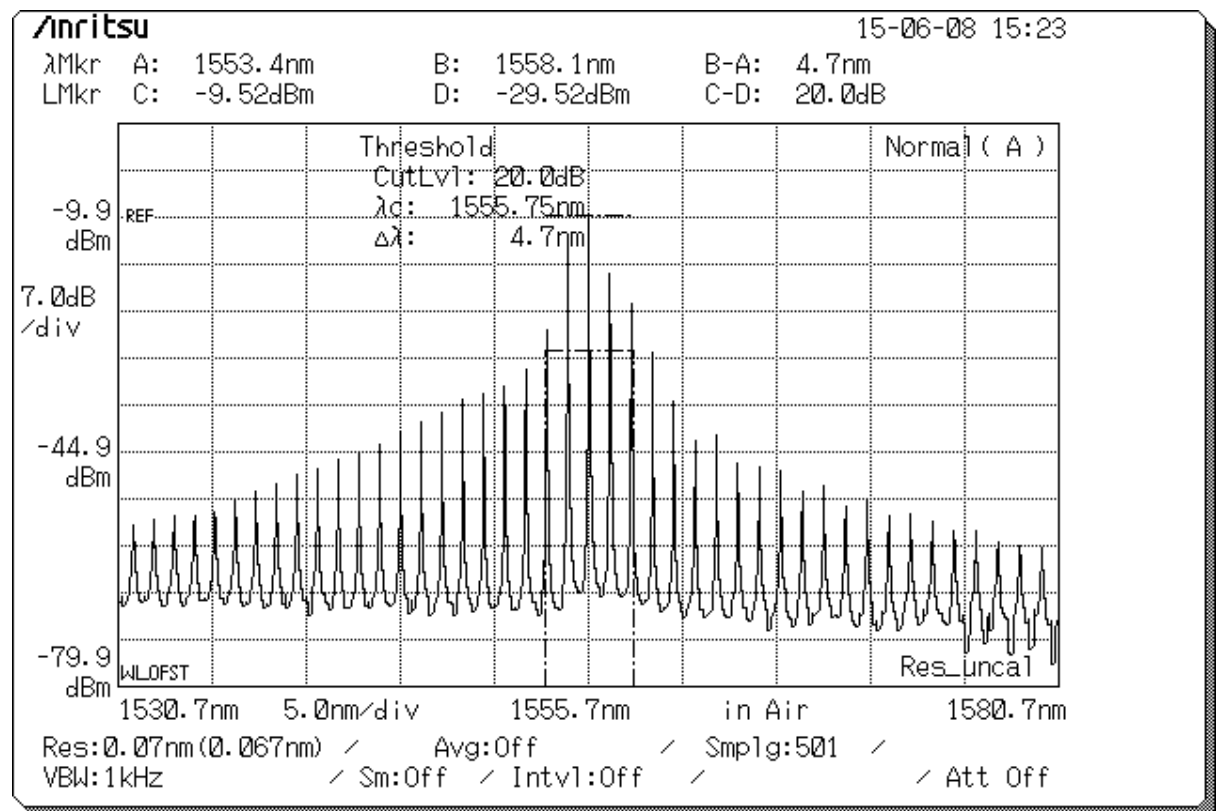
Fig. C F-P LD configuration

Project 1.2 Measuring lasing spectrum of F-P semiconductor laser

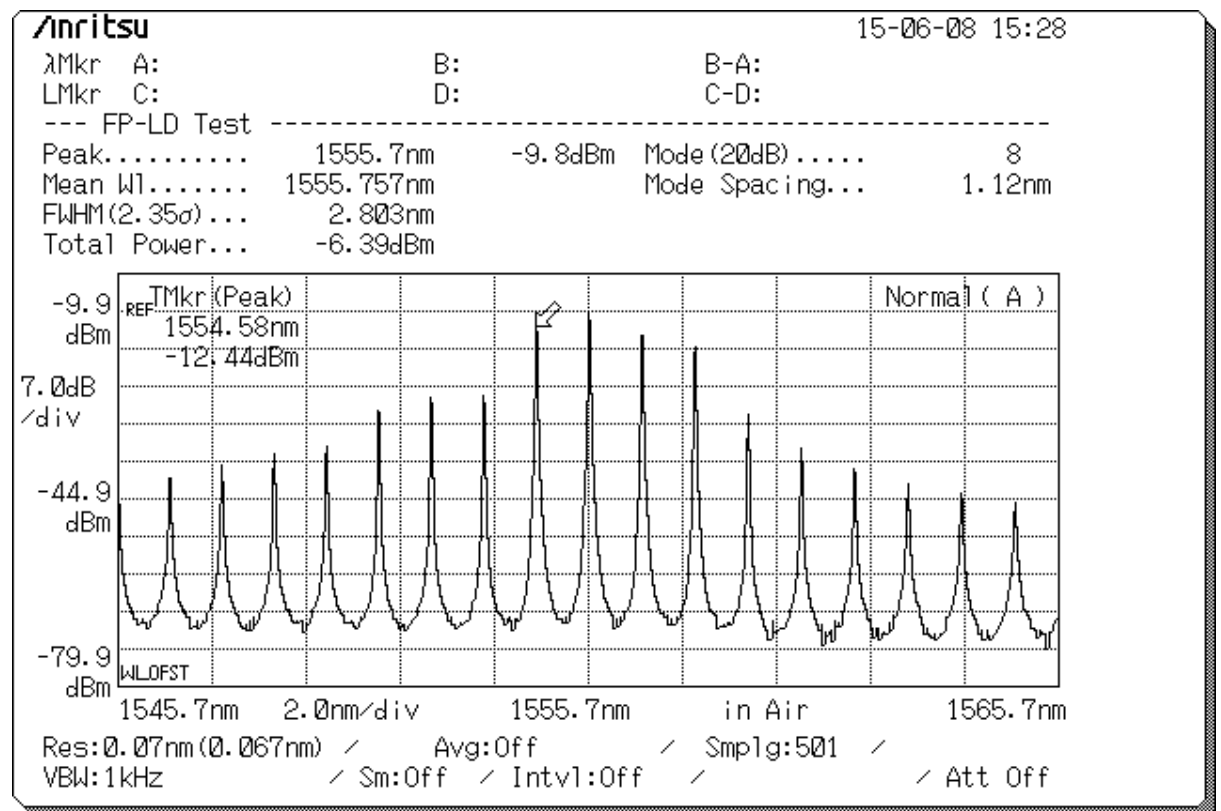
In this project we investigate properties of F-P LD multimode spectrum.



Measurement block diagram.



F-P LD spectrum



Equipment used in the experiment:

F-P Laser Diode

Laser Diode Controller: Newport 8000 (LDD/TEC 8610)

Optical Spectrum Analyzer , Anritsu MS 9710 B

Using measurement results, perform the following tasks:

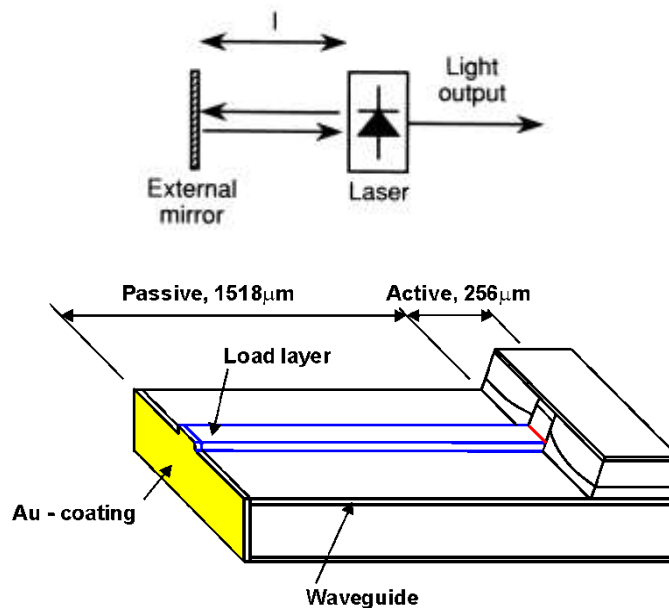
Examine properties of F-P LD emission spectrum.

Determine 20 dB envelope bandwidth.

Measure FSR.

Determine the laser cavity length L assuming that the refractive index of semiconductor material $n=3,6$.

A typical F-P laser diode linewidth ranges from 10 – 100 MHz. Much narrower emission spectrum can be achieved for long external cavity F-P lasers.



Integrated long external cavity semiconductor laser.

Single mode semiconductor lasers

The single mode laser operation may be achieved by implementation of very narrow band feedback reflection filters – Bragg gratings. The strongest feedback of Bragg grating occurs for the first order diffraction satisfying condition:

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

where: L is the grating period, \bar{n} is the effective refractive index.

Distributed feedback (DFB) and distributed Bragg reflection (DBR) lasers are the most commonly implemented laser diodes.

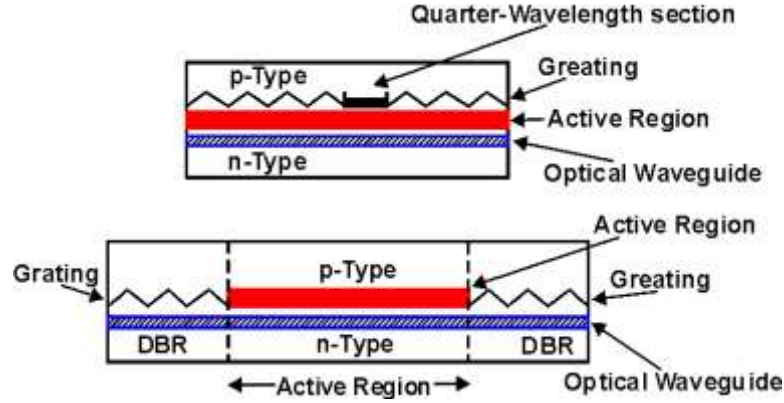
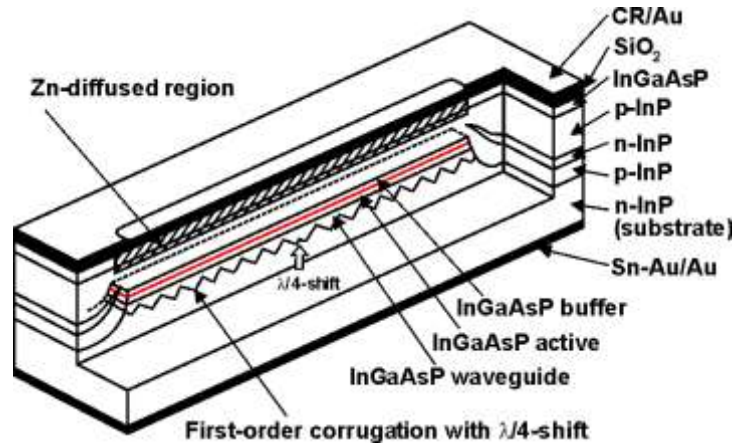


Fig. D DBF and DBR basic laser configuration.



Details of DBF heterostructure laser.

Laser linewidth

The linewidth equation for semiconductor laser is given by:

$$\Delta \nu * P = \frac{v_g h \nu n_{sp} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)}{8\pi L} (1 + \alpha_0^2)$$

where: v_g – group velocity

n_{sp} – spontaneous emission coefficient

$$\alpha_0 = \frac{dn/dN}{dg/dN}$$

is the ratio of refractive index change gain change with respect to carrier density.

Frequency chirping

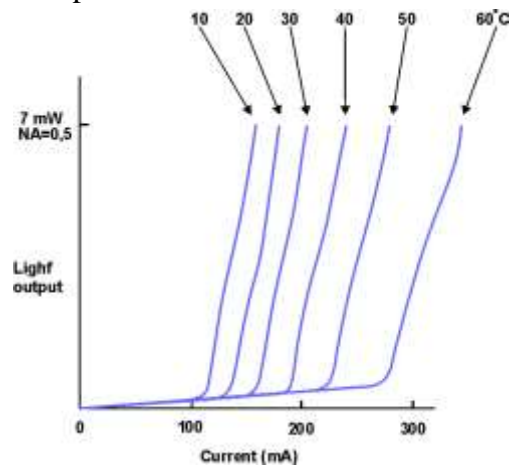
The frequency chirp is given by:

$$\delta\nu(t) = \frac{\alpha_0}{4\pi} \left[\left(\frac{d}{dt} \ln P(R(t)) \right) + \chi P(R(t)) \right]$$

where $P(t)$ is a time variation of optical power, κ is a constant.

A typical value of frequency chirp is 1 GHz/mA.

Semiconductor lasers are temperature sensitive. The threshold current increases with the rise of temperature. Characteristic temperature coefficient is 1%/10C.



P-I laser curves for different temperature.

Comparison of spectral properties of different semiconductor optical sources.

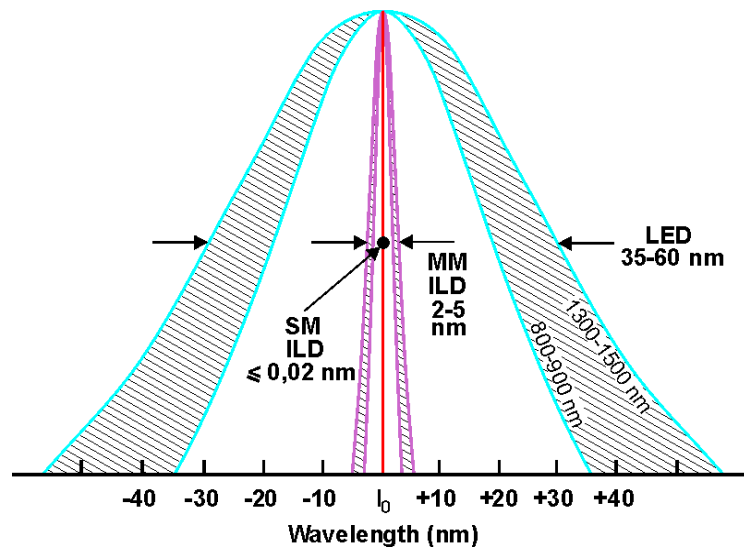
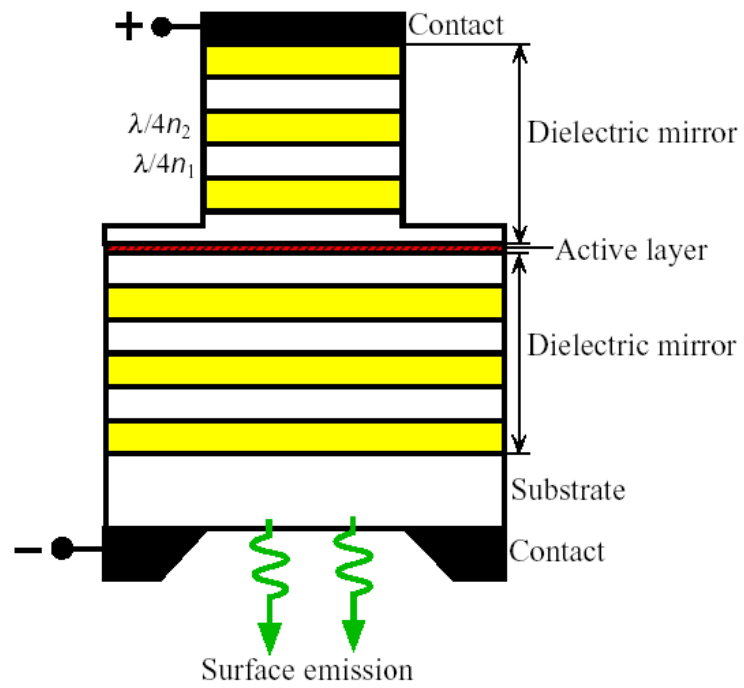


Figure: Typical LED, MM F-P and DFB output spectra.

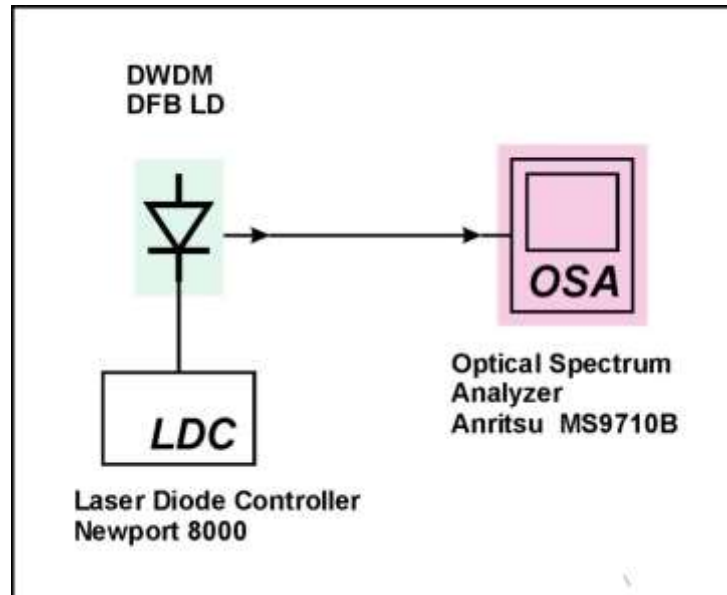


simplified schematic illustration of a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL).

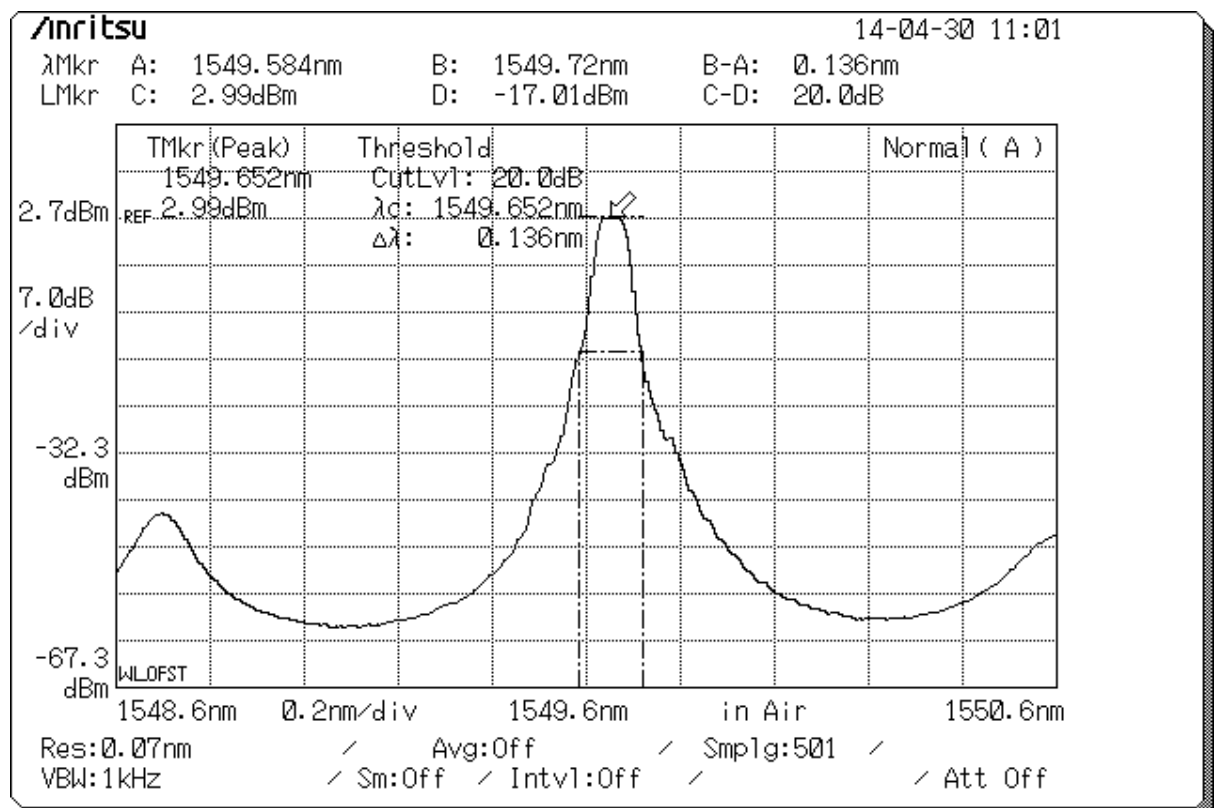
Fig.

Project 1.3. Measuring lasing spectrum of DFB semiconductor laser

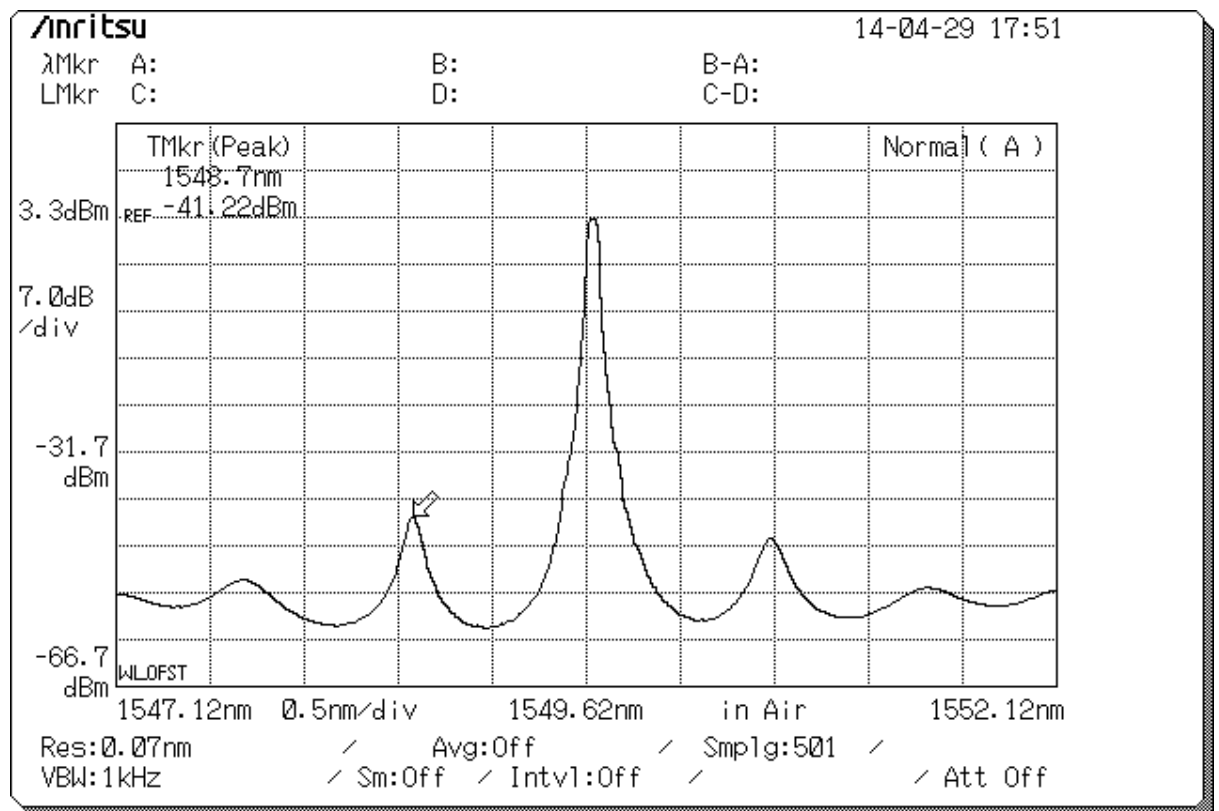
In this project we investigate properties of DFB LD singlemode spectrum and lasing wavelength – temperature sensitivity.



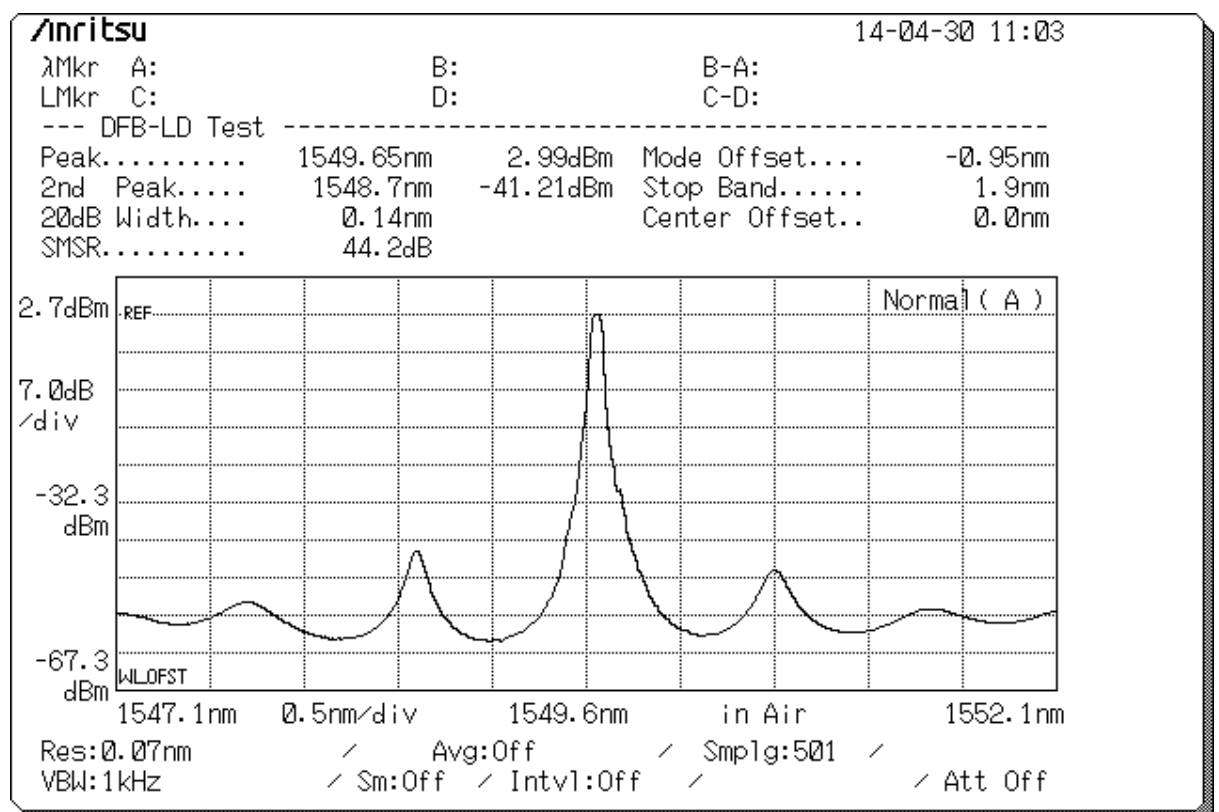
Experimental setup of DFB LD spectrum measurement.



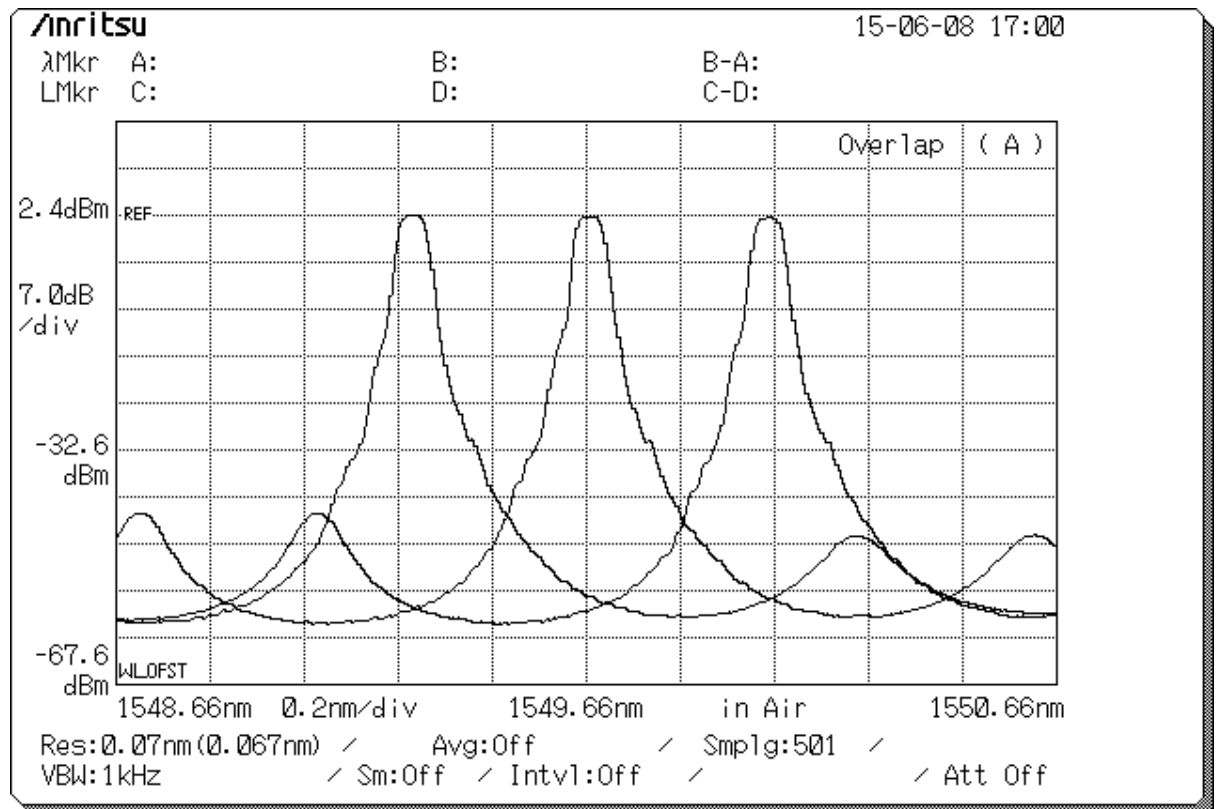
DFB laser – output spectrum.



DFB laser – output spectrum.



DFB laser – output spectrum.



DFB laser – output spectrum vs temperature.

DFB LD spectrum – measurement results

Lasing wavelength vs temperature – measurement results

Equipment used in the experiment:

DFB DWDM Laser Diode, Aifotec

Laser Diode Controller: Newport 8000 (LDD/TEC 8610)

Optical Spectrum Analyzer , Anritsu MS 9710 B

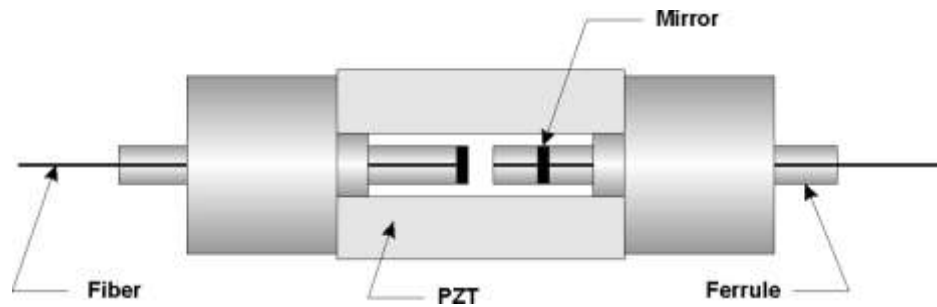
Using measurement results, perform the following tasks:

Examine properties of DFB LD emission spectrum.

Determine 20 dB envelope bandwidth.

Determine the lasing wavelength – temperature sensitivity. Discuss obtained result.

The fiber Fabry-Perot tunable filter (FPF)

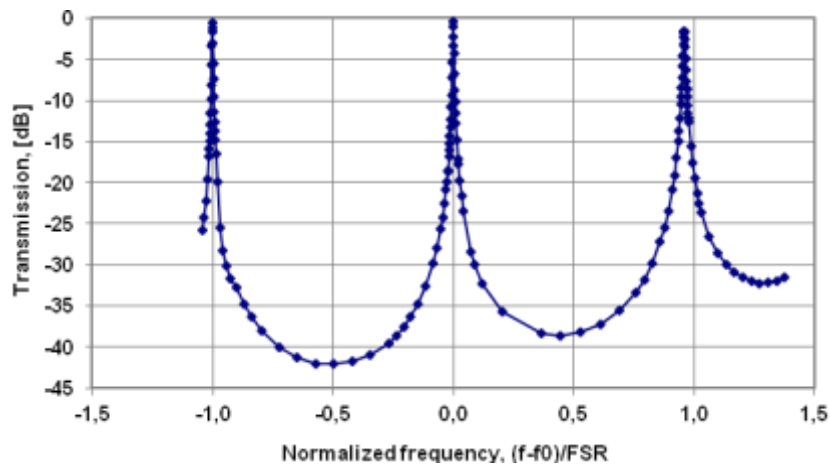


A tunable fiber F-P filter

The FPF transfer function is expressed by the following equation:

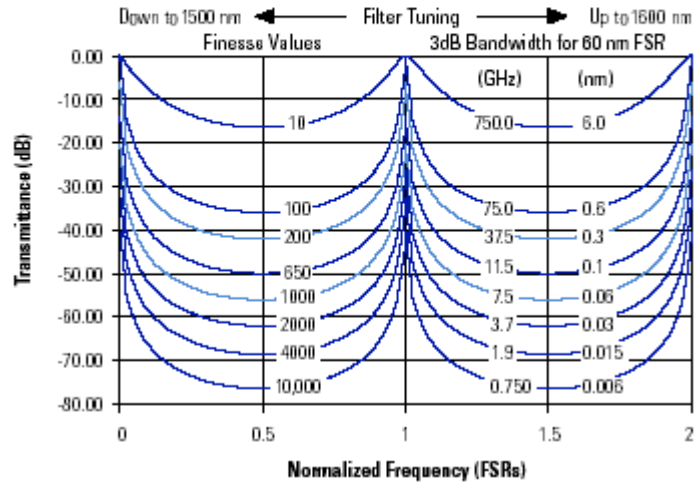
$$T_{FP}(\nu) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2 \left(\frac{2\pi(\nu - \nu_0)L}{c} \right)}$$

where: R - end-faced reflectivities,
L - cavity length,
c - light velocity.



Frequency response of Fabry-Perot filter

Example FFP-TF2 Filters Standard Finesse Values with Fixed FSR



Frequency response of Fabry-Perot filters for different reflectivities R, Micron Optics, Inc.

The Fabry-Perot is periodic with a period, called the free spectral range (FSR), given by:

$$FSR = \frac{c}{2nL}$$

The FSR is the frequency range that can be tuned freely without overlapping due to multiorder interference. The 3-dB bandwidth of the F-P filter (full width at half maximum, FWHM) is given by:

$$\Delta \nu_{FWHM} = \frac{c}{2nL} \frac{1-R}{\sqrt{R}}$$

The ratio of the free spectral range is known as the finesse F of the Fabry-Perot filter and is given by:

$$F = \frac{FSR}{\Delta \nu_{FWHM}} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

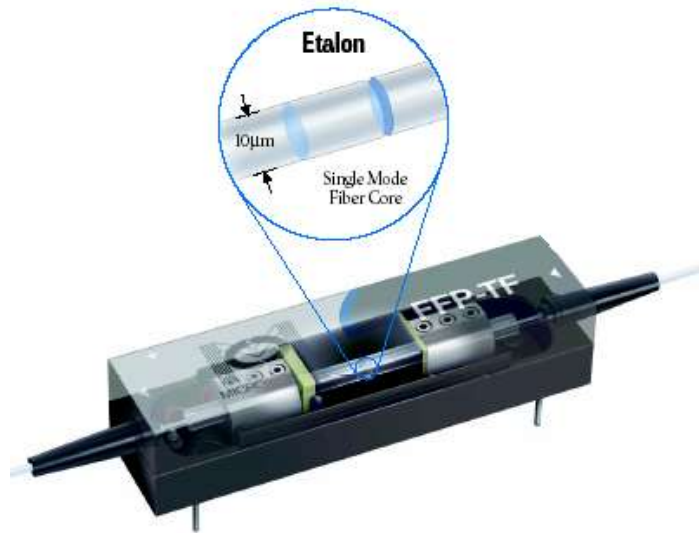
The maximum number of resolvable channels of the Fabry-Perot filter is restricted by:

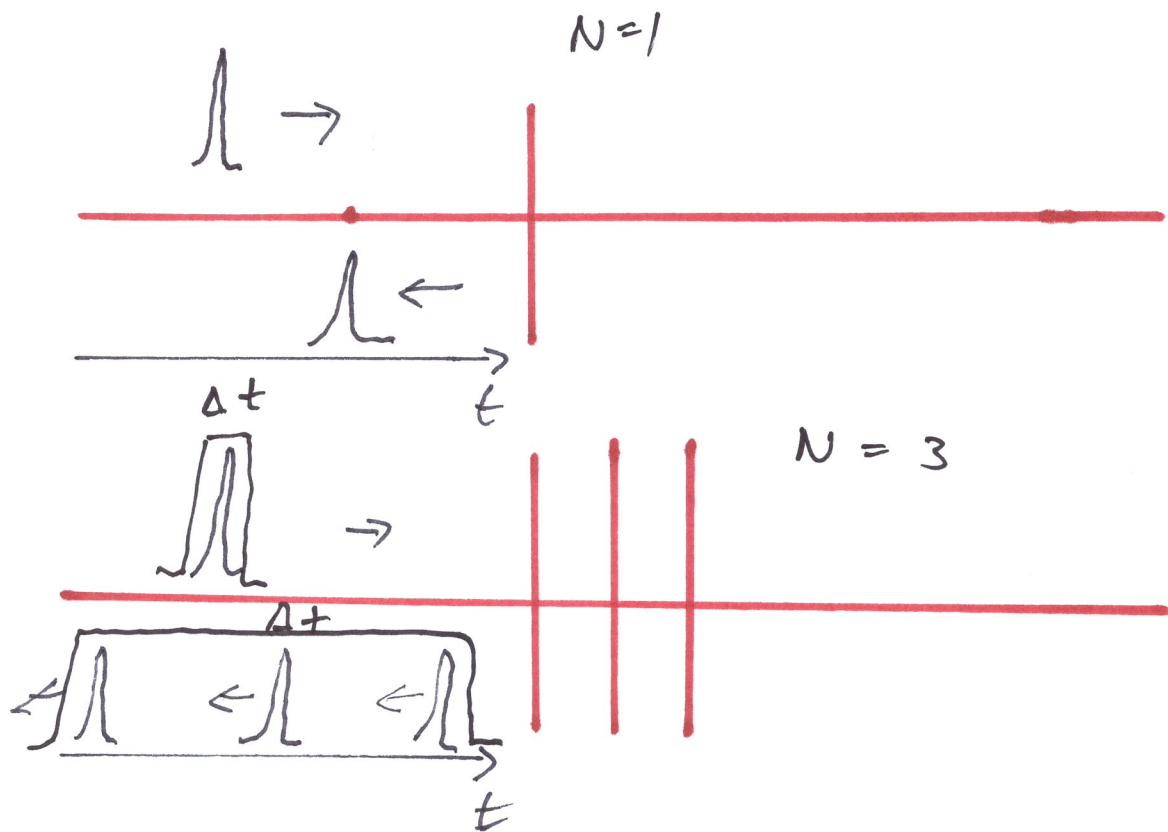
$$N_{MAX} < \frac{F}{3} = \frac{\pi\sqrt{R}}{3(1-R)}$$

With F=100, yields $N_{max} < 33$.

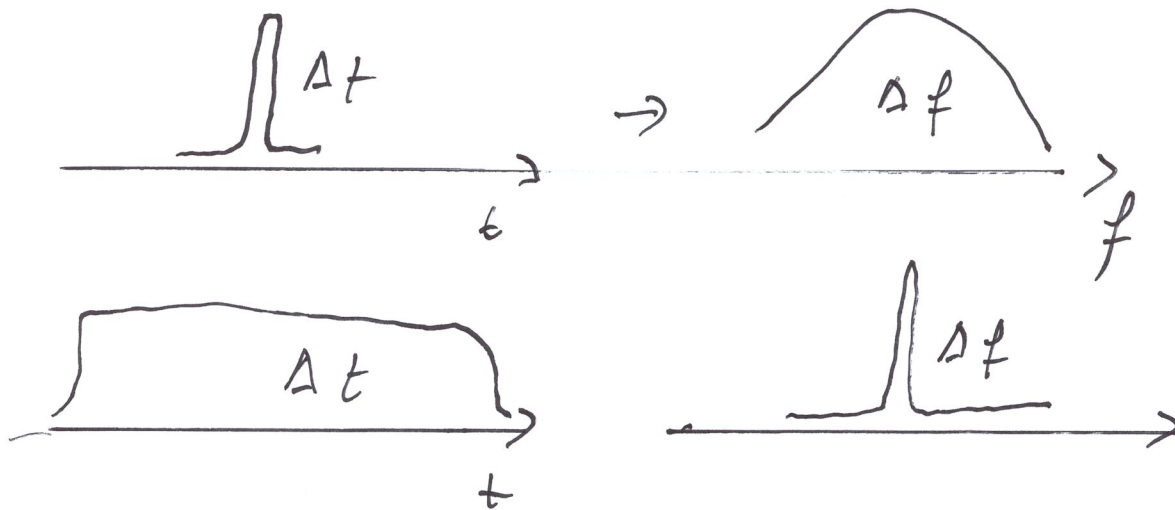
To tune the filter from one channel to another, the resonant conditions of FPF must be changed. This can be done by fine-adjusting the Fabry-Perot cavity length L .

Among the various design options that have been proposed, probably the most successful design is the *tunable-fiber Fabry-Perot Filter*.





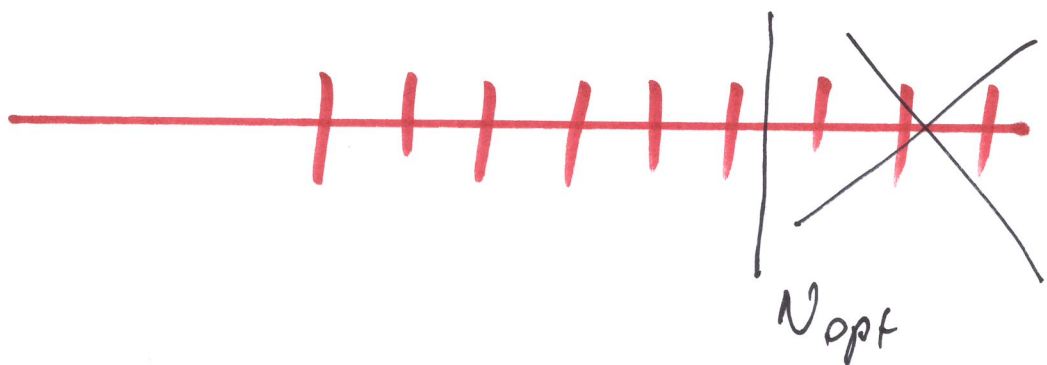
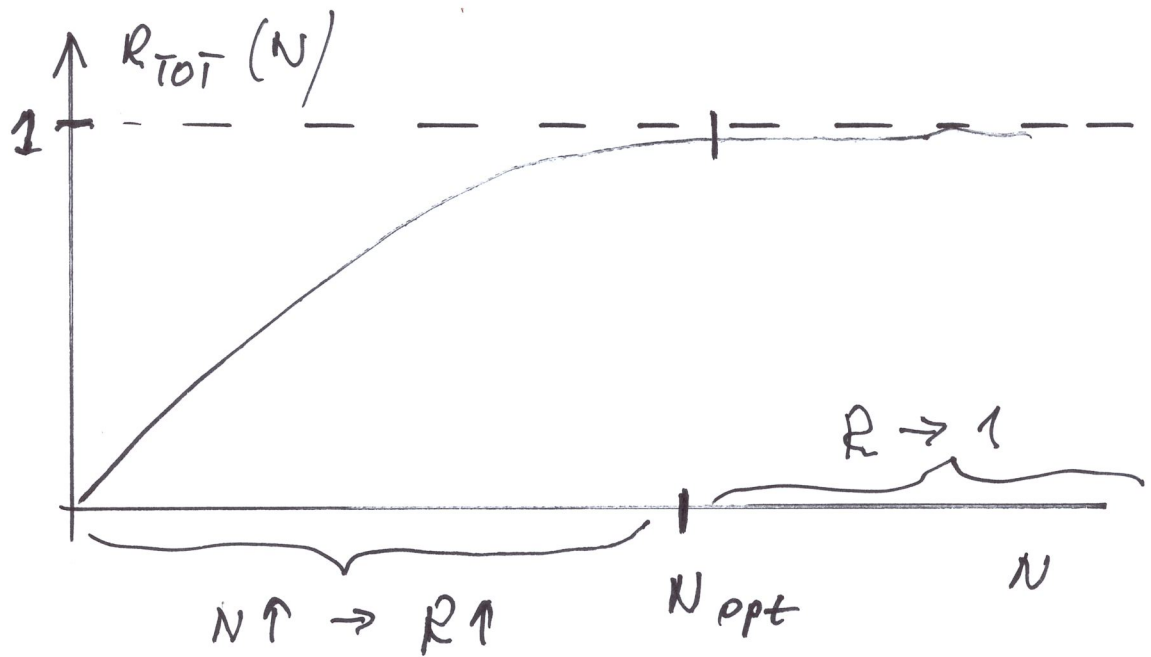
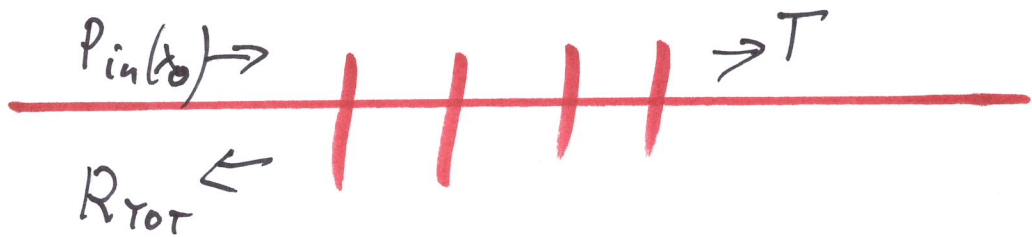
$$\Delta t \sim N$$



$$\Delta f \sim \frac{1}{\Delta t} \sim \frac{1}{N}$$

$$N \uparrow \rightarrow \Delta t \uparrow \rightarrow \Delta f \downarrow$$

$$R_{Tot} = R(N)$$



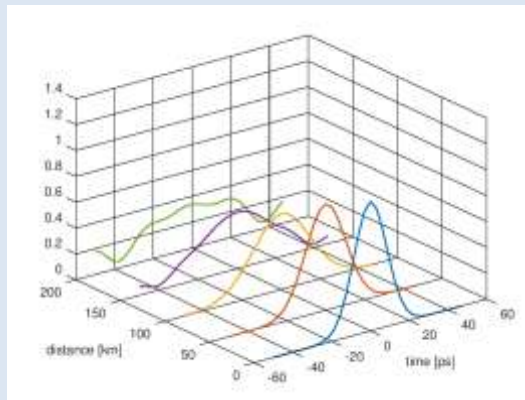
Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

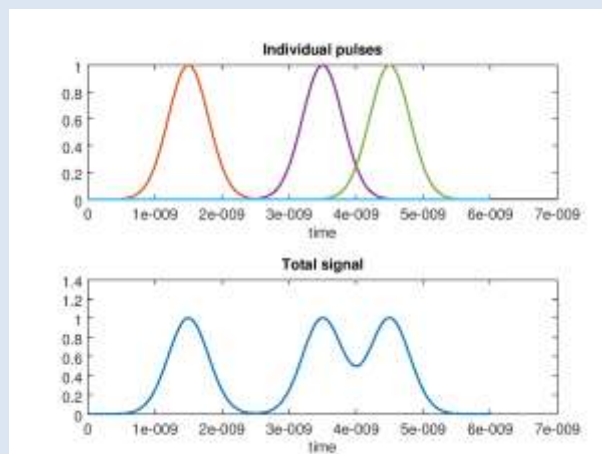
- Ekwiwalentne straty dyspersji chromatycznej
- Ekwiwalentne straty dyspersji modowej
- Ekwiwalentne straty PMD
- Ekwiwalentne straty ER
- Ekwiwalentne straty chirpu
- Ekwiwalentne straty nieliniowego rozpraszania

Ekwiwalentne straty dyspersji chromatycznej:
 dyspersja powoduje **poszerzenie impulsów** w dziedzinie czasu i
 tym samym **zmniejszenie ich amplitudy** na wejściu odbiornika.
 Efekt ten można uwzględnić w budżecie mocy wprowadzając
 ekwiwalentne straty (Power penslty)

Na rysunku pokazano wyniki
 obliczeń ewolucji impulsów Gaussa
 w **bezzstratnym włóknie** ($\alpha=0\text{dB/km}$),
 dyspersja: $\beta_2=2.0$, $D[\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})]$,
 $\beta_3=1.01$, $S[\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})]$



Co więcej ekwiwalentne straty dyspersji chromatycznej
 prowadzą do, zmniejszenia różnicy pomiędzy poziomami mocy
 logicznego 0 i 1:



Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

- Ekwiwalentne straty dyspersji chromatycznej

$$P_{CD} = -5 \log \left[1 - (4BLD_{CD} \Delta \lambda)^2 \right]$$

$$P_{CD} < 0.5 \text{ dB} \leftrightarrow B * L * D_{CD} * \Delta \lambda < 0.1$$

Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

- Ekwiwalentne straty dyspersji modowej:

$$P_{MM} = \left(\frac{\tau_c}{\tau} \right)^4 [dB]; \tau_c = 2\sigma\sqrt{2}$$

$$P_{MM} = 2 \left(2\sigma B_T \sqrt{2} \right)^4 [dB]$$

$t = 1/B_T$; τ_c – poszerz. imp. (1/e); σ – szerokość rms

Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

- Ekwiwalentne straty spowodowane dyspersją polaryzacyjną - PMD

$$P_{\text{PMD}} < 1 \text{ dB/30 min/rok} \leftrightarrow \Delta T_{\text{OrtSOP}} < 0.14 \tau$$

Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

- Ekwiwalentne straty ER współczynnika wygaszania

$$P_{\text{ER}} = -10 \log \frac{ER - 1}{ER + 1}$$

$$P_{\text{ER}} < 0.5 \text{ dB} \leftrightarrow ER > 18$$

Ekwiwalentne (dodatkowe) straty Power penalties

- Ekwiwalentne straty nieliniowego rozpraszania Brillouin'a SBS (Stimulated Brillouin Scattering)

nasycenie gdy $P_{\text{sygn}} > 17 \text{ dBm}$

Równanie budżetu mocy,
zgodne z oznaczeniami stosowanymi w przykładzie:

Example 12.6

$$P_{TX} = P_{RX} + \alpha_{Tot} + M$$

$$P_{TX} = P_{RX} + (\alpha_f + \alpha_{sp})L + \alpha_{ct} + M$$

Uwzględniając ekwiwalentne straty dyspersji D_L

$$P_{TX} = P_{RX} + (\alpha_f + \alpha_{sp})L + \alpha_{ct} + D_L + M$$

Gdzie:

P_{TX} – moc nadajnika [dBm]

P_{RX} – moc na wejściu odbiornika lub czułość odbiornika [dB]

α_f – tłumienie włókna [dB/km]

α_{sp} – średnie tłumienie spawów na kilometr włókna [dB/km]

α_{ct} – tłumienie złączy [dB]

D_L – ekwiwalentne straty dyspersji [dB]

M – margines mocy [dB]

Ekwiwalentne straty dyspersji modowej (włókno wielomodowe)
 - problem sprzęgania modów – uwagi do przykładu 12.6

Zgodnie z poprzednimi wyrażeniami ekwiwalentne straty D_L opisują równania:

$$D_L = \left(\frac{\tau_c}{\tau} \right)^4 [dB]$$

$$\tau_c = 2\sigma\sqrt{2}$$

$$D_L = 2(2\sigma B_T \sqrt{2})^4 [dB]$$

τ – okres impulsu $= 1/B_T$

τ_c – poszerzenie impulsu na poziomie $(1/e)$ spowodowane dyspersją

σ – szerokość rms impulsu (zakładając Gaussowski kształt)

Ekwiwalentne straty dyspersji modowej (włókno wielomodowe)
 - problem sprzęgania modów – uwagi do przykładu 12.6

Charakter obserwowanego poszerzenia impulsów zależy od występowania sprzężenia pomiędzy modami (mode coupling) lub jego braku.

Sprzęganie modów (mode coupling) oznacza wymianę (przepływ) energii pomiędzy modami.

Gdy **nie występuje sprzężenie modów** poszerzenie impulsu jest **proporcjonalne do długości włókna**:

$$\sigma_T = \sigma^* L$$

Gdy **obserwujemy sprzężenie modów** poszerzenie impulsu zachodzi wolniej:

$$\sigma_T = \sigma^* (L)^{0.5}$$

σ_T - poszerzenie impulsu na wyjściu włókna o długości L

Zadanie: Budżet mocy

Oblicz maksymalny zasięg systemu światłowodowego

$P_{Tx} = -3\text{dBm}$ – moc nadajnika,

$\alpha_f = 0.4\text{dB/km}$ – tłumienie włókna,

$\alpha_{sp} = 0.1\text{dB/km}$ – uśrednione tłumienie spawów,

$\alpha_{ct} = 1\text{dB/szt}$ – tłumienie złączy,

$M = 7\text{ dB}$ – założony margines mocy,

dla trzech wariantów:

A/ Przepływności 35Mbps, $P_{Rx(35Mbps)} = -55\text{dBm}$ (czułość odbiornika)

B/ Przepływności 400Mbps, $P_{Rx(400Mbps)} = -44\text{dBm}$ (czułość odbiornika)

C/ Przepływności 400Mbps, $P_{Rx(400Mbps)} = -44\text{dBm}$ (czułość odbiornika) oraz $D_L = 1.5\text{dB}$ (ekwiwalentne straty dyspersji)

$$L_{35Mbps}, L_{400Mbps}, L_{400Mbps/DL=1.5dB} = ?$$

Tłumienie włókien

Useful formulas V

tłumienie włókien podstawowe wzory

$$\alpha = -\frac{1}{P} \frac{dP}{dx}$$

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

$$\alpha - [km^{-1}]$$

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L)$$

$$P_{out} = P_{in} 10^{-\alpha_{dB} L / 10dB}$$

$$\log P_{out} = -\alpha_{dB} L / 10dB + \log P_{in}$$

$$\alpha_{dB} L = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

$$\alpha_{dB} - \left[\frac{dB}{km} \right]$$

Fiber attenuation

Przykład:

$P_{we}=120 \mu W$, $P_{wy}=3\mu W$, $L=8km$,

Oblicz:

$\alpha_{dB}L=?$, $\alpha_{dB}=?$

$$\alpha L = 10 \log \frac{P_{we}}{P_{wy}} = 10 \log 40 = 16$$

$$\alpha = \frac{16dB}{8km} = 2 dB/km$$

Dla: $L=10 km$, $\alpha_{złaczy}=1 dB/1km$ (średnia tł. spawów - wartość na km),

Oblicz: Link attenuation $LinAtt=?$, $P_{wy}=?$

$$LinAtt = aL + n\alpha_{zl} = 20dB + 9dB = 29dB$$

$$\frac{P_{we}}{P_{wy}} = 10^{\frac{\alpha dB}{10}} = 794$$

Budżet (bilans) mocy

Moc na wejściu odbiornika w skali liniowej:

$$P_O = P_N * SW * SR$$

Przechodząc do skali logarytmicznej (moce w [mW]):

$$10\log(P_O) = 10\log(P_N * SW * SR) = 10\log(P_N) + 10\log(SW) + 10\log(SR)$$

$$P_O[dBm] = P_N[dBm] + SW[dB] + SR[dB]$$

Czyli obliczona moc na wejściu odbiornika w skali logarytmicznej:

$$P_O = 6[dBm] + (-23[dB]) + (-3[dB]) = -20[dBm]$$

Moc nadajnika (PN)	4 mW	6 dBm	8 mW	
Straty włókna (SW)	1:200	-23 dB	1:300	
Rozgałęźnik (SR)	1:2	-3 dB	1:4	
Moc na wej. odbiornika (P _O)		- 20 dBm		
Czułość odbiornika (C _O)	-40 dBm	-40 dBm	-30 dBm	
Zapas (margines) mocy (M)		20 dB		

Budżet (bilans) mocy

Prosty bilans mocy

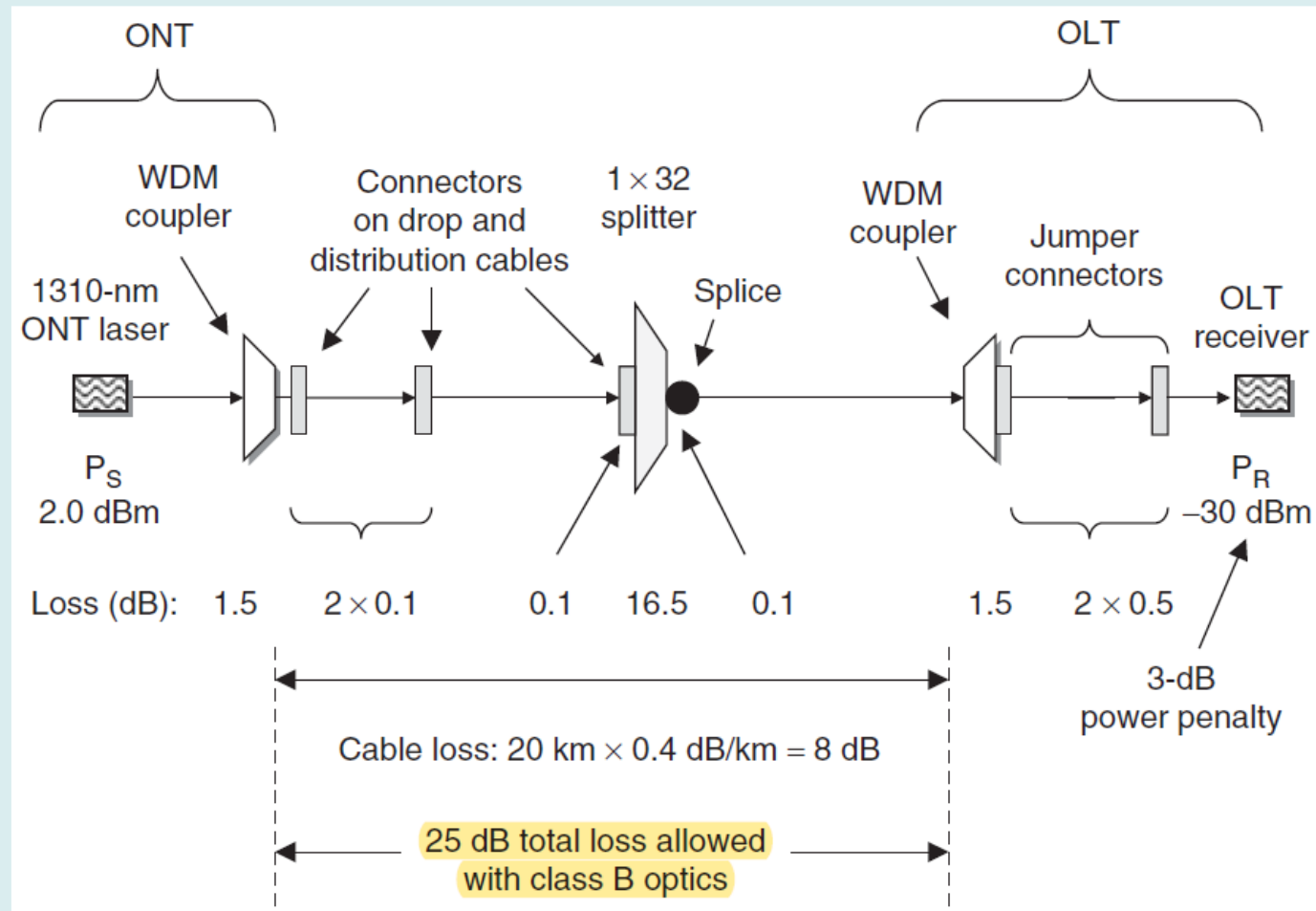
Przeprowadź analogiczne obliczenia dla drugiego wariantu

Tabela 1

Moc nadajnika (PN)	4 mW	6 dBm	8 mW	
Straty włókna (SW)	1:200	-23 dB	1:300	
Rozgałęźnik (SR)	1:2	-3 dB	1:4	
Moc na wej. odbiornika (P _O)		- 20 dBm		
Czułość odbiornika (C _O)	-40 dBm	-40 dBm	-30 dBm	
Zapas (margines) mocy (M)		20 dB		

FTTH – PON

Upstream, **622 Mbps**, $\text{BER}=10^{-11}$



Optical power losses of various components in a **1310-nm** FTTP link

Spreadsheet for Calculating the 1310-nm BPON-Based FTTP Link PowerBudget for a Class B Attenuation Range

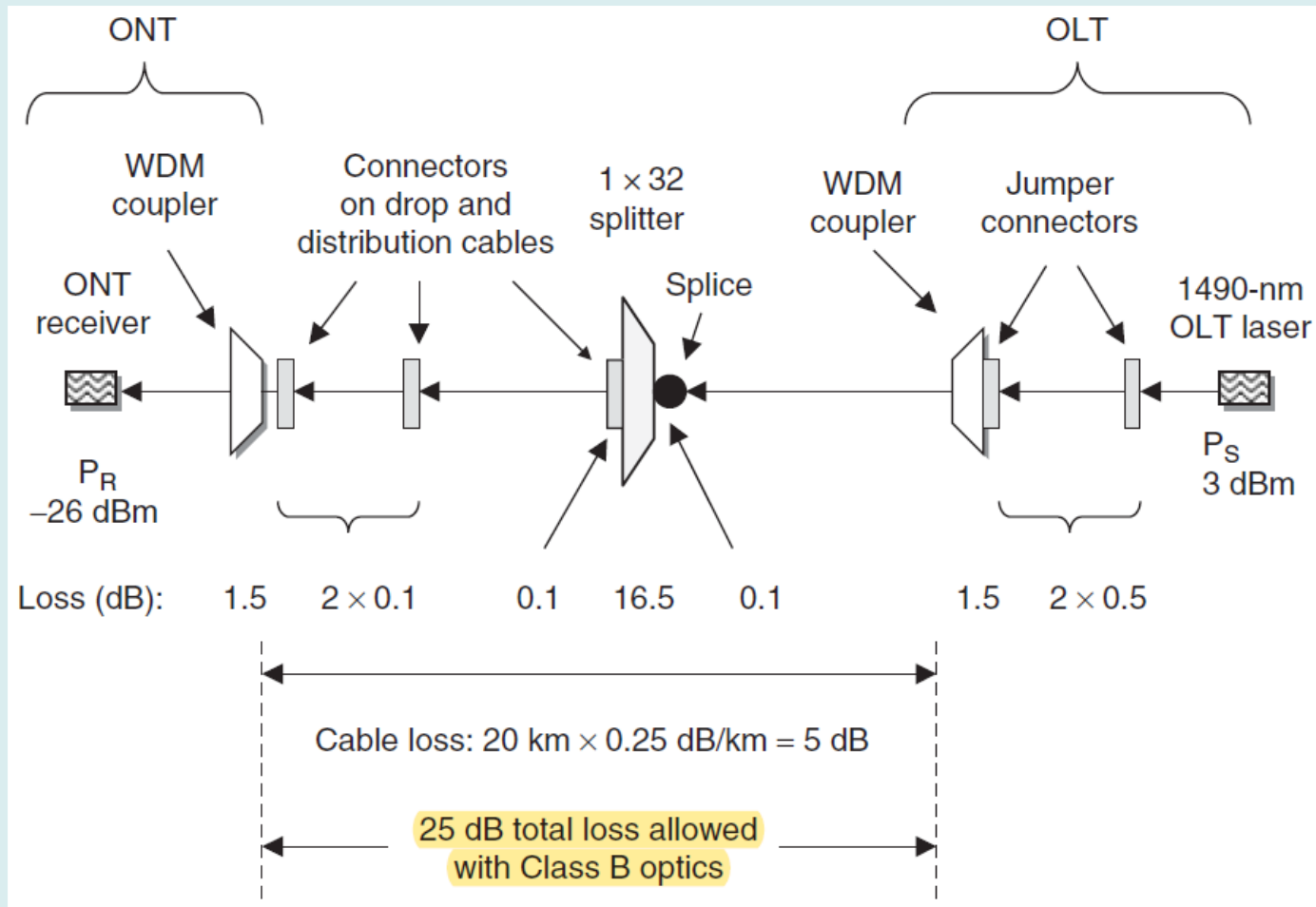
Uzupełnij tabelę na podstawie danych zawartych na schemacie

Tabela 2

Component /Loss Parameter	Output /Sensitivity/Loss	
ONT laser diode output	2.0 dBm	
WDM coupler loss (2*1.5 dB)		
Central-office patch cord loss		
Power available for class B link		
Power splitter loss (1*32)		
Splice loss (1*0.1 dB)		
Connector loss (3*0.1 dB)		
Cable attenuation (20km*0.40 dB/km)		
OLT receiver power penalty	-3.0 dB	Straty dodatkowe odbiornika
OLT detector sensitivity at 622Mbps		
Power Margin		

FTTH – PON

Downstream, **1.25 Gbps**, $\text{BER}=10^{-11}$



Optical power losses of various components in a **1490-nm** FTTP link

Spreadsheet for Calculating the 1490-nm BPON-Based FTTP Link Power Budget for a Class B Attenuation Range

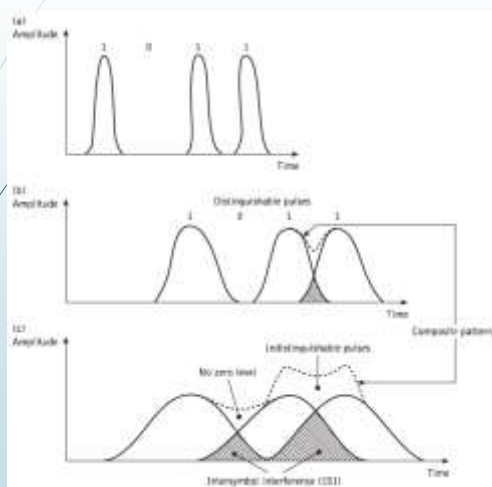
Uzupełnij tabelę na podstawie danych zawartych na schemacie

Tabela 3

Component /Loss Parameter	Output /Sensitivity/Loss	
OLT laser diode output	3.0 dBm	
WDM coupler loss (2*1.5 dB)		
Central-office patch cord loss		
Power splitter loss (1*32)		
Splice loss (1*0.1 dB)		
Connector loss (3*0.1 dB)		
Cable attenuation (20km*0.25 dB/km)		
OLT detector sensitivity at 1250Mbps		
Power Margin		

Dynamika systemu

Zniekształcenia dyspersyjne



Związek przepływność <->
poszerzona szerokość impulsu

$$B_T [bps] \leq \frac{1}{2\tau}$$

poszerzenie : τ

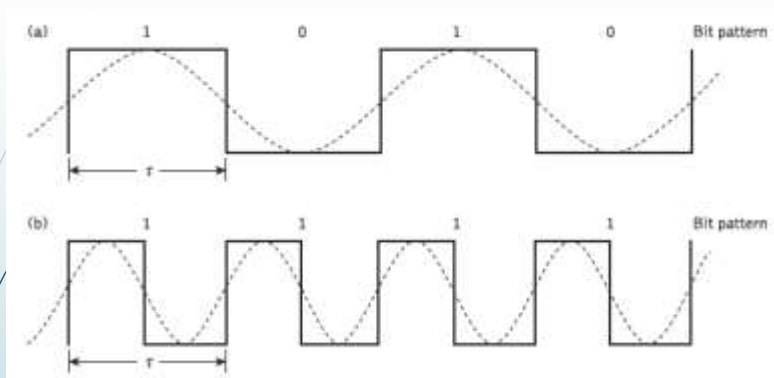
Związek przepływność <->
poszerzona szerokość impulsu **Gausa**

$$B_{T,\max} = \frac{0,2}{\sigma} [bps]$$

lub :

$$B_{T,\max} = \frac{0,25}{\sigma} [bps]$$

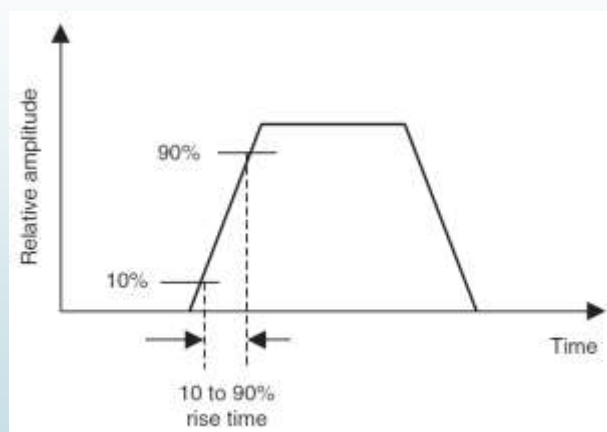
Przepływność <-> częstotliwość



Pasmo Nyquista – NRZ $BW = \frac{BR}{2}$

Pasmo Nyquista – RZ $BW = BR$

Szybkość narastania <-> pasmo



Wymagany czas narastania <-> BR <-> BW przebieg prostokątny

- Wymagany czas narastania:

$$t_r = \frac{0.35}{BW_{e,3dB}}$$

- NRZ

$$BW_{e,3dB} = \frac{BR}{2} = \frac{1}{2T}$$

$$t_r = \frac{0.7}{BR}$$

- RZ

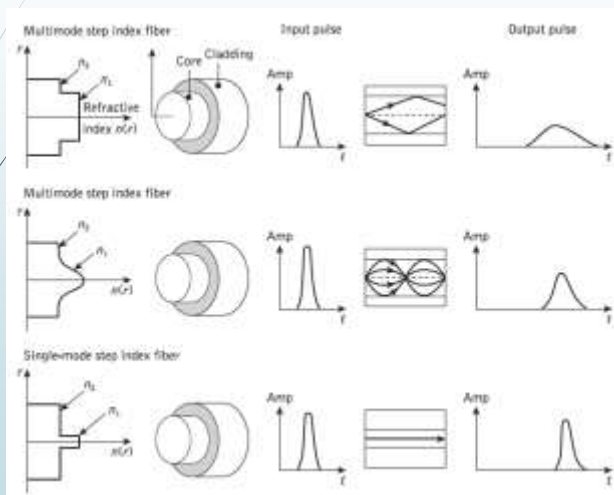
$$BW_{e,3dB} = BR = \frac{1}{T}$$

$$t_r = \frac{0.35}{BR}$$

Zniekształcenia dyspersyjne - odpowieź włókna

$$T_{fib}^2 = T_m^2 + T_{GVD}^2 + T_{pol}^2$$

Dyspersja MM-SI, MM-GI, SM



WŁÓKNO WIELOMODOWE SI

$$T_m = D_m L \approx \left(\frac{n_1 \Delta}{c} \right) L$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$



WŁÓKNO WIELOMODOWE GI

$$BL < \frac{8c}{n_1 \Delta^2}$$

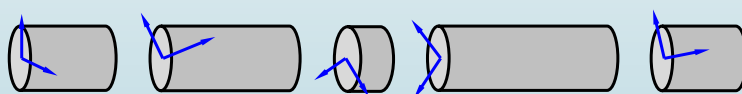


WŁÓKNO JEDNOMODOWE DYSPERSJA CHROMATYCZNA

$$T_{GVD} \approx |D_{ch}| \Delta\lambda * L$$

WŁÓKNO JEDNOMODOWE DYSPERSJA POLARYZACYJNA

$$T_{pol} = D_{pol} \sqrt{L}$$



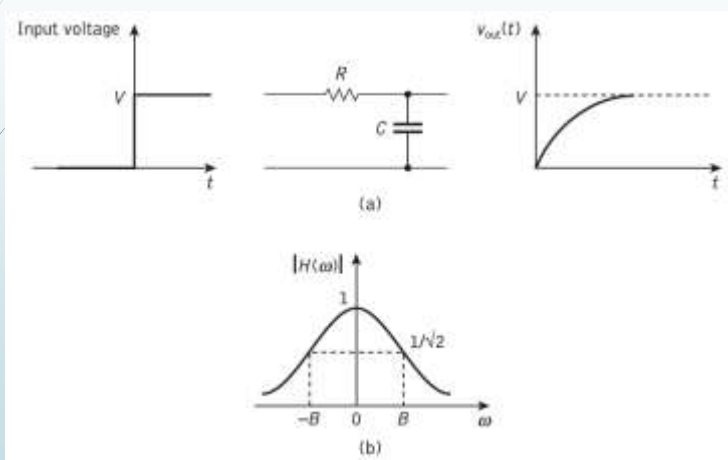
Pasmo włókna

$$B_{fib} \approx \frac{0.44}{T_{fib}} = \frac{0.44}{\sqrt{(D_m L)^2 + (D_{chr} \Delta \lambda L)^2 + D_{pol}^2 L}}$$

Odpowiedź systemu:

$$T_{sys} = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{mod}^2 + T_{CD}^2 + T_{PMD}^2 + T_{RX}^2}$$

Filtr RC, odpowiedź w dziedzinie (a) czasu (b) częstotliwości



Filtr RC – związek pasmo B - czas narastania t_r

$$v_{out}(t) = V \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \right\}$$

dla 10 - 90% :

$$t_r = 2.2RC$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 + \omega^2 C^2 R^2)}}$$

→ pasmo 3dB :

$$B = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$t_r = \frac{2.2}{2\pi B} \approx \frac{0.35}{B}$$

Przepływność <-> szybkość systemu

$$B\tau = 1$$

$$T_{sys} = t_r = 0.35\tau$$

Dla RZ :

$$B_r [bps] = B = \frac{1}{\tau}$$

$$B_{r(max)} [bps] = \frac{0.35}{T_{sys}}$$

Dla NRZ :

$$B_r [bps] = \frac{B}{2} = \frac{1}{2\tau}$$

$$B_{r(max)} [bps] = \frac{0.7}{T_{sys}}$$

11.4 LINK CAPACITY ESTIMATES

A rise-time budget analysis is a convenient method of determining the information capacity of an optical link. This is particularly useful for a digital link in which the capacity is dispersion limited.

11.4.1 Basic Formulation

In the rise-time budget analysis approach, the total rise time t_{sys} of the link is the root-sum-square calculation of the rise times from each contributor t_i to the pulse rise-time degradation, that is,

$$t_{\text{sys}} = \left(\sum_{i=1}^N t_i^2 \right)^{1/2} \quad (11.5)$$

The five basic elements that may limit system speed significantly are the transmitter rise time t_{TX} , the modal dispersion rise time t_{mod} of multimode fiber, the chromatic dispersion rise time t_{CD} of the fiber, the polarization mode dispersion rise time t_{PMD} of the fiber, and the receiver rise time t_{RX} . Substituting these parameters into Eq. (11.5) then yields

$$t_{sys} = (t_{TX}^2 + t_{mod}^2 + t_{CD}^2 + t_{PMD}^2 + t_{RX}^2)^{1/2} \quad (11.6)$$

Single-mode fibers do not experience modal dispersion (i.e., $t_{mod} = 0$), so in these fibers the rise time is related only to chromatic and polarization mode dispersions.

201/15/2018 $T_{sys} \approx BR$: $T_{sys} = \frac{0.7}{BR} = 0.7 \cdot 2$ | $T_{sys} = 0.35 \cdot 2$
 11.4.2 Basic Rise Times BR - bit rate

Generally, the total transition-time degradation t_{sys} of a digital link should not exceed 70 percent of an NRZ (non-return-to-zero) bit period or 35 percent for RZ (return-to-zero) data, where one bit period is defined as the reciprocal of the data rate. In Appendix D we discuss NRZ and RZ data formats in more detail.

The rise times of the transmitters and receivers generally are known to the link designer. The transmitter rise time is attributable primarily to the speed at which a light source responds to an electrical drive current. A rule-of-thumb estimate for the transmitter rise time is 2 ns for an LED and 0.1 ns for a laser diode source. The receiver rise time results from the photodetector response speed and the 3-dB electrical bandwidth B_{RX} of the receiver front end. The rise time typically is specified as the time it takes the detector output to increase from the 10 percent to the 90 percent point, as shown in Figure 11.6. If B_{RX} is given in megahertz, the receiver front-end rise time in nanoseconds is

$$t_{RX} = \frac{350}{B_{RX}} \quad (11.7)$$

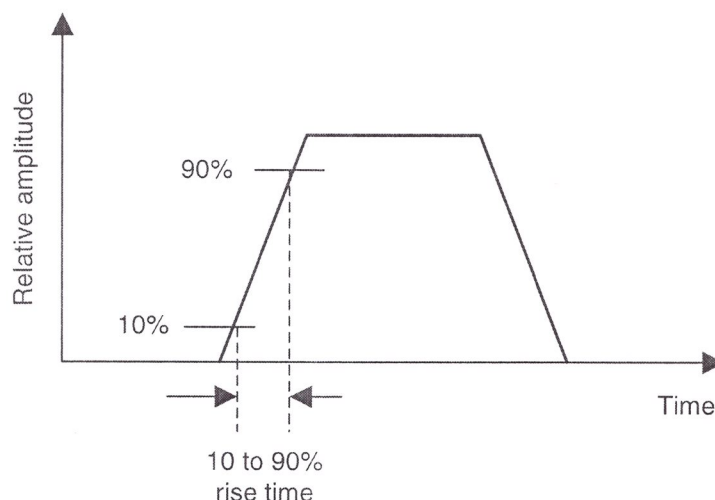


Figure 11.6. The 10 to 90 percent rise time of a pulse.

In practice, an optical fiber link seldom consists of a uniform, continuous, jointless fiber. Instead, a transmission link nominally is formed from several concatenated (joined in tandem) fibers that may have different dispersion characteristics. This is especially true for dispersion-compensated links operating at 10 Gbps and higher. In addition, multimode fibers experience modal distributions at fiber-to-fiber joints owing to misaligned joints, different core index profiles in each fiber, and/or different degrees of mode mixing in individual fibers. Determining the fiber rise times resulting from chromatic and modal dispersion then becomes more complex than for the case of a single uniform fiber.

The fiber rise time t_{CD} resulting from chromatic dispersion over a length L can be approximated by

$$t_{CD} \approx |D_{CD}|L\Delta\lambda \quad (3) \quad (11.8)$$

where $\Delta\lambda$ is the half-power spectral width of the light source and D_{CD} is the fiber chromatic dispersion. Since the chromatic dispersion value may change from one section of fiber to another in a long link, an average value should be used for D_{CD} in Eq. (11.8).

For a multimode fiber the *bandwidth*, or *information-carrying capacity*, is specified as a *bandwidth-distance relationship* with units of $\text{MHz} \cdot \text{km}$. Thus, the bandwidth needed to support an application depends on the data rate of transmission, that is, as the data rate goes up (MHz), the distance (km) over which signals can be transmitted at that rate goes down. Multimode fibers with a $50\text{-}\mu\text{m}$ core diameter have about three times more bandwidth ($500 \text{ MHz} \cdot \text{km}$) than $62.5\text{-}\mu\text{m}$ fibers ($160 \text{ MHz} \cdot \text{km}$) at 850 nm. If B_{mod} is the modal-dispersion bandwidth (in $\text{MHz} \cdot \text{km}$), the modal rise time t_{mod} (ns) over a fiber of length L (km) is given by

$$t_{\text{mod}} = \frac{440L}{B_{\text{mod}}} \quad (2) \quad (11.9)$$

The pulse-spreading t_{PMD} resulting from polarization mode dispersion is given by

$$t_{\text{PMD}} = D_{\text{PMD}} \times \sqrt{\text{fiber length}} \quad (4) \quad (11.10)$$

where D_{PMD} is the polarization mode dispersion measured in units of $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Let us now calculate the expected rise times for the link examples that are given in Section 11.2.

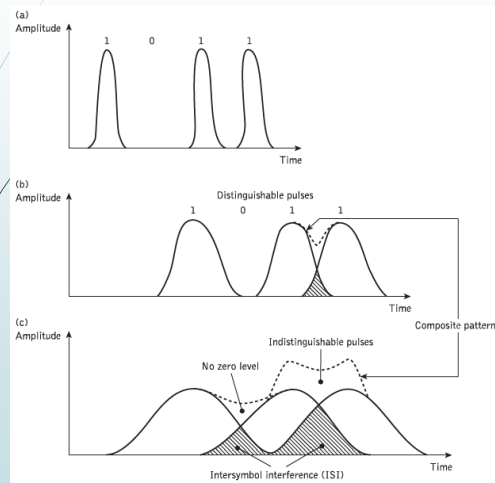
Zadanie – dynamika systemu

Przykład do samodzielnego
obliczenia

Określone wszystkie niezbędne kroki



Zniekształcenia dyspersyjne



Związek przepływność <-> poszerzona szerokość impulsu

$$B_T [bps] \leq \frac{1}{2\tau}$$

poszerzenie : τ

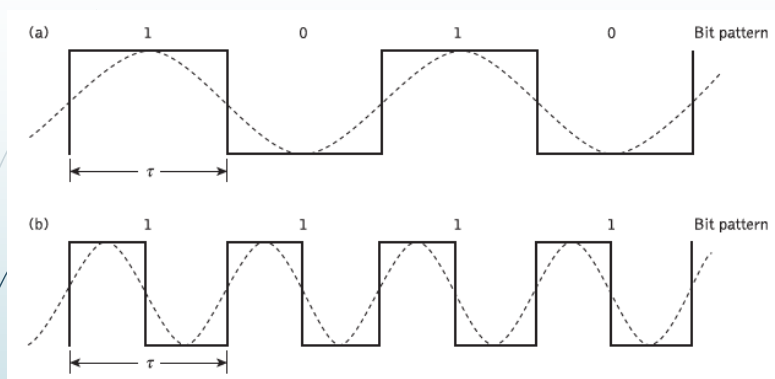
Związek przepływność <->
poszerzona szerokość impulsu **Gaussa**

$$B_{T,\max} = \frac{0,2}{\sigma} [bps]$$

lub :

$$B_{T,\max} = \frac{0,25}{\sigma} [bps]$$

Przepływność <-> częstotliwość



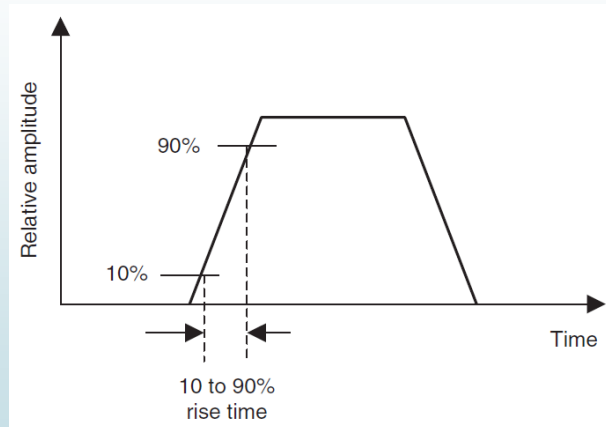
Pasmo Nyquista – NRZ

$$BW = \frac{BR}{2}$$

Pasmo Nyquista – RZ

$$BW = BR$$

Szybkość narastania <-> pasmo



Wymagany czas narastania <-> BR <-> BW przebieg prostokątny

- Wymagany czas narastania:

$$t_r = \frac{0.35}{BW_{e,3dB}}$$

- NRZ

$$BW_{e,3dB} = \frac{BR}{2} = \frac{1}{2T}$$

$$t_r = \frac{0.7}{BR}$$

- RZ

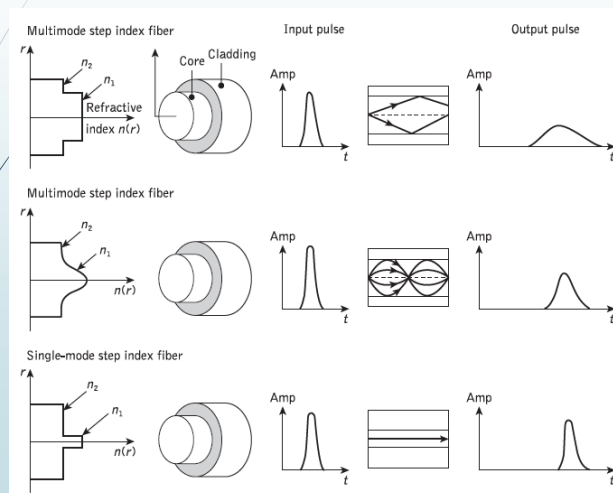
$$BW_{e,3dB} = BR = \frac{1}{T}$$

$$t_r = \frac{0.35}{BR}$$

Zniekształcenia dyspersyjne - odpowiedź włókna

$$T_{fib}^2 = T_m^2 + T_{GVD}^2 + T_{pol}^2$$

Dyspersja MM-SI, MM-GI, SM



WŁÓKNO WIELOMODOWE SI

$$T_m = D_m L \approx \left(\frac{n_1 \Delta}{c} \right) L$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

WŁÓKNO WIELOMODOWE GI

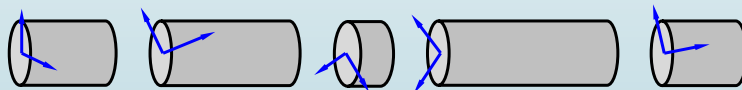
$$BL < \frac{8c}{n_1 \Delta^2}$$

WŁÓKNO JEDNOMODOWE DYSPERSJA CHROMATYCZNA

$$T_{GVD} \approx |D_{ch}| \Delta\lambda * L$$

WŁÓKNO JEDNOMODOWE DYSPERSJA POLARYZACYJNA

$$T_{pol} = D_{pol} \sqrt{L}$$



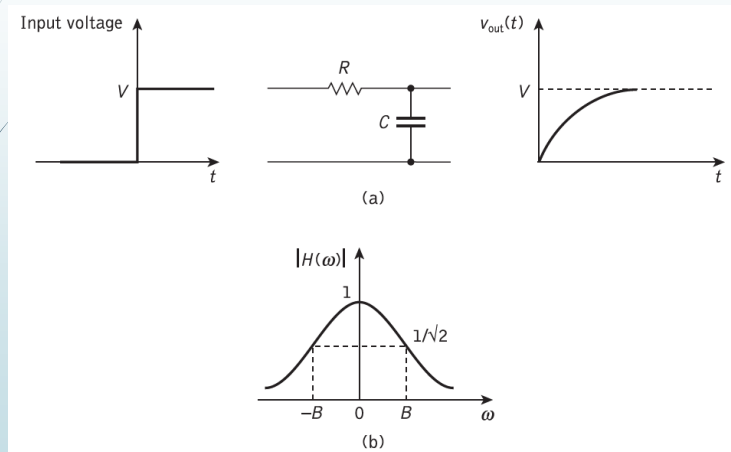
Pasmo włókna

$$B_{fib} \approx \frac{0.44}{T_{fib}} = \frac{0.44}{\sqrt{(D_m L)^2 + (D_{chr} \Delta \lambda L)^2 + D_{pol}^2 L}}$$

Odpowiedź systemu:

$$T_{sys} = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{mod}^2 + T_{CD}^2 + T_{PMD}^2 + T_{RX}^2}$$

Filtr RC, odpowiedź w dziedzinie (a) czasu (b) częstotliwości



Filtr RC – związek pasmo B - czas narastania t_r

$$v_{out}(t) = V \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \right\}$$

dla 10-90% :

$$t_r = 2.2RC$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}$$

-> pasmo 3dB :

$$B = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$t_r = \frac{2.2}{2\pi B} \approx \frac{0.35}{B}$$

Przepływność <-> szybkość systemu

$$B\tau = 1$$

$$T_{\text{sys}} = t_r = 0.35\tau$$

Dla RZ :

$$B_T[\text{bps}] = B = \frac{1}{\tau}$$

$$B_{T(\text{max})}[\text{bps}] = \frac{0.35}{T_{\text{sys}}}$$

Dla NRZ :

$$B_T[\text{bps}] = \frac{B}{2} = \frac{1}{2\tau}$$

$$B_{T(\text{max})}[\text{bps}] = \frac{0.7}{T_{\text{sys}}}$$

Dane zadania

(zadanie dotyczy systemu, dla którego obliczaliście budżet mocy – jest to druga część - kontynuacja)

- A laser diode with a 0.1-ns rise time and a 1-nm spectral width (this assumes that the laser has reached its stabilized *on* state, as described in Section 4.5)
- A pin-photodiode receiver with a front-end bandwidth $B_{\text{RX}} = 1250 \text{ MHz}$
- A G.652 single-mode fiber with $D_{\text{CD}} = 4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ and $D_{\text{PMD}} = 0.1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ at 1490 nm

Dane zadania

(zadanie dotyczy systemu, dla którego obliczaliście budżet mocy – jest to druga część - kontynuacja)

- Zasięg 20km
- Przepływność łącza i format modulacji: $B_{NRZ}=1.25\text{ GBps}$
-> **obliczamy maksymalny dopuszczalny czas odpowiedzi systemu T_{sys}**
- Parametry diody laserowej (nadajnika): $t_{tx}=0.1\text{ns}$, $\Delta\lambda=1\text{nm}$ ($\Delta\lambda$ - **niezbędne do obliczenia t_{CD}**)
- Pasma odbiornika: $B_{RX}=1250\text{MHz}$ -> **obliczamy t_{RX}**
- Właściwości włókna: typ G652 (wł. jednomodowe!) - $D_{CD}=4\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{PMD}=0.1\text{ps}/(\text{km})^{0.5}$
 D_{PMD} pomijamy z uwagi na mały zasięg i przepływność

- Należy sprawdzić czy dla wybranych parametrów nadajnika, włókna, odbiornika system będzie odpowiednio szybki:

$$t_{sys} \leq T_{sys}$$

1. Obliczamy **wymagany czas** odpowiedzi systemu (T_{sys})

1. $T_{\text{sys}} =$

Przepływność \leftrightarrow szybkość systemu

$$B\tau = 1$$

$$T_{\text{sys}} = t_r = 0.35\tau$$

Dla RZ:

$$B_r[\text{bps}] = B = \frac{1}{\tau}$$

$$B_{r(\text{max})}[\text{bps}] = \frac{0.35}{T_{\text{sys}}}$$

Dla NRZ:

$$B_r[\text{bps}] = \frac{B}{2} = \frac{1}{2\tau}$$

$$B_{r(\text{max})}[\text{bps}] = \frac{0.7}{T_{\text{sys}}}$$

2. Obliczamy czas odpowiedzi włókna (t_{CD}) - równanie 11.8

1. $T_{sys} =$

2. $t_{CD} =$

The fiber rise time t_{CD} resulting from chromatic dispersion over a length L can be approximated by

$$t_{CD} \approx |D_{CD}| L \Delta\lambda \quad (11.8)$$

where $\Delta\lambda$ is the half-power spectral width of the light source and D_{CD} is the fiber chromatic dispersion. Since the chromatic dispersion value may change from one section of fiber to another in a long link, an average value should be used for D_{CD} in Eq. (11.8).

For a multimode fiber the *bandwidth*, or *information-carrying capacity*, is specified as a bandwidth–distance relationship with units of MHz·km. Thus, the bandwidth needed to support an application depends on the data rate of transmission, that is, as the data rate goes up (MHz), the distance (km) over which signals can be transmitted at that rate goes down. Multimode fibers with a 50-μm core diameter have about three times more bandwidth (500 MHz·km) than 62.5-μm fibers (160 MHz·km) at 850 nm. If B_{mod} is the modal-dispersion bandwidth (in MHz·km), the modal rise time t_{mod} (ns) over a fiber of length L (km) is given by

$$t_{mod} = \frac{440L}{B_{mod}} \quad (11.9)$$

The pulse-spreading t_{PMD} resulting from polarization mode dispersion is given by

$$t_{PMD} = D_{PMD} \times \sqrt{\text{fiber length}} \quad (11.10)$$

where D_{PMD} is the polarization mode dispersion measured in units of ps/√km.

3. Obliczamy czas odpowiedzi odbiornika (t_{RX}) - równanie 11.7

1. $T_{sys} =$

2. $t_{CD} =$

3. $t_{RX} =$

point, as shown in Figure 11.6. If B_{RX} is given in megahertz, the receiver front-end rise time in nanoseconds is

$$t_{RX} = \frac{350}{B_{RX}} \quad (11.7)$$

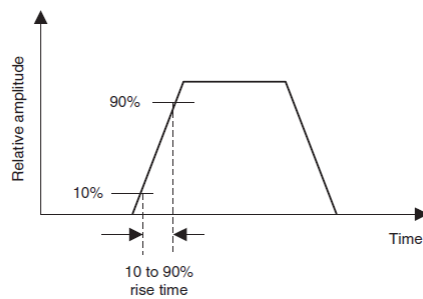


Figure 11.6. The 10 to 90 percent rise time of a pulse.

4. Obliczamy **faktyczny** czas odpowiedzi systemu (t_{sys})
- równanie 11.6

1. $T_{\text{sys}} =$

2. $t_{\text{CD}} =$

3. $t_{\text{RX}} =$

4. $t_{\text{sys}} = \{(T_{\text{tx}})^2 + (T_{\text{CD}})^2 + (T_{\text{rx}})^2\}^{1/2}$

The five basic elements that may limit system speed significantly are the transmitter rise time t_{TX} , the modal dispersion rise time t_{mod} of multimode fiber, the chromatic dispersion rise time t_{CD} of the fiber, the polarization mode dispersion rise time t_{PMD} of the fiber, and the receiver rise time t_{RX} . Substituting these parameters into Eq. (11.5) then yields

$$t_{\text{sys}} = (t_{\text{TX}}^2 + t_{\text{mod}}^2 + t_{\text{CD}}^2 + t_{\text{PMD}}^2 + t_{\text{RX}}^2)^{1/2} \quad (11.6)$$

Single-mode fibers do not experience modal dispersion (i.e., $t_{\text{mod}} = 0$), so in these fibers the rise time is related only to chromatic and polarization mode dispersions.

- Uzyskane wartości wprowadzamy do tabeli

Spreadsheet for Calculating BPON-Based FTTP Link Rise Time Budget

Component	Rise time	Rise time budget
Allowed rise-time budget		$T_{sys} =$ [ns]
Laser transmitter rise time	$t_{TX} =$ [ns]	
Fiber chromatic dispersion	$t_{CD} =$ [ns]	
Fiber PMD (zaniedbujemy)	0 [ns]	
Receiver rise time	$t_{RX} =$ [ns]	
System rise time	-	$t_{sys} =$ [ns]

Sprawdzamy czy: $t_{sys} \leq T_{sys}$

Example 12.7

An optical fiber system is to be designed to operate over an 8 km length without repeaters. The rise times of the chosen components are:

Source (LED)	8 ns
Fiber: intermodal	5 ns km ⁻¹
(pulse broadening) intramodal	1 ns km ⁻¹
Detector (<i>p-i-n</i> photodiode)	6 ns

From system rise time considerations, estimate the maximum bit rate that may be achieved on the link when using an NRZ format.

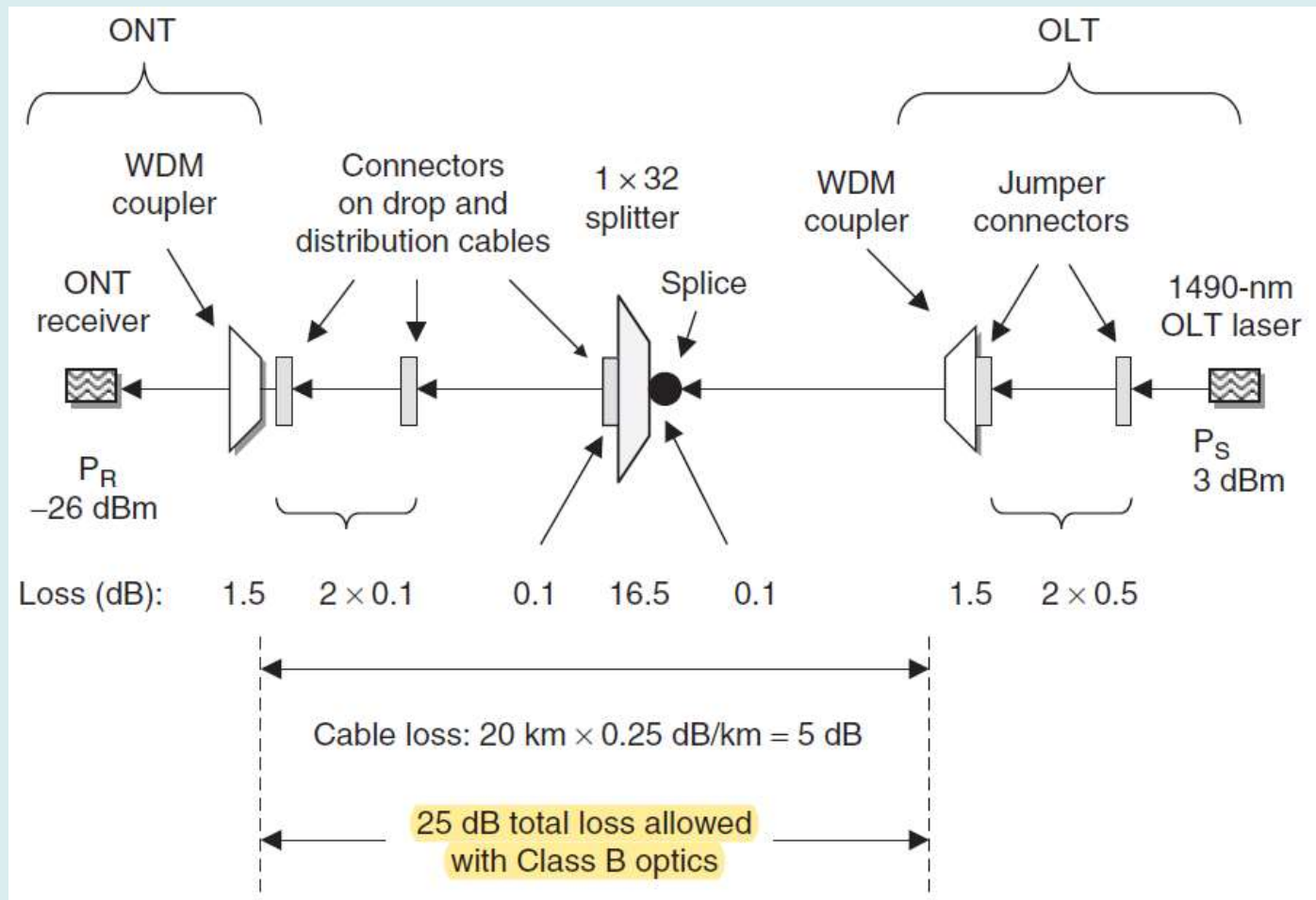
$L=8$ km, $T_{LED}=8$ ns, $\tau_{mod}=5$ ns/km, $\tau_{ch}=D_{ch}*\Delta\lambda=1$ ns/km, $T_{PIN}=6$ ns,
NRZ, $B_{T,max}=?$

$$T_{Syst}=1.1*T=46.2 \text{ ns}$$

$$B_{T,max}=0.7/46.2 \text{ ns}=15.2 \text{ Mbps (7.6 MHz)}$$

FTTH – PON

DS, 1.25 Gbps, BER=10⁻¹¹



Optical power losses of various components in a 1490-nm FTTP link

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD},1490\text{nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, , $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}=0.56 \text{ ns}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}=0.56 \text{ ns}$

- $T_{\text{CD}}=D_{\text{CD}}L\Delta\lambda$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}=0.56 \text{ ns}$

- $T_{\text{CD}}=D_{\text{CD}}L\Delta\lambda=80 \text{ ps}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}=0.56 \text{ ns}$
- $T_{\text{CD}}=D_{\text{CD}}L\Delta\lambda=80 \text{ ps}$
- $T_{\text{rx}}=0.35/B_{\text{rx}}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $T_{\text{sys, BR}}=0.7/B_{\text{NRZ}}=0.56 \text{ ns}$

- $T_{\text{CD}}=D_{\text{CD}}L\Delta\lambda=80 \text{ ps}$

- $T_{\text{rx}}=0.35/B_{\text{rx}}=0.28 \text{ ns}$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $(T_{\text{sys}})^2=(T_{\text{tx}})^2+(T_{\text{CD}})^2+(T_{\text{rx}})^2$

$B_{\text{NRZ}}=1.25 \text{ GBps}$, $L=20 \text{ km}$

LD: $T_{\text{tx}}=0.1 \text{ ns}$, $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$

$B_{\text{rx}}=1250 \text{ MHz}$,

G652 fiber: $D_{\text{CD}, 1490 \text{ nm}}=4 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, $D_{\text{PMD}}=0.1 \text{ ps}/(\text{km})^{0.5}$

- $(T_{\text{sys}})^2=(T_{\text{tx}})^2+(T_{\text{CD}})^2+(T_{\text{rx}})^2$

- $T_{\text{sys}}=0.307 \text{ ns}$

Spreadsheet for Calculating BPON-Based FTTP Link Rise Time Budget

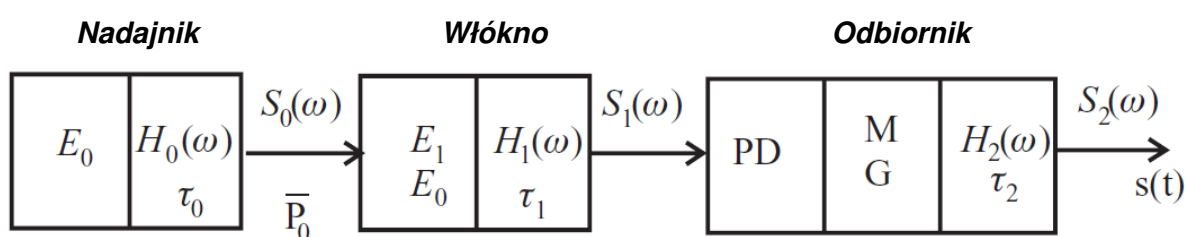
Component	Rise time	Rise time budget
Allowed rise-time budget $T_{\text{sys, BR}}$		0.56 ns
Laser transmitter rise time	0.1 ns	
Fiber chromatic dispersion	0.08 ns	
Fiber PMD	0	
Receiver rise time	0.28 ns	
System rise time T_{sys}	-	0.307 ns

MODEL NUMERYCZNY ŁĄCZA ŚWIATŁOWODOWEGO PON

Uogólniony schemat systemu światłowodowego składa się z nadajnika, włókna światłowodowego oraz odbiornika.

W najbardziej typowej, praktycznej sytuacji informacja w systemie transmitowana jest za pomocą impulsów świetlnych. W trakcie propagacji od nadajnika do odbiornika impulsy ulegają degradacji spowodowanej tłumieniem włókna oraz efektami dyspersyjnymi.

Model łącza optycznego przedstawiono na Rys. 1



Rys. 1 Model transmisyjny systemu światłowodowego

Widmo sygnału na wyjściu odbiornika określa równanie [S. Geckeler. *Optical Fiber Transmission System*. Artech House, Inc., Norwood, 1987]:

$$S_2(\omega) = i_T * T * M * R * G * H_0(\omega) * H_1(\omega) * H_2(\omega)$$

Gdzie:

M – współczynnik powielania fotodiody APD

G – wzmacnienie

i_T – średni prąd fotodiody w czasie T

$H_0(\omega)$ – transmitancja nadajnika

Prąd fotodiody i_T można wyrazić za pomocą następującej zależności:

$$i_T = P_{omax} \frac{\tau_0}{T} D_1 \frac{\eta e}{h\nu}$$

Gdzie:

η – efektywność kwantowa fotodiody

ν – częstotliwość optyczna

h – stała Plancka

e – ładunek elektronu

D_1 – straty włókna, zdefiniowane następująco:

$$D_1 = \frac{E_1}{E_0} = 10^{-\alpha L_1 / 10 \text{ dB}}$$

Odbiornik reprezentowany jest za pomocą dolnoprzepustowej charakterystyki:

$$H_2(\omega) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{1}{2} \omega \tau_2 \right) \right]$$

Włókno modelowane jest za pomocą funkcji Gaussa:

$$H_1(\omega) = e^{-\frac{1}{4} \omega^2 \tau_1^2}$$

Parametr τ_1 zwykle określony jest na podstawie pomiaru pasma (B_1) przenoszenia włókna.

Parametr τ_1 powiązany jest z pasmem zależnością:

$$\tau_1 = \frac{1}{2B_1}$$

Pasmo światłowodu modelowane jest następująco [S. Geckeler. Modelling of fiber-optic transmission systems on a desk-top computer. *Siemens Res. and Dev. Reports*, **12**:127–34, 1983] :

$$B_1 = B_L \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{3L_C} \right)$$

Gdzie:

L_1 – długość włókna

L_c – droga sprzężenia (dotyczy włókien wielomodowych)

B_L – iloczyn pasmo * zasięg

Rezultaty analizy numerycznej przykładowego łącza światłowodowego

Przykładowe obliczenia przeprowadzono w środowisku Matlab.

Przyjęto następujące parametry:

-parametry sygnału nadajnika:

$$BR = 50 \text{ Mbps (przepływność)}$$

$$P_0 = 0.5 \text{ mW (maksymalna moc optyczna)}$$

- parametry włókna:

$$L = 15 \text{ km (długość łącza)}$$

$$\alpha = 3 \text{ dB/km (tłumienność jednostkowa)}$$

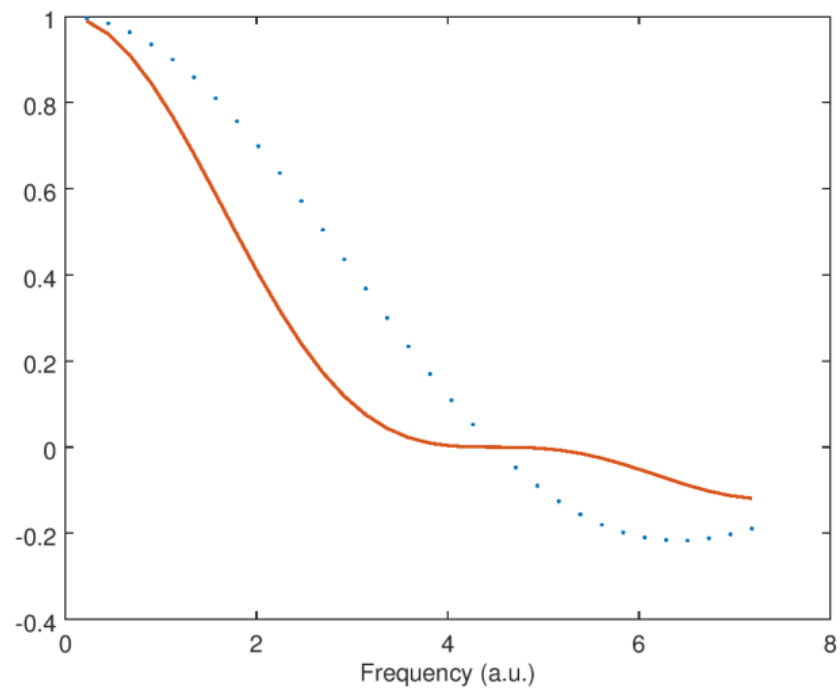
$$BL = 800 \text{ MHz*km (iloczyn pasmo*zasięg)}$$

$$L_c = 10 \text{ km (droga sprzężenia)}$$

- parametry odbiornika:

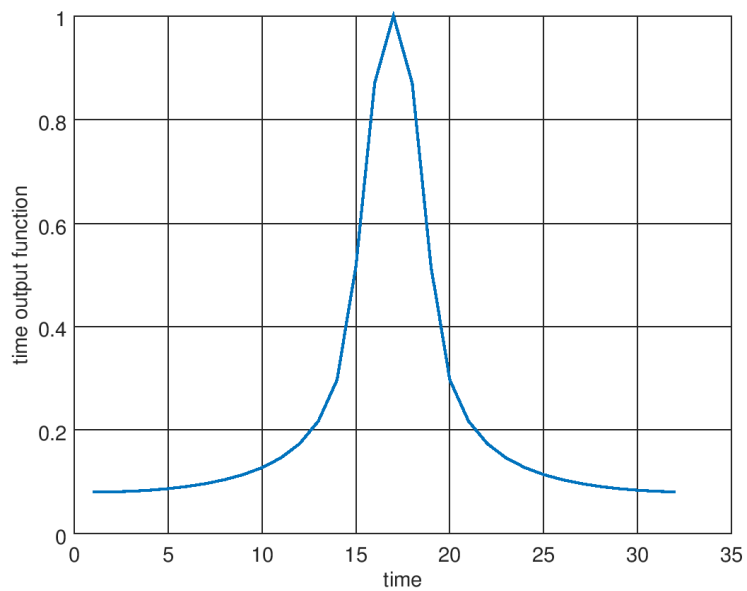
$$\tau_2 = 0.7$$

Na rysunku 2 pokazano obliczone **charakterystyki widmowe** w łączy optycznym.



Rys. 2.2 Wyniki analizy numerycznej: widmo wejściowe (sygnał prostokątny), linia przerywana oraz widmo wyjściowe sygnału, linia ciągła

Na rysunku 3 pokazano kształt impulsu na wyjściu system.



Rys. 3 Wyniki analizy numerycznej: kształt impulsu wyjściowego

WNIOSKI

Prosty model analizy numerycznej pozwala na obliczenie podstawowych właściwości systemu optycznego. Model może być stosowany zarówno w systemach z włóknami wielodomowymi jak i jednomodowymi. Umożliwia uwzględnienie dowolnych efektów dyspersyjnych.

LITERATURA:

1/ S. Geckeler. *Optical Fiber Transmission System*. Artech House, Inc., Norwood, 1987

2/ S. Geckeler. Modelling of fiber-optic transmission systems on a desk-top computer. *Siemens Res. and Dev. Reports*, **12**:127–34

Introduction to Optical Transmitters Tx1

Lecture Series

*University Program
Photonics Curriculum Version 9.9*

- Introduction to Fiber-Optic Communications I & II
- Recommended - Fibers I

Module Objectives

- Semiconductor lasers as sources for optical transmitters
- How a laser works
 - Functional view: gain medium, energy pump, cavity, losses
 - Basic structure: Fabry-Perot laser
 - Optical absorption and emission processes
- Gain Curve, Lasing conditions (gain and phase)
- Rate Equations, Dynamic Effects of Lasers
- Introduction to DFB Lasers

- Many types of optical sources are available
 - Light Emitting Diodes (LEDs)
 - Solid state lasers
 - Gas lasers
 - Semiconductor lasers
 - Fiber lasers
- Semiconductor Lasers are preferred
 - Powered by electrical energy
 - Directly converts **electrical** signals to **optical** signals
 - Generate coherent light source unlike LEDs

- High modulation bandwidth (> 10 Gbit/s)
- Small size
 - Packaged: $\sim 2 \times 1 \times 1$ cm
 - Unpackaged: \sim grain of salt, $0.5\text{mm} \times 200\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$
- Intense single spatial mode
- Energy efficient
- Narrow spectral linewidth
- Can be single longitudinal mode (monochromatic)
- Reliable operation
- Can be integrated

LASER is an acronym for:

LIGHT

Amplification by

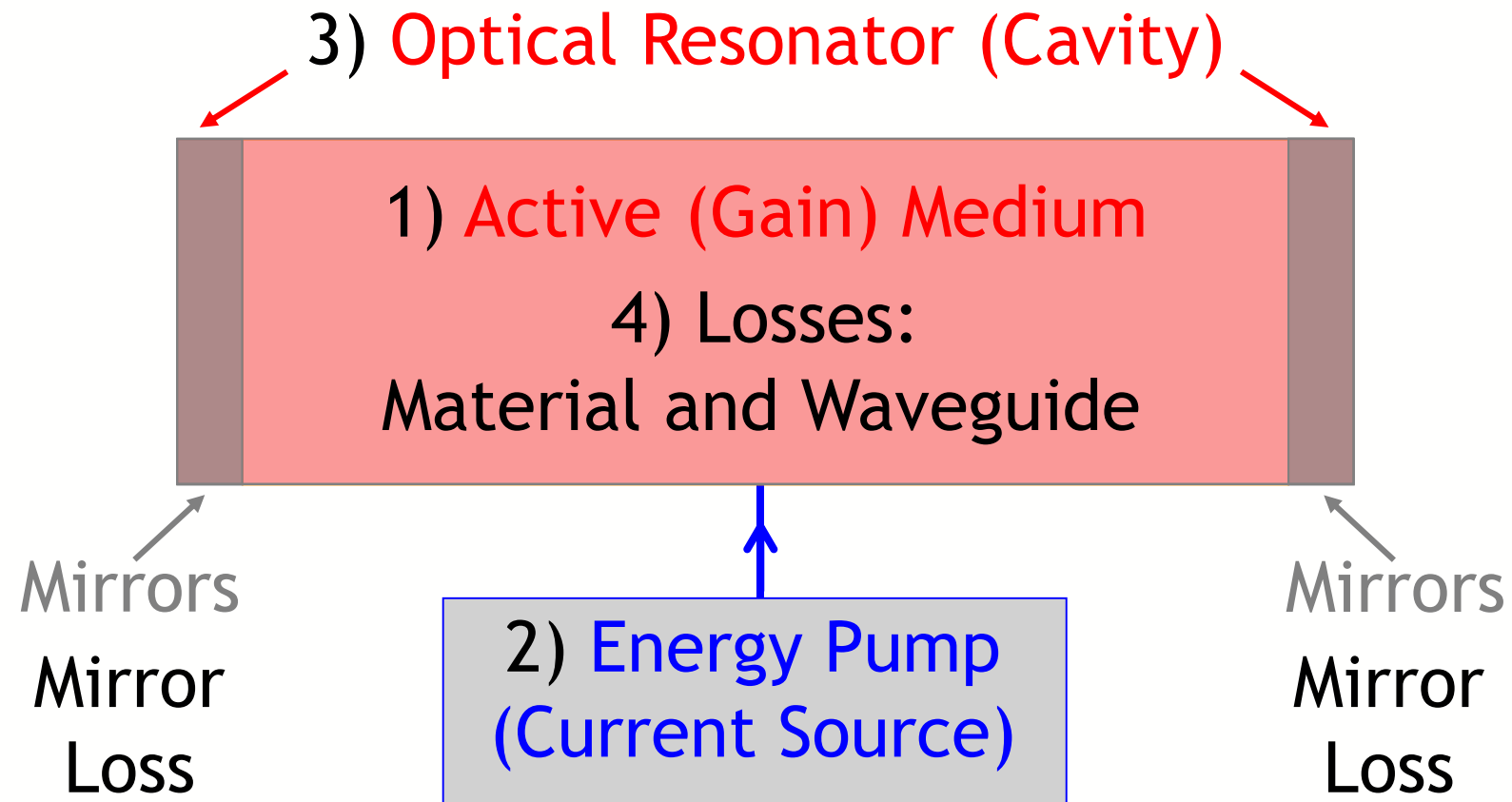
Stimulated

Emission of

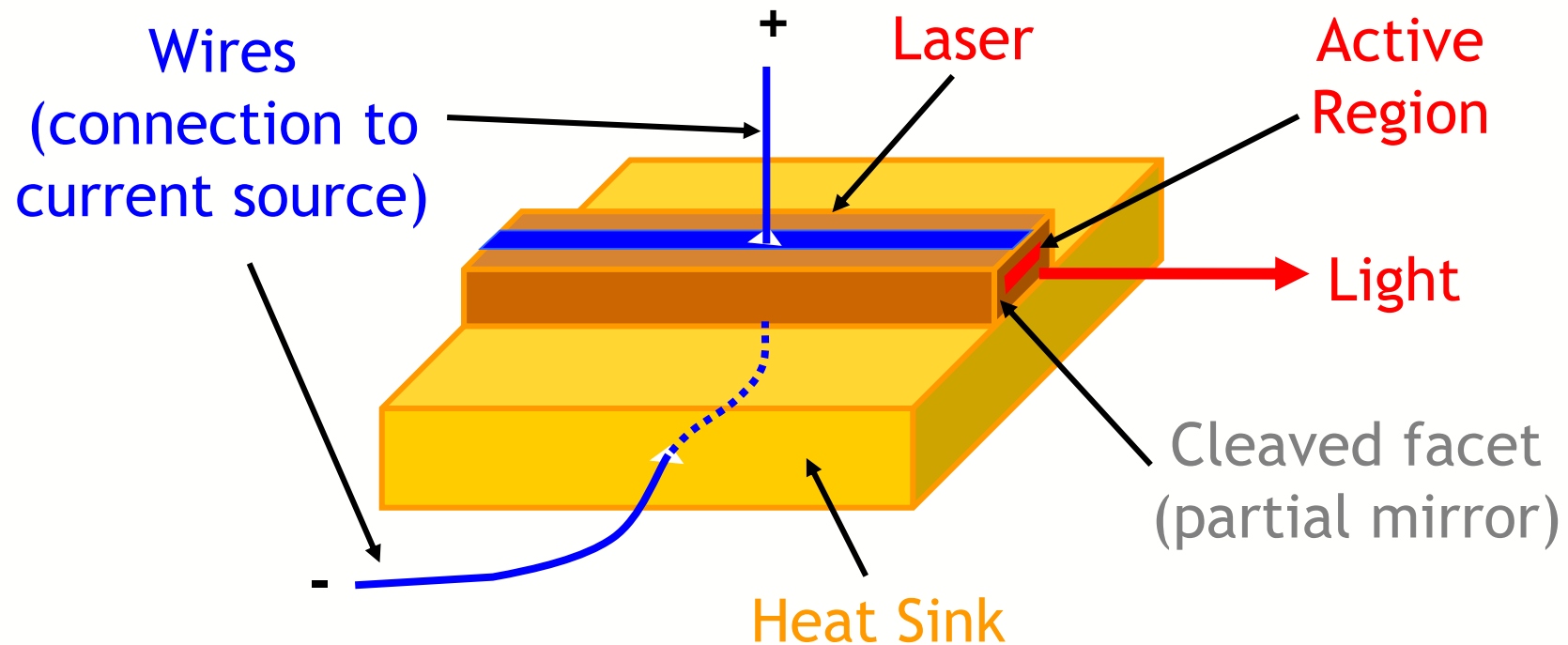
Radiation

- How does it work?
- Why amplification?
- What is stimulated emission?

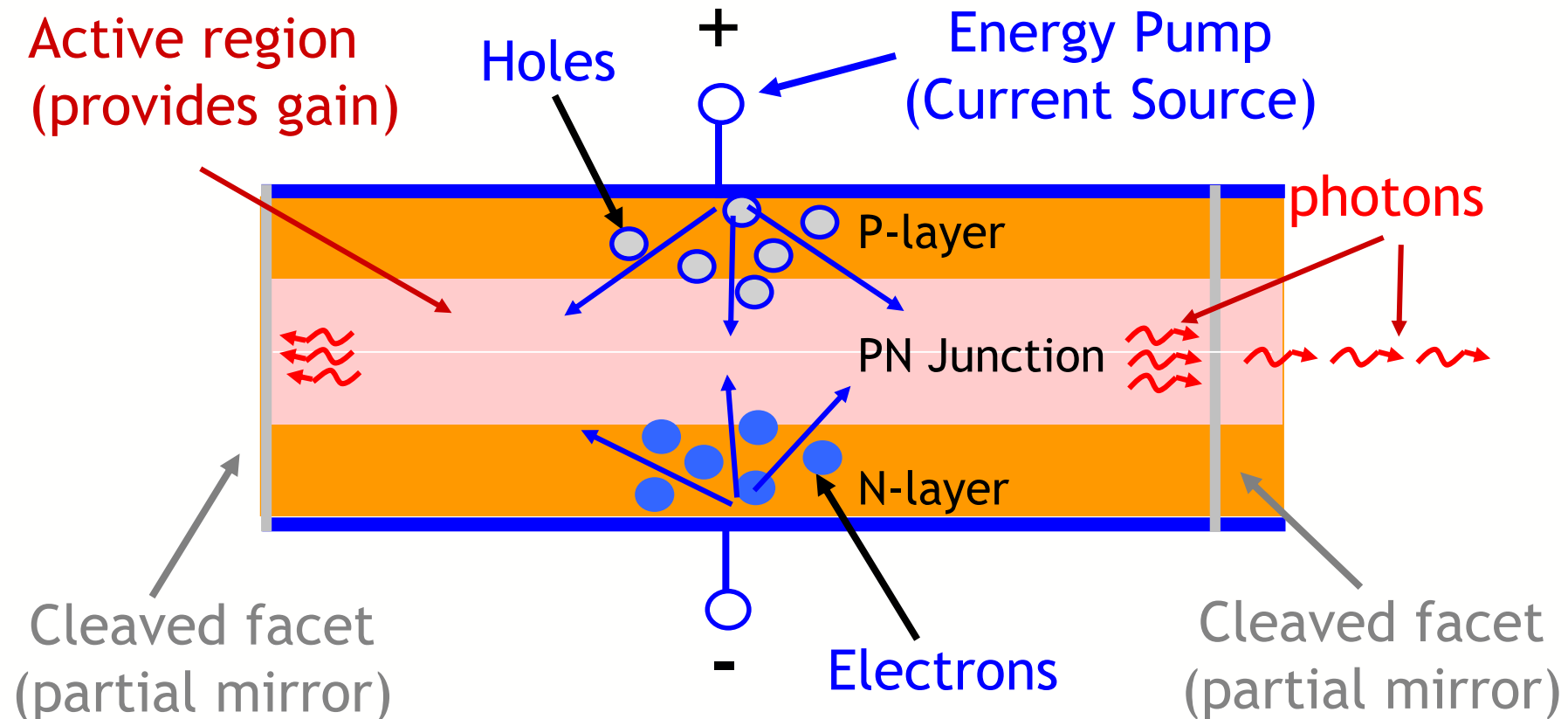
A functional view of a laser: 4 main parts



Fabry-Perot Laser



Fabry-Perot Laser (longitudinal section)

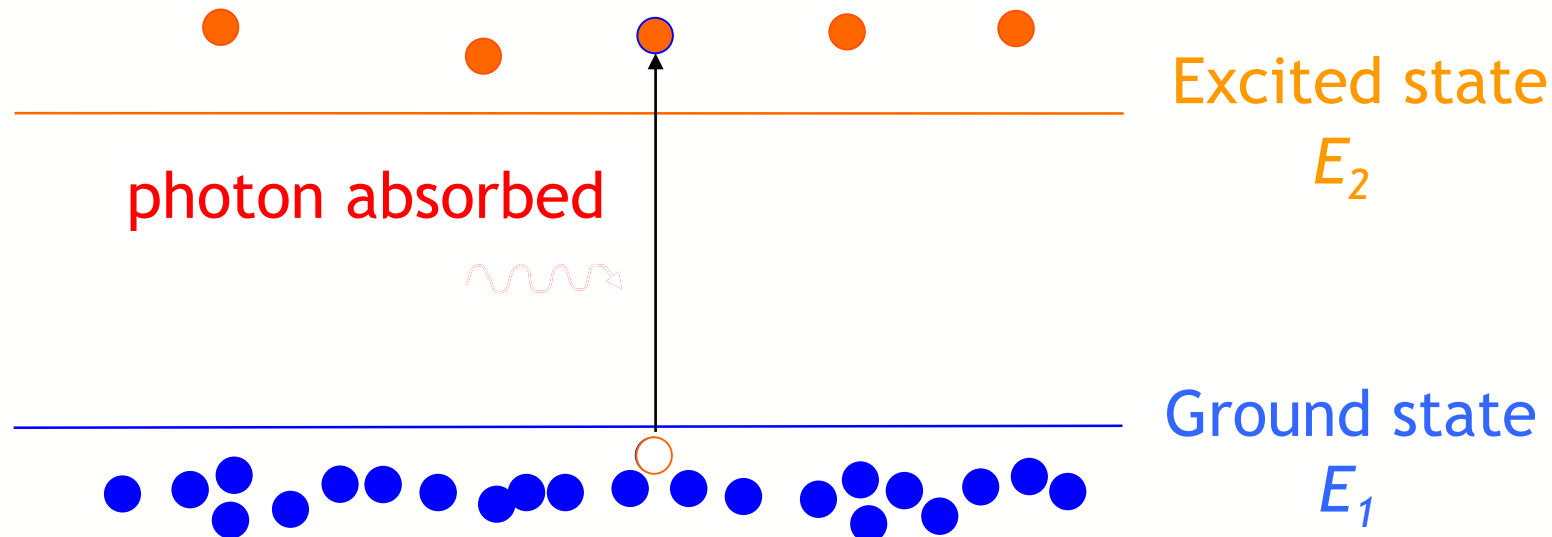


- Need to consider three optical transition processes:
 - Absorption
 - Spontaneous emission
 - Stimulated emission

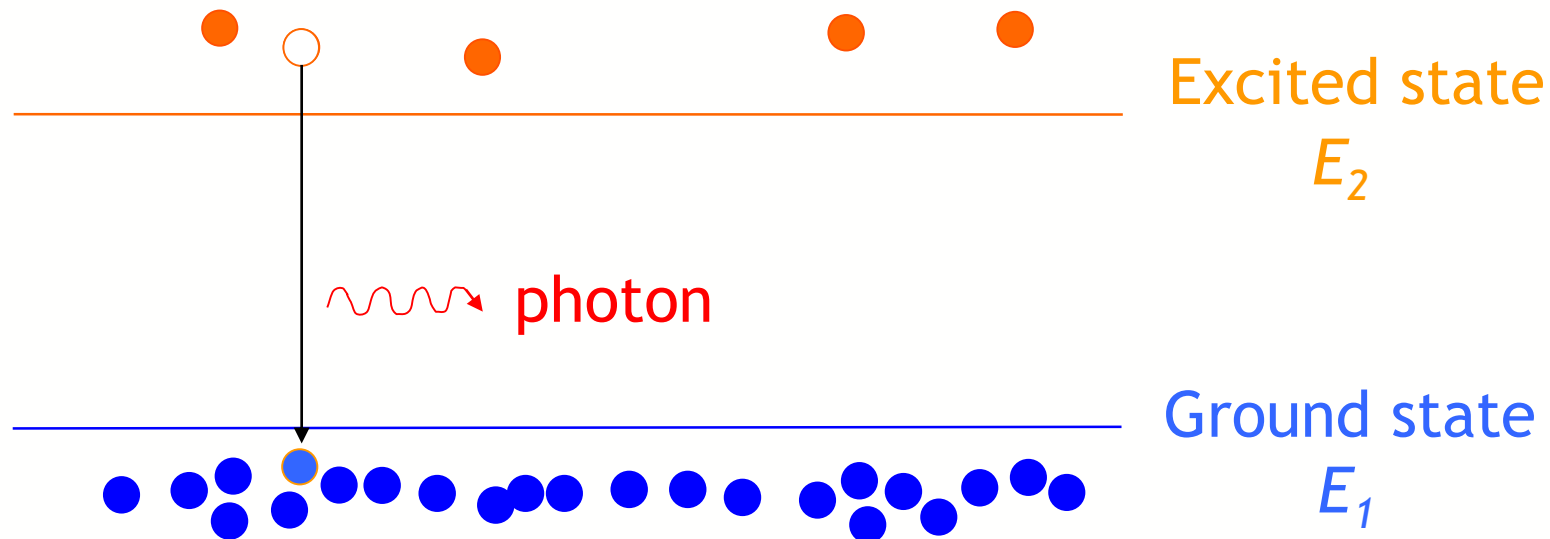
Energy level diagrams for electrons in the active medium



- Absorption: a photon with energy $> (E_2 - E_1)$
- The photon's energy can be absorbed by an electron in state E_1 , thus exciting it to state E_2

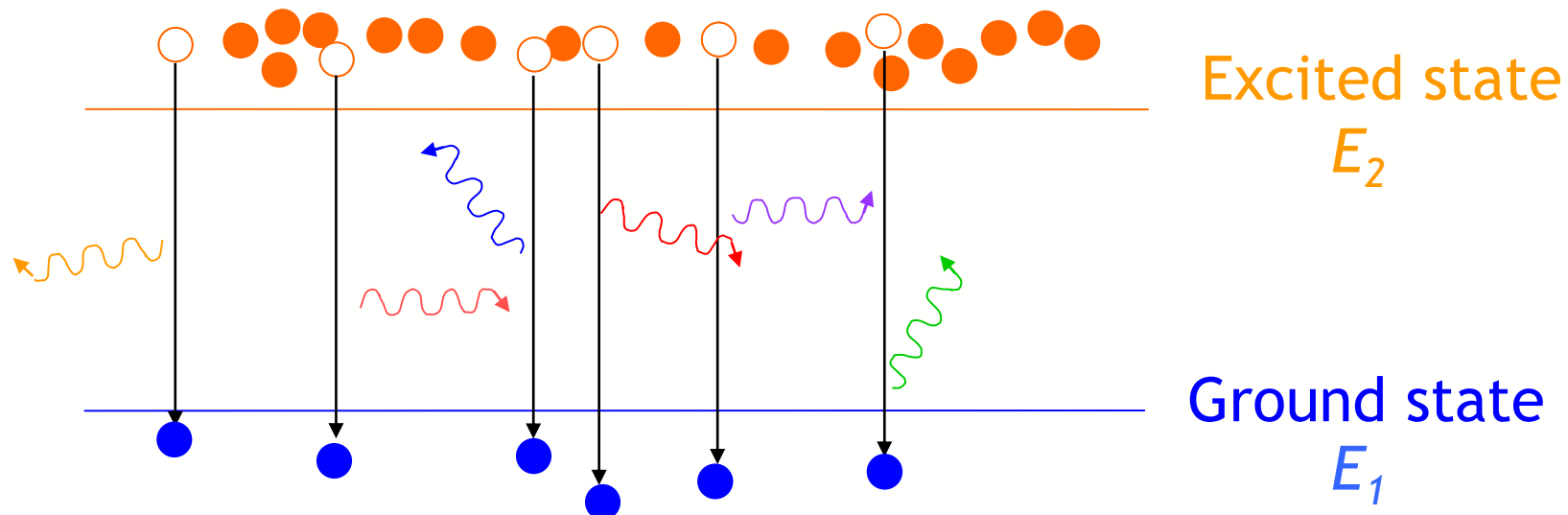


- Spontaneous Emission: electron in excited state E_2 can spontaneously decay to state E_1
- A photon with energy $hf > (E_2 - E_1)$ is emitted

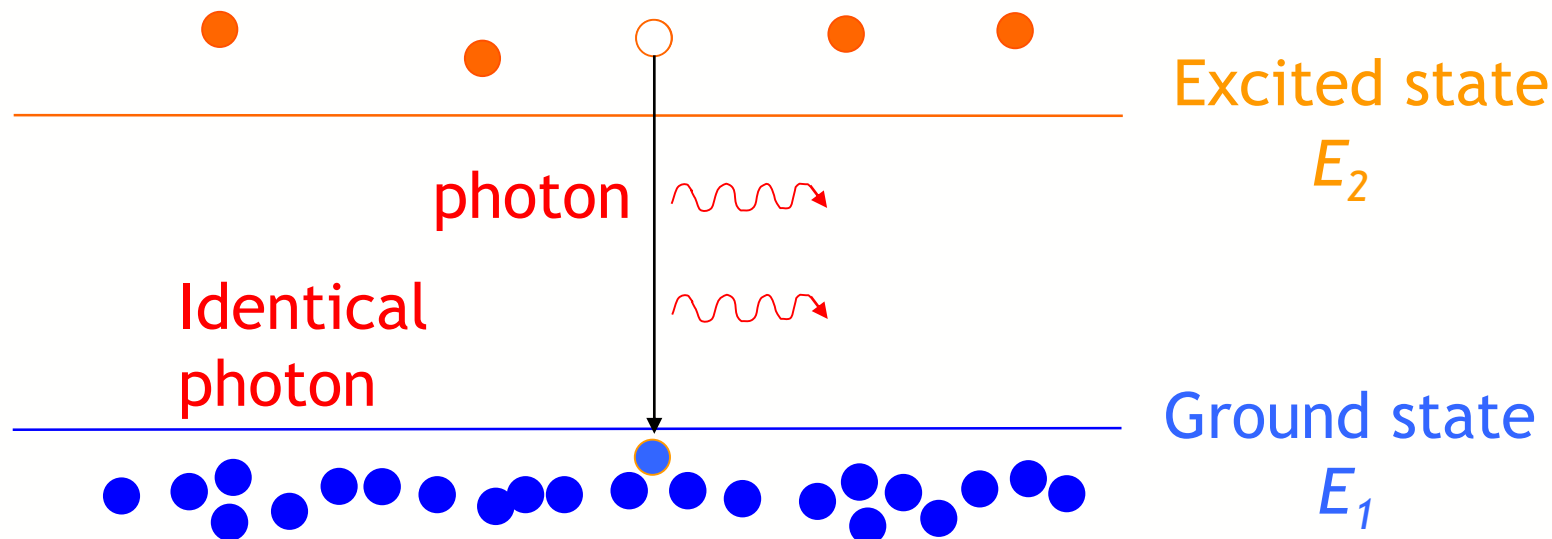


Light produced by spontaneous emission:

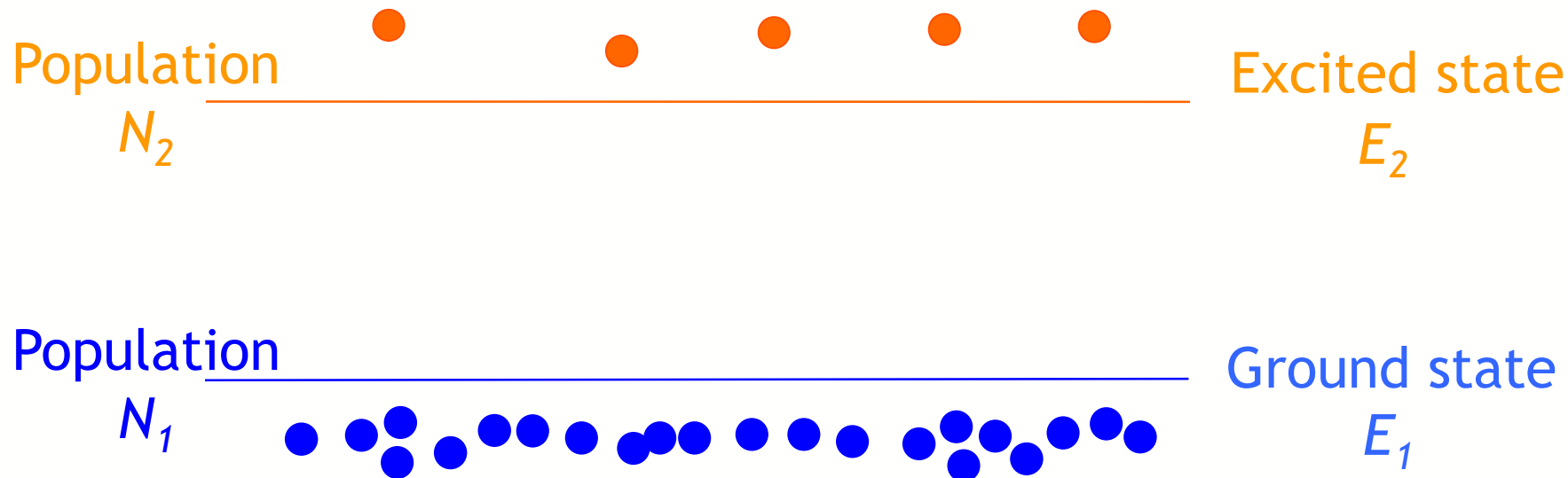
- Random **propagation direction**
- Random **phase**
- Random **frequency**
- is **incoherent** (broad linewidth)



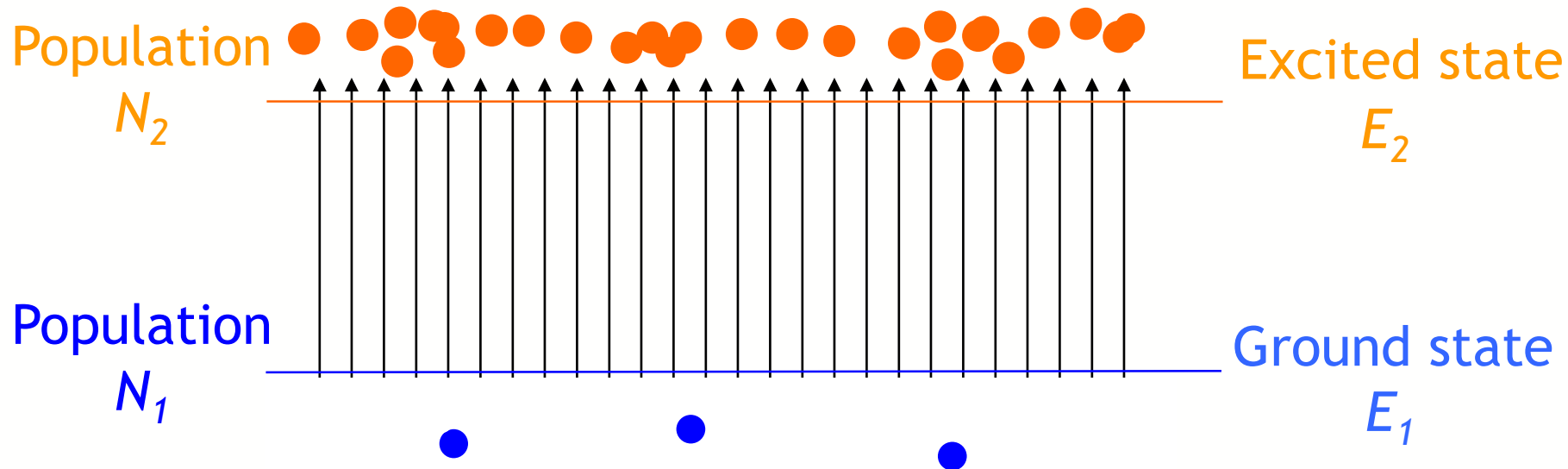
- Stimulated Emission
- A photon with energy $> (E_2 - E_1)$: triggers transition of an excited electron \rightarrow **identical** photon is emitted
- Produced light is **coherent** (desirable)



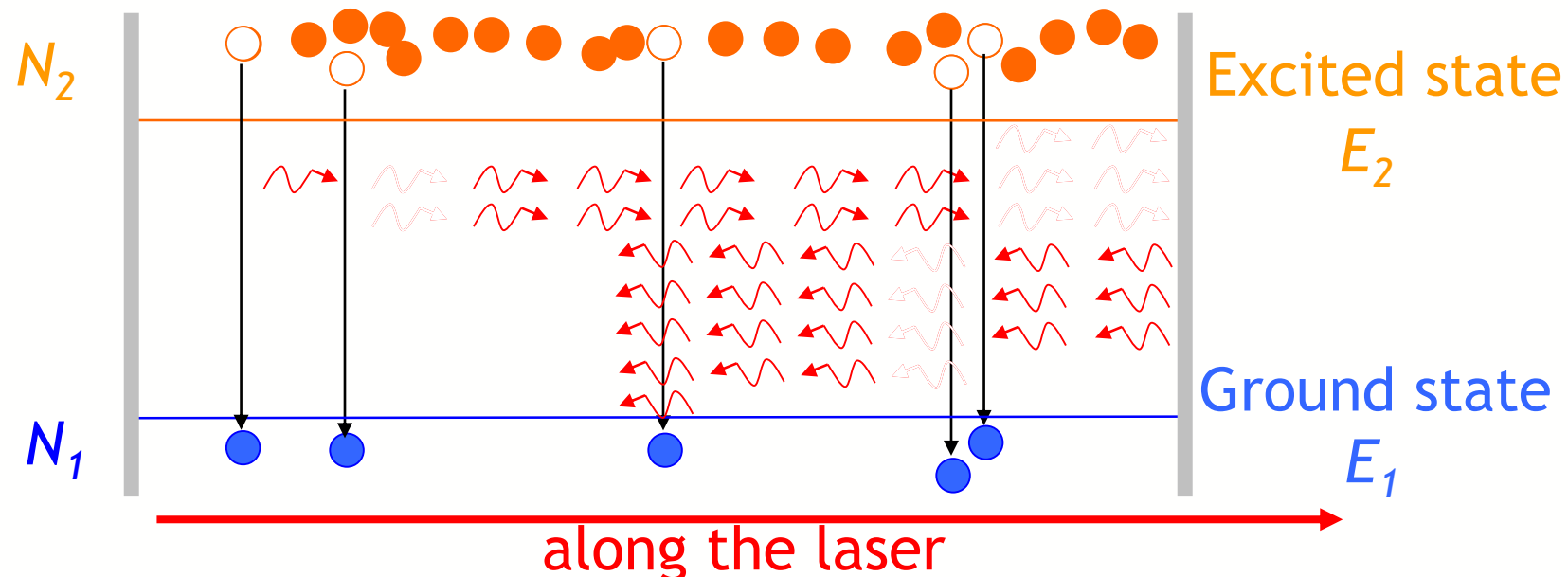
- All three processes related (Einstein Relations)
- At thermal equilibrium, absorption = emission
- Electrons mostly in state E_1 : ($N_2 \ll N_1$)
- Spontaneous emission dominates



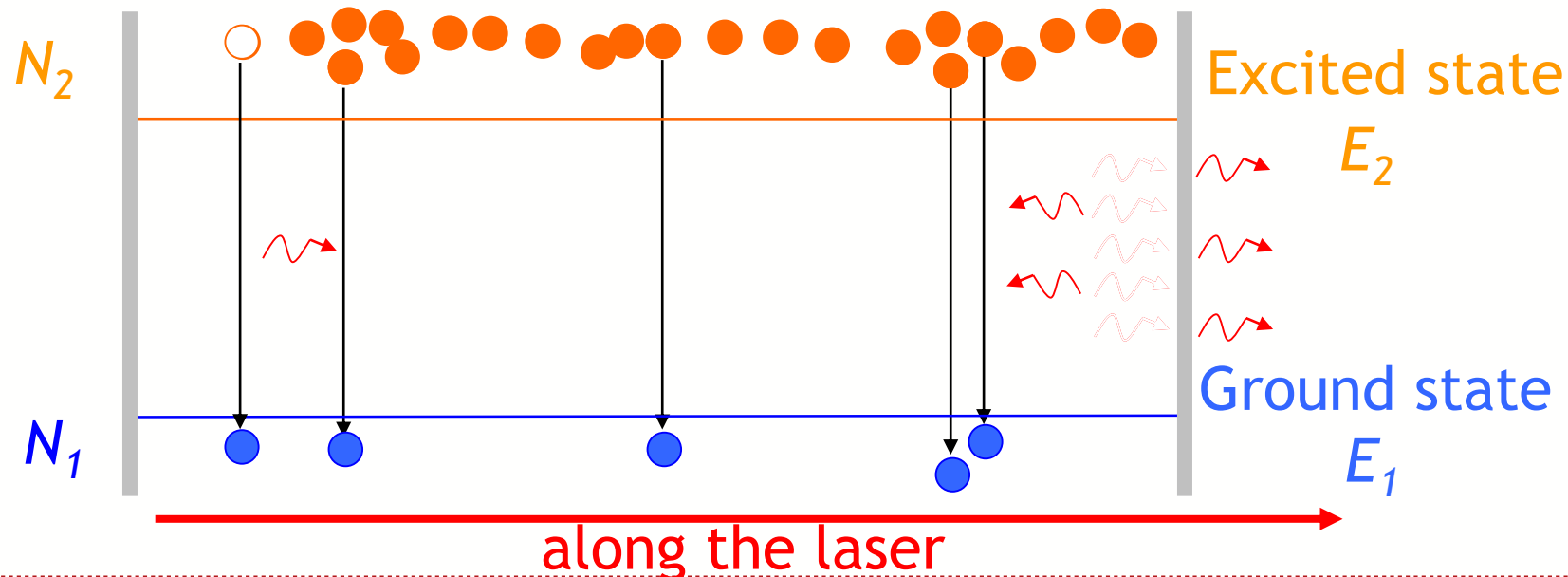
- Stimulated emission - coherent light, desirable
- Need electrons to be mostly in state E_2
- Population inversion achieved by electrical pumping
- $N_2 \gg N_1$, stimulated emission dominates



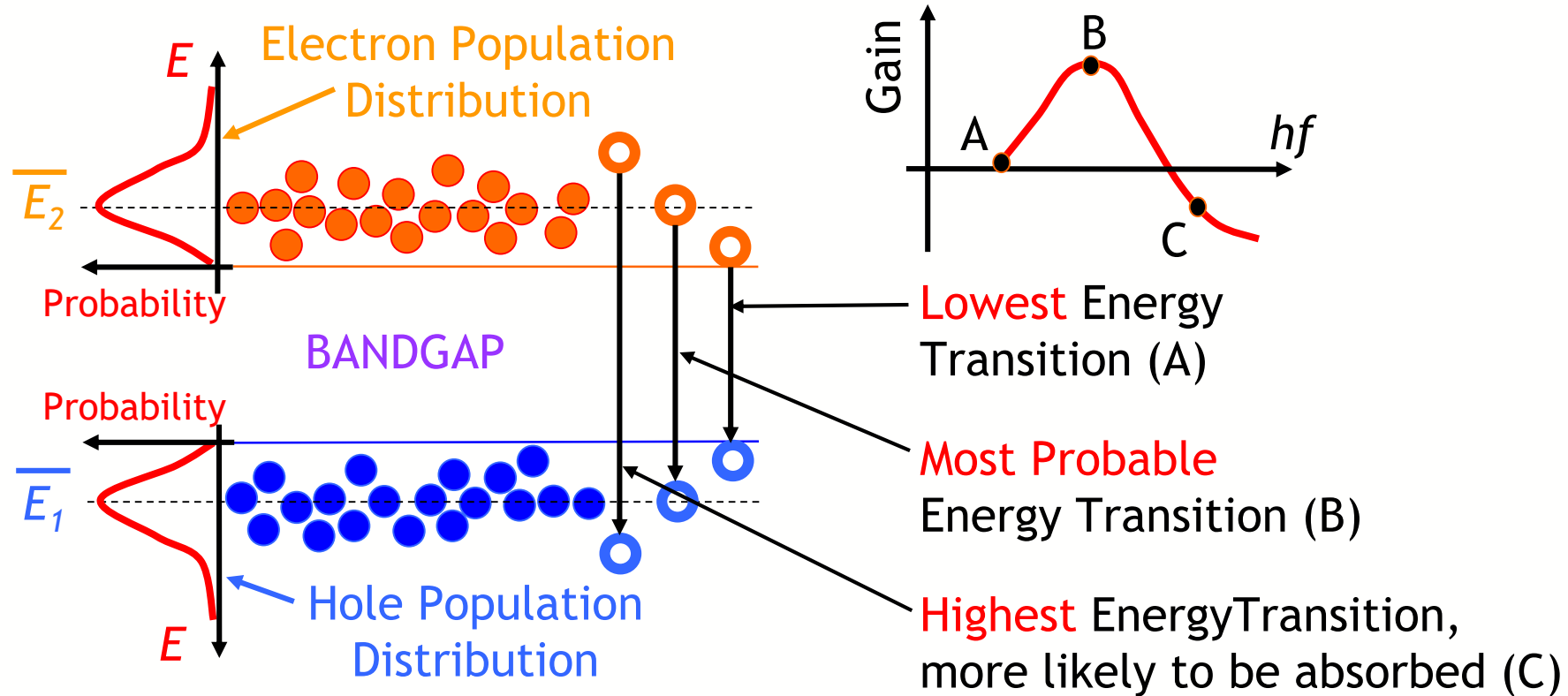
- Light amplification by stimulated emission...
is **not strong**, especially if the active region is **short**
- Optical cavity provides **feedback** into active region
- Light is **reflected** repeatedly and greatly **amplified**



- One mirror is **partially transmitting**, to get **output**
- Photons transmitted out are lost (**mirror loss**)
- Other losses: **scattering** in the material,
nonradiative processes



- Laser oscillation (**lasing**) occurs over a range of λ
- Due to distribution of E_2 and E_1 around mean values



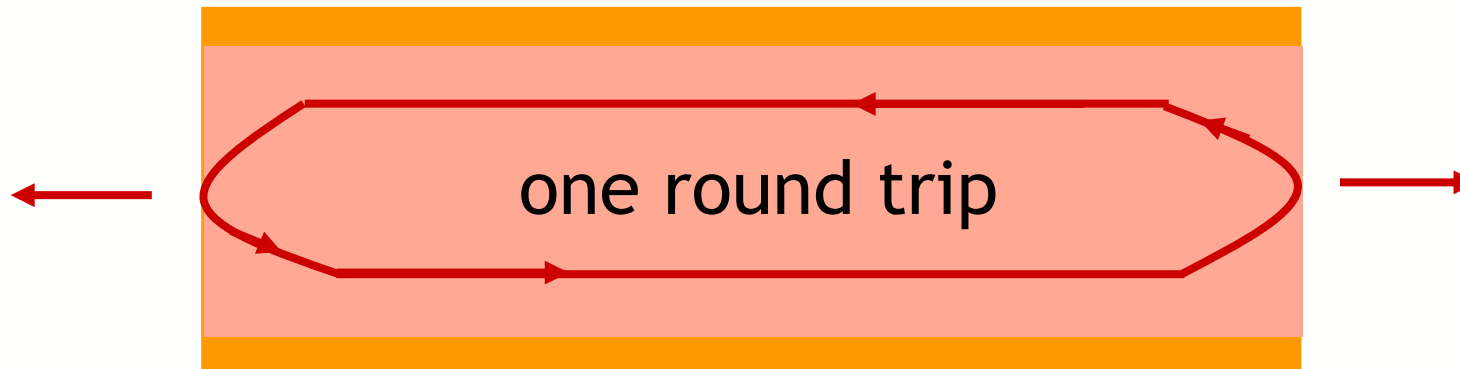
For lasing to initiate in a cavity, **two conditions** need to be satisfied:

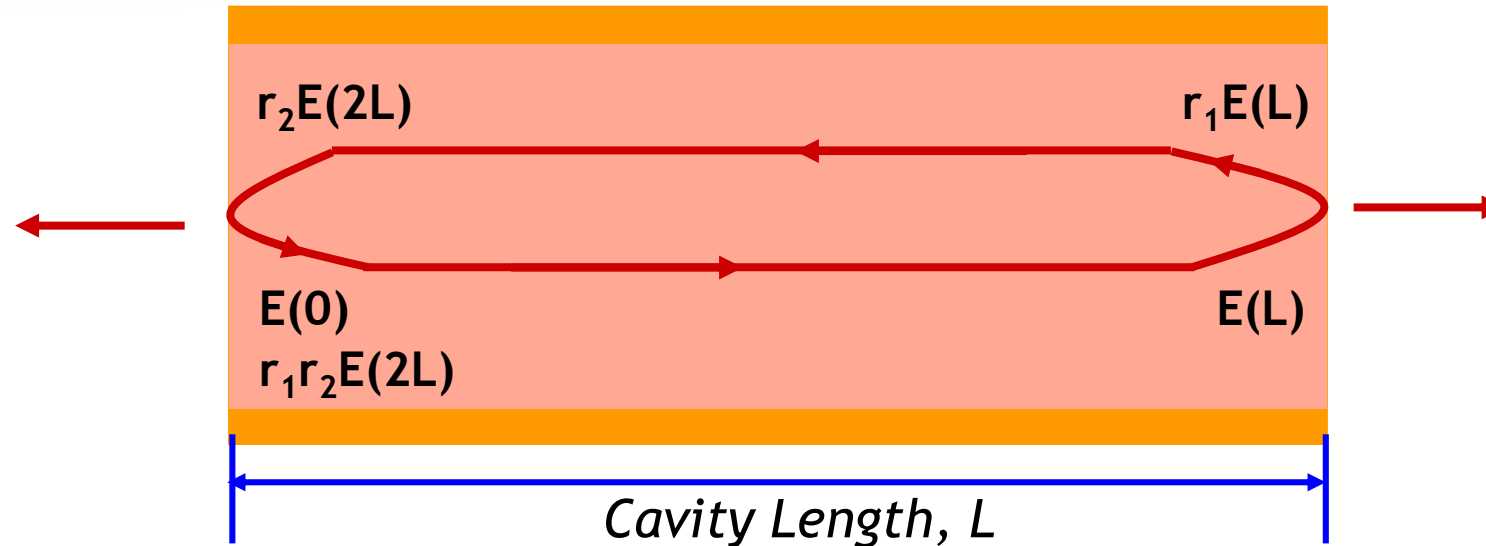
- **Gain condition:**

The electric field of the light, after completing one round trip inside the cavity, should have **the same amplitude**

- **Phase condition:**

The electric field of the light, after completing one round trip inside the cavity, should have **the same phase**





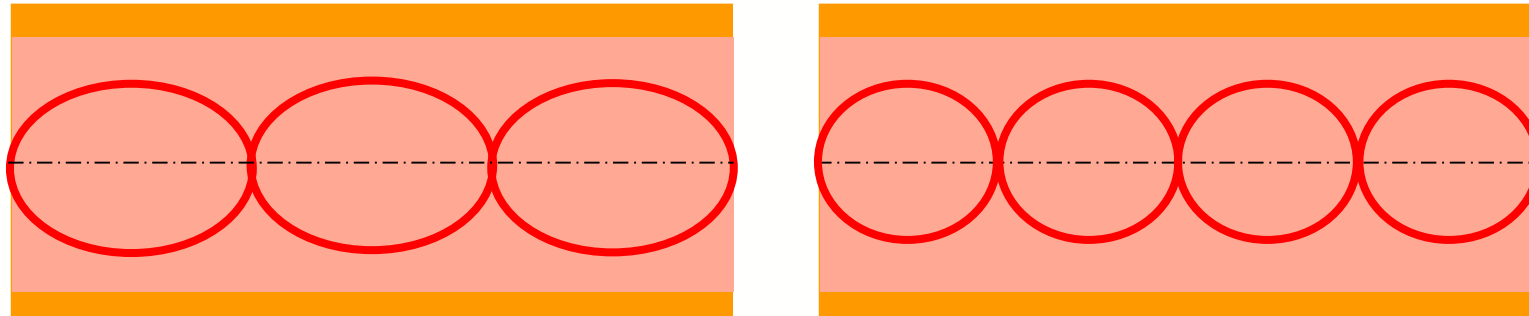
Gain Condition: $E(t,0) = E(t,2L)$

$$E(t,0) = A \exp(j\omega t); E(t, 2L) = A r_1 r_2 \exp[2L(g - \alpha_i)] \exp[j(\omega t - 2\beta L)]$$

To satisfy the Gain Condition: $r_1 r_2 \exp[(g - \alpha_i)2L] = 1$

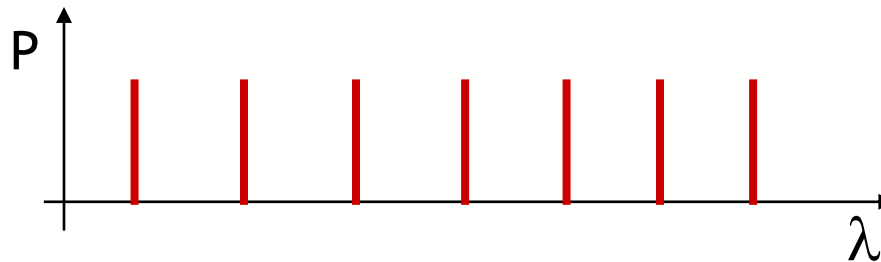
The threshold gain: $g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{r_1 r_2}$

Integral number of cycles must fit within the cavity

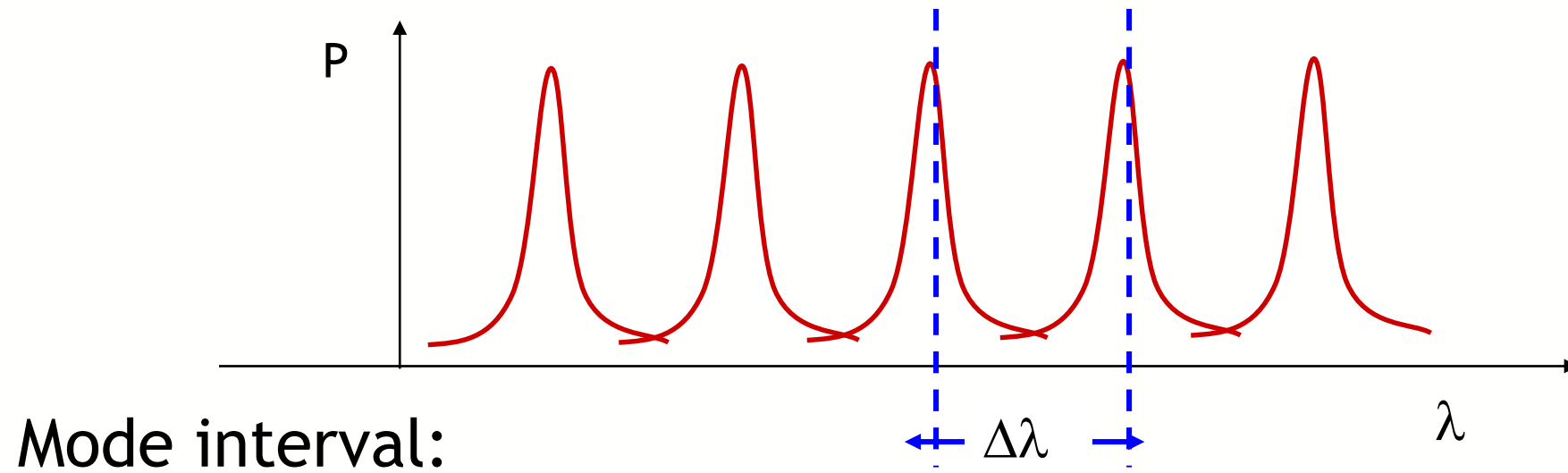


Phase: $\exp(-2j\beta L) = \exp\left(-\frac{4j\pi nL}{\lambda}\right) = 1, \quad \frac{4j\pi nL}{\lambda} = 2m\pi$

Resonant cavity - discrete set of spectral lines



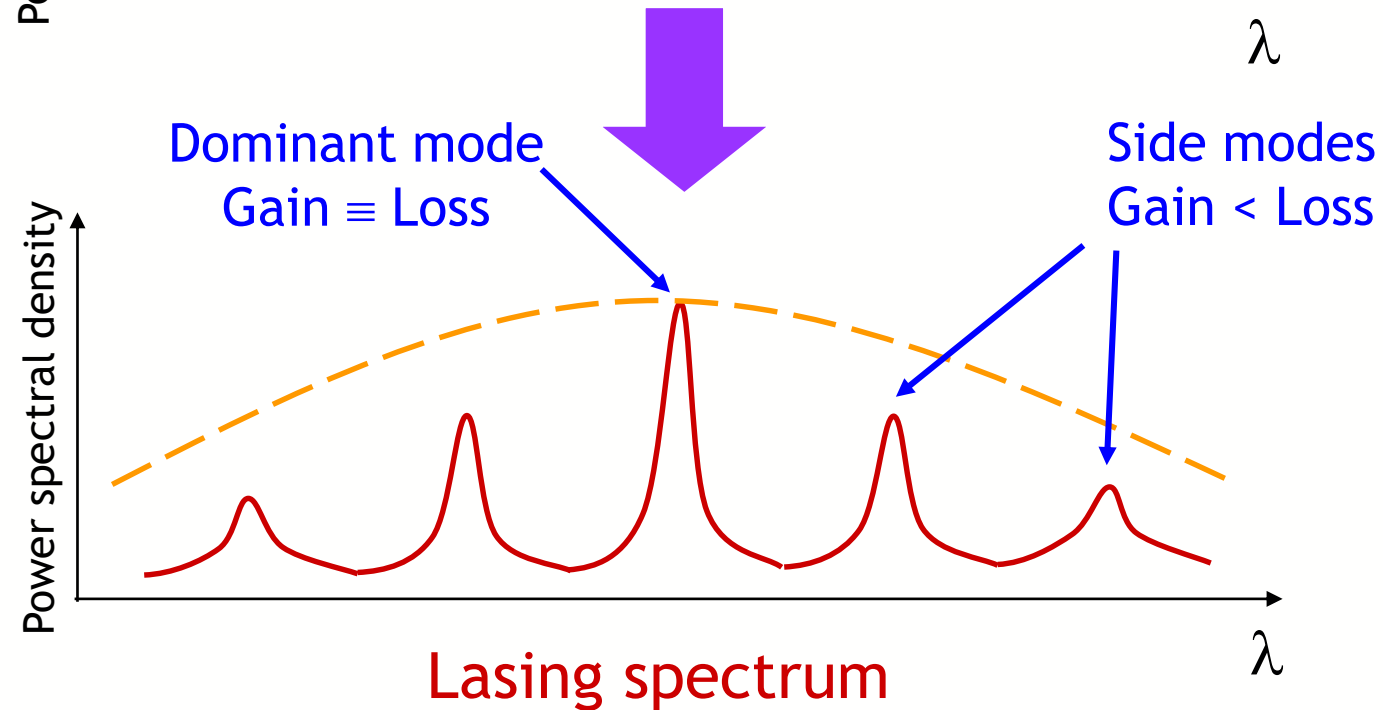
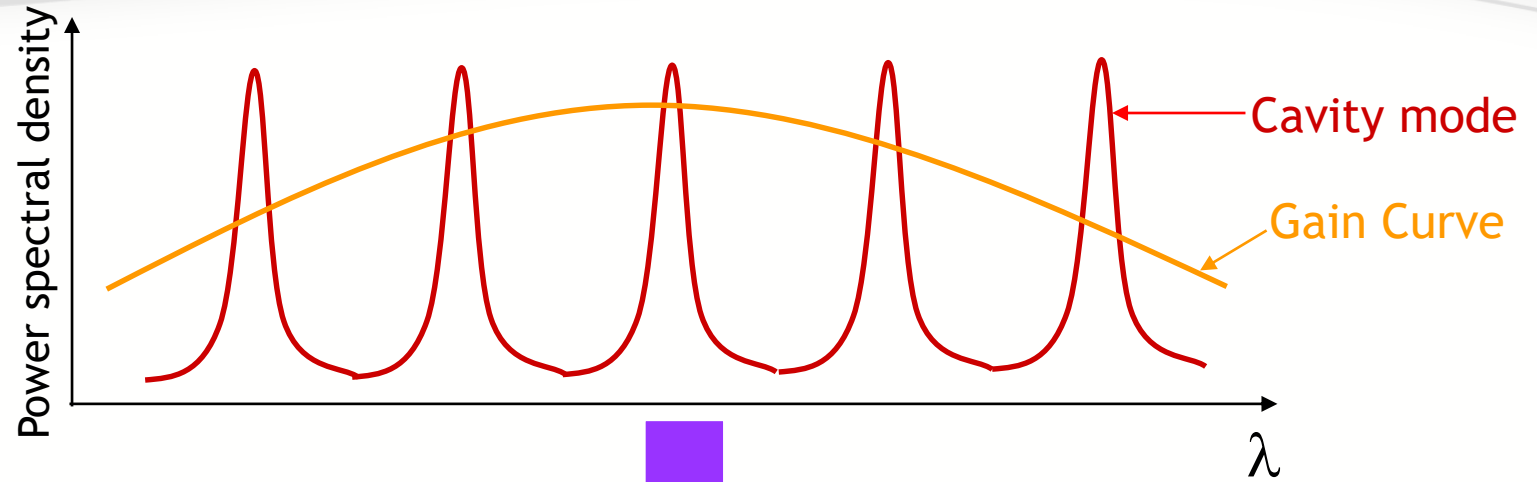
Discrete modes that can be supported by the cavity are called longitudinal modes



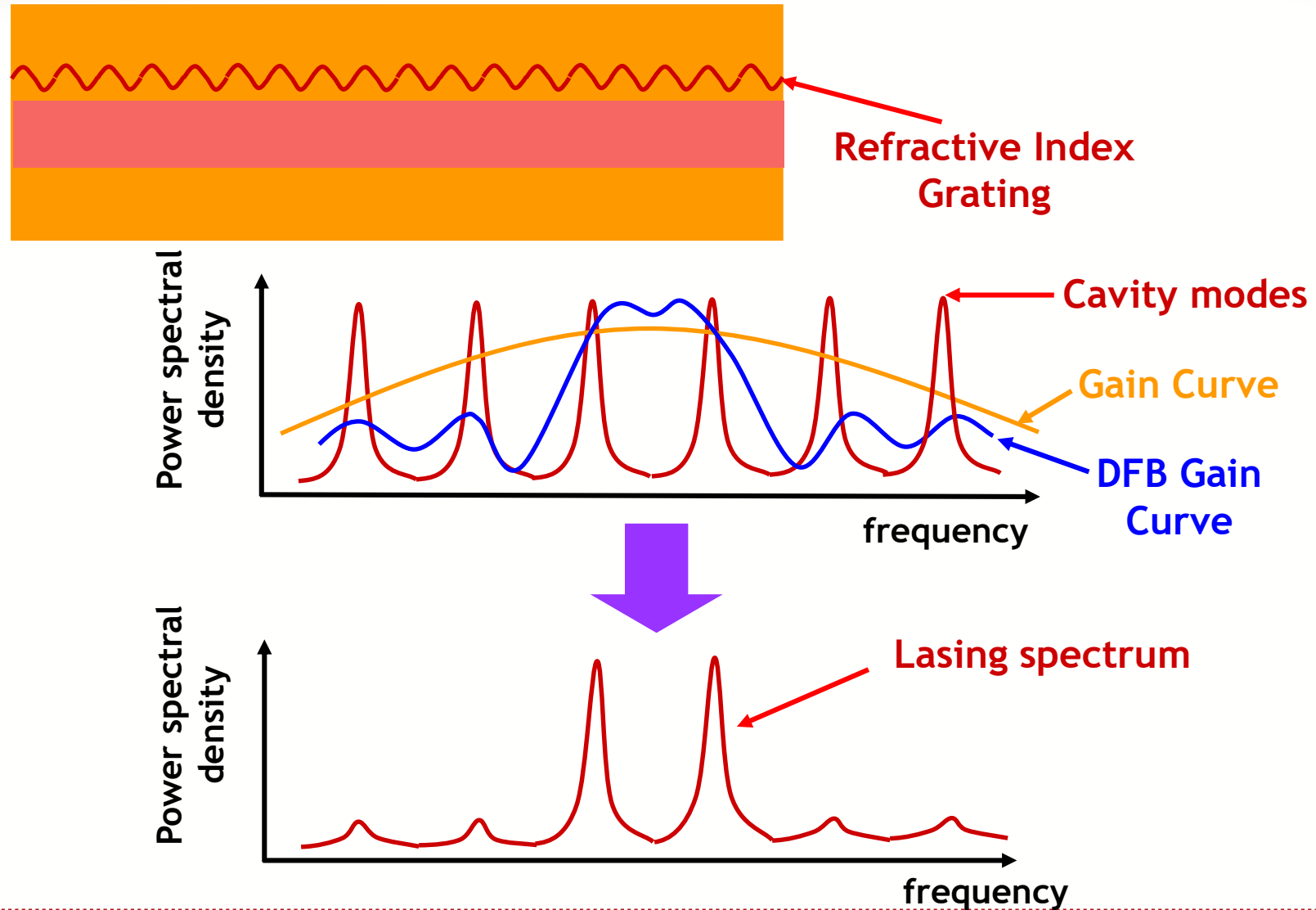
Phase condition: $\frac{2nL}{\lambda} = m$

Thus: $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$

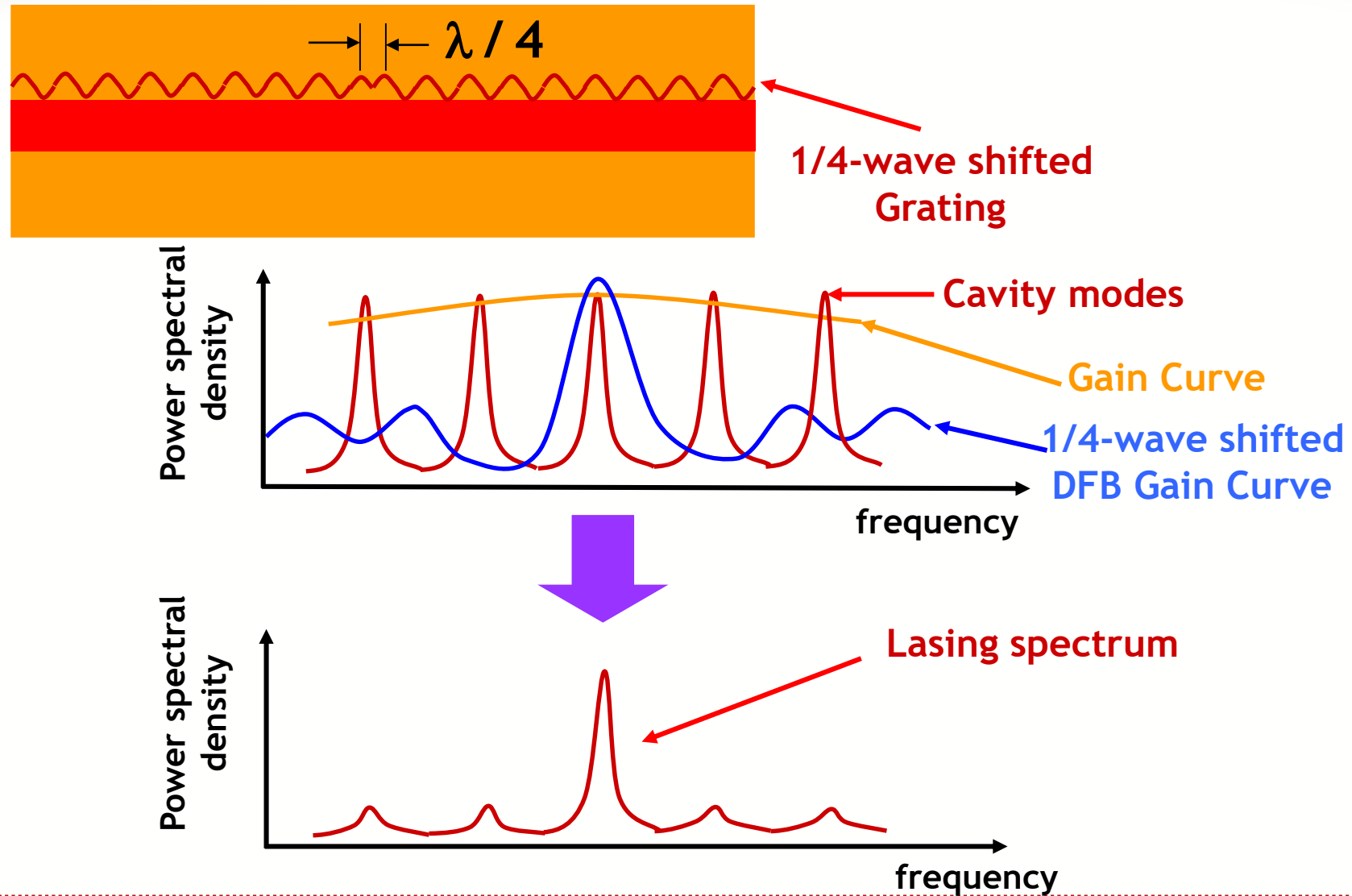
Laser Spectrum: Gain & Phase conditions met



Another Laser Structure: DFB Laser



Another Laser Structure: DFB Laser



Rate equation describe the **dynamic interaction** between excited electrons and photons

Change in carrier density:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{n}{\tau} - v_g g s$$

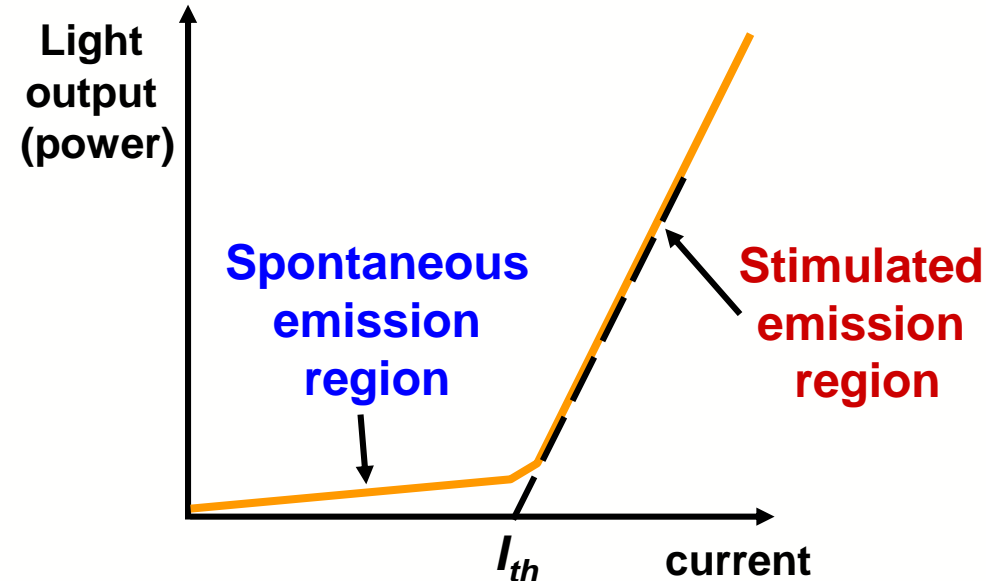
Contribute from Current
Decay of electrons
Usage of electron by Stimulated emission

Change in photon density:

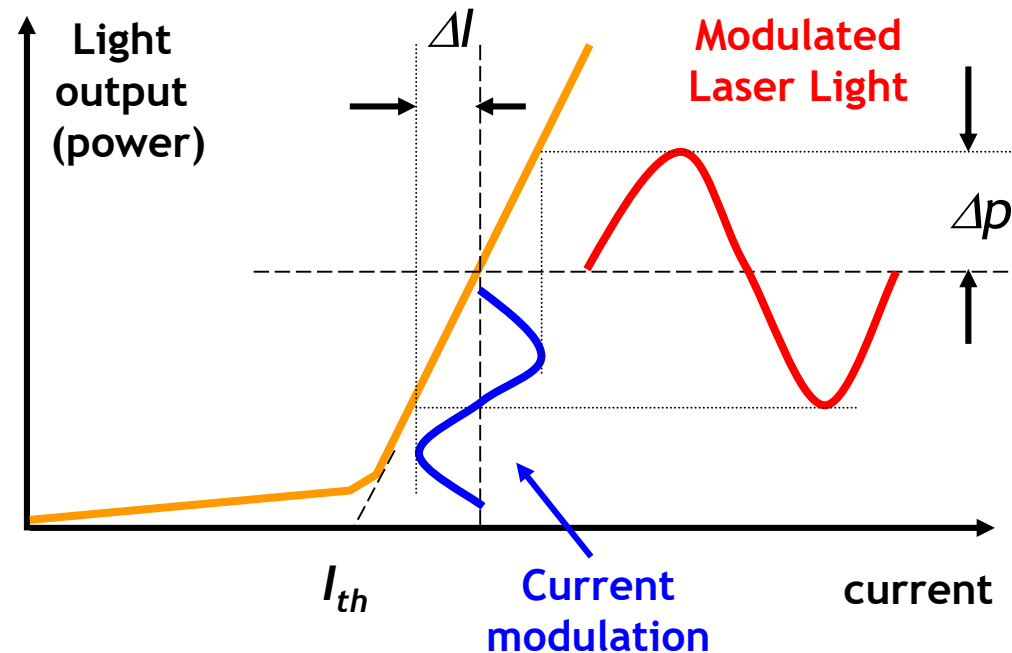
$$\frac{ds}{dt} = \Gamma v_g a (n - n_0) s - \frac{s}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{n}{\tau}$$

Photon generated by stimulated emission
Decay of photon
Photon generated by Spontaneous emission

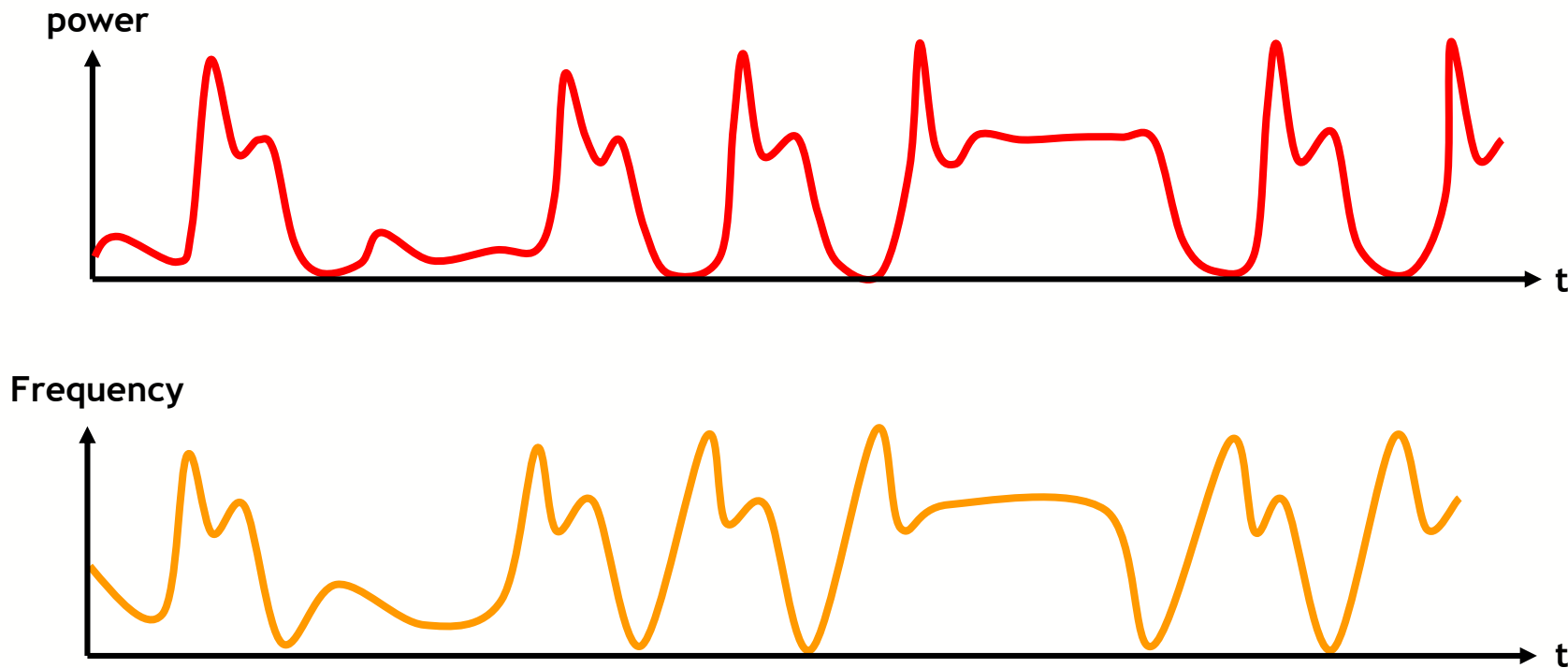
- The $L-I$ curve: output light power vs. input current
- Diode characteristics, threshold current I_{th}
- For $I > I_{th}$, light power increases linearly with I



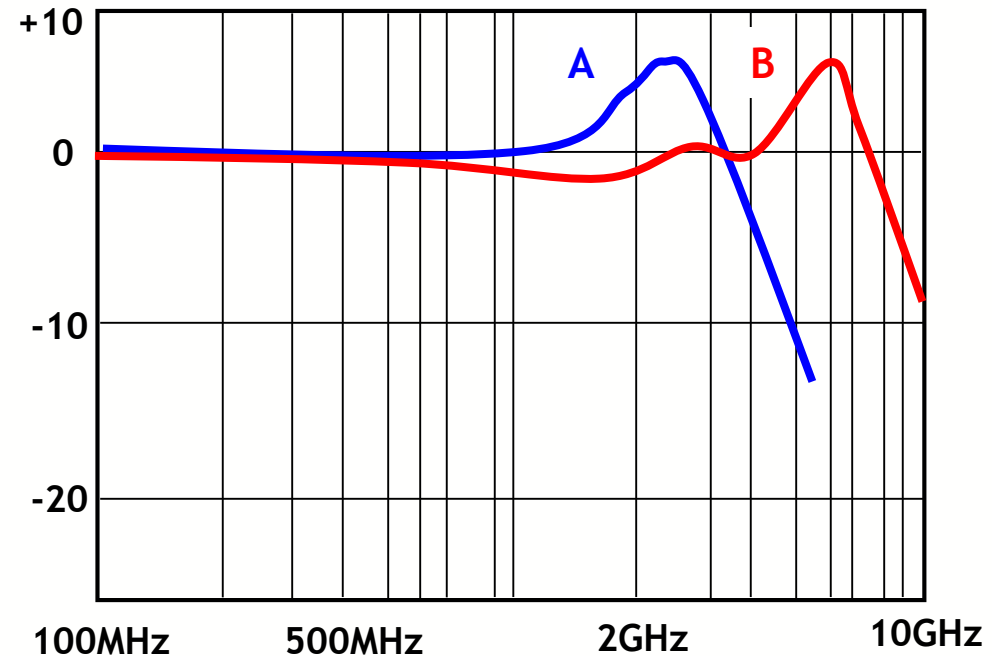
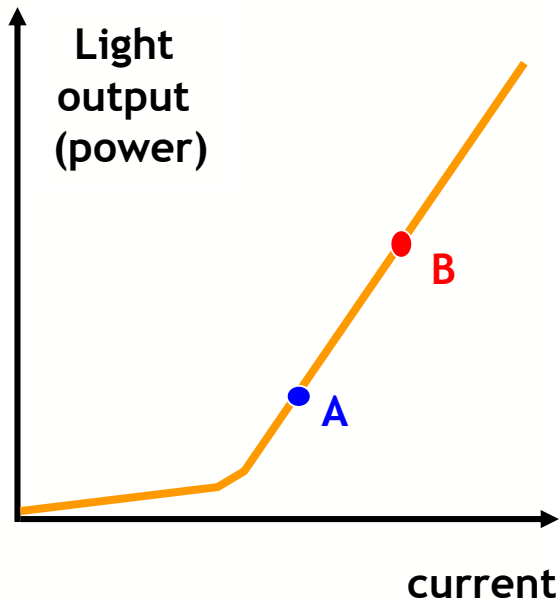
The information is encoded on semiconductor lasers by current modulation



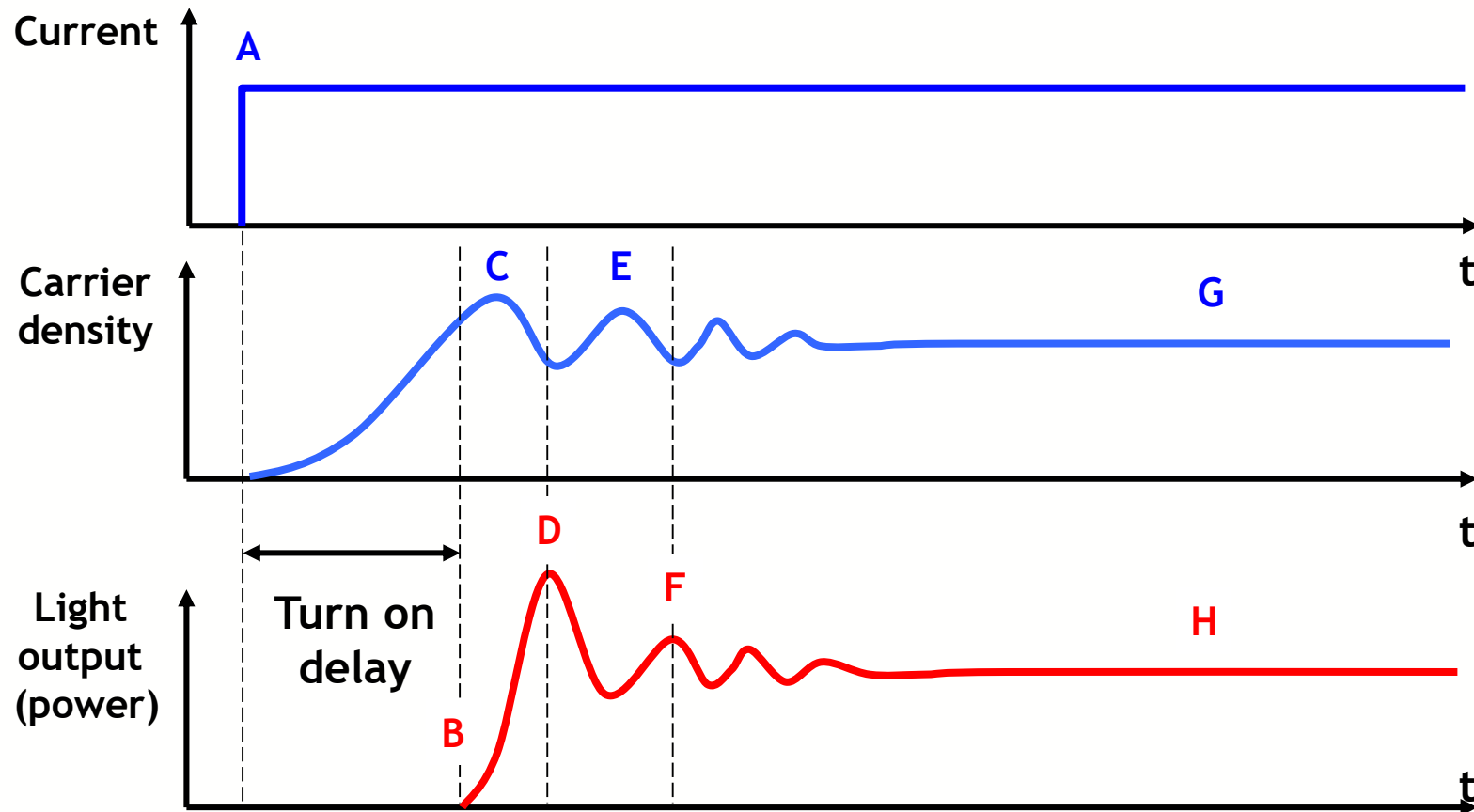
- Chirping of the laser output signal (pulses)
- Instantaneous frequency of the signal changes
- Leads to increased dispersion (broadening)



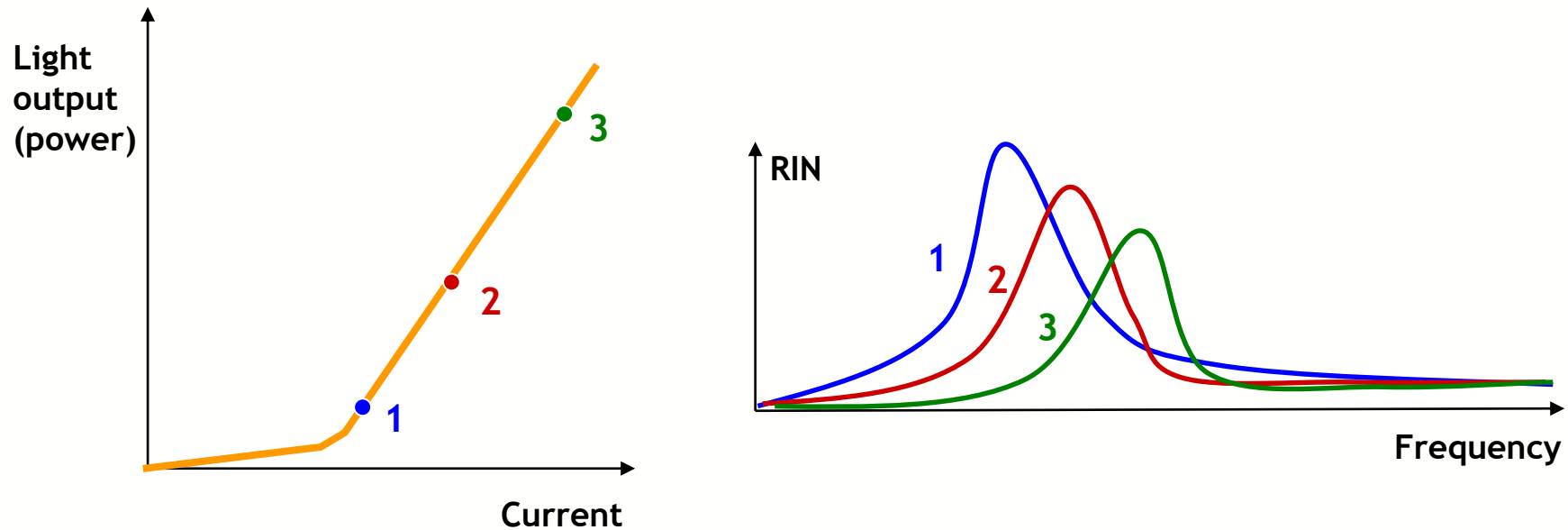
- Determines maximum direct modulation speed
- Increases with increasing drive (bias) current
- Within practical limits, get multi-GHz modulation



Delay between injection of current and generation of light



Frequency shape of RIN depends on laser driving conditions



- **Semiconductor lasers optical transmitters**
 - Gain medium, energy pump, cavity, losses
 - Basic structure: Fabry-Perot laser
 - Optical absorption and emission processes
 - Einstein Relations
- **Gain Curve, Lasing conditions (gain and phase)**
- **Introduction to Dynamic Effects of Lasers**
 - Rate equations, $L-I$ curve, direct modulation, chirp
 - Modulation bandwidth, turn on delay, RIN

Proceed with the *Interactive Learning Module*

Introduction to Optical Receivers Rx1

Lecture Series

*University Program
Photonics Curriculum Version 8.0*

- Introduction to Fiber-Optic Communications I & II
- Recommended - Transmitters I, Optical Amplifiers I

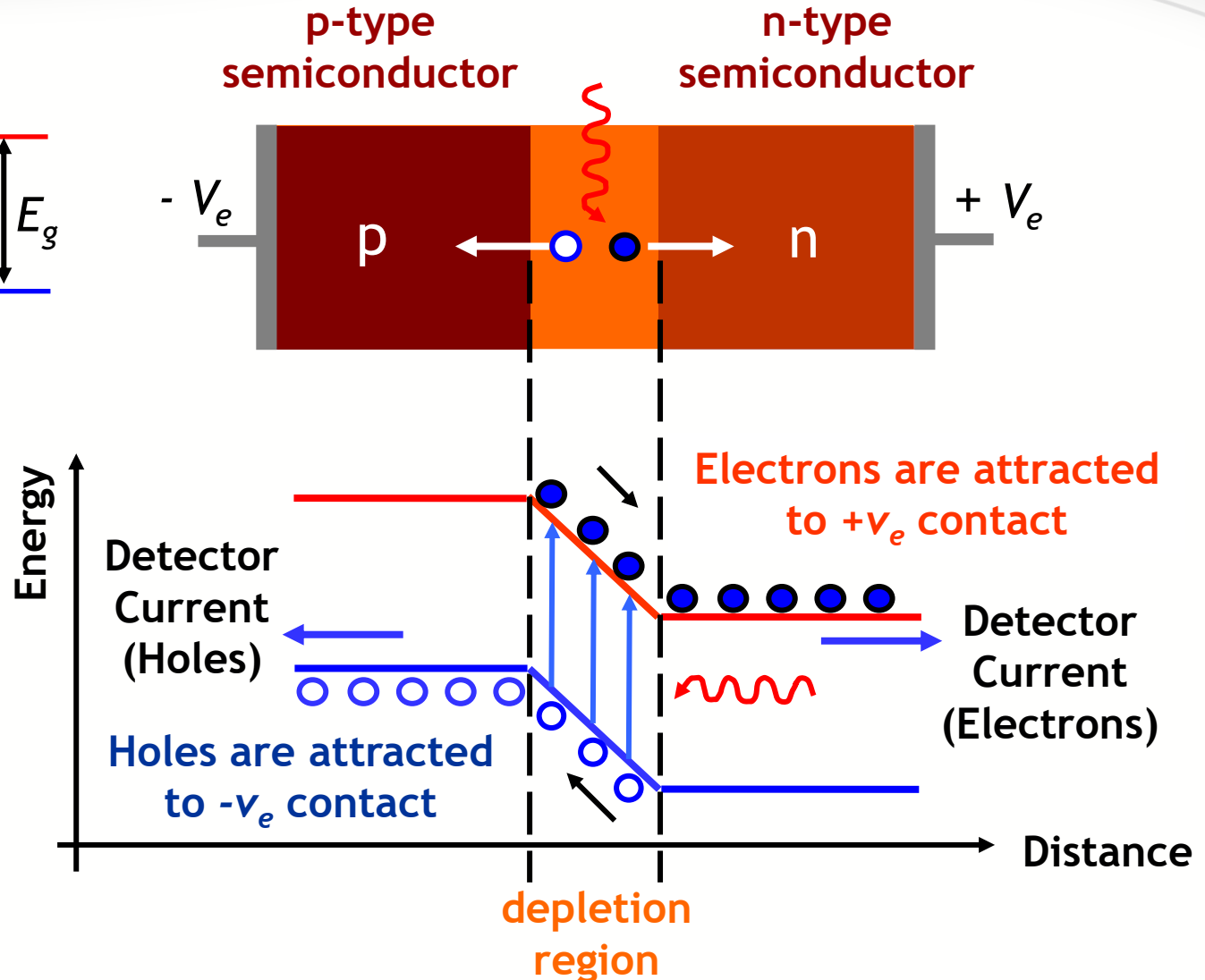
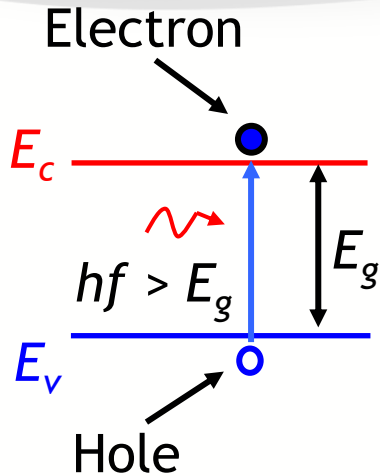
Module Objectives

- Introduction and basic requirements
- How a photodetector works
 - Basic structure: a PN junction photodetector
 - Optical Absorption Process
 - Reverse Bias, Dark Current, Quantum Efficiency, Responsivity
- PIN and APD photodetectors
- Noise sources

A photo detector (optical receiver) converts
an optical signal into an electrical signal

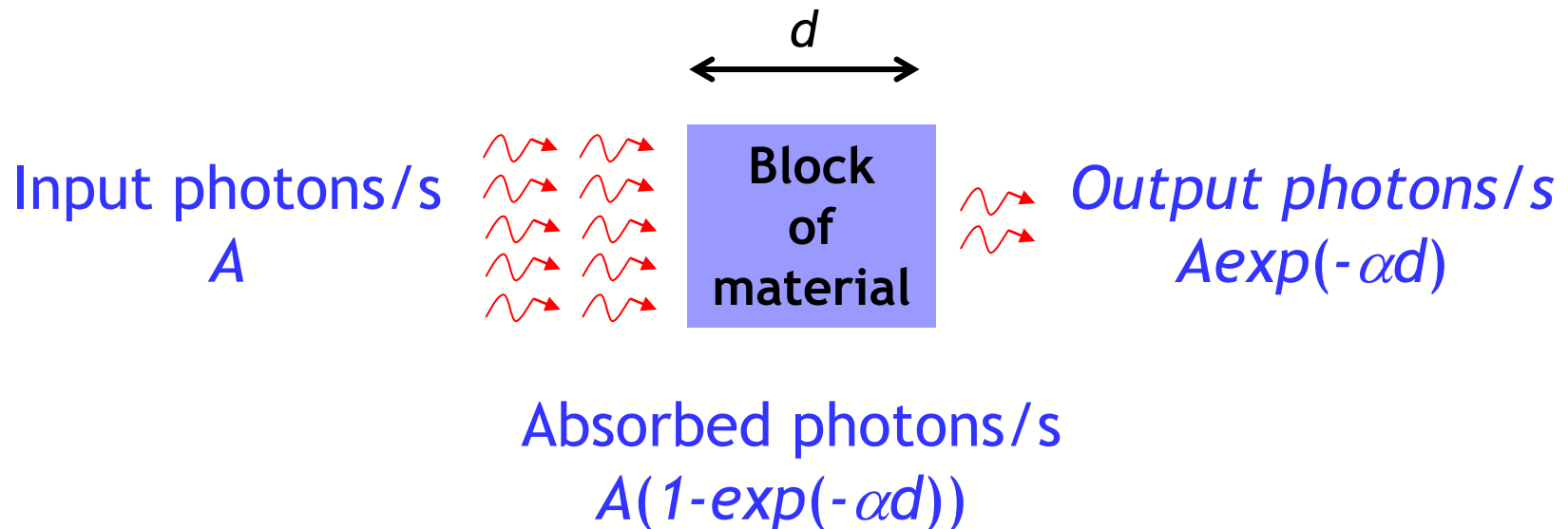
Basic requirements

- Sensitivity at the required wavelength
- Efficient conversion of photons to electrons
- Small area for low capacitance and a fast response
- Low noise
- Sufficient area for efficient coupling to optical fiber
- High reliability
- Low cost



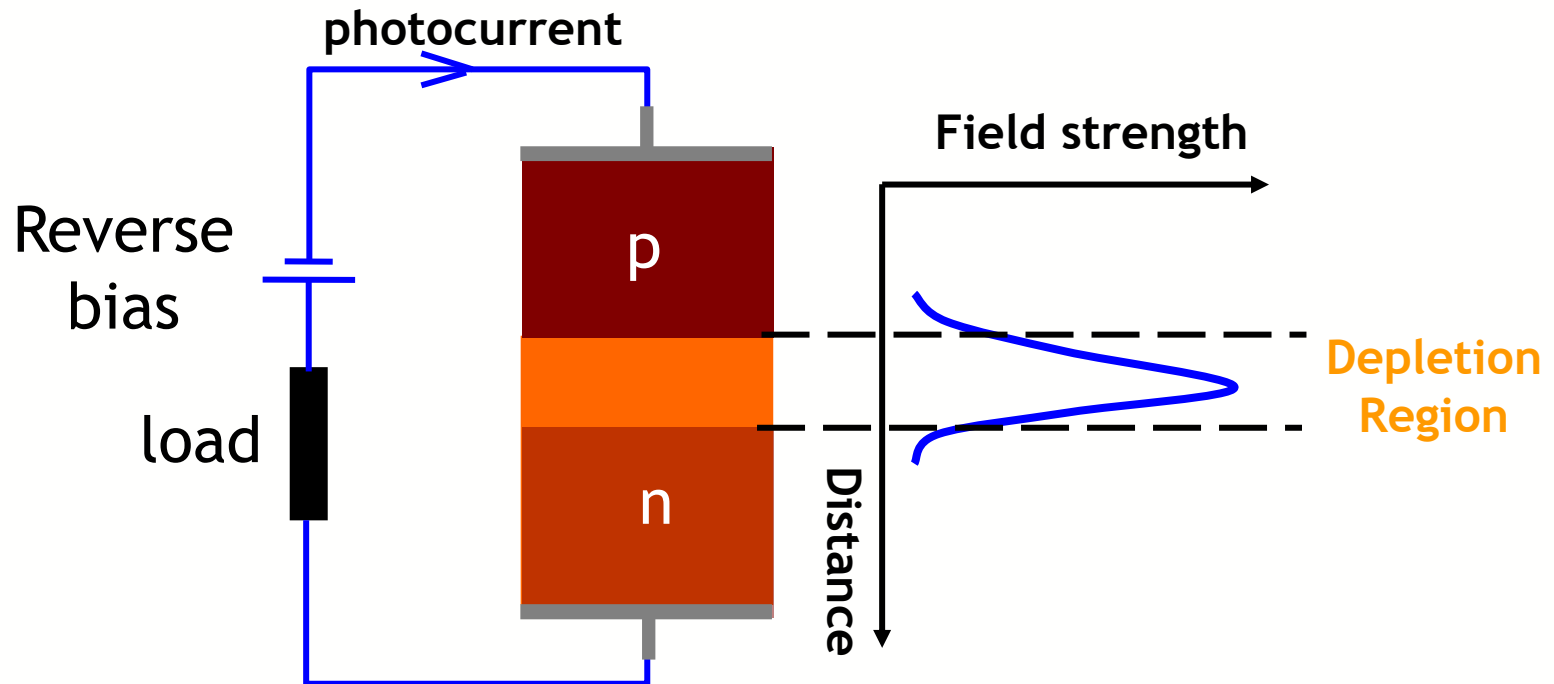
Depends on

- Thickness of intrinsic region, d
- The material's absorption coefficient, α
- The wavelength of the incident light, λ
- No. of photons lost on their way to the intrinsic region
- Surface reflection

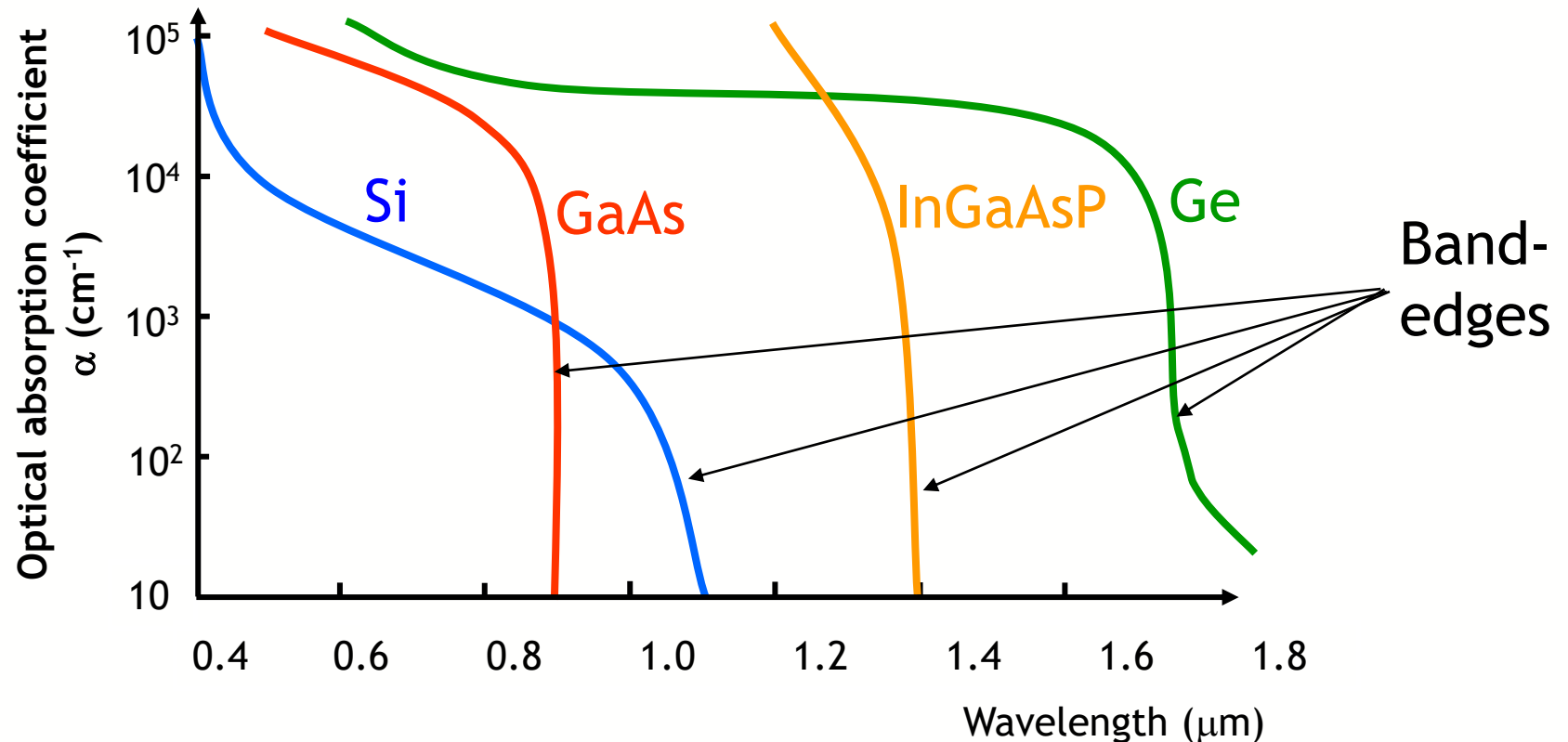


Reverse biasing the photodetector

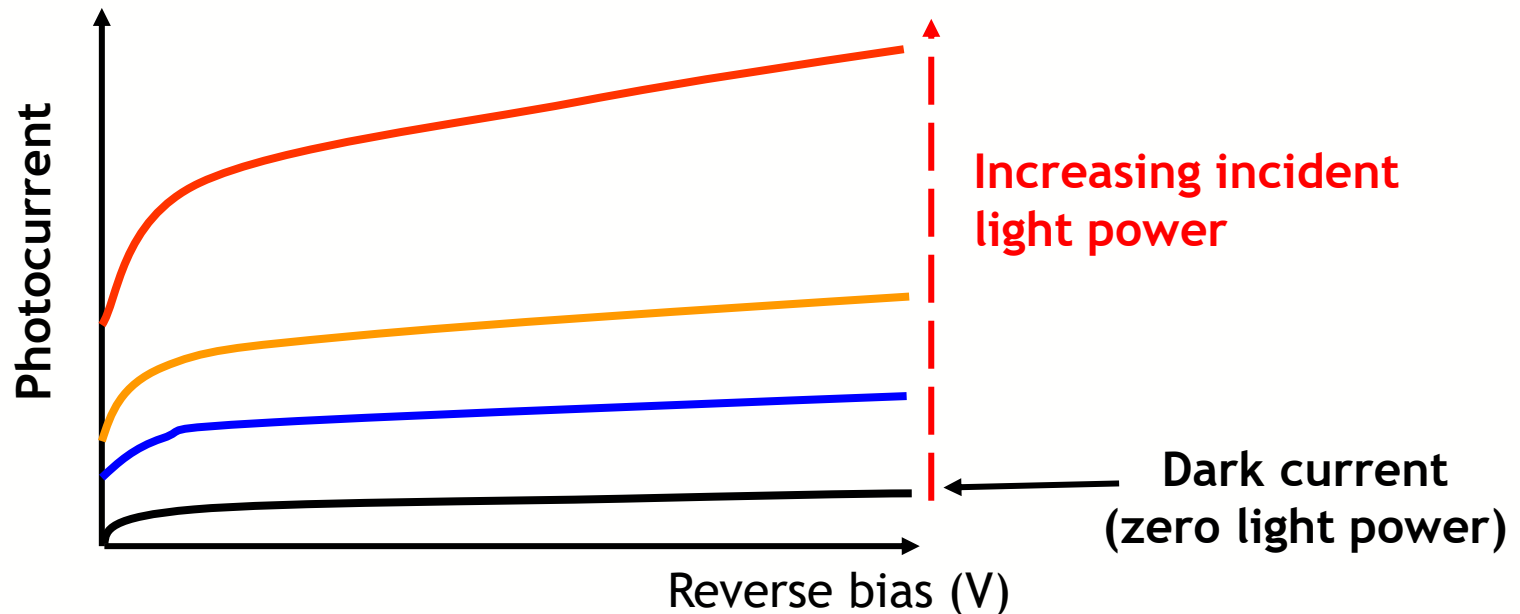
- Increases the electric field in the depletion region
- Decreases its capacitance (increase speed)
- Increases its sensitivity and frequency response



Absorption coefficient depends on wavelength, and the material (bandgaps again)



- Dark current (flows even when there is no light)
- As the incident light increases...
the photocurrent increases linearly



The **quantum efficiency** (η) is the probability that an incident photon will produce an electron-hole pair

$$\begin{aligned}\eta &= \text{electron flux} / \text{photon flux} \\ &= \frac{\text{electrons per second}}{\text{photons per second}}\end{aligned}$$

The **responsivity**, R_0 (A/W), is the photocurrent produced per unit of incident optical power


$$R_0 = I_p / P_i = q\eta / hf \quad [\text{A/W}]$$

$$\text{with } I_p = (\text{electron flux}) \cdot q \quad [\text{A}]$$


$$P_i = (\text{photon flux}) \cdot hf \quad [\text{W}]$$

The **responsivity** of a device relates to its design:


$$R = (1 - r) \exp(-D\alpha_c) [1 - \exp(-d\alpha)] (q\lambda / hc)$$




Facet
factor



Contact
absorption



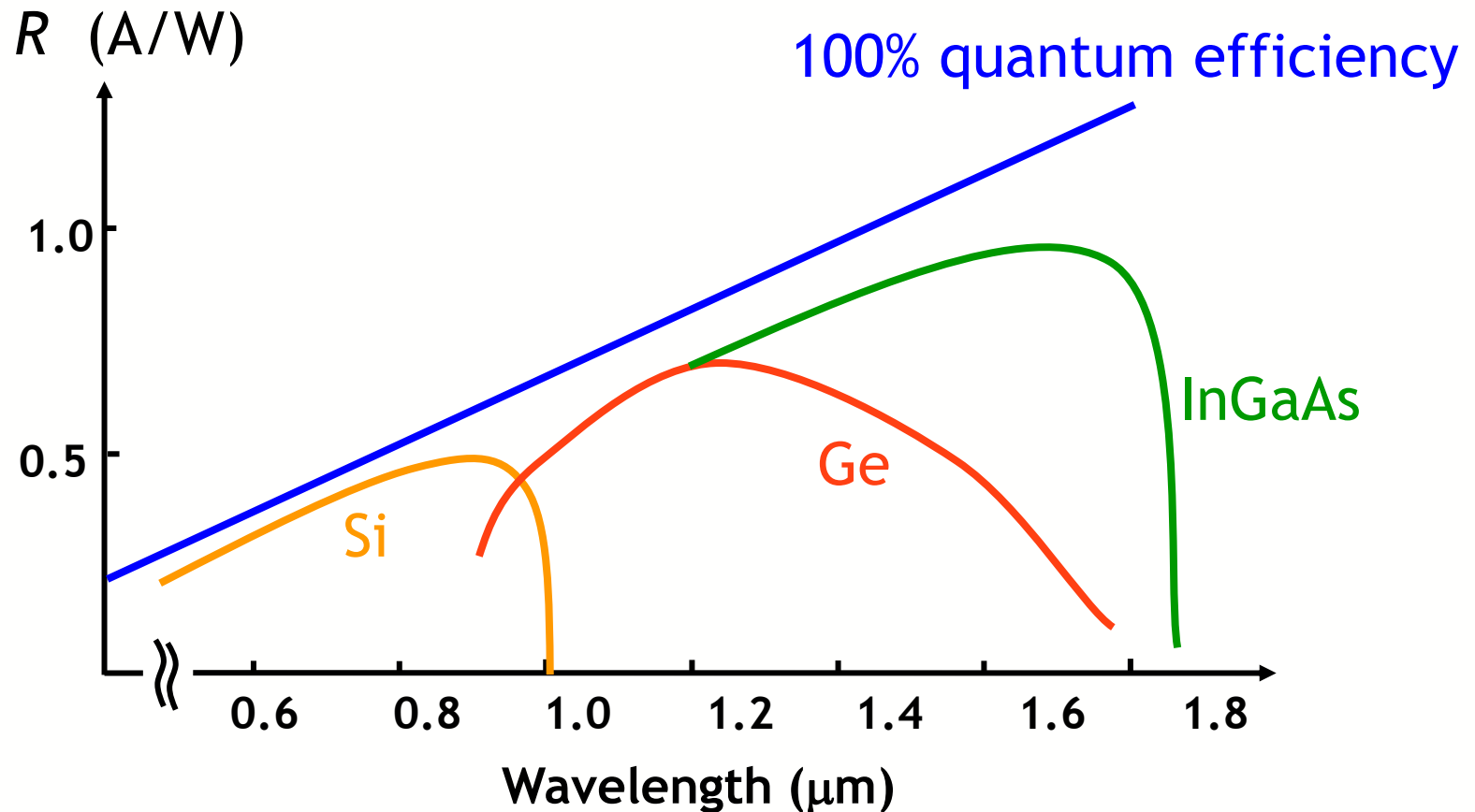
Intrinsic
absorption



Wavelength
factor

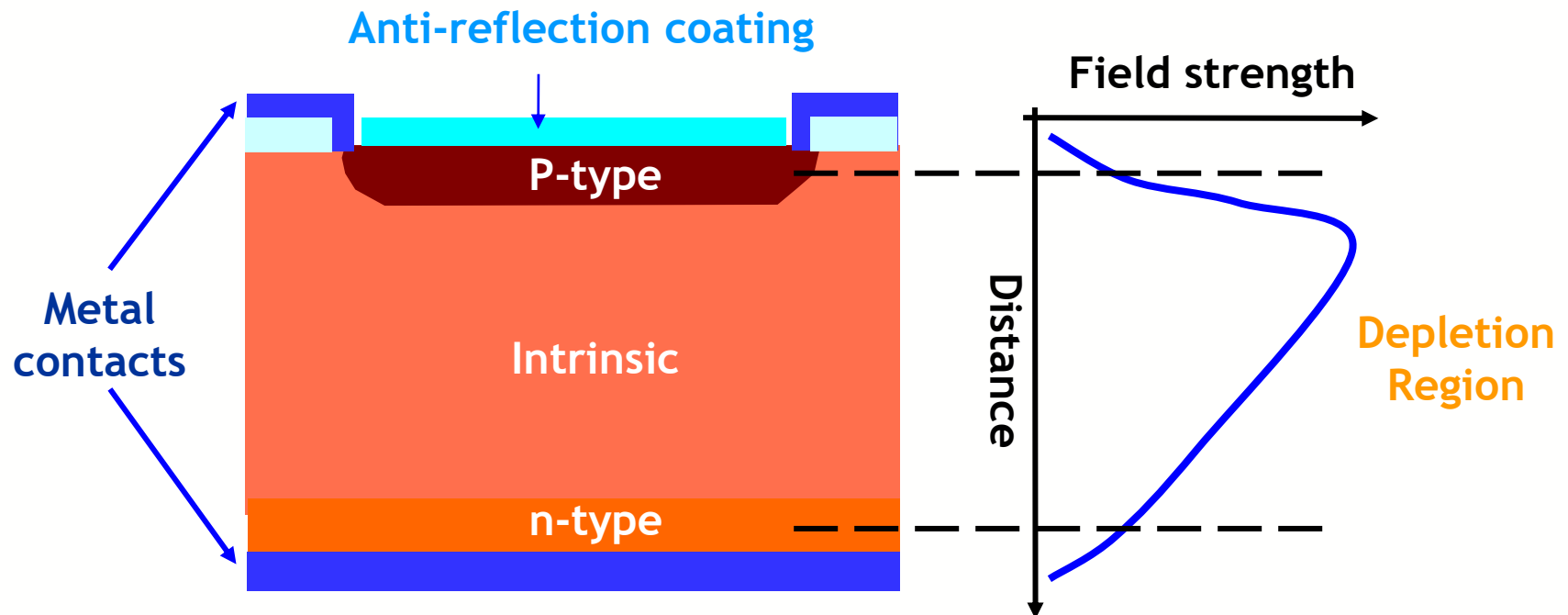


Different materials suit different wavelengths



Adding an “intrinsic” region between P and N

- increases depletion region width
- increases absorption of incident light
- increases the quantum efficiency of the photo detector

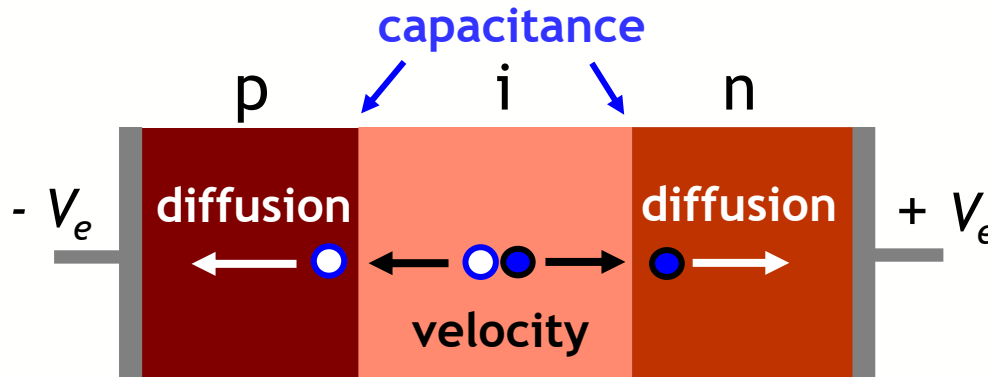


Speed - **maximum detectable** modulation rate

- i.e. the **electrical frequency response**

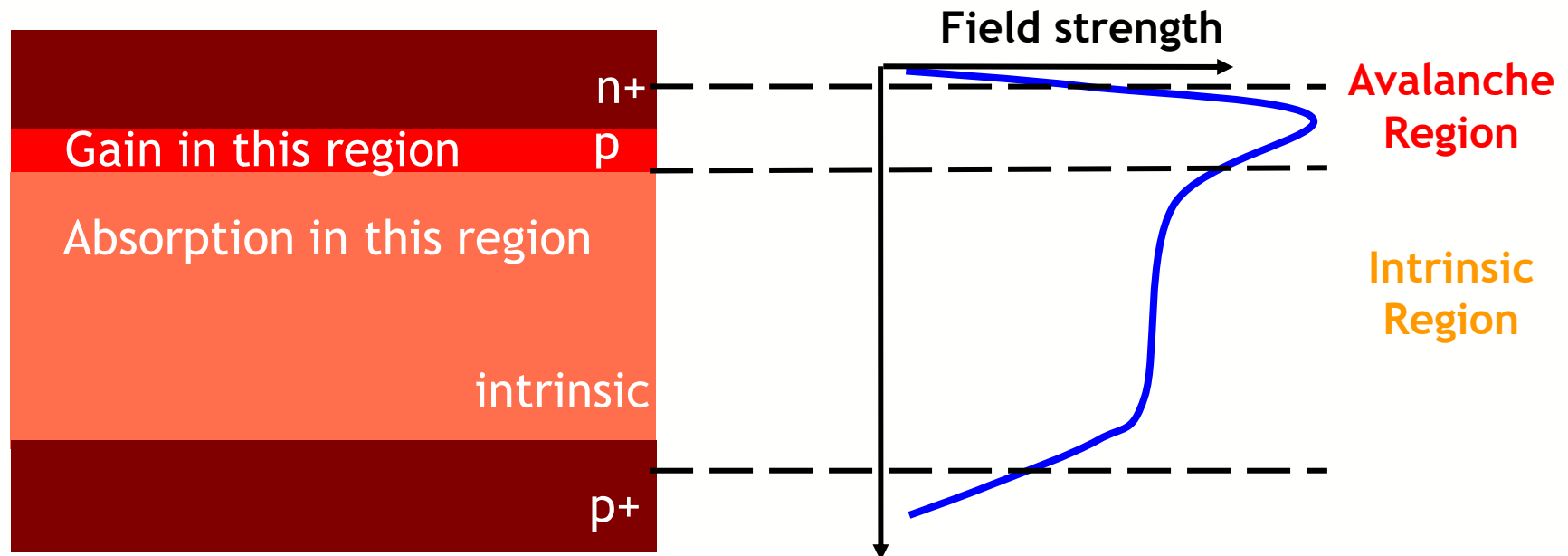
Speed is **limited** by the:

- Carrier velocity in depletion region
- Diffusion time of carriers outside the depletion region
- Time constant of the p-n junction capacitance
- Photodetector load resistance



Avalanche region - **higher** internal electric field

- Accelerates carriers - more kinetic energy
- High energy collision frees bound electrons
- Freed electrons can collide - free more bound electrons
- Results in **current gain** (avalanche multiplication)



An APD:

- has gain, while a PIN does not
- can detect a weaker signal than a PIN
- requires a higher bias voltage than a PIN
- is noisier than a PIN
- is more sensitive to variations in temperature and bias voltage than a PIN
- is more expensive than a PIN

Electronic Shot Noise

- associated with the quantum nature of the light
- each incident photon produces an electron's worth of current.

The total shot noise associated with a photocurrent current I flowing through a potential barrier is:

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2qIB$$

Electron charge

observation
bandwidth

Thermal Noise

- is the result of thermally induced **random fluctuations** in the charge carriers in a resistance
- occurs even when **no voltage** is applied across the resistance

Mean square thermal noise current is given by:

$$\langle i_{ther}^2 \rangle = \frac{4kTB}{R}$$

Diagram illustrating the components of the thermal noise current equation:

- Boltzmann's constant (k)
- temperature (T)
- bandwidth (B)
- resistance (R)

Dark Current Noise I_d

- flows in the photo detector even in the **absence** of light.
- caused by **current leakage paths** in the photo detector
- and **thermal excitation of carriers across the p-n junction**

I_d gives rise to an additional shot noise current with a mean-square value of:

$$\langle i_{dark}^2 \rangle = 2qI_dB$$

APD Excess Noise

- is present in avalanche photodiodes because the avalanche multiplication is essentially a random process

This causes the shot noise of the photodiode to be multiplied by:

$$\text{Noise Multiplication factor} = M^{2+x}$$
$$(0.1 < x < 1.0)$$

where M is the avalanche gain

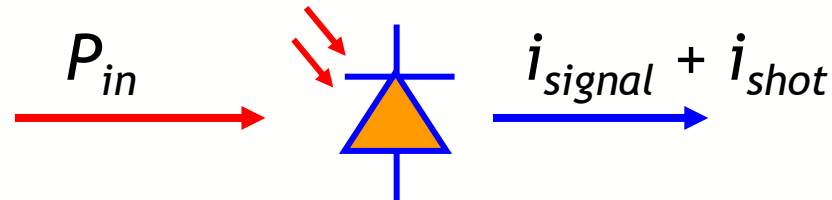
Optical Excess Noise

- can be broadly defined as any noise that appears along with the received signal, *other than* quantum shot-noise

Most common types:

- Laser Intensity Noise
- Modal Noise
- Mode Partition Noise
- Amplified Spontaneous Emission (ASE) Noise in optical amplifiers

Electrical SNR (assuming shot noise dominates)



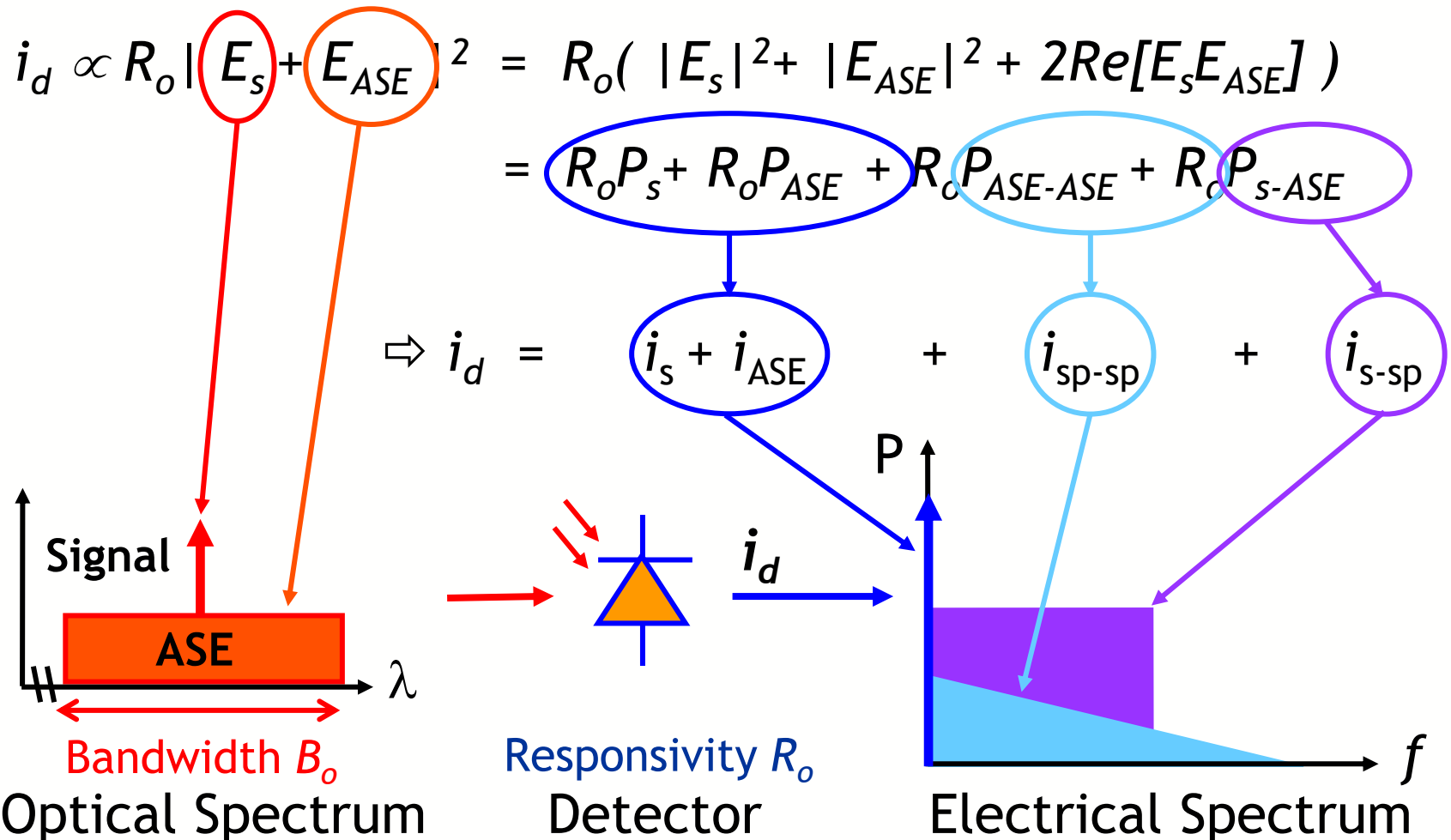
$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2qIB = 2qR_o P_{in} B$$

$$i_{signal}^2 = (R_o P_{in})^2$$

$$SNR = \frac{(R_o P_{in})^2}{2qR_o P_{in} B} = \frac{P_{in}}{2hfB}$$

$$R_o = \frac{q}{hf}, \text{ Responsivity of the photodetector}$$

Mixing products in the detected photocurrent:



The SNR at receiver with responsivity R_o , and electrical bandwidth B

$$SNR = \frac{i_s^2}{(i_{s-sp}^2 + i_{sp-sp}^2 + i_{shot}^2 + i_{ther}^2)B}$$

includes contributions from i_d , i_{ASE} ,
optical excess noise induced shot noise

- How a basic PN junction photodetector works
 - Optical Absorption Process
 - Reverse Biasing , Photocurrent, Dark Current
 - Quantum Efficiency, Responsivity
- How PIN photodetectors and APDs work
- Overview of noise sources in photodetectors
- Signal to Noise Ratio

Proceed with the *Interactive Learning Module*

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

1. Wybór długości fali (uzależnia tłumienności włókna i zasięg)
2. Wybór formatu sygnału. (analogowy, cyfrowy, FM, NRZ, RZ, Manchester itp.).
3. Określenie wstępnych parametrów odbiornika. (pasmo lub przepływność binarna, minimalna moc odbieranego sygnału - MRP - minimum required received power)
4. Wybór typu detektora. (PIN, ADP, długość fali, czułość, technologia, cena)
5. Przedwzmacniacz. (transimpedancyjny, wysokoomowy, typ tranzystora: bipolarny, FET)
6. Typ sprzężenia detektor - włókno, złącze, straty, rozmiar struktury fotodiody.
7. W sytuacji budowy odbiornika z oddzielnych elementów **istotnymi parametrami detektora są**:
 - czułość - R [A/W]
 - wzmacnienie - G (ADP)
 - pojemność - C_d [pF]
 - czas narastania - t_r [ns]
 - prąd ciemny - I_{du} , I_{dm} [nA]
 - napięcie polaryzacji - [V]

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

Istotne parametry przedwzmacniacza:

- Rezystancja wejściowa - R [Ω]
 - pojemność wejściowa - C_a [pF]
 - transkonduktancja tranzystora FET - g_m [S]
 - współczynnik szumu kanału tranzystora FET
 - częstotliwość graniczna tranzystora FET, f_c , [MHz]
 - parametr h_{fe} tranzystora bipolarnego
8. Obliczamy MRP lub MDP (minimum required detector power)
 9. Uwzględniamy straty sprzężenia
 10. MRP uwzględniamy przy obliczeniach budżetu mocy

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

Wartość MDP zależy od:

- Wyboru detektora i przedwzmacniacza:
PIN, ADP, FET – przedwzmacniacz, bipolar, transimpedancyjny
- Długość fali – materiał: Si, Ge, GaAs
- Wymagany SNR (typ modulacji itp.)
- Wymagane pasmo
- Szum źródła, szum modowy, nieliniowość źródła (pogarszają SNR)
- Temperatury (szum cieplny, elementy aktywne)

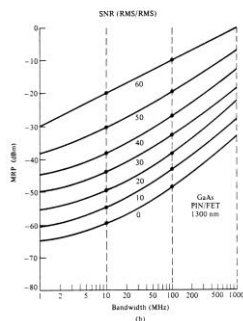
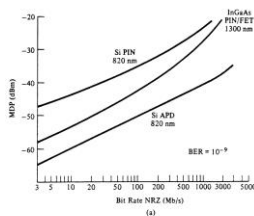
$$MRP[dBm] = MDP[dBm] + L_d[dB]$$

L_d – straty sprzężenia

Straty sprzężenia - L_d

- Metoda sprzężenia (apertura złącza ..)
- Geometria sprzężenia
- Odbicia Fresnela

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora



Minimalna moc detektora a/ transmisja cyfrowa, b/ transmisja analogowa

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

Parametr		Si		Ge		InGaAs	
		PIN	APD	PIN	APD	PIN	APD
Zakres	nm	400-1100		800-1800		900-1700	
Pik	nm	900	830	1550	1300	1300	1300
						(1550)	(1550)
Struktury	R	0.6	77-130	0.65-0.7	3-28	0.63-0.8	
						(0.75-0.97)	
Str. + włókno	R	0.35-0.55	50-120	0.5-0.65	2.5-25	0.5-0.7	
						(0.6-0.8)	
Efek. kwan.	%	65-90	77	50-55	55-75	60-70	60-70
Wzmocn.	G	1	150-250	1	5-40	1	10-30
Szum	x	-	0.3-0.5	-	0.95-1	-	0.7
K_{eff}	k	-	0.02-0.08	-	0.7-1	-	0.3-0.5
V polar.	-V	45-100	220	6-10	20-35	5	<30
Prąd ciemny							
niepow.	nA	1-10		50-500		1-20	1-5
powiel.	nA	-	0.1-1.0	-	10-500		1-5
Pojemność	pF	1.2-3	1.3-2	2-5	2-5	0.5-2	0.5
Czas nar.	ns	0.5-1	0.1-2	0.1-0.5	0.5-0.8	0.06-0.5	0.1-0.5

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

Specyfikacja detektora

- Fotoprąd

$$i_p = rGP_d$$

- Efektywność kwantowa

$$\eta = \frac{i_p / e}{P_d / hc} \quad \eta_E = \eta \left[1 - \left(\frac{n_d - n_0}{n_d + n_0} \right)^2 \right]$$

- Czułość

$$r = \eta \left(\frac{e\lambda}{hc} \right)$$

- Wzmocnienie G

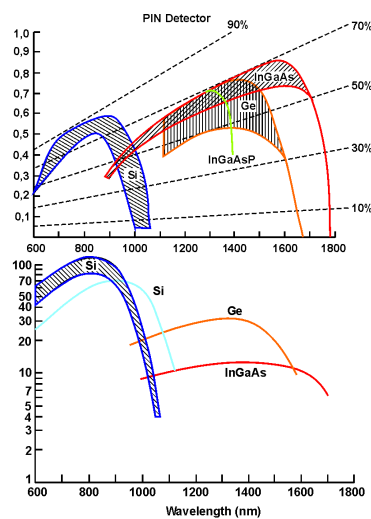
- Dodatkowy szum

$$F = G^x$$

- NEP

$$NEP = \frac{hc}{e\lambda} \frac{i_p}{\eta}$$

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora



Charakterystyki spektralne diod

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

PIN SNR:

$$SNR = \frac{0.5(M_o r P_o)^2}{2e(r P_o + I_{du})(BW)_n + \langle i_{nA}^2 \rangle}$$

APD SNR:

$$SNR = \frac{0.5(M_o r G P_o)^2}{2e(G^2 F(r P_o + I_{dm}))(BW)_n + \langle i_{nA}^2 \rangle}$$

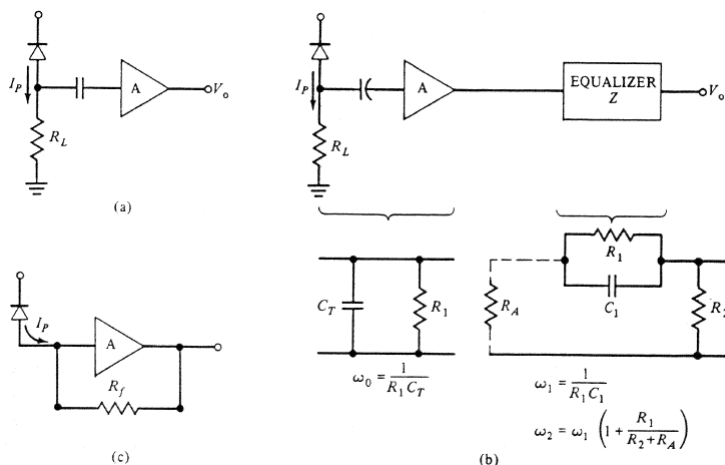
M_0 – współczynnik modulacji

Metodyka wyboru elementów systemu wybór parametrów odbiornika i detektora

Źródło szumu	Dioda PIN	Dioda lawinowa (APD)
Szum kwantowy		
$\langle I_{sq}^2 \rangle =$	$2eP_d(BW)_n$	$2eG^2FP_d(BW)_n$
Szum prądu ciemnego		
$\langle I_{dt}^2 \rangle =$	$2eI_{dt}(BW)_n$	$2e(G^2FI_{dm} + I_{dt})(BW)_n$
Szum całkowity		
$\langle I_{sd}^2 \rangle =$	$2e(G^2FI_{dm} + I_{dt})(BW)_n$	$2e[(rP_d + I_{dm})G^2F + I_{dt}](BW)_n$
e - ładunek elektronu r - czułość G - współczynnik wzmocnienia lawinowego F - współczynnik szumu dodatkowego = $kG + (1-k)(2-1/G)$ P _d - moc optyczna I _{dt} - niepowielony prąd ciemny I _{dm} - powielony prąd ciemny		

Konfiguracje odbiorników:

(a) wzmacniacz napięcia (b) wysokoimpedancyjny (c) transimpedancyjny



Właściwości różnych konfiguracji odbiorników

Parametr	Napięciowy	Integrujący	Transimpedancyjny
Pasma odbiornika	$\frac{1}{2\pi R_i C_i}$	$\frac{G_{eq}}{2\pi R_i C_i}$	$\frac{A}{2\pi R_f (C_i + AC_f)}$
Impedancja wejściowa	R_i	R_i	$\frac{R_f}{A}$
Napięcie wyjściowe	$i_p R_i A$	$\frac{i_p R_i A}{G_{eq} - 1}$	$i_p R_f$
Dynamika	$(DR)_{amp}$	$\frac{(DR)_{amp}}{G_{eq} - 1}$	$(DR)_{amp}$
PIN	30 dB	15 – 20 dB	30 dB
APD	30 – 40 dB	20 – 35 dB	35 – 40 dB

$C_t = C_d + C_a$
 C_f – pojemność wzmacniacza
 $G_{eq} = 1 + R_1 / (R_2 + R_A)$
 $(DR)_{amp} = 1/(BR)^2$ FET, $1/(BR)$ do $1/(BR)^2$ tr bipolarny
 R_i = wejściowa rez
 R_f = rez sprzężenia
 I_p = prąd diody
 C_t = całkowita poj. wejściowa
 C_d = poj. diody
 C_a = poj. wzmacniacza

Właściwości różnych konfiguracji odbiorników

- Wzmacniacz napięciowy

Dominujący szum termiczny,

Maleje ze wzrostem R

Wzrost R -> spadek szerokości pasma

- Wzmacniacz całkujący

Duże R -> niski szum, zastosowany korektor (equalizer)

Niski szum, ograniczona dynamika

- Wzmacniacz transimpedancyjny

Obniżona wejściowa impedancja -> duże pasmo,

Niski szum termiczny

Duża dynamika

Wpływ temperatury

- Prąd upływności detektora
- Szum termiczny
- Wzmocnienie APD zmienia się z T
- Odpowiedź impulsowa, wzmocnienie, pojemności elementów aktywnych
- Dryf par. elementów selektywnych
- Sprzężenie włókna z fotodiodą

Straty sprzężenia detektora

- Sprzężenie bezpośrednie (na styk)

$$L_d = 20 \log \frac{D_d}{D_f} + 10 \log(1 - R_{jd})$$

$$R_{jd} = \frac{(n_d - n_f)^2}{(n_d + n_f)^2}$$

- Sprzężenie pośrednie (z separacją d)

$$L_d = 20 \log \frac{D_d}{2d \tan \Theta + D_f} + 10 \log(1 - R_{jd}) + 10 \log(1 - R_{sd})$$

$$R_{jd} = \frac{(n_f - n_o)^2}{(n_f + n_o)^2}$$

$$R_{sd} = \frac{(n_d - n_o)^2}{(n_d + n_o)^2}$$

Metody detekcji fotonów

- Efekty termiczne:

Termoelektryczny,
piromagnetyczny,
piroelektryczny,
ciekła kryształy

- Efekty bazujące na oddziaływaniu fal:

Parametryczna up/down conversion,
parametryczne wzmocnienie

- Efekty fotoniczne:

Fotoprzewodnictwo,
emisja,
fotowoltaiczne

Typy detektorów światła

- Powielacze próżniowe

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1240}{E_g [eV]} [nm]$$

- Optorezystory

- Diody p-n

$$P_a(x) = P_i(1-R)(1-e^{-\alpha x})$$

- Diody m-s

$$\eta(x) = \frac{N_e}{N_p} = (1-R)(1-e^{-\alpha x})$$

- Diody p-i-n

$$\omega_{RC} = \frac{1}{R_s C_j}$$

- Diody lawinowe APD

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{l_d}$$

$$H(f) = \frac{M(f)}{M_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f M_0 \tau)^2}}$$

$$B = \frac{1}{2\pi \tau M_0}$$

Właściwości materiałów półprzewodnikowych

Materiał	E_g , eV	Max czułość, nm	Typowy Zakres, nm
Si	1,12	1110	500-900
Ge	0,67	1850	900-1300
GaAs	1,43	870	750-850
InGaAs	0,6	1900	900 - 1700
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,38 – 2,25	550-3260	1000-1600

1.1. Photodiodes

In fiber communication photodiodes are usually implemented for the optical signal detection. The operation of photodiodes bases on the electron-hole generation in the p-n junction depletion region as a result of the photon interaction.

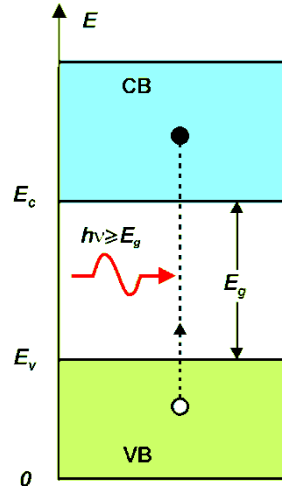


Fig. 1.22. Photon absorption: electron-hole pair generation process.

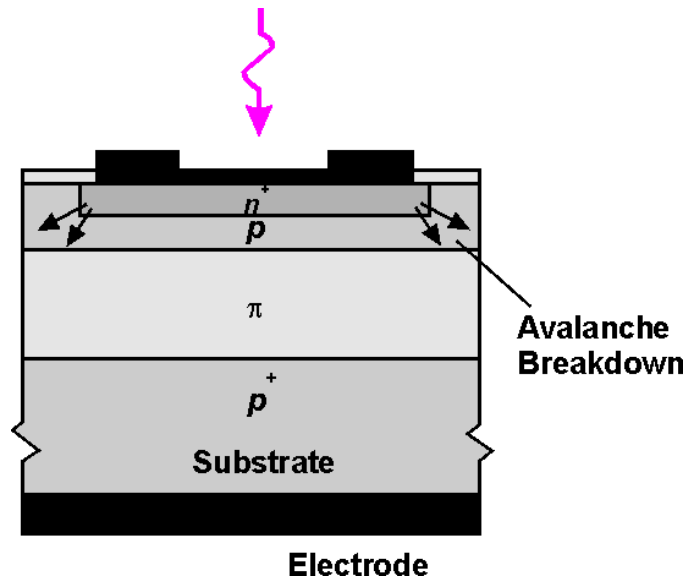


Fig. 1.23. Photodiode structure.

The cut-off wavelength λ_c of this process is determined by the bandgap energy E_g :

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad \text{or} \quad \lambda_c [\mu m] = \frac{1,24}{E_g [eV]}$$

Two types of photodiodes are widely used in optical communications: the PIN and avalanche photodiodes APD. The APD photodiodes have an internal mechanism of the signal amplification.

Essential parameters of photodiodes:

- detector sensitivity:

$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc} \left[\frac{A}{W} \right]$$

where: η – quantum efficiency.

- spectral response is mostly determined by semiconductor bandgap

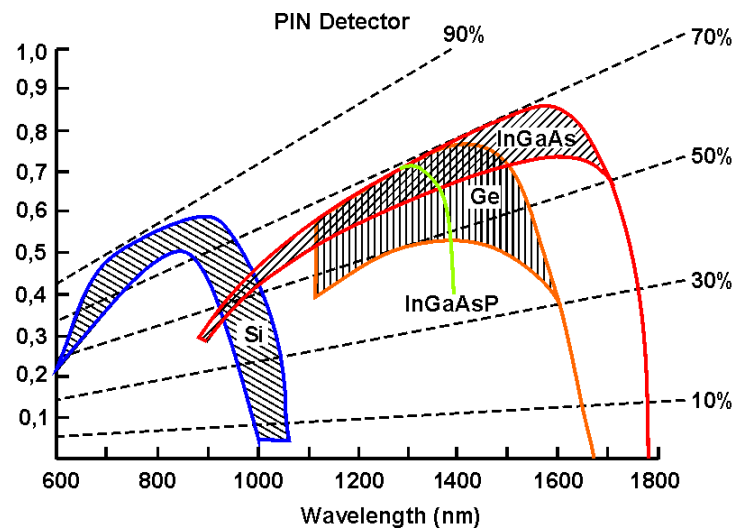


Fig. 1.24. Spectral response of different PIN photodiodes

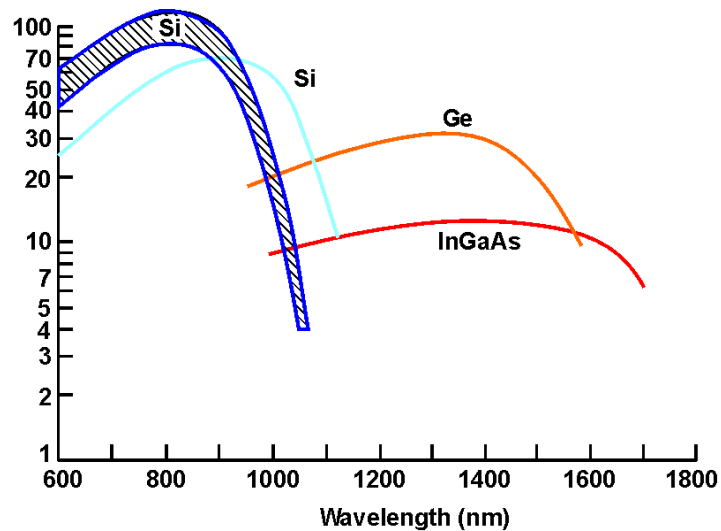


Fig. 1.25. Spectral response of different avalanche photodiodes (APD).

- response time. Rise time determine electrical bandwidth:

$$\Delta f_{3dB} = \frac{0.35}{\tau}$$

- Electrical parameters: junction capacitance, dark current, resistance.

APD operates similarly to PIN diode operation. The main difference is internal electron amplification.

Due to the effect of multiplication, the avalanche photodiodes sensitivity is much higher than this of the p-i-n diodes:

$$I = M(V)I_p = MRP_o$$

where: M(V) – multiplication coefficient:

$$M(V) = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_{br}} \right)^n}$$

n - coefficient <1, V_{br} – diode reverse breakdown.

Photodiode noise

The photocurrent shot noise is:

$$\overline{i_s^2} = 2eBI_p$$

where: B electrical bandwidth.

Neglecting thermal noise and dark current noise the receiver SNR may be expressed as:

$$\frac{S}{N} = \frac{I_p^2}{\overline{i_s^2}} = \frac{I_p}{2eB}$$

Substituting expression for the photocurrent:

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta P_o e}{hf 2eB} = \frac{\eta P_o}{hf 2B}$$

Last equation allows to calculate the optical power requirements for the specific SNR.

Taking into account **the thermal noise**:

$$\frac{S}{N} = \frac{i_s^2 R_L}{i_{s,th}^2 R_L} = \frac{i_s^2 R_L}{4k_B T B}$$

where B is the bandwidth and T is the temperature.

$$\frac{S}{N} = \frac{i_s^2}{8k_T T B^2 C_j}$$

Where C_j – junction capacitance

Minimum detectable signal $i_{s,min}$ corresponds to:

$$\frac{S}{N} = 1$$

Minimum detectable optical power is:

$$P_{min} = \frac{2hc}{\eta e \lambda} B (2\pi k_B T C_j)^{1/2}$$

Program listing: function min power determines minimum signal power for a PIN photodetector for different temperatures

```
clear all
h_Planck = 6.6261d-34;           % Planck's constant (J s)
c_light=299.80d6;               % speed of light (m/s)
k_B= 1.3807d-23;               % Boltzmann constant (J/K)
e=1.602d-19;                   % electron's charge (C)
C_j = 1d-12;                   % junction capacitance (1pF)
eta = 1;                       % quantum efficiency
lambda = 0.85d-6;              % wavelength (0.85 microns)
B = 1d6:1d5:1d10;              % range of detector bandwidth
for T_eff = [500 1000 1500]
P_min=(2*h_Planck*c_light/(eta*e*lambda))*sqrt(2*pi*k_B*T_eff*C_j)*B;
loglog(B,P_min,'LineWidth',1.5)
hold on
end
xlabel('Detector bandwidth (Hz)','FontSize',14);
ylabel('Minimum signal power (W)','FontSize',14);
text(1d9, 4d-7, '500K','FontSize',14)
text(5d7, 4d-7, '1500K','FontSize',14)
set(gca,'FontSize',14);         % size of tick marks on both axes
grid on
```

Wybrane zagadnienia projektowania

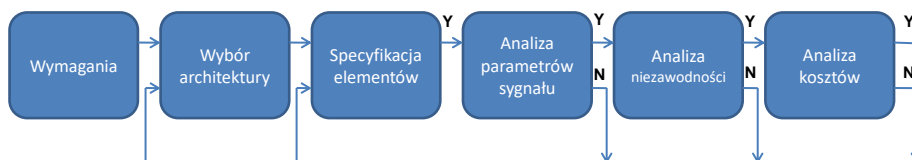
Jan Lamperski

Literatura

- Robert J. Hoss Fiber, Optic Communications Design Handbook, Prentice Hall, 1992
- Krzysztof Perlicki, Systemy transmisji optycznej WDM WŁK, 2007
- Harold Kolimbiris, Fiber Optics Communications, Prentice Hall, 2004
- Jerzy Siuzdak: Systemy i sieci fotoniczne, WŁK, 2009
- Krzysztof Perlicki, Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WDM WŁK, 2002
- Lightwave - <http://www.lightwaveonline.com/>

- Wstęp (wady i zalety, metodologia projektowania, model systemu)
- Wymagania i standardy (ANSI, International Electro-Technical Commission – IEC, CCITT, ITU, Telcordia)
- Specyfikacja elementów toru światłowodowego (źródła, fotodetektory, wzmacniacze optyczne, konwertery długości fal, regeneratory, krotnice, krotnice transferowe, komutatory, modulatory, nadajniki, odbiorniki, transceivery)
- SNR (zależności, OSNR, pasmo, BER, współczynnik szumu, szum detekcji, wzmacniacza, MDP)
- Modulacja, multipleksja
- Optyczne sieci transportowe
- Systemy analogowe (CATV, RoF)
- Światłowodowe sieci LAN (FDDI, Ethernet, Fiber Channel)
- Optyczne sieci dostępowe (FITL, PON, HFC)
- Analiza właściwości systemu (metodologia, zdefiniowanie właściwości, warstwa sekcji optycznej, warstwa fotoniczna, analiza pasma, ekwiwalentne straty, SNR, minimalne wymagania mocy odbiornika, budżet mocy, test właściwości)
- Architektura systemu
- Badanie jakości systemów optycznych
- Niezawodność i analiza kosztów

Metodologia projektowania



Technologia światłowodowa: wady i zalety

ZALETY

- Duża wartość iloczynu $B \cdot L$
- Niska tłumienność
- Tłumienie słabo zależy od częstotliwości
- Niskie koszty instalacji i eksploatacji
- Małe rozmiary
- Mała waga
- Odporność na interferencje
- Wysoka jakość transmisji
- Izolacja elektryczna
- Stabilność środowiskowa
- Bezpieczeństwo transmisji
- Odporność na EMP
- Wytrzymałość konstrukcji

WADY

- Wpływ promieniowania
- Izolacja
- Łamliwość włókien
- Absorpcja wody
- Duże koszty przy niskich przepływnościach
- Szum kwantowy

Specyfikacja elementów toru światłowodowego

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| • źródła, | • nadajniki, odbiorniki, |
| • fotodetektory, | transceivery |
| • wzmacniacze optyczne, | • złącza |
| • konwertery długości fal, | • rozgałęźniki |
| • optyczne multipleksery | • filtry |
| • regeneratory optyczne | • tłumiki optyczne |
| • krotnice, krotnice | • włókna światłowodowe |
| transferowe, | • kable światłowodowe |
| • komutatory, modulatory, | • osprzęt instalacyjny |

Komutatory optyczne

PARAMETRY:

- Pasma
- Czas przełączania
- Straty i tłumienność wtrąceniową
- Wrażliwość na stan polaryzacji
- Poziom przesłuchów
- Współczynnik odbicia

TECHNOLOGIE:

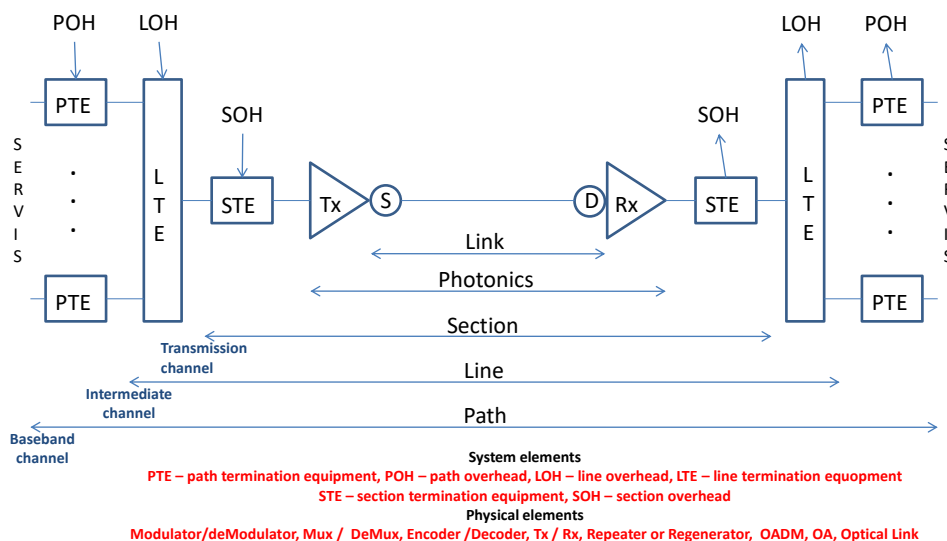
- Mikroelektromechaniczne systemy (MEMS)
- Realizacje ciekłokrystaliczne
- Optoelektroniczne
- Technologie bąbelkowe

Technologia MEMS

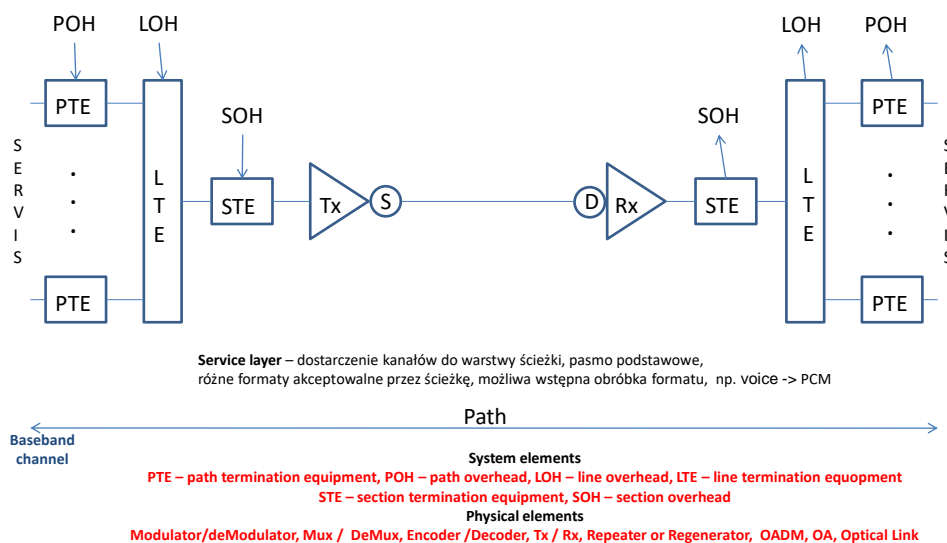
PORÓWNANIE KLUCZOWYCH CECH KOMPONENTÓW OPTYCZNYCH MEMS						
Technologia/cecha	Sterowanie lustrem	Produkcja	Pakowanie	Niezawodność	Skalowalność lustra/dł. fali	Koszt
Jednowymiarowe	proste	łatwa	proste	wysoka	N	niski
Dwuwymiarowe	proste	trudna	dość trudne	wysoka	N ²	średni
Trójwymiarowe	trudne	bardzo trudna	bardzo trudne	niska	2N	wysoki

- Producenci: Lucent Technology, Optical Micro Machines oraz Calient Networks
- Lucent: Lambda Router, komutacja 256 kanałów, przepływności 10 Tbps

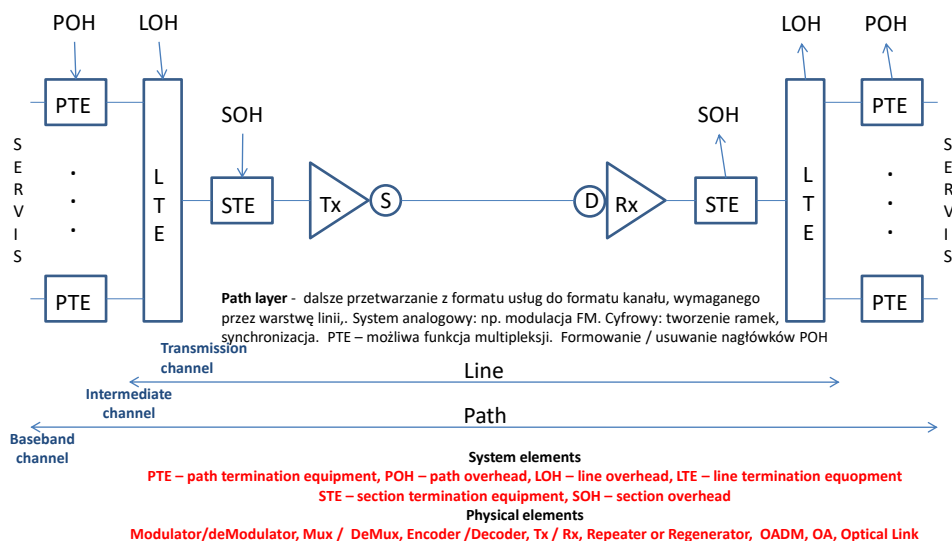
Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



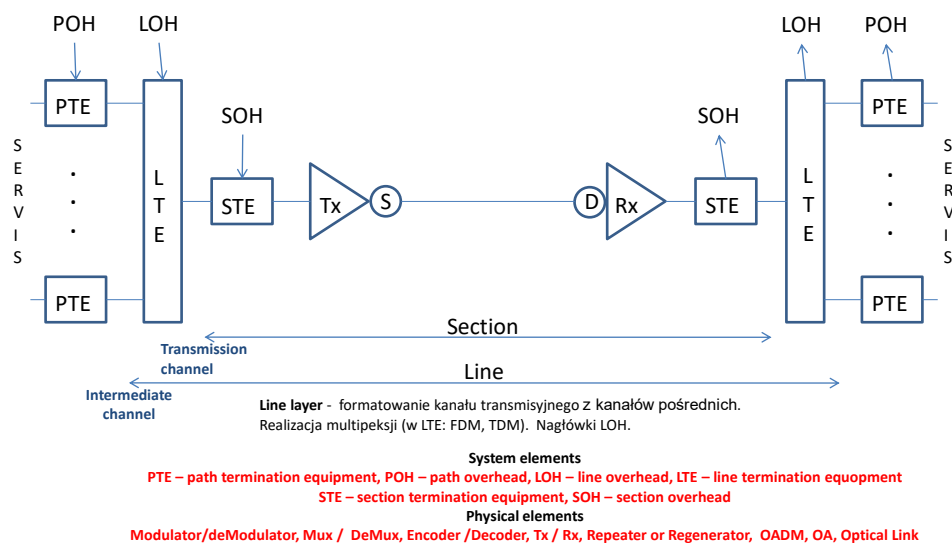
Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



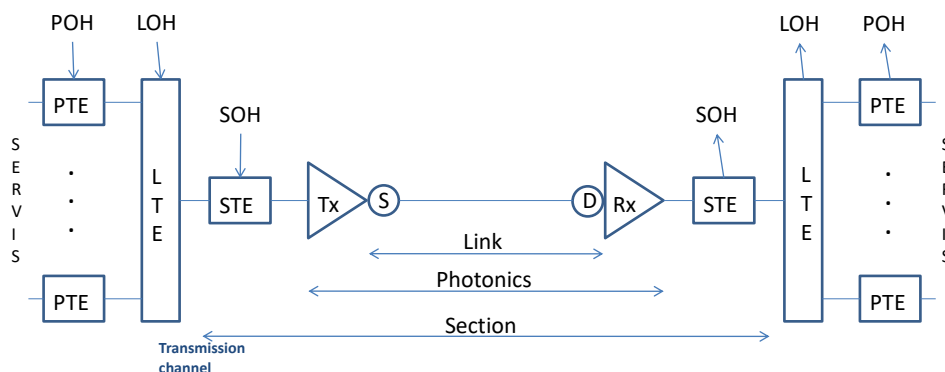
Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



Section layer - zmultiplesowany kanał transmisyjny. Nagłówki sekcji (SOH). Kodowanie sygnału do formatu wymaganego przez część fotoniczną: NRZ -> Manchester.

System elements

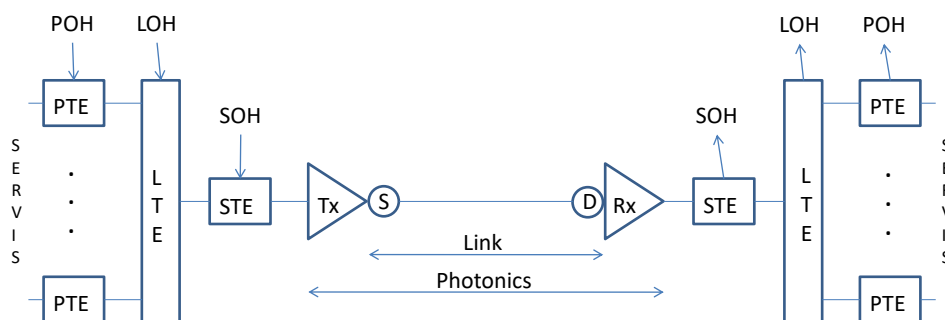
PTE – path termination equipment, POH – path overhead, LOH – line overhead, LTE – line termination equipment

STE – section termination equipment, SOH – section overhead

Physical elements

Modulator/deModulator, Mux / DeMux, Encoder /Decoder, Tx / Rx, Repeater or Regenerator, OADM, OA, Optical Link

Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



Photonic layer – realizacja konwersji E->O oraz O->E

System elements

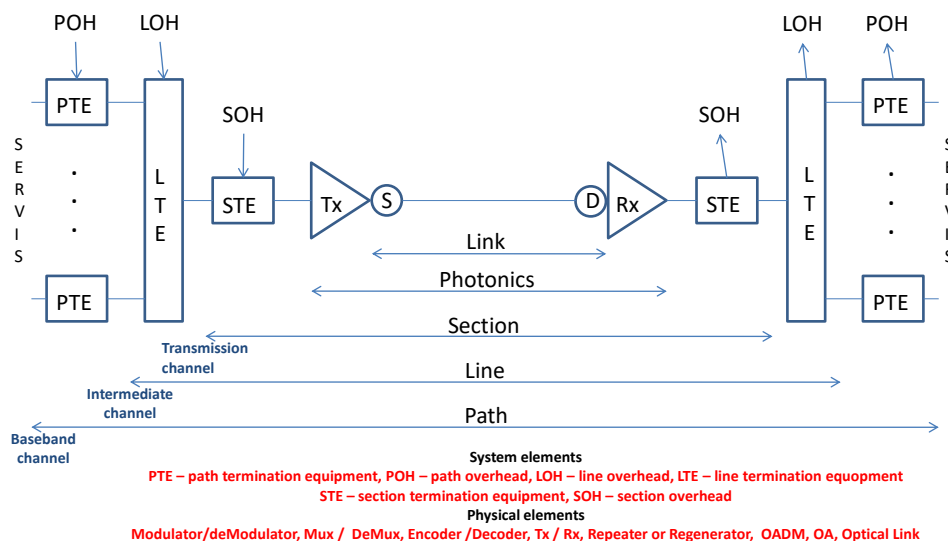
PTE – path termination equipment, POH – path overhead, LOH – line overhead, LTE – line termination equipment

STE – section termination equipment, SOH – section overhead

Physical elements

Modulator/deModulator, Mux / DeMux, Encoder /Decoder, Tx / Rx, Repeater or Regenerator, OADM, OA, Optical Link

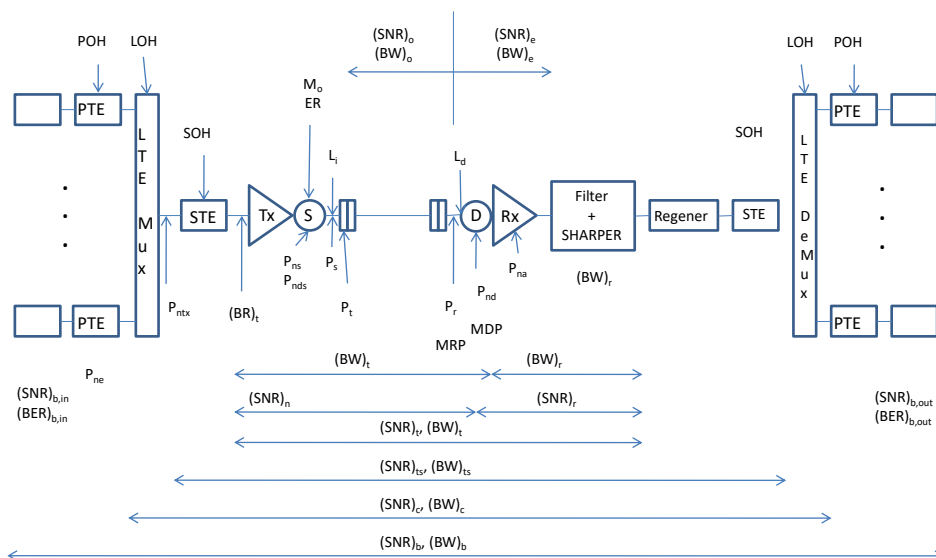
Definicja funkcjonalnych warstw systemu światłowodowego



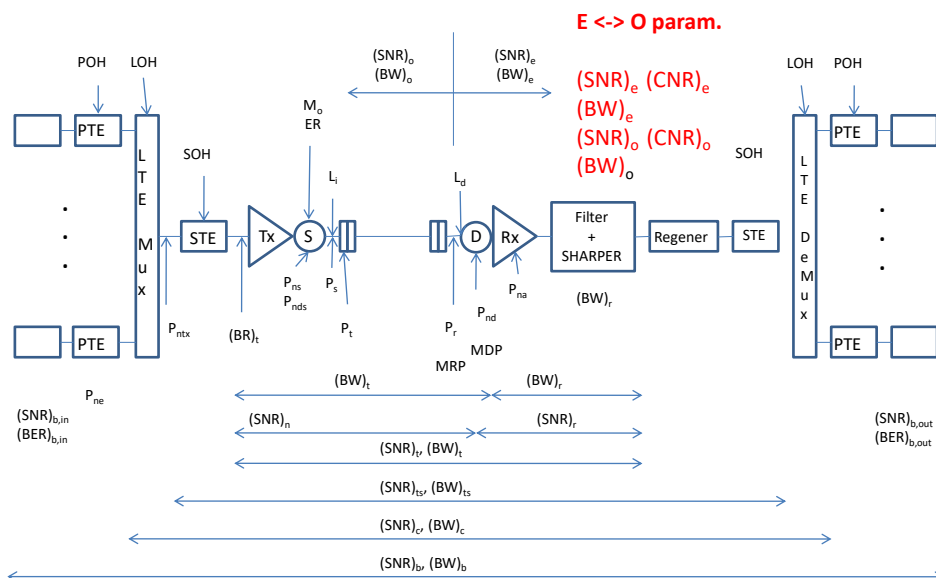
Fizyczna realizacja funkcji niezbędnych dla PTE, LTE, STE

- Modulatory / Demodulatory: PCM, FM, PM, AM
- Multipleksery / Demultipleksery: łączenie kanałów pasma podstawowego lub pośredniego (FDM, TDM). Funkcja realizowana we wszystkich warstwach
- Enkoder / Dekoder – formatowanie kanału transmisyjnego kompatybilnego z warstwą foniczną
- Nadajnik optyczny
- Odbiornik optyczny
- Repeater / regenerator
- ADM
- Wzmacniacz optyczny
- Linia optyczna

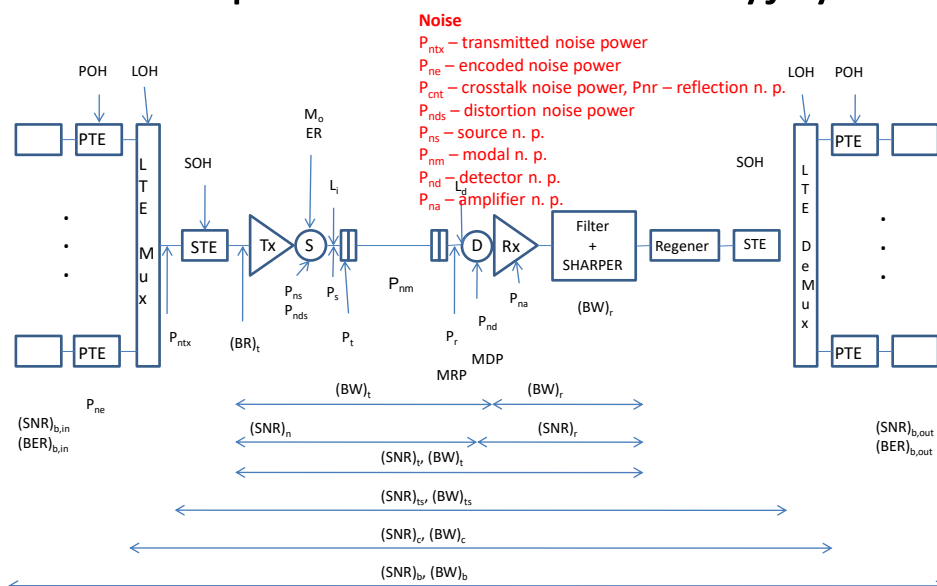
Model parametrów transmisyjnych



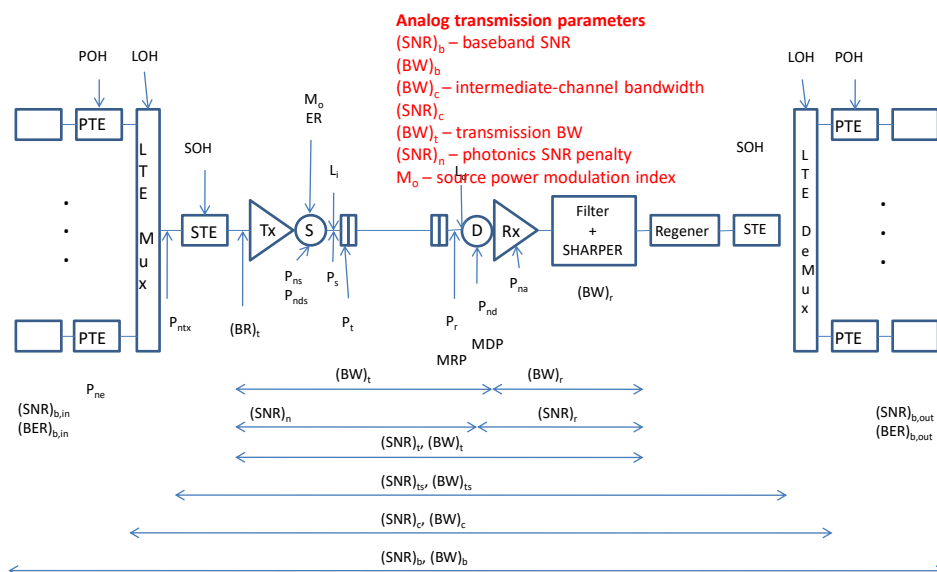
Model parametrów transmisyjnych



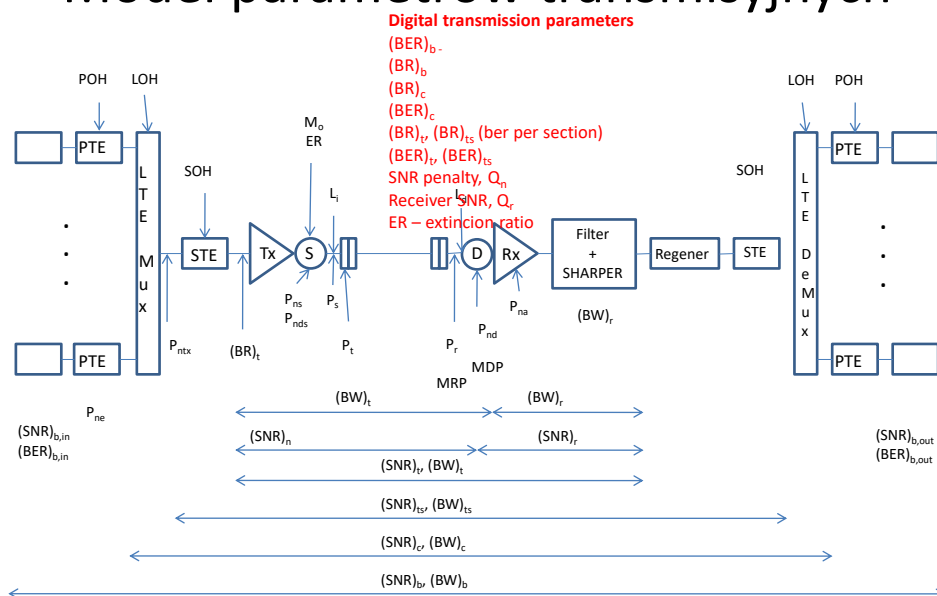
Model parametrów transmisyjnych



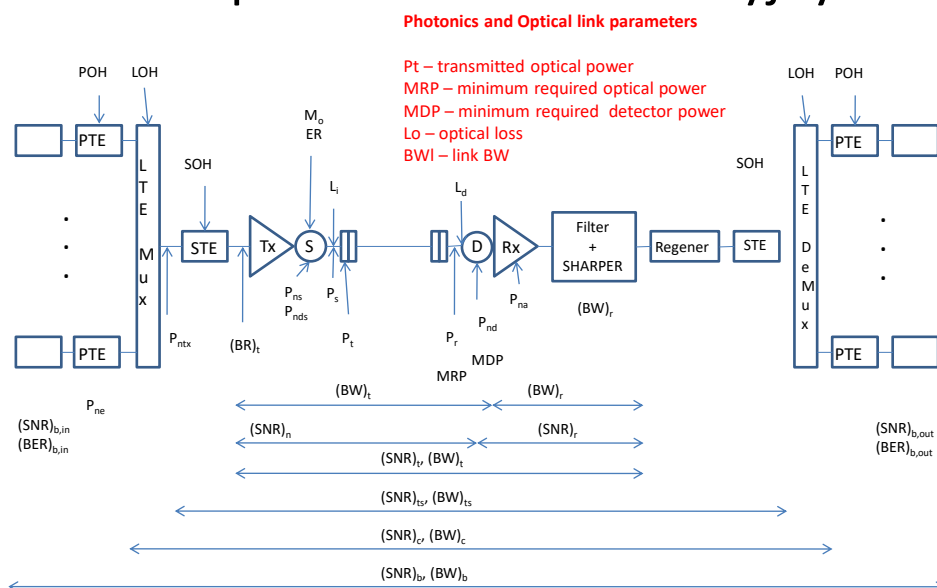
Model parametrów transmisyjnych



Model parametrów transmisyjnych



Model parametrów transmisyjnych



Model parametrów transmisyjnych

E <-> O param.

- $(\text{SNR})_e$
- $(\text{BW})_e$
- $(\text{SNR})_o$
- $(\text{WB})_o$

Noise

- P_{ntx} – tr noise power
- P_{ne} – encoded noise power
- P_{cnt} – crosstalk noise power, P_{nr} – reflection n. p.
- P_{nds} – distortion noise power
- P_{ns} – source n. p.
- P_{nm} – modal n. p.
- P_{nd} – detector n. p.
- P_{na} – amplifier n. p.

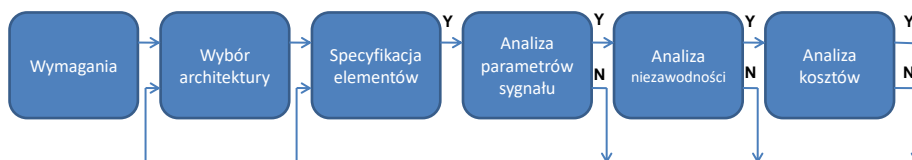
Analog transmission parameters

- $(\text{SBR})_b$ – baseband SNR
- $(\text{BW})_b$
- $(\text{BW})_c$ – intermediate-channel bandwidth
- $(\text{SNR})_c$
- $(\text{BW})_t$ – transmission BW
- $(\text{SNR})_n$ – photonics SNR penalty
- M_o – source power modulation index

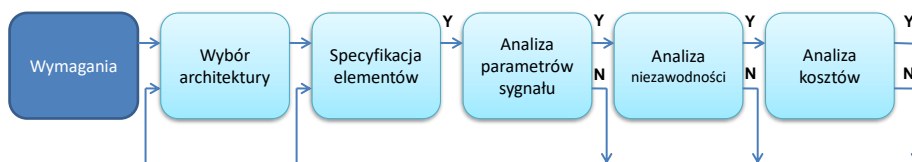
Digital transmission parameters

- $(\text{BER})_b$
- $(\text{BR})_b$
- $(\text{BR})_c$
- $(\text{BER})_c$
- $(\text{BR})_t, (\text{BR})_{ts}$ (ber per section)
- $(\text{BER})_t, (\text{BER})_{ts}$
- SNR penalty, Q_n
- Receiver SNR, Q_r
- ER – extinction ratio

Metodologia projektowania

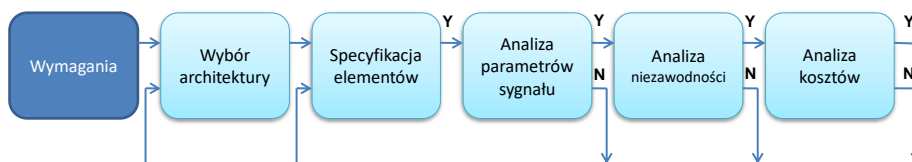


Metodologia projektowania



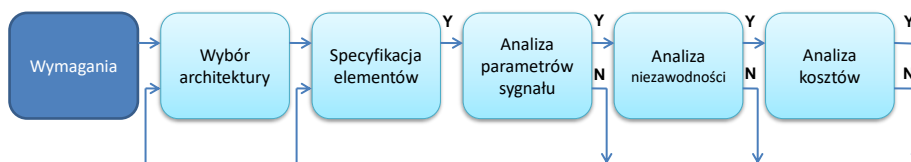
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE		
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE		
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY		
INSTALACJA		
ODBIÓR		
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE		
KOSZTY		

Metodologia projektowania



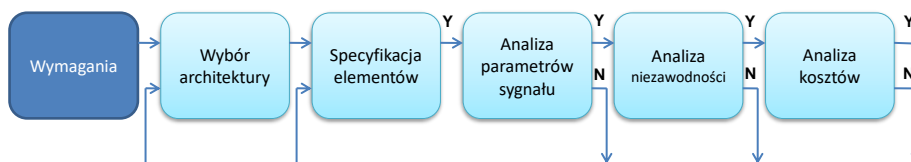
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE	Konfiguracja systemu	Liczba terminali, liczba węzłów transferowych, topologia
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Odcinki transmisyjne	Pomiędzy terminalami, repeaterami, end-to-end
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE	Specyfikacja układów	Interfejs analogowy / cyfrowy, audio / video / dane, standard interfejsu
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY	Pojemność projektowa systemu	Wymagania instalacyjne, pojemność instalacyjna, graniczna pojemność
INSTALACJA		
ODBIÓR	Fizyczne	Budynki, lokalizacja węzłów, trasa kablowa
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE	Zarządzanie siecią	Centralne / lokalne, raportowanie alarmów / ostrzeżeń, bezpieczeństwo, system rozliczeń, zarządzanie zasobami, raportowanie
KOSZTY		

Metodologia projektowania



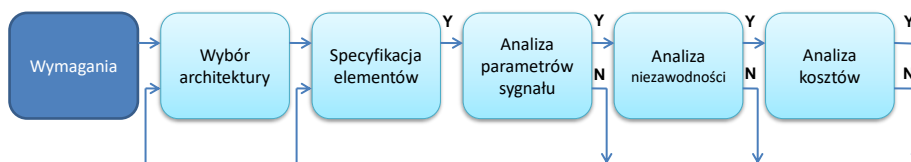
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU	Sygnał analogowy	Audio / video
ŚRODOWISKOWE		Standardy jakości
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		SNR
FIZYCZNE		BW
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		Zniekształcenia intermodulacyjne ...Inne
OBIEKTY	Sygnał cyfrowy	Dane, analogowy enkodowany
INSTALACJA		
ODBIÓR		Protokół
UTRZYMANIE		Standardy jakości
WDROŻENIE		RZ, NRZ, BER, BR, jitter, zniekształcenia przebiegów
KOSZTY		Inne

Metodologia projektowania



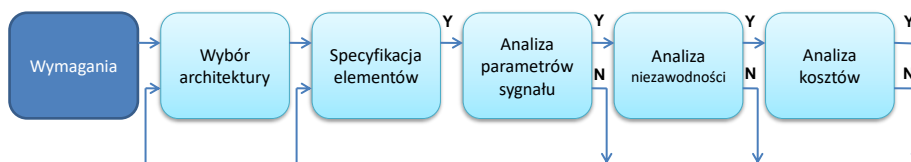
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE	Temperatura	Długookresowy, krótkookresowy, zmiany okresowe, uder termiczny, temp. przechowywania
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Wilgotność	Dopuszczalna wilgotność, odporność na okresowe zmiany temperatury i wilgotności, kondensacja wilgoci, zabezpieczenia przed wilgocią
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE	Wibracje i udary	
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY	Ekspozycja / Promieniowanie	Zasolenie, piasek, kurz, błysk, trwałe uszkodzenie, odwracalne uszkodzenie
INSTALACJA		
ODBIÓR	Kable / złącza mechaniczne	Naprężenia, skręcenia, zagięcia, blokowanie wody, gazów, ścieranie, gryzonie, odporność na ogień
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE	EMI / RFI	Wrażliwość na wyladowania
KOSZTY		

Metodologia projektowania



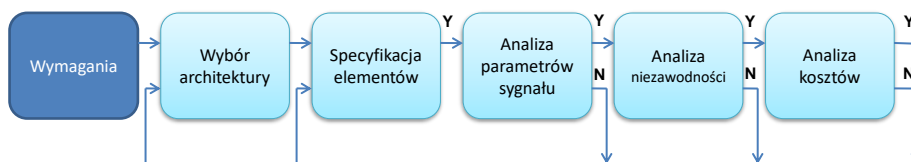
da	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		Katastroficzne
PARAMETRY SYGNAŁU	Definicje awarii	Max BER
ŚRODOWISKOWE		czas trwania awarii
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		okres pomiędzy awariami
FIZYCZNE		
ZARZĄDZANIE SIECIĄ	Dostępność systemu	% dostępność / rok lub miesiąc
OBIEKTY		średni czas przywrócenia sprawności
INSTALACJA		
ODBIÓR		Odstępy pomiędzy przeglądami
UTRZYMANIE	Niezawodność sprzętu	Średni czas pomiędzy awariami
WDROŻENIE		Średnia czasochłonność naprawy
KOSZTY		

Metodologia projektowania



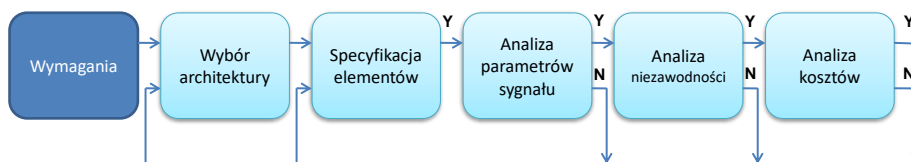
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Stacje końcowe	Rozmiary, konfiguracja, umiejscowienie wejść / wyjść
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE	Instalacje kablowe	Liczba włókien, średnica osłony, typ kabla (tuba centralna, linka nośna ...)
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		włókno – bufor typ, rozmiar
OBIEKTY	Zakończenia / złącza	Złącza, patch panele, kasety, organizery, mufy, krosownice
INSTALACJA		
ODBIÓR	Spawy	Mufy, kasety, organizery
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE		
KOSZTY		

Metodologia projektowania



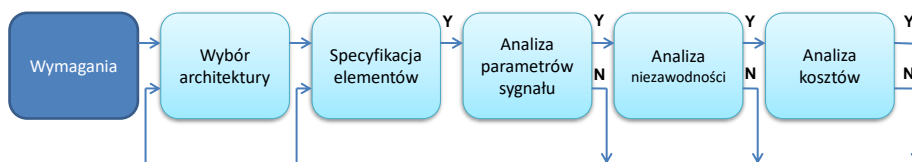
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU	Alarmy i ostrzeżenia	Filozofia utrzymania / konserwacji, centrum zarządzania, poziomy alarmów,
ŚRODOWISKOWE		Raporty: bieżące, historie,
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE		
ZARZĄDZANIE SIECIĄ	Rozliczenia	system bilingu, konfiguracja zarządzania i śledzenia,
OBIEKTY		
INSTALACJA		
ODBIÓR		
UTRZYMANIE	Dostęp	Bezpieczeństwo: dane, budynki..., poziomy dostępu
WDROŻENIE		
KOSZTY		

Metodologia projektowania



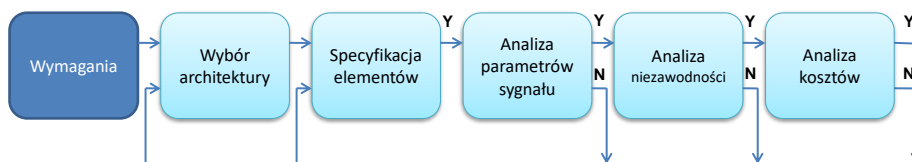
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Opis	Obiekty terminali, lokalizacja repeaterów, kierowanie siecią
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE		
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY	Specyfikacja	Rozkłady pomieszczeń, klimatyzacja, zasilanie (główne, awaryjne, systemy backup), dostęp i zabezpieczenia, oświetlenie, zabezpieczenia
INSTALACJA		Przeciwpożarowe, przestrzeń dla personelu
ODBIÓR		
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE		
KOSZTY		

Metodologia projektowania



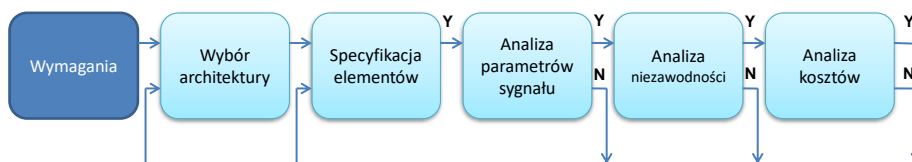
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU	Sprzęt końcowy	Montaż, okablowanie zasilające, sygnałowe, uziemienia, zakończenia optyczne
ŚRODOWISKOWE		
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE		
ZARZĄDZANIE SIECIĄ	Okablowanie	Konstrukcja: kanalizacja, przeciski
OBIEKTY		Naprężenia, krzywizny
INSTALACJA		Procedury instalacyjne
ODBIÓR		
UTRZYMANIE	Spawy	Technologia połączeń, sprzęt, transport
WDROŻENIE		Straty, pomiary, mufy i organizery, zabezpieczenia
KOSZTY		

Metodologia projektowania



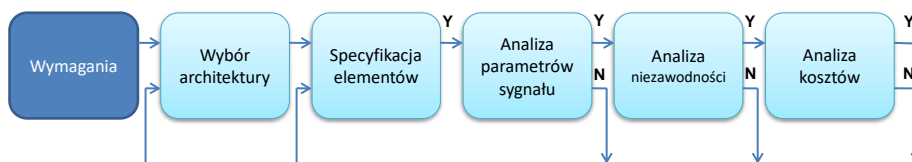
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE		
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE	Stacje końcowe, sprzęt, syst. zarządzania	Testy jakości, procedury testów, testy uruchomieniowe, ustawienia,
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		sezonowanie, raporty pracy
OBIEKTY		
INSTALACJA		
ODBIÓR	Okablowanie	Testy producenta, parametry łączy, tłumienie, dydyersja
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE	Dokumentacja	Raporty testów, schematy powykonawcze, oprogramowanie, instrukcje obsługi
KOSZTY		

Metodologia projektowania



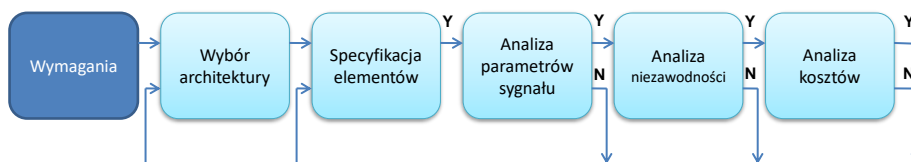
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Wsparcie konserwacji	Sprzęt, oprogramowanie, okablowanie
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		
FIZYCZNE	Części zamienne - filozofia	Podręczne, magazynowe, 24 h
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY	Help desk	Prewencja, zgłoszenie konserwacji
INSTALACJA		
ODBIÓR	Dostęp do budynków, sekcji	Poziomy dostęp, napraw, sekcje
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE	Diagnostyka	Scentralizowana, lokalna, zdalna
KOSZTY		

Metodologia projektowania



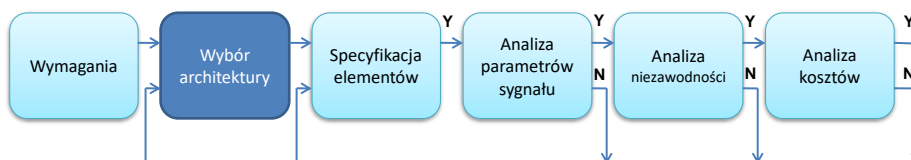
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU		
ŚRODOWISKOWE	Krytyczne etapy	Projekt, zamówienia, produkcja
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		Pomieszczenia, instalacja, odbiory,
FIZYCZNE		Przekierowanie ruchu
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY	Zarządzanie czasem	Bieżące
INSTALACJA		Krótkoterminowe
ODBIÓR		Perspektywistyczne
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE	Personel	Projekt, instalacja, obsługa
KOSZTY		

Metodologia projektowania



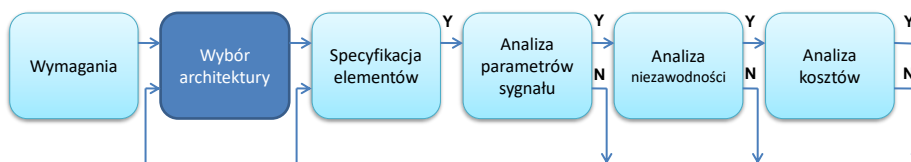
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FUNKCJONALNE		
PARAMETRY SYGNAŁU	Początkowe	B&R
ŚRODOWISKOWE		Koszty stałe, zamówienia, koszty uruchomienia produkcji, sprzętu i softwar'u
DOSTĘPNOŚĆ / NIEZAWODNOŚĆ		Pomieszczenia, instalacja
FIZYCZNE		uruchomienie
ZARZĄDZANIE SIECIĄ		
OBIEKTY		
INSTALACJA	Koszty bieżące	Produkcja bieżąca, kontrola działania i jakości, konserwacji, lizingu, narzędzia
ODBIÓR		
UTRZYMANIE		
WDROŻENIE		
KOSZTY	Zwrot kosztów	Zwrot inwestycji, okres zwrotu

Metodologia projektowania



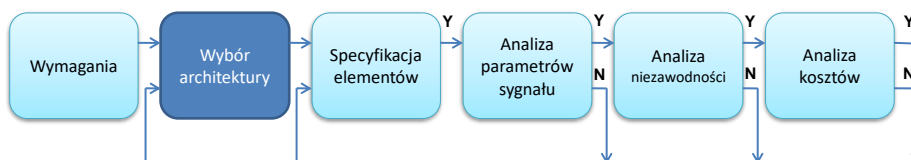
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE		
INTERFEJSY SYGNAŁOWE		
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW		
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW		
FUNKCJONALNE ELEMENTY		

Metodologia projektowania



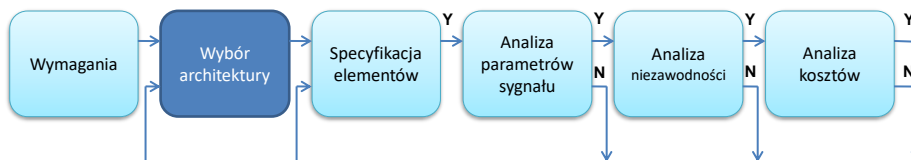
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE	Topologia fizyczna	Połączenia węzłów
INTERFEJSY SYGNAŁOWE		Redundancja ścieżek, linii, łączy
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW		Redundancja dróg
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW		
FUNKCJONALNE ELEMENTY		

Metodologia projektowania



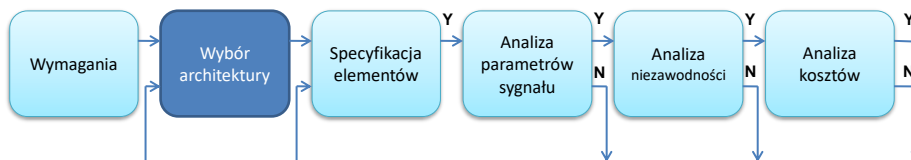
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE	Sygnaly w paśmie podstawowym	Punkty sprzętu końcowego ścieżki, standardy, parametry
INTERFEJSY SYGNAŁOWE	Kanały pośrednie	Punkty sprzętu końcowego linii, format, standardy kanału
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW	Kanał transmisyjny	Format sygnału, standardy,
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW	Kanał optyczny	Punkt interfejsu optycznego, format / standard sygnału
FUNKCJONALNE ELEMENTY	Kanały nagłówków	Standardy, zawartość sygnału

Metodologia projektowania



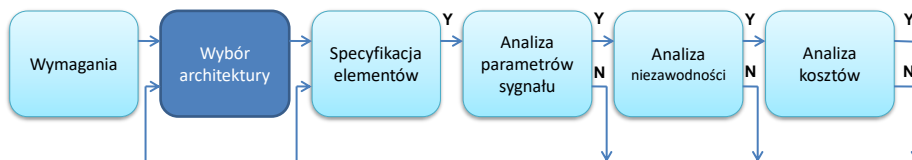
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE	Modulacja / kodowanie: ścieżka, linia	Analog: Baseband, kod impulsowe, częstotliwość, faza, amplituda
INTERFEJSY SYGNAŁOWE		Cyfrowy: Baseband, NRZ, RZ, format ramki, protokół
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW	Multipleksja: ścieżka, linia, warstwa optyczna	A: Mux podz częstotl, dł. fali
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW		C: Mux podz czasu, dł. fali
FUNKCJONALNE ELEMENTY	Moduł nośnej, kodowanie (span layer)	A: AM, FM, PM; C: NRZ, RZ, Manchester, PSK, FSK

Metodologia projektowania



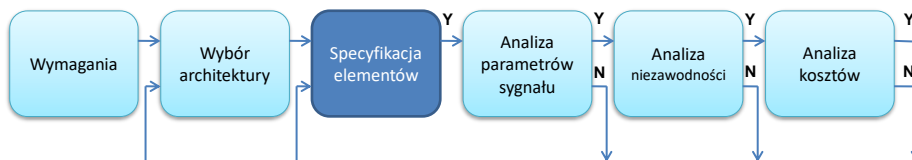
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE		
INTERFEJSY SYGNAŁOWE	Architektura zarządzania siecią	Interfejsy, punkty kontrolne, dodatkowe okablowanie, zapasowe kanały,
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW		
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW	Sygnalizacja nagłówków	Format / protokół,
FUNKCJONALNE ELEMENTY		

Metodologia projektowania



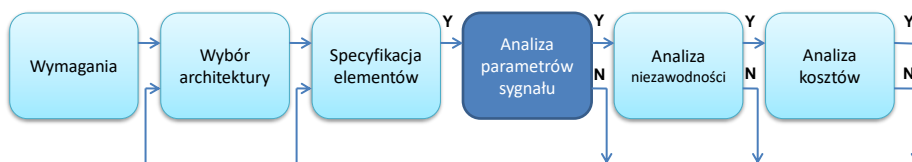
Kategoria wymagań	Wymagania	Szczegółowa specyfikacja
FIZYCZNE	Sprzęt transmisyjny	Ścieżka, linia, optyczna
INTERFEJSY SYGNAŁOWE		
PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW	Linie dzierżawione	Czujniki alarmów, monitoring, sprzęt zapasowych kanałów
PRZETWARZANIE NAGŁÓWKÓW		
FUNKCJONALNE ELEMENTY	Optyczny sprzęt transmisyjny	Tx, Rx, źródła, detektory, WO, złącza, Mux, spawy, włókna ...

Metodologia projektowania



Właściwości wszystkich funkcjonalnych modułów i interfejsów
 Właściwości wszystkich funkcjonalnych elementów
 Proces wyboru iteracyjny
 W rezultacie każdy funkcjonalny moduł scharakteryzowany pod kątem :
 •Interfejsów we /wy
 •Funkcji transmitancji / lub właściwości
 •Innych parametrów

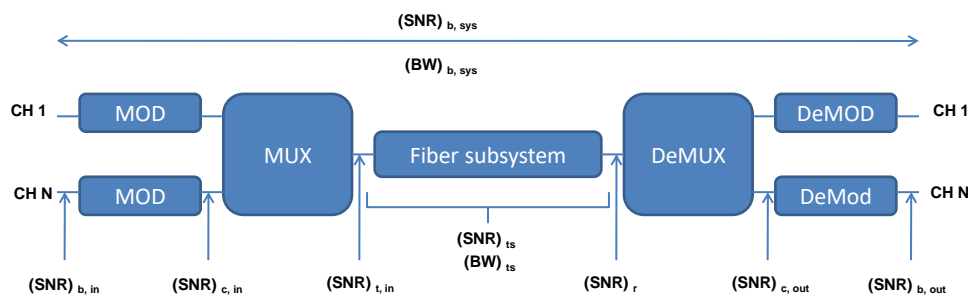
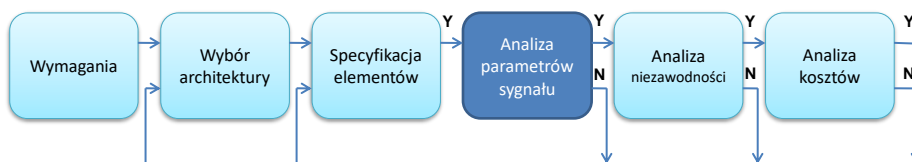
Metodologia projektowania



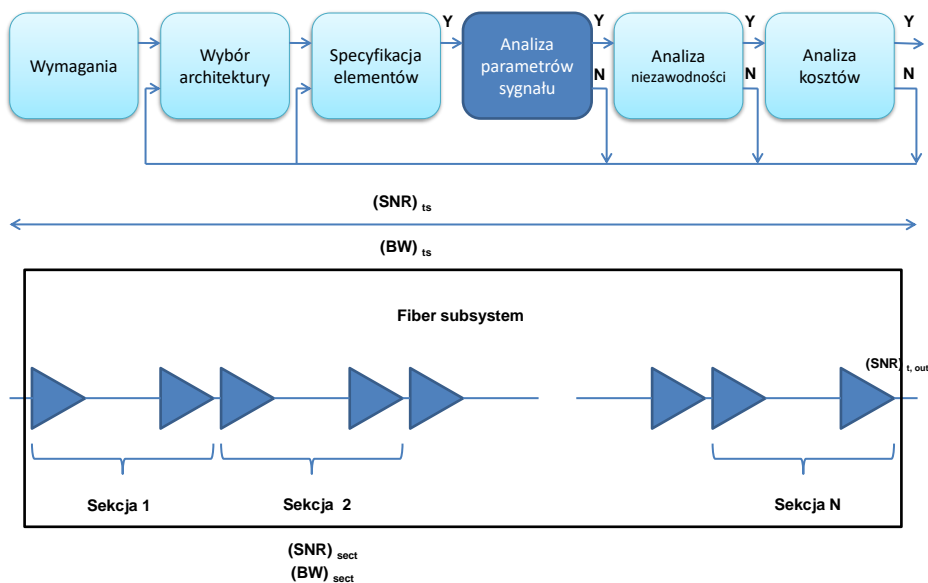
Zwykle trzy kroki:

1. Warstwa usług, ścieżki, linii (sprzęt końcowy – parametry umożliwiające uzyskanie założonych parametrów end-to-end w pasmie podstawowym)
2. Warstwa sekcji – definicja formatu sygnału, nagłówków, wybór technologii optycznej,
3. Projektowanie warstwy fotonicznej: analiza budżetu mocy, dynamiki systemu

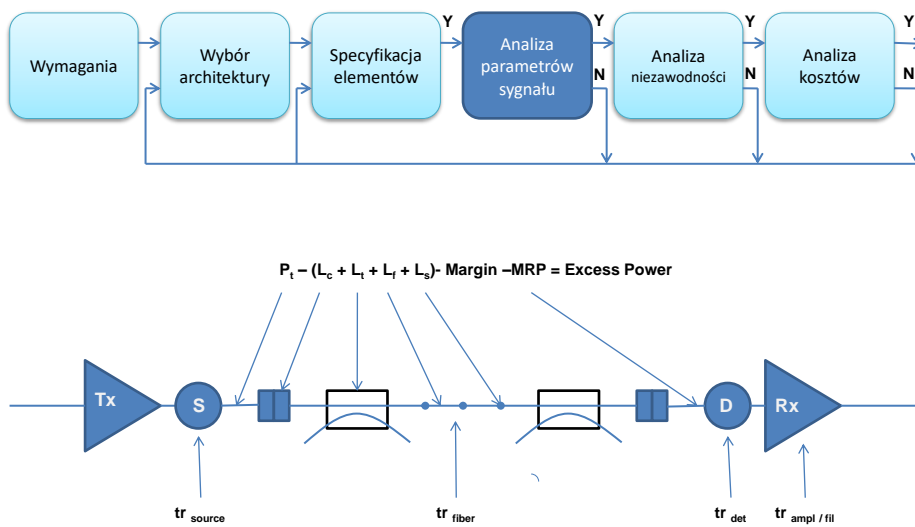
Metodologia projektowania



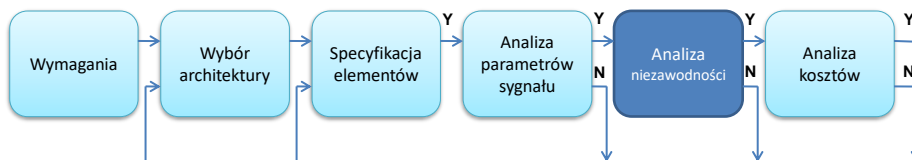
Metodologia projektowania



Metodologia projektowania

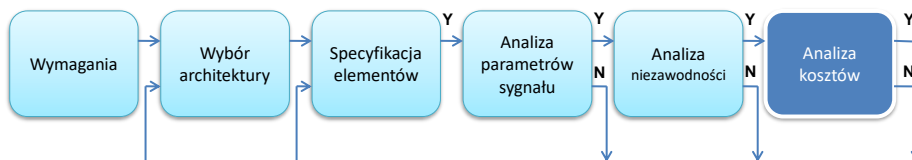


Metodologia projektowania

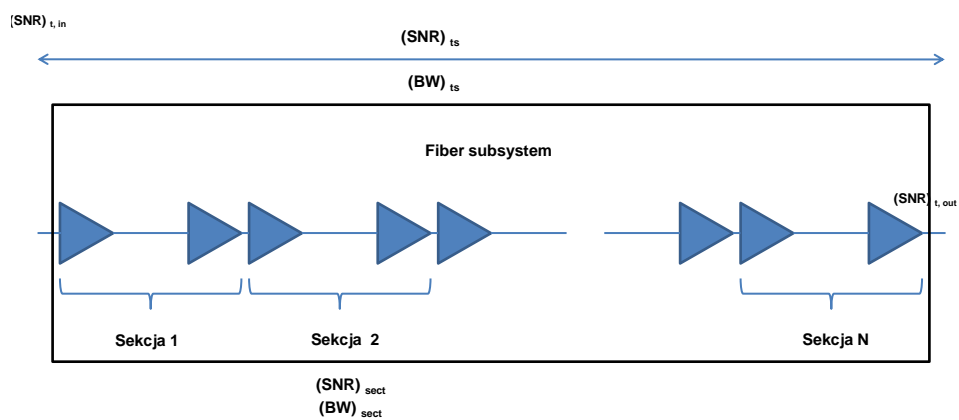
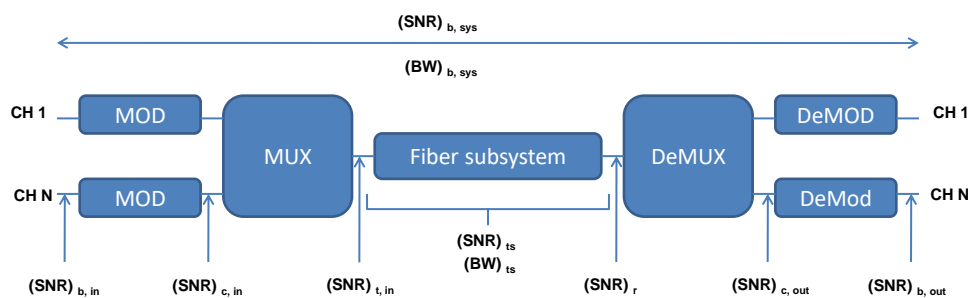


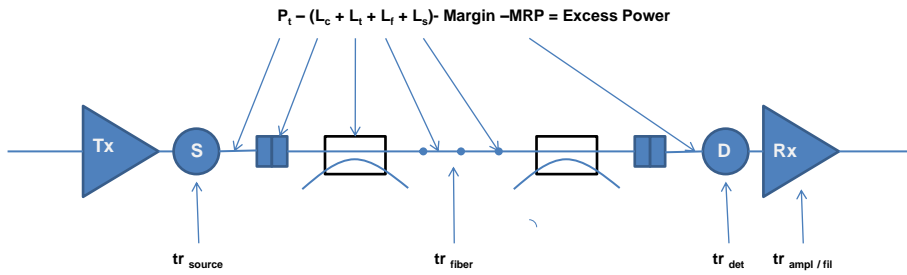
Niezawodność jest funkcją właściwości komponentów i funkcjonalnych modułów systemu, a także warunków pracy systemu, architektury.

Metodologia projektowania



Kończącym etapem projektowania jest analiza kosztów.
 Analiza kosztów może wpłynąć na ostateczną architekturę systemu,
 zastosowane komponenty, funkcjonalne moduły, technologię instalacji
 Może także wpłynąć na przededefiniowanie parametrów systemu.





Creating a brighter future

Webinar:

Passive infrastructure of FTTH networks: an overview

Moderator: **Wolfgang Fischer**

Chair Deployment & Operations Committee
FTTH Council Europe

FTTH Council Europe

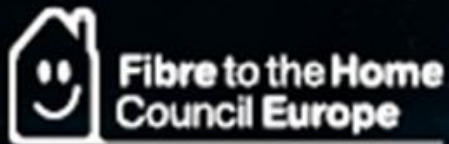


A sustainable future
for Europe
enabled by
Fibre to the Home



FTTH Conference 2015

Join us Next Year in Warsaw! 10-12 February 2015



Creating a Connected Continent

FTTH Conference 2015
EXPO XXI, Warsaw, 10 – 12 February 2015



Webinar



- 20-25 minutes presentation
- 15-20 minutes Q&A

-
- Post your **questions** in the questions box of the webinar system
 - Relevant questions that are not answered during the webinar will be answered by email

-
- The **slides** will be available for download after the webinar
 - The **webinar** is recorded and can be viewed as video-stream afterwards. The video will be available on the website of the FTTH Council Europe within one week
 - Slides and information about the availability will be sent to registered attendees by email



The following presentation does not necessarily reflect the opinion of the FTTH Council Europe



FTTH Council Europe

Post your **comments** about this webinar on Twitter:

#ftthwebinar



A background image showing a bright sun rising over a layer of white clouds against a clear blue sky.

Creating a brighter future

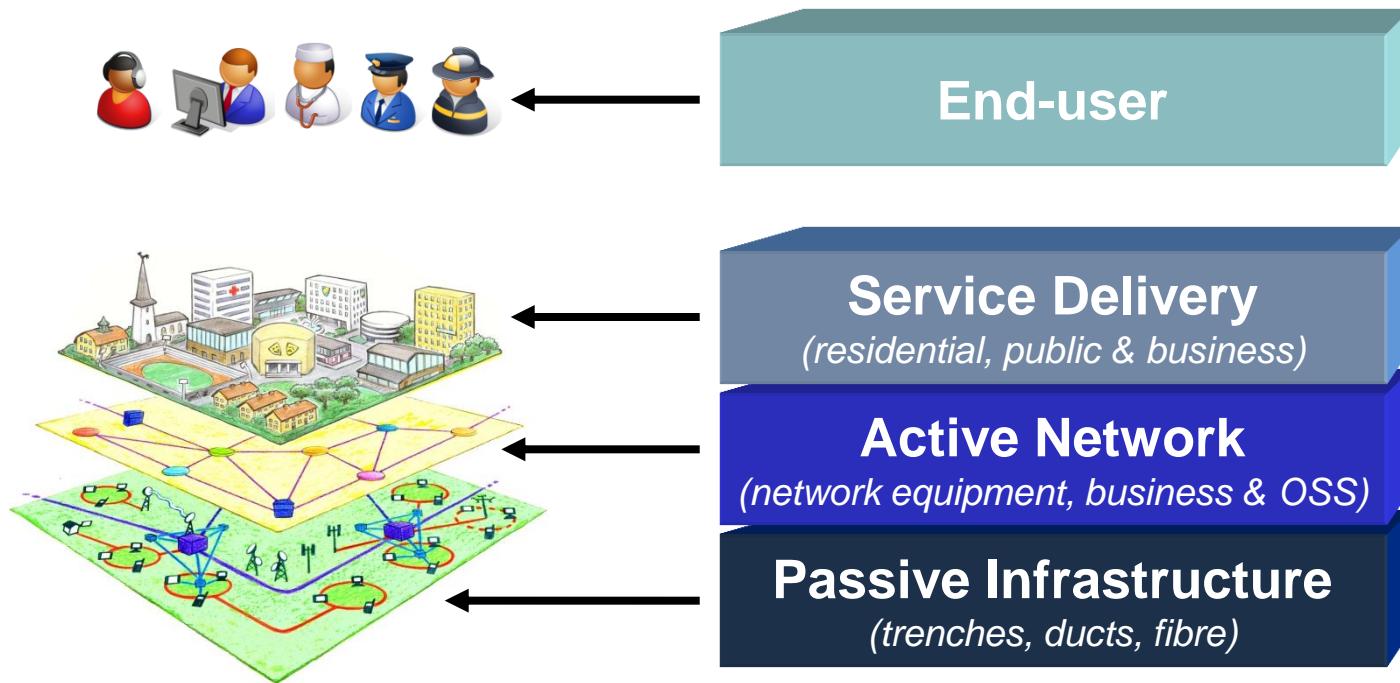
Webinar:

Passive infrastructure of FTTH networks: an overview

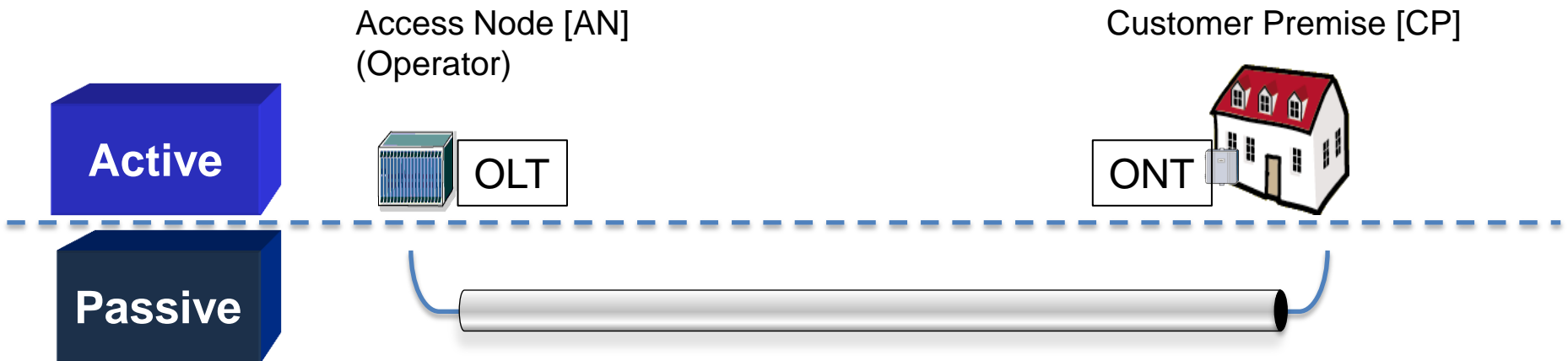
Presenter: **Raf Meersman**
CEO Comsof

FTTH

The Layered Model



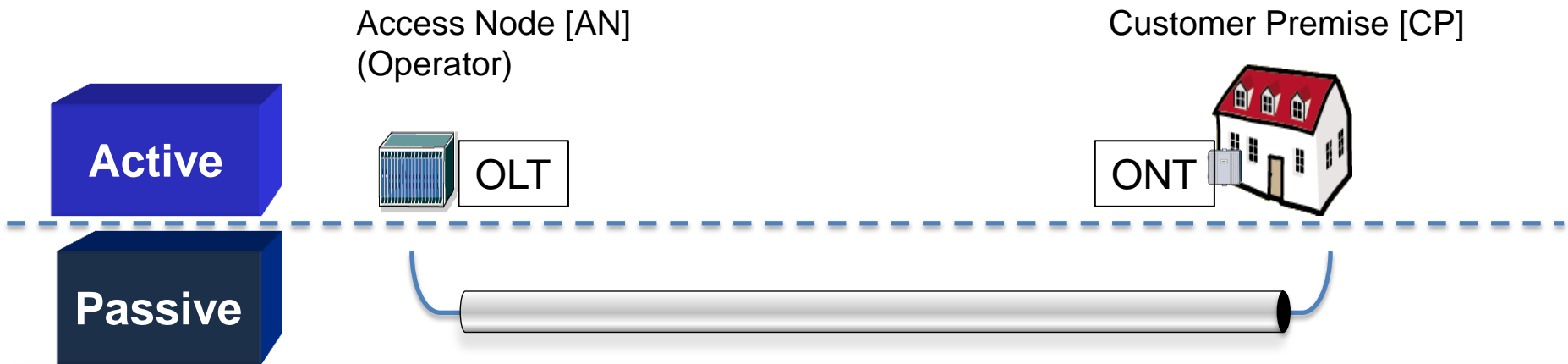
Passive – A simple pipe...



Seen from the active layer, passive layer seems **simple**:

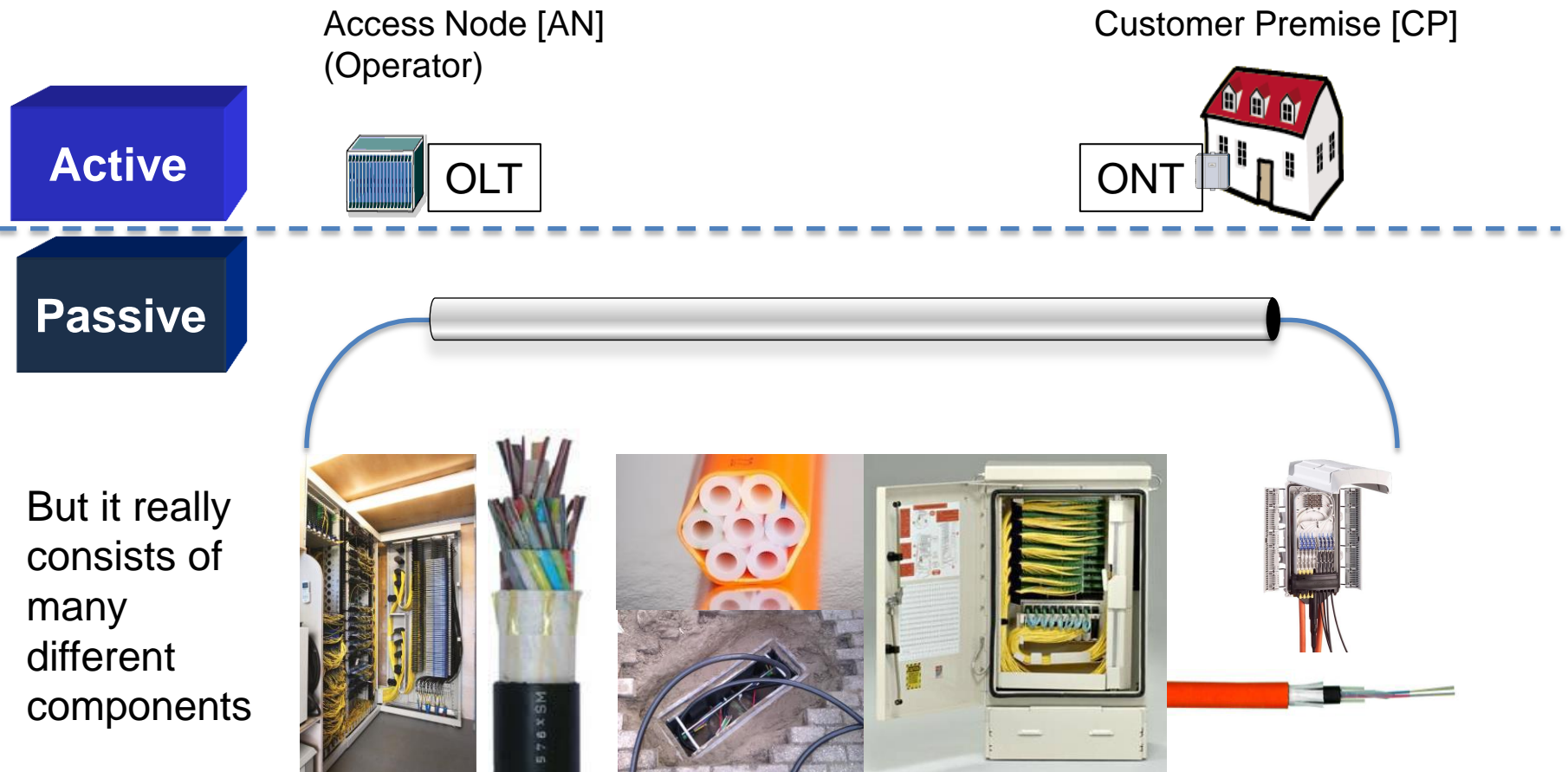
- End-2-end pipe from Operator's AN to Customer's premise
- Transports light between Optical Line Termination (OLT) and Optical Network Termination (ONT)

Passive – A simple pipe...

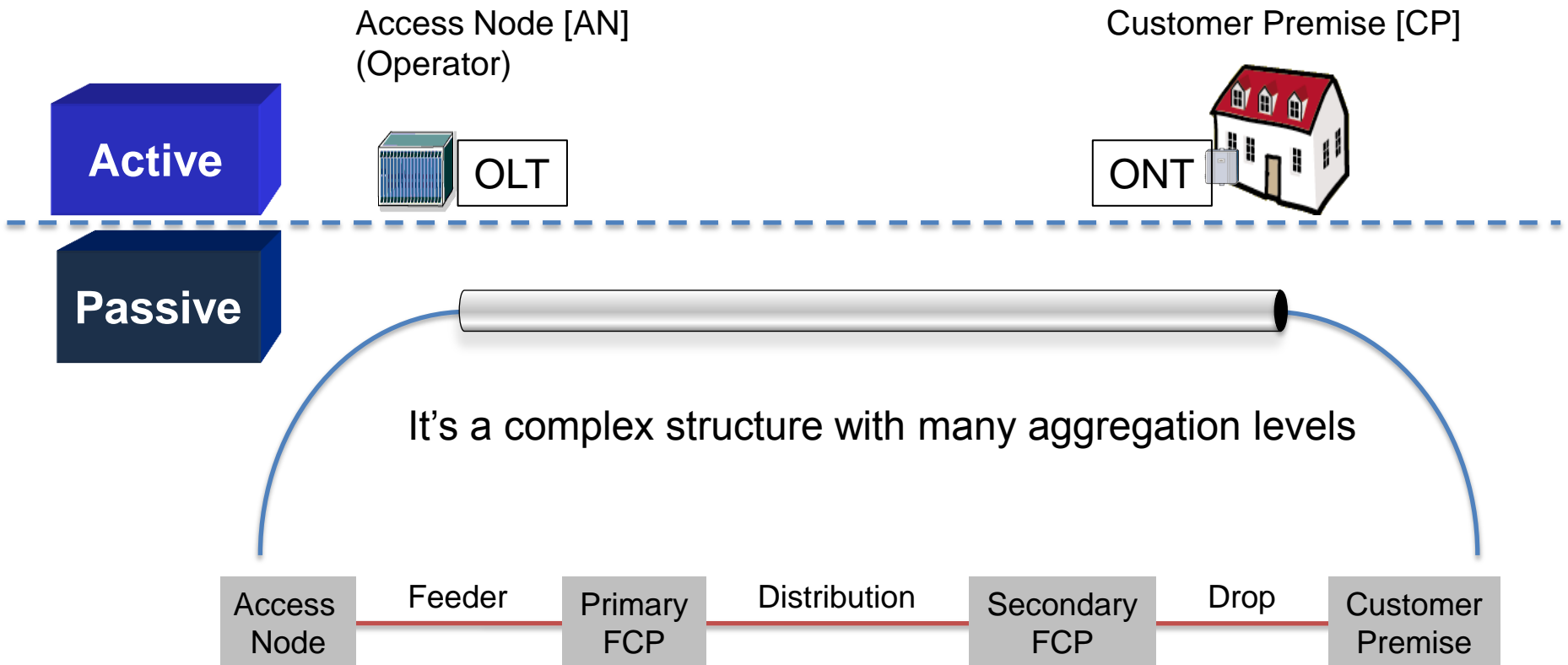


- **Access Node [AN]:** starting point for the optical path to the subscriber. It houses all active equipment from the operator. This is often also referred to as Central Office [CO] or Point of Presence [PoP]
- **Optical Line Termination [OLT]:** the active equipment at the operator side that sends and reads optical signals
- **Optical Network Termination [ONT]:** the active equipment at the customer side that sends and reads optical signals

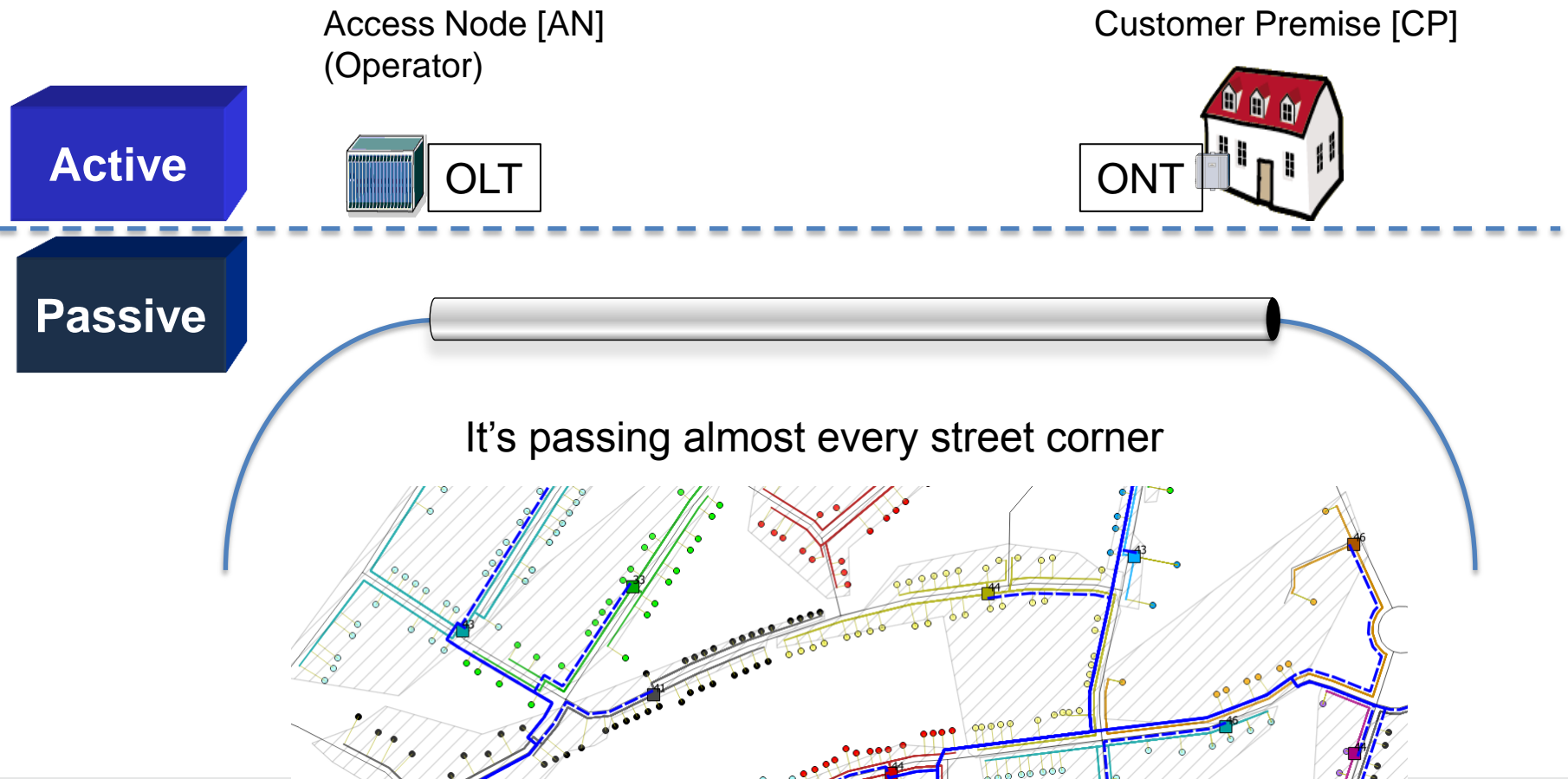
Passive – ... that is far from simple



Passive – ... that is far from simple

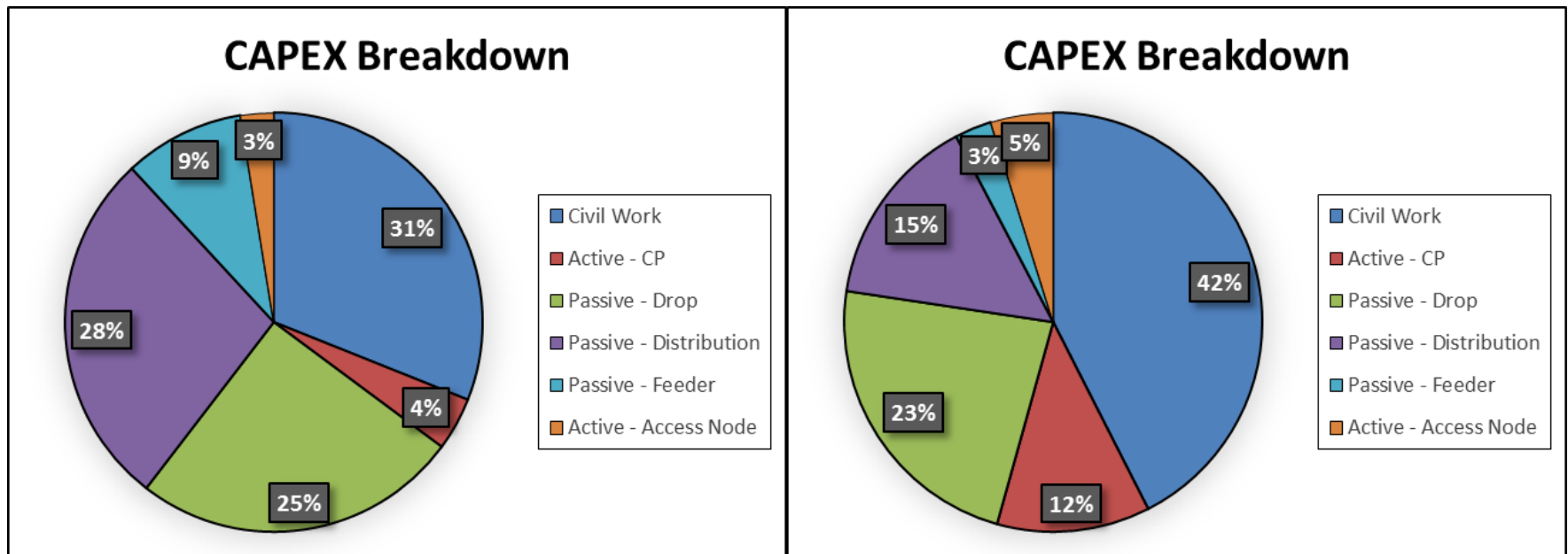


Passive – ... that is far from simple



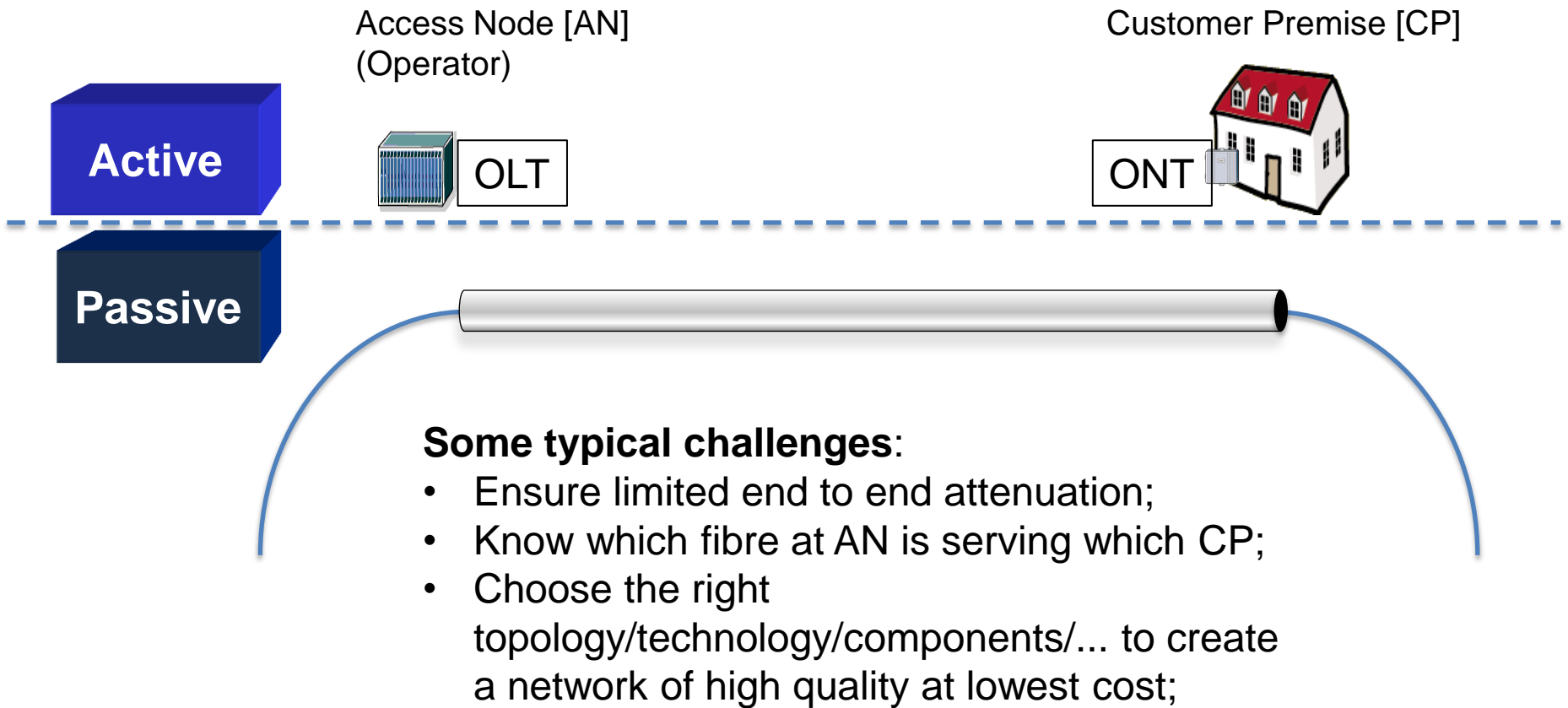
Passive – ... and very expensive

Examples of CAPEX breakdowns in 2 completely different cases



- Differences are linked to labour rates, density of area, type of cable deployment, ...
- But the biggest reason for the difference in ratio Active/Passive between these two cases is take rate!!

Passive – ... and challenging



The passive pipe

Different aspects / Many variations of the passive pipe

1. Different Topologies

P2P vs P2MP

2. Different Aggregation Levels

Feeder – Distribution – Drop – In-House

3. Different Components:

Fibre – splice – splitter – connector

Cables – closures – cabinets – manholes

4. Different Cable Deployment Methods:

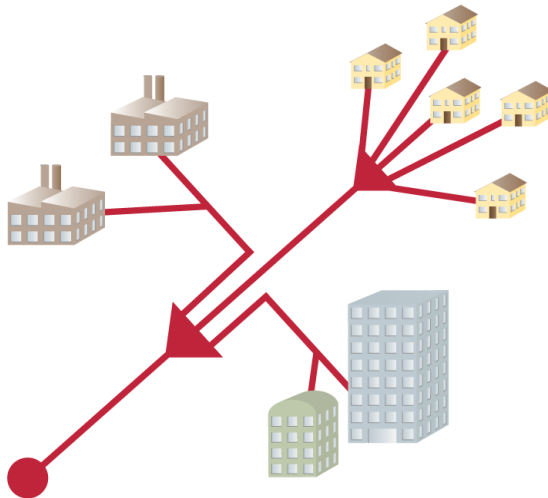
Ducts – Microducts – Direct buried – Aerial – Existing Pipes



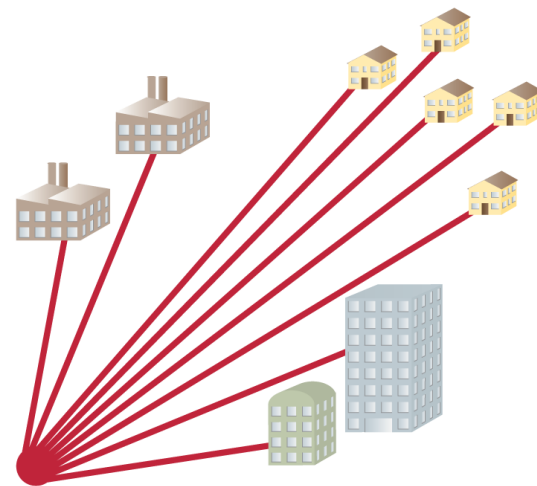
1. FTTH Topologies

Topology

Point to Multi-Point [P2MP]



Point to Point [P2P]



1. FTTH Topologies

Topology

Point to Multi-Point [P2MP]

P2MP:

one fibre leaving the AN will feed a splitter with multiple outgoing fibres. This means the capacity of this feeding fibre is shared between these outgoing fibres. The amount of outgoing fibres determines the split ratio and can vary from 1 by 2 or 1 by 4 up to 1 by 128 or 1 by 256. Splitters can also be deployed in cascade or series, in which case the end to end split ratio is the multiple of the individual split ratios. Since capacity is shared, the higher the end to end split ratio, the lower the maximum bandwidth per customer will be

Point to Point [P2P]

P2P:

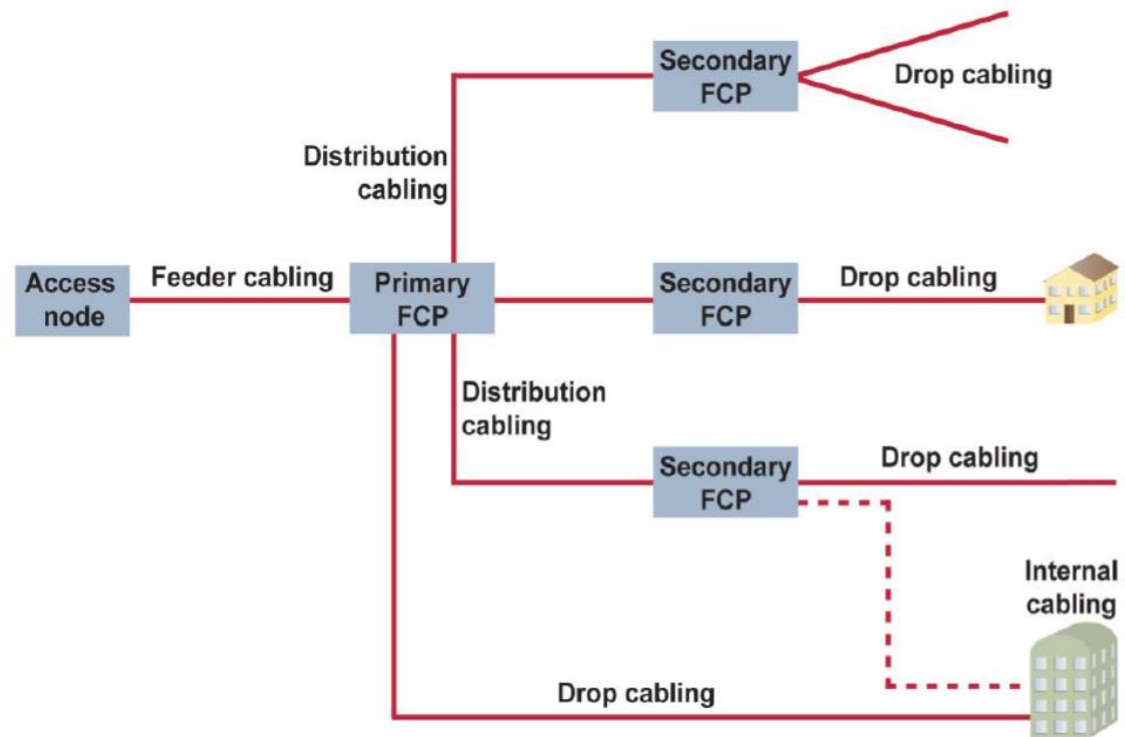
when a dedicated fibre is available from AN into each Customer premise. No capacity is shared, but high fibre counts are entering the AN, requiring also large amounts of active equipment in the AN.



2. FTTH Network Structure

From Access Node to customer premise: different aggregation levels

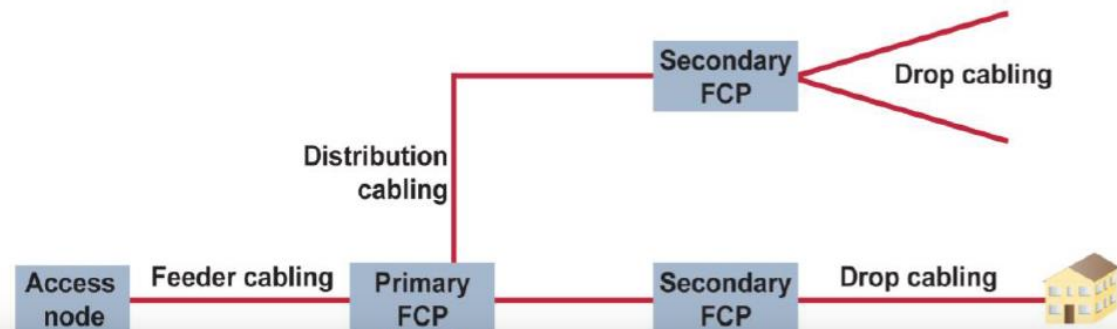
- Access Node
- Feeder
- Primary FCP
- Distribution
- Secondary FCP
- Drop
- In-House



2. FTTH Network Structure

From Access Node to customer premise: different aggregation levels

- Access Node
- Feeder
- Primary FCP
- Distribution
- Secondary FCP
- Drop
- In-House

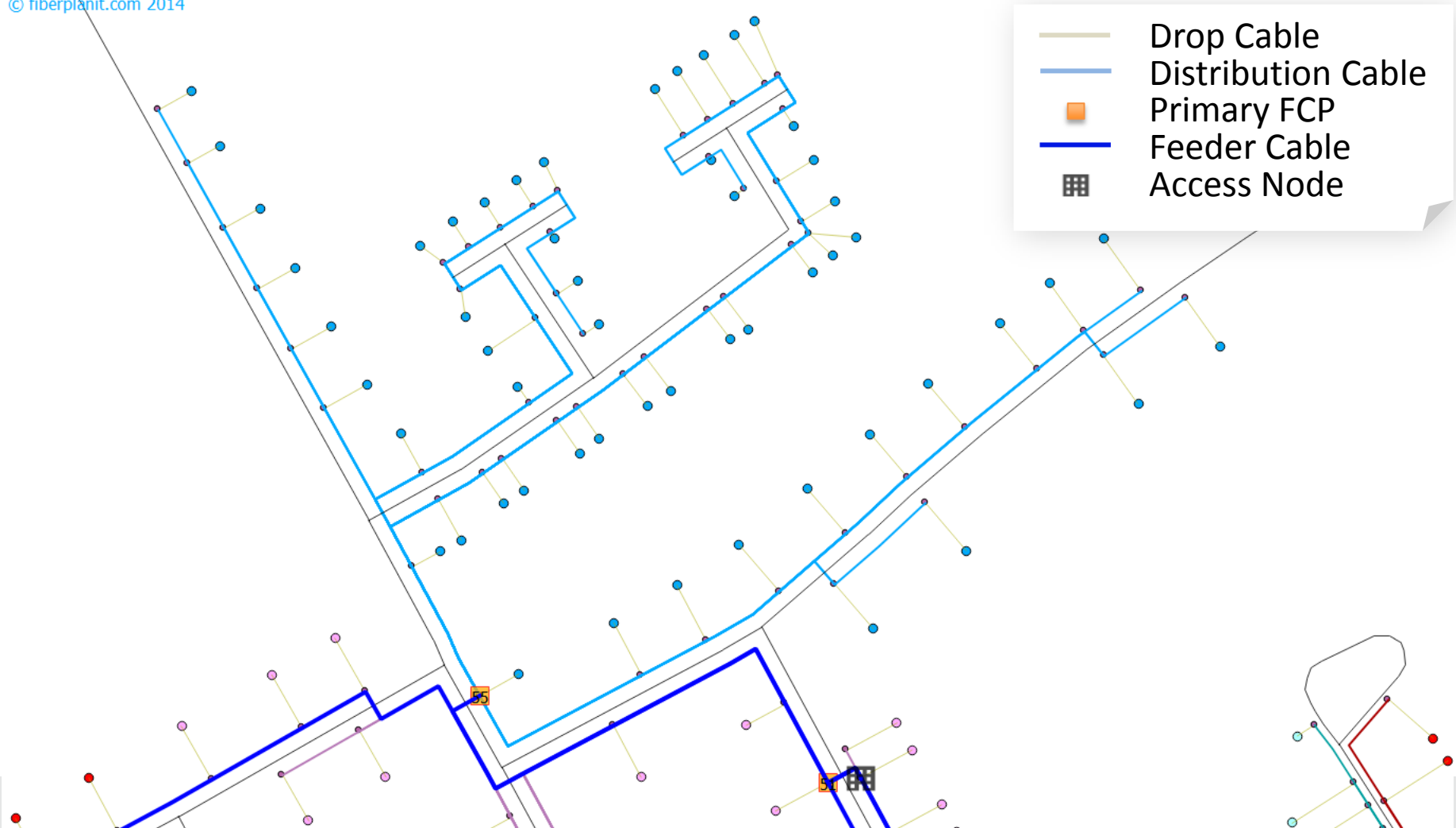


Fibre Concentration Point [FCP]: a point in the network where cables of different types or sizes are typically joint, in a way that may include flexibility or splitting functionality.

- Typically networks will use FCPs at different aggregation levels in the network. Primary FCP is often also referred to as Distribution Point (DP). Secondary FCP is often referred to as Drop Point.
- FCPs can be realised in the form of a street cabinet, a manhole or a smaller handhole.

2. FTTH Network Structure

© fiberplanit.com 2014



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- **ODF/ODR**
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- **ODF/ODR**
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes

Optical Distribution Rack [ODR] :

Rack that houses the ODFs. A good fibre guiding system is crucial to keep high amount of fibres entering the ODR well organised

Optical Distribution Frame [ODF]:

A frame enabling the fibres from the outdoor cables to become available on an individual fibre level for flexible patching with the active transmission equipment (OLT Ports)

3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- **Fibre/Cable**
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes



Low-fibre Count (drop)



High-fibre Count (feeder)

3. FTTH Network Components

In each layer:

- ODF/ODR
- **Fibre/Cable**
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes

Optical fibre

- individual “light pipe” able to carry pulses of light over a long distance, because the light is captured in the core by the surrounding cladding.
- Different fibre types exist, for example single-mode versus multi-mode fibre

Optical fibre cable

- groups several fibres into one cable for easy deployment. Amount of fibres in one cable can go from 1 or 2 up to 288 or even 864. Internally the fibres can be organised in different ways, for example in fibre bundles of 12 or 24 fibres. This is needed to allow for an easier identification of individual fibres within a cable, for example where fibres need to be spliced onto each other.
- The cable is responsible for protecting the individual fibres, but also to enable specific deployment techniques: for example for an aerial network the cable needs to be able to resist a certain tensile load, while a blown cable needs to minimize friction within the tube it is deployed in.

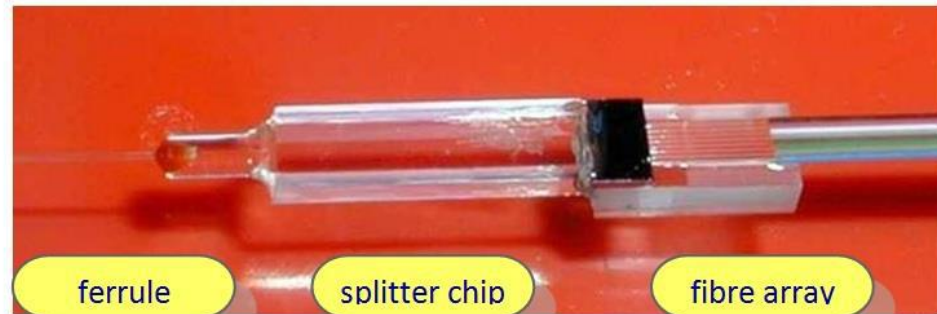
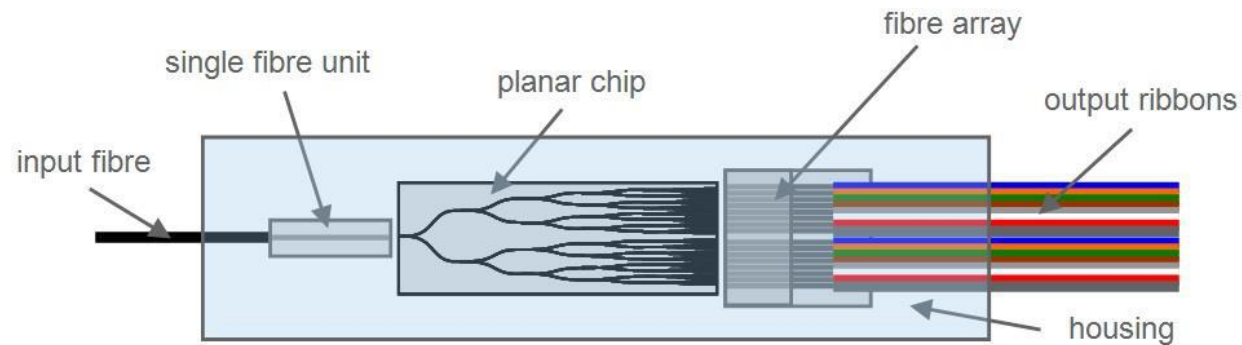
More info about this in section 4 of this presentation.



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- **Splitter**
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - **Splitter**
 - Splice
 - Connector
 - Closures
 - Cabinets
 - Manholes
- Splitters allow to feed multiple output fibres by 1 input fibre.
 - **Typical split ratios** are 1:2, 1:4 1:8, 1:16, 1:32 or 1:64, but can also go up to 1:128 or 1:256
 - Splitters can be deployed in the **AN** (centralised split), in one of the **FCPs** (decentralised split), or within the **building** of the customer (typically for MDUs) or in a **combination** of these different locations, in which case we speak about **cascaded splitting**
 - Splitters can either be firmly spliced into the fibre infrastructure or be connectorized, so that they can be flexibly inserted in a FCP.
 - Splits can be **symmetric** and **asymmetric**
 - Splitters introduce a considerable **insertion loss** depending on the split ratio. This insertion loss is **bidirectional**



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- **Splice**
- Connector
- Closures
- Cabinets
- Manholes

Fusion Splice Machine



Mechanical splice

3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - Splitter
 - **Splice**
 - Connector
 - Closures
 - Cabinets
 - Manholes
- Splices **are used to connect** 2 fibres to each other.
 - Splices introduce extra **optical losses**, depending on quality of alignment.
 - **Two technologies:** fusion (melted together) and mechanical (aligned and fixed)
 - **Fusion:**
 - Less optical loss ($<0,1\text{dB}$)
 - More expensive (skills, tools) to realise
 - **Mechanical:**
 - More optical loss ($<0,5\text{dB}$)
 - Less expensive (skills, tools) to realise



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- **Connector**
- Closures
- Cabinets
- Manholes



3. FTTH Network Components

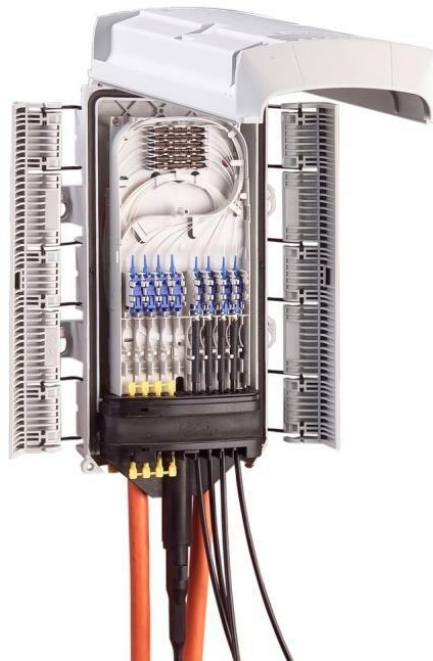
In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - Splitter
 - Splice
 - **Connector**
 - Closures
 - Cabinets
 - Manholes
- **Connectors** are installed at end of fibre to allow a flexible connection with another connectorised fibre
 - Typically used where **flexibility** is needed, for example in the Access Node or Customer Premise for connection to the active equipment, in combination with patch cords or pigtails
 - **Many types and standards** (ST, SC, MU, MPO, FC, LSH, MT-RJ, SC-RJ, LC, LX, ...)
 - **Introduces losses** of the light signal – due to reflection (*return loss (RL)*) or insertion (*insertion loss (IL)*) – depending on the alignment of fibre cores (angular pointing error, concentricity)
 - Connectors are typically **graded** to indicate their quality (mean/max attenuation)
 - Careful with difference between *theoretic* loss values (ideal circumstances) and *real usage* values

3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- **Closures**
- Cabinets
- Manholes



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - Splitter
 - Splice
 - Connector
 - **Closures**
 - Cabinets
 - Manholes
- **Cable joint closures** are installed where different cables are connected/spliced onto each other. They are used to organise the joints (including overlength), and to protect the joints (against water, dust, ...). The closures must be accessible in order to add or adjust fibre connections, or to test and repair connections.
 - Can be installed in manholes, cabinets or on poles, each with different requirements (for example UV protection for pole mounted)

3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- **Cabinets**
- Manholes



3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - Splitter
 - Splice
 - Connector
 - Closures
 - **Cabinets**
 - Manholes
- **Cabinets** are installed at **flexibility points** in order to allow easy access to the fibres, cables and ducts, while offering protection against environment (weather, vandalism, ...)
 - Mostly above ground, but sometimes in manhole
 - If above ground, need to find locations with sufficient room for accessing, not too vulnerable, permitted by authorities, ... while minimising costs

3. FTTH Network Components

In each layer: different components

- ODF/ODR
- Fibre/Cable
- Splitter
- Splice
- Connector
- Closures
- Cabinets
- **Manholes**



Big Manhole
(typically on big branching points in network)

Small Handhole

(typically near Customer Premise)



3. FTTH Network Components

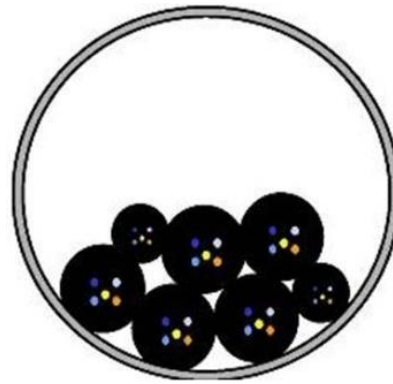
In each layer: different components

- ODF/ODR
 - Fibre/Cable
 - Splitter
 - Splice
 - Connector
 - Closures
 - Cabinets
 - **Manholes**
- **Manholes** are typically concrete chambers that are covered by a metal lid, and are intermediate locations in the network that allow access to ducts and/or cables. They can also host closures.
 - Small manholes are sometimes also called **handholes**
 - They are typically introduced at locations where **access to ducts or cables** is required, for example for blowing or pushing extra cables through ducts

4. FTTH Cable Deployment Methods

Cables can be installed in different manners

- **Ducts**
- Subducts
- Direct buried
- Aerial
- Existing Pipes



110mm duct
with cables

- **Cable installation** in duct via pulling, pushing, blowing or floating
- **Duct size** depends on cables (amount, type, diameter): 25mm, 50mm, 110mm, ...
- **Challenges:** cable entanglement, bends, friction on cable, installation equipment

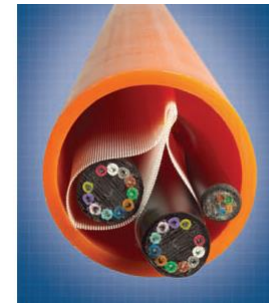
4. FTTH Cable Deployment Methods

Cables can be installed in different manners

- Ducts
- **Subducts**
- Direct buried
- Aerial
- Existing Pipes



Microduct bundle



Flexible inner ducts



Micro cable

- Cable installation in microduct typically via **blowing** (easier, lighter than in convential ducts); in flexible ducts via **pulling**
- **MicroDuct size** depends on cables (type, diameter): 16mm, 10mm, 5mm, ...
- **Flexible ducts** can be used to increase occupation of existing ducts

4. FTTH Cable Deployment Methods

Cables can be installed in different manners

- Ducts
- Subducts
- **Direct buried**
- Aerial
- Existing Pipes



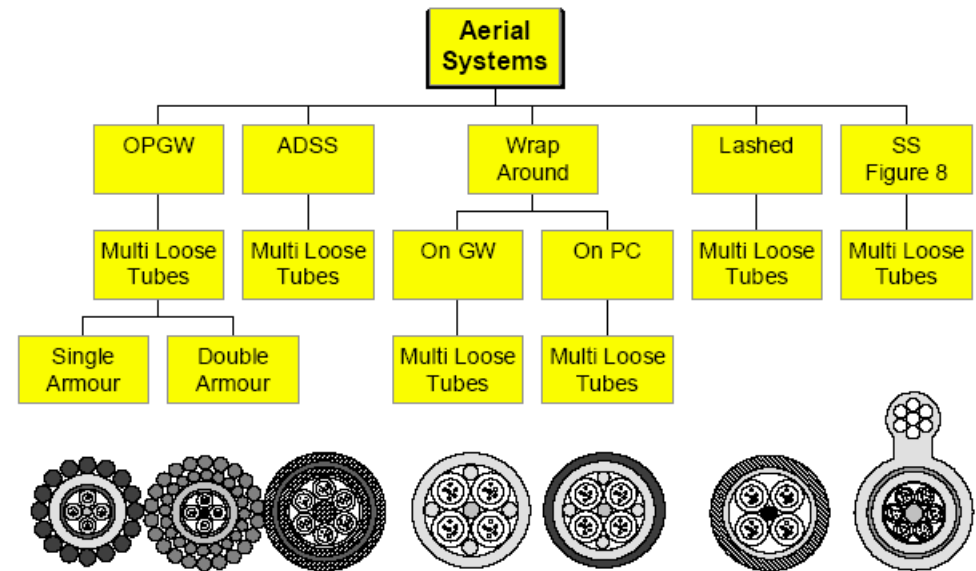
Direct Buried
cable with Steel
protection

- **Cable installation** directly into open trench (ploughing, slotting, mini trenching, micro trenching) or via excavation made with drilling
- **Challenges:** crush protection, termite protection, no flexibility

4. FTTH Cable Deployment Methods

Cables can be installed in different manners

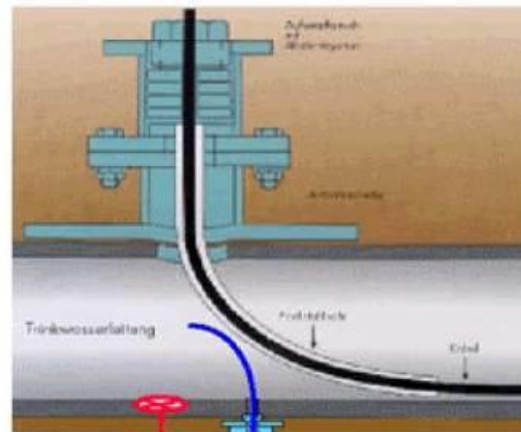
- Ducts
- Subducts
- Direct buried
- **Aerial**
- Existing Pipes



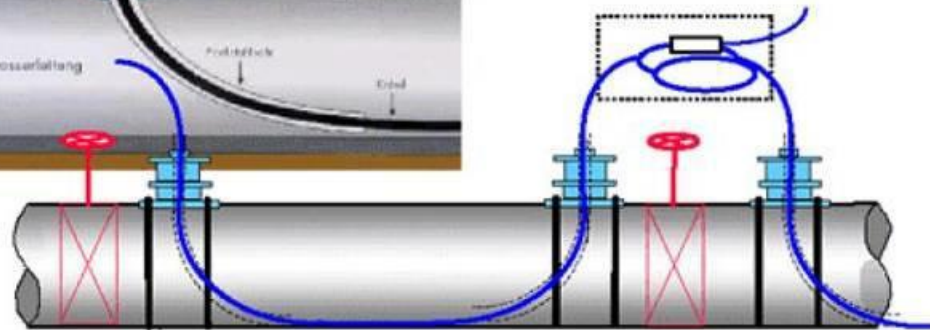
4. FTTH Cable Deployment Methods

Cables can be installed in different manners

- Ducts
- Subducts
- Direct buried
- Aerial
- **Existing Pipes**
 - Sewer
 - Water
 - Gas



- ♦ flange system tested on ducts with 200mm and 300mm diam.
- ♦ cable must meet applicable drinkwater and health regulations
- ♦ each cable inlet (flange system) is a potential POP



Many choices for the passive infrastructure

- **Important to compare different options and decide before you build**
 - **Overhead vs underground cable deployment**
 - Greenfield vs brownfield (reuse existing ducts/pipes)
 - Pull vs Blow
 - Duct vs microducts vs direct buried
 - **Level of Accessibility/Flexibility**
 - Splices vs connectors vs retract
 - **Splitters: centralised vs decentralised**; cascaded (multi staged)
- **Comparing options based on**
 - CAPEX Costs: typical breakdowns in labour, equipment, installation
 - OPEX Costs: impact on failures, repair, power consumption, ...
 - Life time/Future proofness: expanding/upgrading network



Examples

1. Overhead vs. underground
2. Level of accessibility/flexibility in FCP
3. Optimised location of PON splitters



Example 1: overhead vs underground

Cost may increase:

- if poles are rented: recurring OPEX;
- if poles need reinforcement: extra CAPEX;

Overhead	Underground
+ low CAPEX, particularly when reusing existing poles	– High CAPEX, particularly with traditional trenching (> 50cm deep)
+ Easy and cheap customer connection and repair	– Expensive and difficult customer connections and repair
– Lifetime of the network (damage from storm, accidents, ...)	+ Longer lifetime due to higher protection from environment
– Local regulations: no permissions for estical reasons – rather trend towards putting existing overhead infrastructure underground	– Longer, more disturbing installation process can be negative for people/government

Example 1: overhead vs underground

Cost may decrease:

- if existing ducts can be reused
- if micro-/mini-trenching is allowed
- if trench sharing with other utilities

Overhead	Underground
+ low CAPEX, particularly when reusing existing poles	– High CAPEX, particularly with traditional trenching (> 50cm deep)
+ Easy and cheap customer connection and repair	– Expensive and difficult customer connections and repair
– Lifetime of the network (damage from storm, accidents, ...)	+ Longer lifetime due to higher protection from environment
– Local regulations: no permissions for estical reasons – rather trend towards putting existing overhead infrastructure underground	– Longer, more disturbing installation process can be negative for people/government

Example 2: level of accessibility/flexibility in FCP

*For example:
Street cabinets with Patch
panel and connectors*

*For example:
Manholes with Splice
closures and spliced fibres*

High flexibility FCP

- + can save on feeder cables, splitters, PON cards, power, ...
- Customer Activation requires access to FCP for configuration
- Challenge to keep Documentation up to date

**Can be option to
save initial costs if
take rate is low**

Low flexibility FCP

- Need all splitters and fibres installed and ready from day 1
- + Customer Activation requires no intervention in FCP
- + No changes to documentation needed

**Can be easier and safer on
long term while extra cost is
limited if take rate is high**

Example 3: optimised location of PON splitters

*For example:
splitters in Access Node*

*For example: splitters in Primary FCP
and/or secondary FCP and/or
basement of MDU*

Centralised splitters	Decentralised splitters
<ul style="list-style-type: none">– High nr of fibres needed in feeder network	<ul style="list-style-type: none">+ Save fibres in feeder network
<ul style="list-style-type: none">+ Less PON splitters needed (better occupation of PON splitters), lower amount of PON cards	<ul style="list-style-type: none">– More PON Splitters and cards needed (less occupied)
<ul style="list-style-type: none">+ Easy to upgrade the network (for example change split ratio)	<ul style="list-style-type: none">– Changing splitters requires to visit many places
<ul style="list-style-type: none">– Large fibre count into MDU	<ul style="list-style-type: none">+ For MDU, splitters can also be placed inside the building

The FTTH Handbook

Written by the D&O Committee of the FTTH Council Europe

What is its purpose?

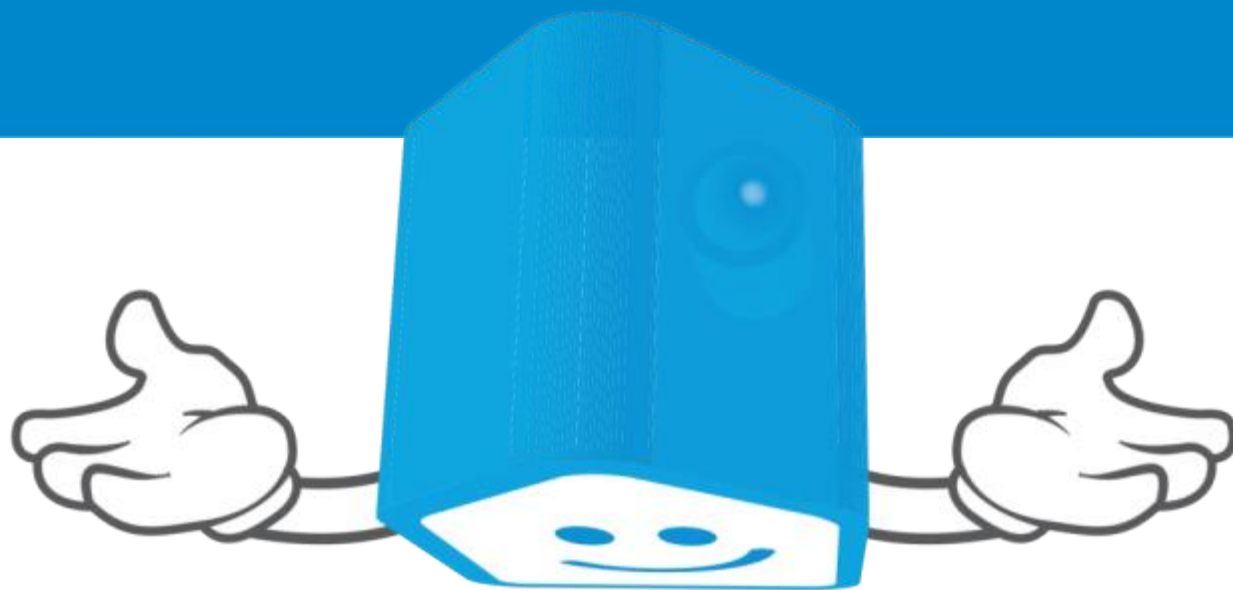
- **Explain all elements** associated with FTTH deployments
- List details of **deployment options** when planning and building FTTH

Two main parts

- **Active Infrastructure**
Active Network Components & Technologies
- **Passive infrastructure**
Infrastructure Components, Cabling, OSP

Current version, released in Feb 2014
(FTTH Conference in Stockholm)





www.ftthcouncil.eu





Fiber To The Home

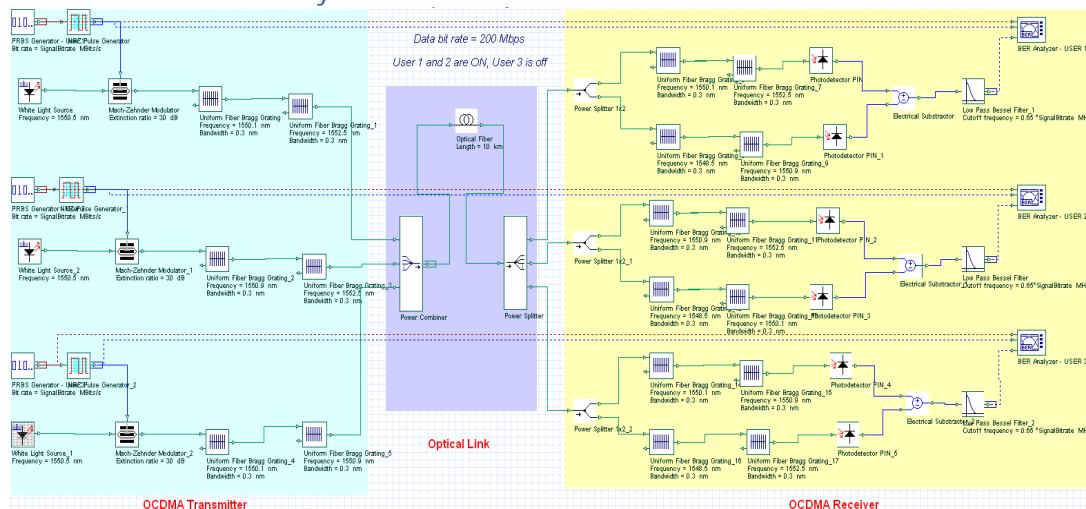
Applications

- High speed internet
- Broadband multimedia access
- Tele-medicine
- Distant learning

Overview

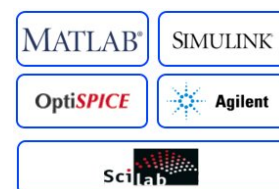
A broadband access network offers various high-speed services to the end-user such as internet, multimedia, tele-medicine and distant learning. Fiber to the home (FTTH) is an optical access network architecture that uses optical fibers to replace all or part of the metallic cables to the end-user. Using OptiSystem we can explore the performance of different architectures for FTTH networks. In this application note, we explain an optical code-division multiple access (OCDMA) structure using three users.

FTTH: OCDMA Network Layout



Benefits

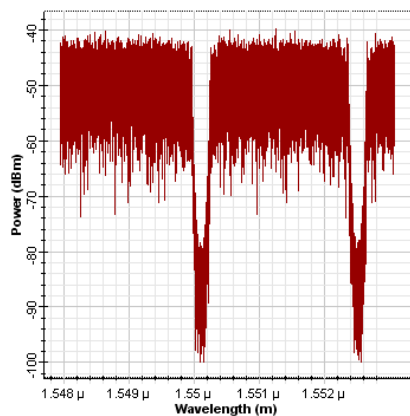
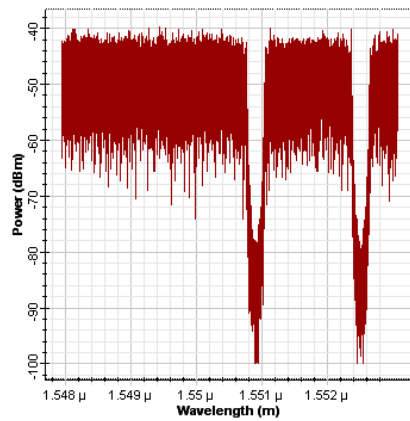
- Multi-parameter scanning enables system designers to study trade-offs with respect to parameters of interest and to choose optimal designs for deployments.
- Enables users to analyze different algorithms for electronic equalization.
- New BER Test Set enables simulation of millions of bits for direct error counting.
- FEC
- Interfaces with popular design tools.
- Significantly reduces product development costs and boosts productivity through a comprehensive design environment to help plan, test, and simulate optical links in the transmission layer of modern optical networks.



Simulation Description

In the above layout, we have simulated a 3-user fiber bragg grating (FBG) based OCDMA network at 200 Mbit/s. Uniform FBGs are used to implement the Modified Quadratic Congruence (MQC) codes by spectral amplitude encoding. The signal is generated using an incoherent source modulated with NRZ PRBS data using a Mach-Zehnder Modulator. The optical link is 10 km of single mode fiber. The receiver is comprised of two spectral filters and two photodetectors connected in a balanced configuration which perform the decoding with a low-pass filter and a BER analyzer. In this experiment User 1 and 2 are ON and User 3 is OFF.

The next two figures demonstrate the spectra of the encoded data for User 1 and 2.



Next we illustrate the signal in time domain for User 1 and eye diagrams for User 1 and 2. Using OptiSystem you can analyze the performance of optical access networks by varying coding schemes, modulation format, number of users, and propagation length.

