

*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*  
*Corso per la laurea di primo livello in Ingegneria delle Telecomunicazioni*

---

*Corso di Trasmissioni Ottiche*  
*Prof. Maria-Gabriella Di Benedetto*  
*a.a. 2005/2006*

# **Sistemi di comunicazione in fibra ottica**

*Michela Svaluto Moreolo*

<http://www.dea.uniroma3.it/fotonica>

# parte I

---

- Sistema di comunicazione ottico
- Richiami sulla propagazione
- Dispersione
- Attenuazione
- Effetti non lineari
- Linee di progetto

# caratteristiche

---

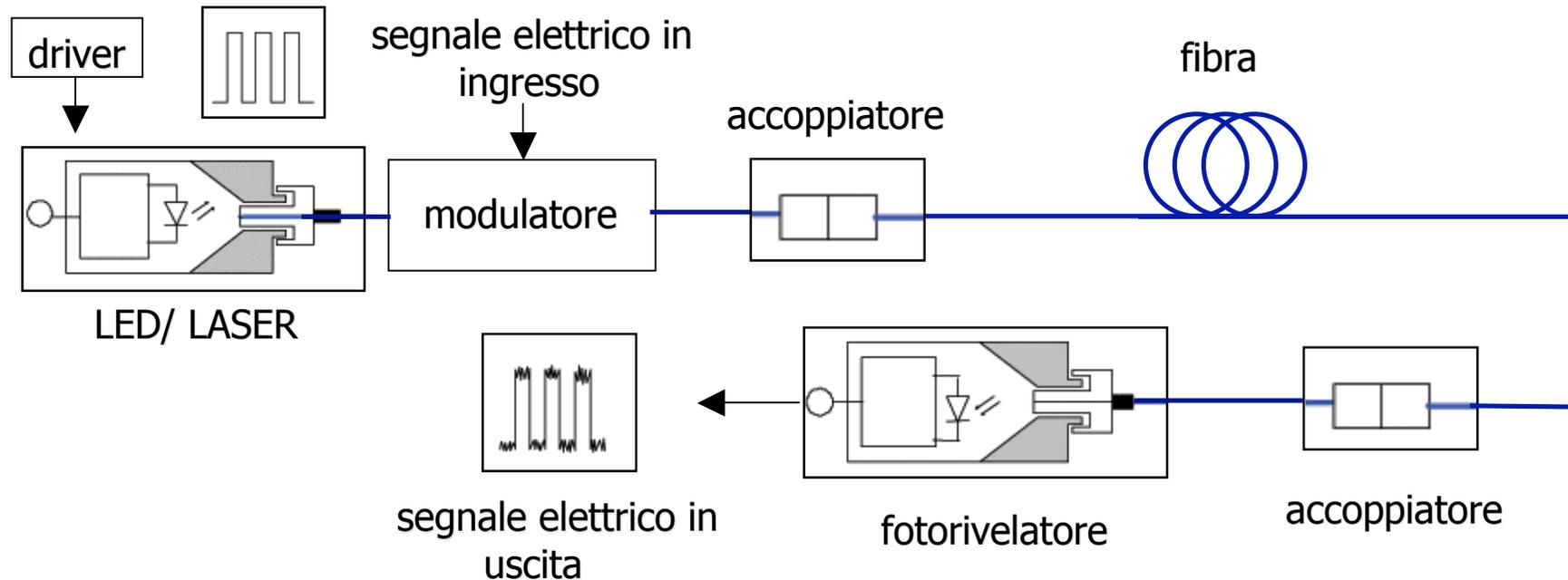
- mezzo più efficiente per trasmettere informazioni (voce, dati...)
- non soggetto ad interferenza elettromagnetica
- più leggero e meno ingombrante dei collegamenti elettrici o a microonde
- elevata capacità di canale

## applicazioni principali

---

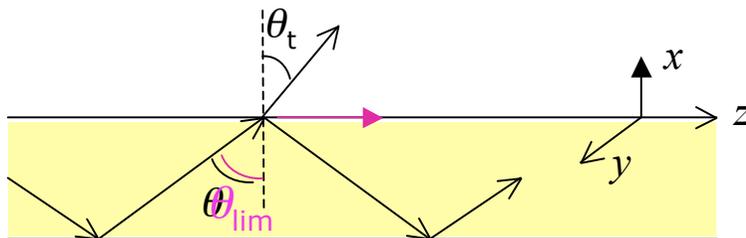
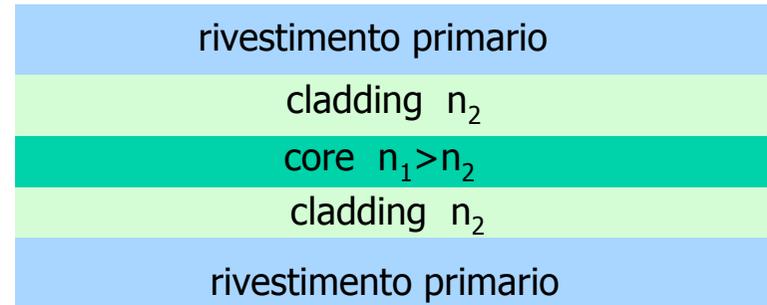
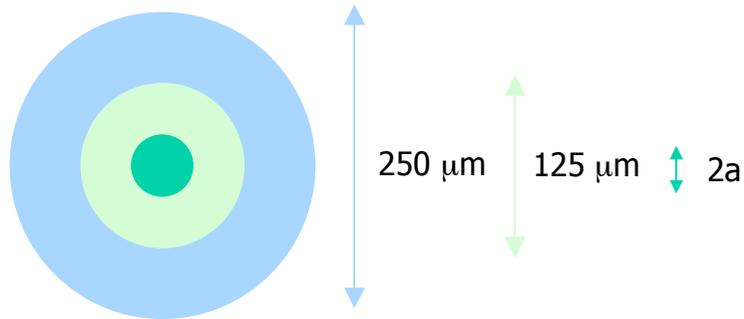
- reti telefoniche
- sistemi di comunicazione dati
- TV via cavo
- *sensori ottici*
- *diagnostica medica*

# sistema di comunicazione in fibra ottica



- IM/DD Intensity Modulation/ Direct Detection
- TDM Time Division Multiplexing
- DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing
- OOK: formati di modulazione RZ Return to Zero e NZR Non Return to Zero

# fibre step-index



fenomeno di riflessione totale

$$\sin\theta_i > n_2/n_1$$

fibra monomodo

$$V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$

Leggi di Snell-Cartesio

$$\theta_i = \theta_r$$

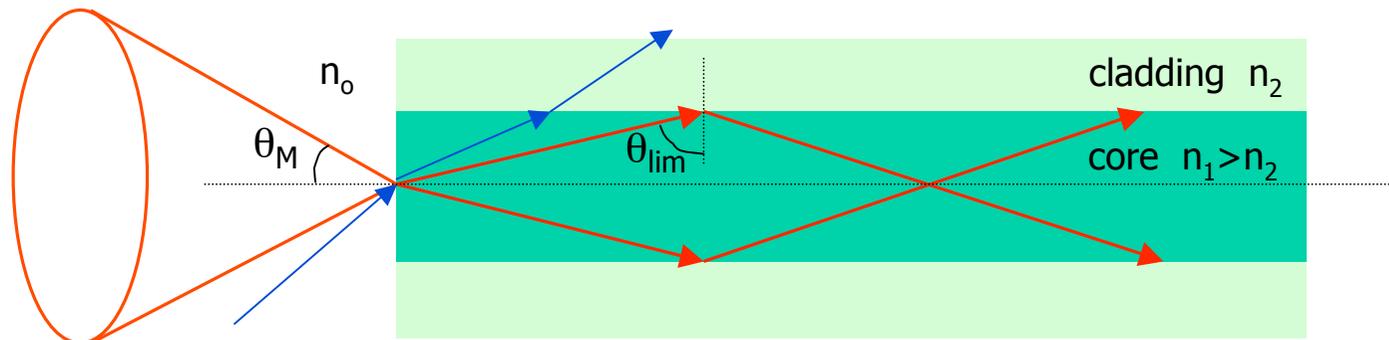
$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$

$$\theta_{lim}: \theta_t = \pi/2$$

$$\sin\theta_{lim} = n_2/n_1$$

V: frequenza normalizzata

# apertura numerica

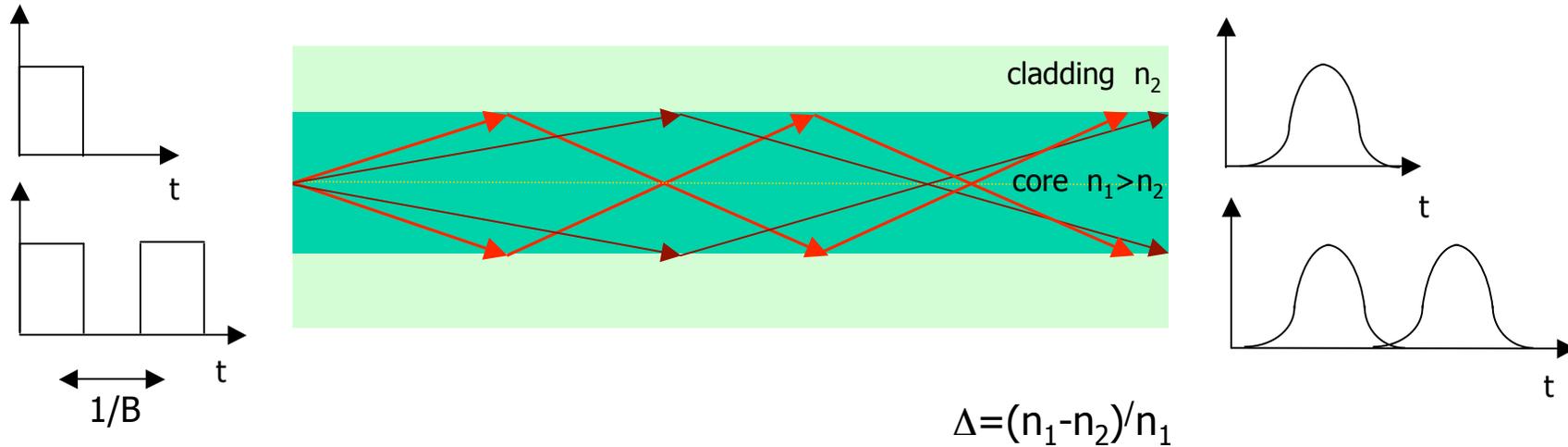


apertura numerica  $NA = n_0 \sin \theta_M$

$\theta_M$  è il massimo angolo con cui un raggio luminoso proveniente da un mezzo con indice di rifrazione  $n_0$  può incidere sulla faccia d'ingresso della fibra e venire guidato

$$NA = n_0 \sin \theta_M = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

# dispersione intermodale



- step index

$$\Delta\tau = L \frac{n_1^2}{n_2 c} \Delta$$

$n_1 = 1.5 \quad \Delta = 2 \cdot 10^{-3}$   
 $BL < 100 \text{ Mb/s-km}$

- graded index

$$\Delta\tau = L \frac{n_1}{8c} \Delta^2$$

$n_1 = 1.5 \quad \Delta = 2 \cdot 10^{-3}$   
 $BL < 400 \text{ Gb/s-km}$

# dispersione cromatica (GVD)

se la costante di propagazione  $\beta = kn_1 \sin\theta_i = 2\pi/\lambda n_{\text{eff}}$  è una funzione lineare della frequenza (in assenza di dispersione cromatica), l'impulso in uscita è una copia dell'impulso in ingresso con ritardo:

$$\tau = \frac{d\beta}{d\omega} z \quad \Rightarrow \quad \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad \text{velocità di gruppo}$$

considerando una sorgente non monocromatica, essendo  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}(\lambda)$

per un fibra di lunghezza L

$$\tau = \frac{d\beta}{d\omega} L = -\frac{L}{c} \left( \lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda} - n_{\text{eff}} \right)$$

l'allungamento dell'impulso si può stimare come

$$\Delta\tau = \frac{d\tau}{d\lambda} \Delta\lambda = -\frac{L\Delta\lambda}{c} \lambda \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}$$

$$\Delta\tau = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} L \Delta\lambda = \mathbf{DL\Delta\lambda}$$

# dispersione cromatica (GVD)

parametro di dispersione  $D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = D_M + D_W$  [ps/(Km-nm)]

$D_M$  dispersione da materiale  
 $D_M=0$  per  $\lambda=1.276 \mu\text{m}$

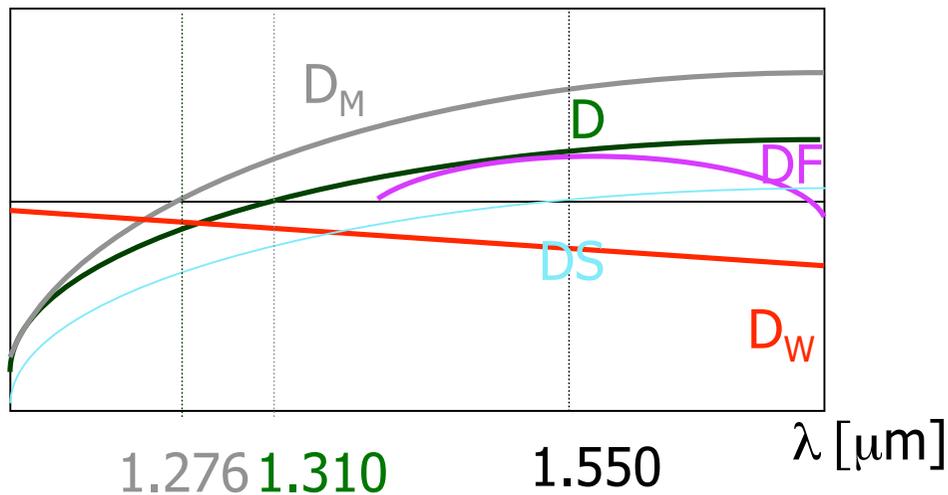
$D_W$  dispersione da guida d'onda  
 $D=0$  per  $\lambda=\lambda_{ZD} = 1.310 \mu\text{m}$

Fibre **DS** Dispersion Shifted

Fibre **DF** Dispersion Flattened

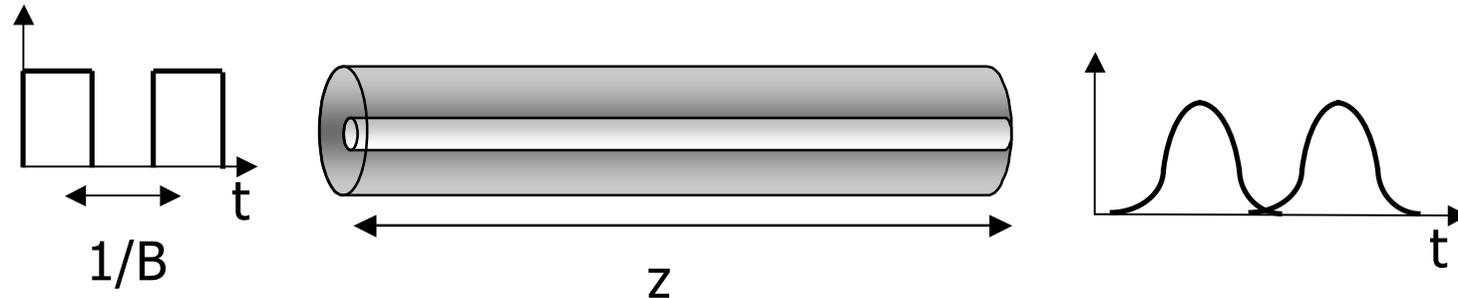
ITU-T G.652 SMF  $\lambda_{ZD}=1.310 \mu\text{m}$ ;  
 ITU-T G.653 DSF  $\lambda_{ZD}=1.550 \mu\text{m}$ ;

ITU-T G.655 NZDF  
 $0.1 < D < 6$  ps/(Km-nm)



$D=1$  ps/(Km-nm)  $\Delta\lambda=4$  nm  
 $BL < 250$  Gb/s-km  
 compensazione della dispersione

# GVD power penalty

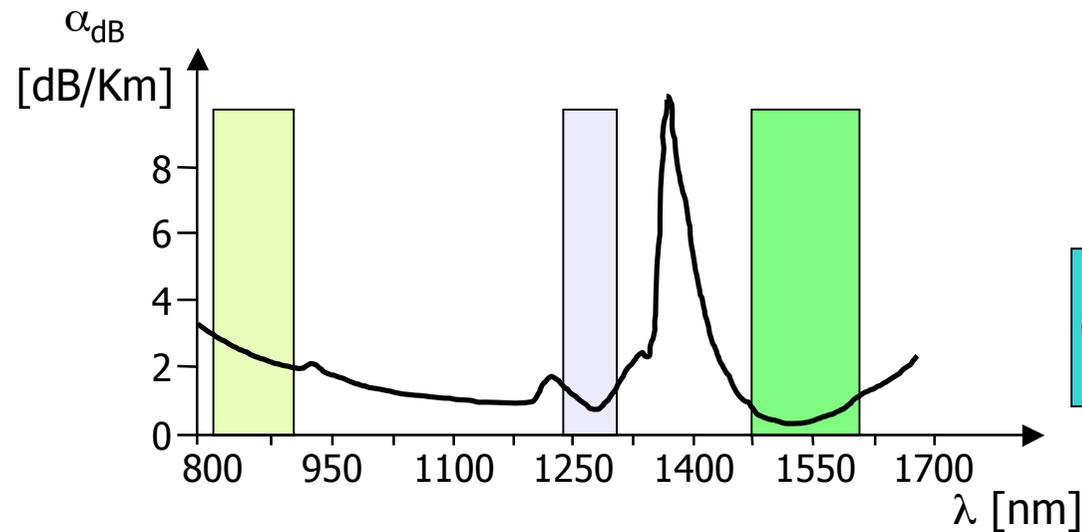


A causa della dispersione cromatica, l'impulso ricevuto si allarga oltre la slot di tempo ad esso allocata e provoca interferenza intersimbolica (ISI).

Inoltre l'energia luminosa all'interno della slot del bit ricevuto diminuisce e peggiora il SNR al ricevitore. La power penalty è l'incremento (in dB) della potenza ricevuta necessario per compensare questo effetto

$$\text{penalty(dB)} = 10 \log_{10} \frac{\sigma_o}{\sigma_{in}} \quad \sigma_o^2 = \sigma_{in}^2 + D^2 L^2 \Delta\lambda^2$$

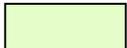
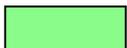
# attenuazione



$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha z}$$

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{z} \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} = 4.343 \cdot \alpha$$

## Valori tipici:

-   $\alpha_{dB} \sim 2.5$  dB/Km  $\lambda = 0.85$   $\mu\text{m}$  (I finestra)
-   $\alpha_{dB} \sim 0.4$  dB/Km  $\lambda = 1.3$   $\mu\text{m}$  (II finestra)
-   $\alpha_{dB} \sim 0.25$  dB/Km  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$  (III finestra)

alle lunghezze d'onda utilizzate nelle comunicazioni ottiche, le perdite in una fibra ottica ( $\text{SiO}_2$ ) sono essenzialmente dovute allo scattering di Rayleigh, all'assorbimento nell'infrarosso e all'assorbimento dovuto alle impurezze (ioni  $\text{OH}^-$ ); quest'ultimo è responsabile dei picchi presenti nella curva dell'assorbimento.

# tipi di fibre



## **Fibre MM-SI: Multi Mode - Step Index**

Diametro core	50 - 400 $\mu\text{m}$
Diametro cladding	125 (500) $\mu\text{m}$
coating	200 - 1000 $\mu\text{m}$
NA	0.16 - 0.5
Attenuazione	1 - 4 dB/km
BL	6 - 25 MHz km
utilizzo	collegamenti brevi, a basso costo

Le normative della ITU (International Telecommunication Union) definiscono i parametri della fibra e i metodi di test

# tipi di fibre

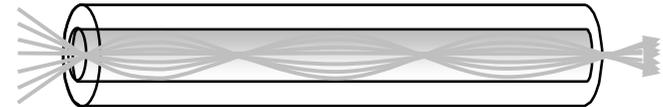


## Fibre SM-SI Single Mode - Step Index

Diametro core	3-10 $\mu\text{m}$
Diametro cladding	50-125 $\mu\text{m}$
coating	200-1000 $\mu\text{m}$
NA	$\sim 0.1$
Attenuazione	0.25 dB/km @1550 nm 0.4 dB/km @1300 nm
BL	100 GHz km – 1 THz km
utilizzo	collegamenti a lunga distanza

# tipi di fibre

---



## **Fibre GI Graded Index**

Diametro core	50 $\mu\text{m}$
Diametro cladding	125 $\mu\text{m}$
coating	200 - 1000 $\mu\text{m}$
NA	0.2 - 0.35
Attenuazione	1 dB/km @1300 nm
BL	150 MHz km
utilizzo	collegamenti a distanze medie

# effetti non lineari

---

- scattering non lineare
- SPM Self Phase Modulation
- XPM Cross Phase Modulation
- FWM Four Wave Mixing

Gli effetti non lineari non sono più trascurabili nei sistemi di comunicazione ottici che operano con bit rate  $B > 10$  Gb/s e potenza  $P > 10$  mW.

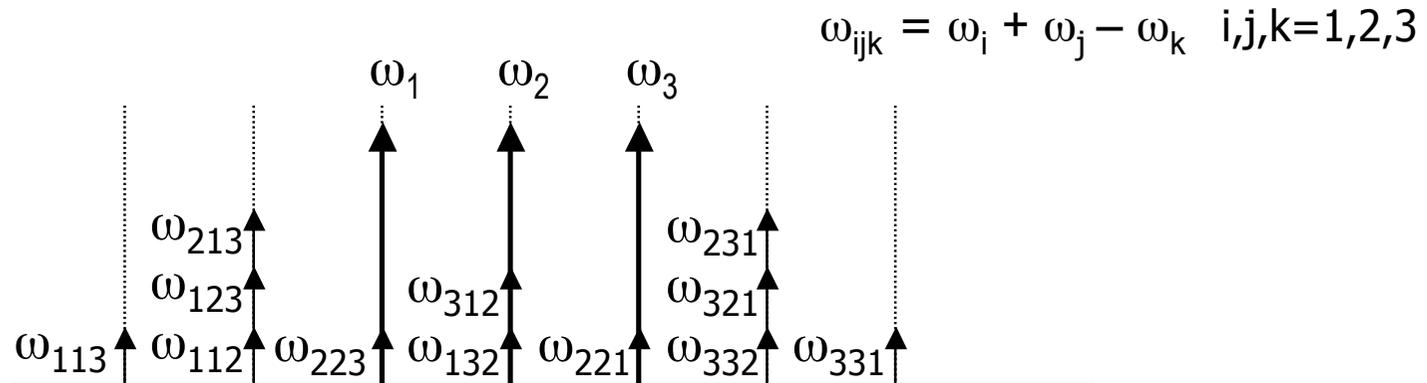
# effetti non lineari

**SPM:** nella propagazione, l'impulso subisce uno sfasamento che varia nel tempo. Questo effetto peggiora l'ISI dovuta alla dispersione cromatica.

**XPM:** se due o più canali sono trasmessi simultaneamente all'interno della stessa fibra, utilizzando frequenze diverse, un impulso può subire uno sfasamento non lineare che dipende dall'intensità dei segnali trasmessi negli altri canali

**FWM:** tre canali, con pulsazioni  $\omega_1, \omega_2$  e  $\omega_3$  copropaganti all'interno di una fibra, danno luogo ad un nuovo segnale di frequenza  $\omega_{FWM} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ .

L'efficienza del FWM è massima quando la dispersione cromatica è minima ( $D=0$ ). Per ridurre l'effetto del FWM nelle reti DWDM si utilizzano fibre NZD.



# linee di progetto

sistemi limitati dall'attenuazione

sistemi limitati dalla dispersione

