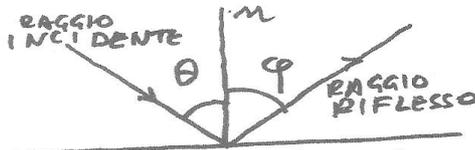


FIBRE OTTICHE

FIBRE OTTICHE

RIFLESSIONE

1



θ : angolo d'incidenza
 φ : angolo di riflessione
 $\theta = \varphi$

RIFRAZIONE



θ : angolo d'incidenza
 φ : angolo di rifrazione

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s
 300000 km/s
 velocità della luce nel vuoto

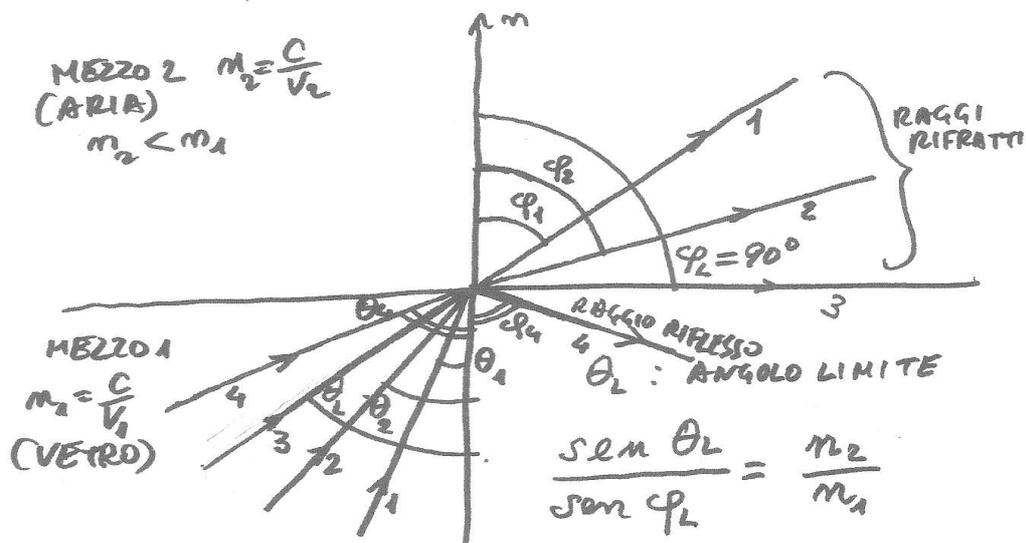
MEZZO 1 CON INDICE DI RIFRAZIONE ASSOLUTO $n_1 = \frac{c}{v_1} \geq 1$

MEZZO 2 CON INDICE DI RIFRAZIONE ASSOLUTO $n_2 = \frac{c}{v_2} \geq 1$

LEGGE DI SNELL

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

RIFLESSIONE TOTALE



$$\sin \phi_L = \sin 90^\circ = 1$$

$$\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1}$$

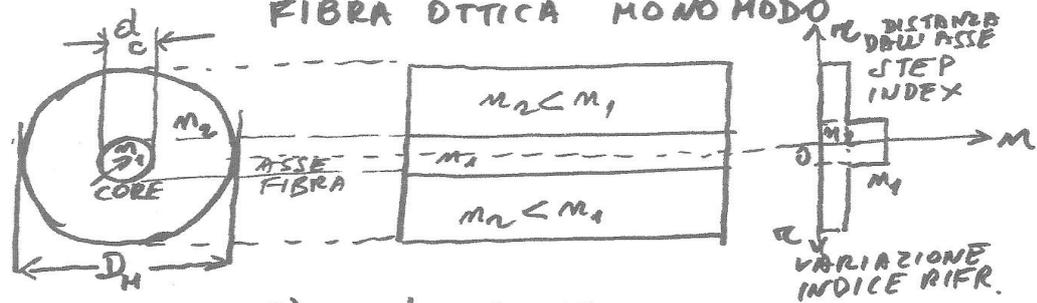
$$\theta_L = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

se $n_2 = 1, n_1 = 1,5$

$$\theta_L = \arcsin \frac{1}{1,5} = \arcsin 0,66 = 42^\circ$$

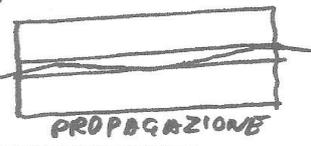
se $\theta > \theta_L$ ANGOLO LIMITE
SI HA LA RIFLESSIONE
TOTALE
 $\theta = \phi$

FIBRA OTTICA MONOMODO

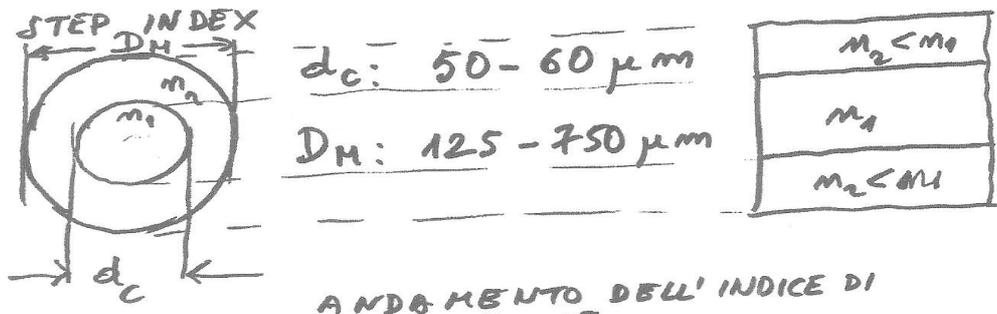


CORE (NUCLEO)
 n_1
 $d_c: 4 - 10 \mu m$
 (microm)
 $10^6 m$

CLADDING (MONTELLA)
 $n_2 < n_1$
 $D_M: 125 \mu m$

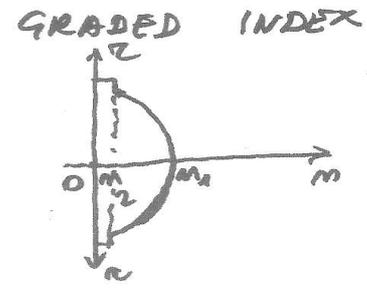
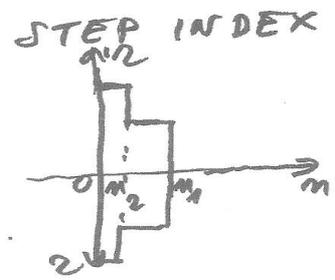


FIBRA OTTICA MULTIMODO



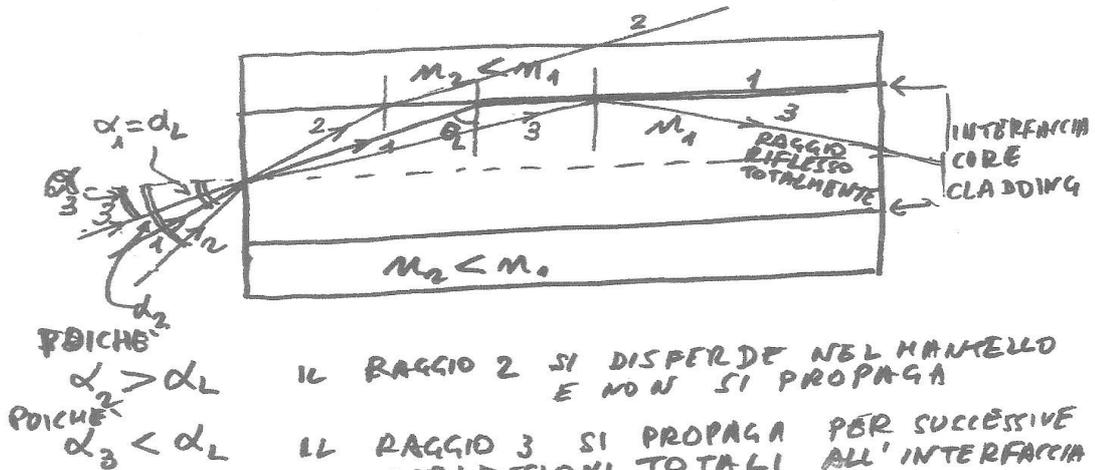
$d_c: 50 - 60 \mu m$
 $D_M: 125 - 750 \mu m$

ANDAMENTO DELL'INDICE DI RIFRAZIONE



PROPAGAZIONE DELLA LUCE IN UNA FIBRA OTTICA

4



NEL CASO LIMITE

$\alpha_1 = \alpha_L$ (ANGOLO DI ACCETTAZIONE DELLA FIBRA)

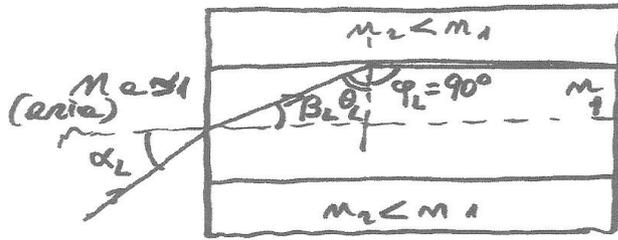
IL RAGGIO 1 SI PROPAGA LUNGO L'INTERFACCIA CORE-CLADDING.

PERTANTO TUTTI I RAGGI CON $\alpha < \alpha_L$ SI PROPAGHERANNO PER RIFLESSIONE TOTALE



CALCOLO DELL'APERTURA NUMERICA N.A. DI UNA FIBRA OTTICA

5



ESEMPIO NUMERICO:

SE $n_1 = 1,5$
e $n_2 = 1,48$

$$N.A. = \text{sen} \alpha_L = \sqrt{1,5^2 - 1,48^2} = \sqrt{5,96 \cdot 10^{-2}} \approx 0,244$$

$$\alpha_L = \arcsen 0,244 \approx 14,12^\circ$$

$$N.A. = \text{sen} \alpha_L$$

$$\frac{\text{sen} \alpha_L}{\text{sen} \beta_L} = \frac{n_1}{n_2} \approx n_1 ; \beta_L = 90^\circ - \theta_L$$

$$n_a = \frac{c}{v_a} \approx \frac{c}{c} = 1$$

$$\text{sen} \alpha_L = n_1 \text{sen} \beta_L = n_1 \cos \theta_L =$$

$$= n_1 \sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_L} = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} =$$

$$= n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

($\text{sen}^2 \theta_L + \cos^2 \theta_L = 1$)

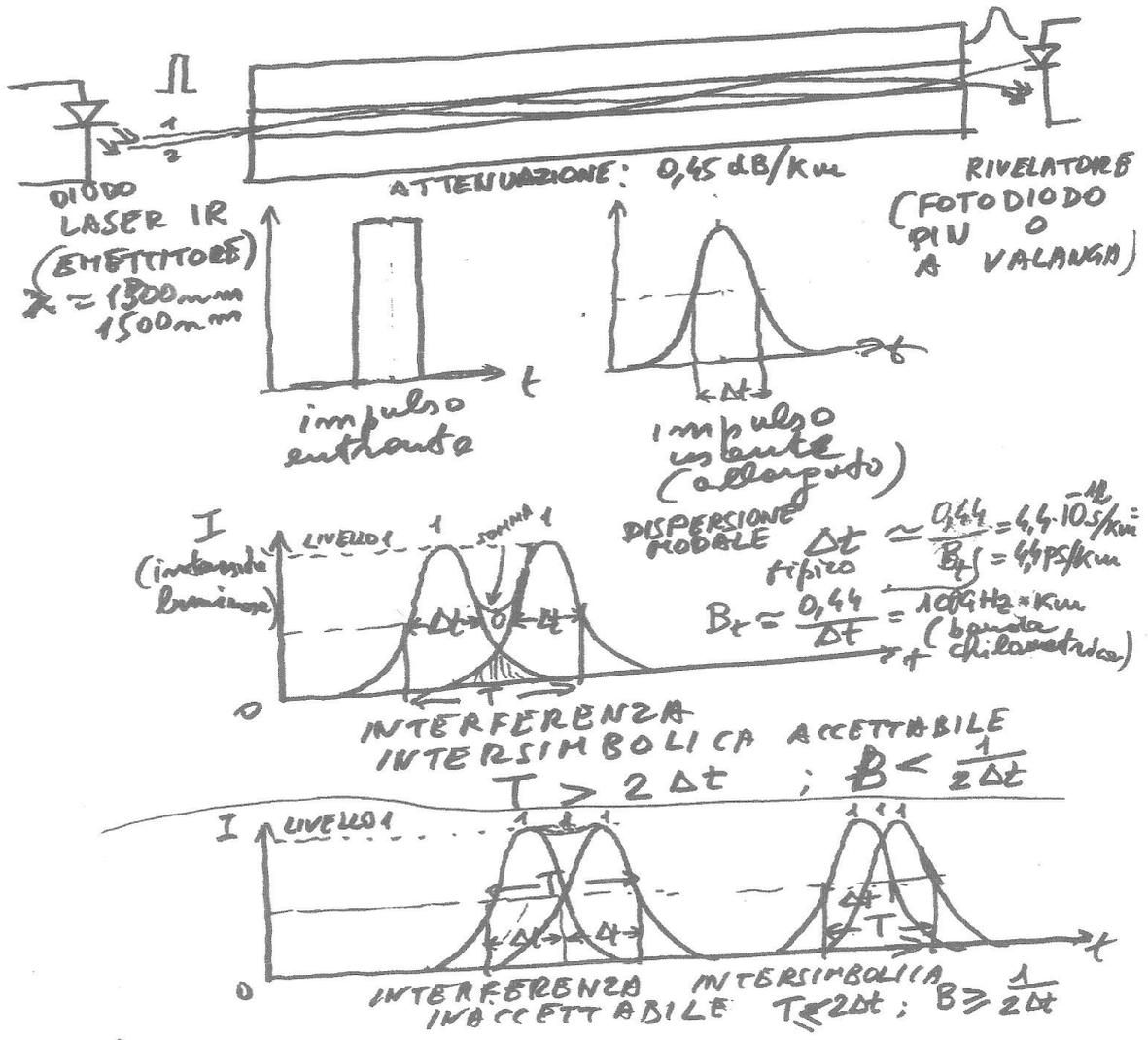
$$\frac{\text{sen} \theta_L}{\text{sen} \phi_L} = \frac{n_2}{n_1} ; \text{sen} \theta_L = \frac{n_2}{n_1} \text{sen} \phi_L = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{sen} \phi_L = 1$$

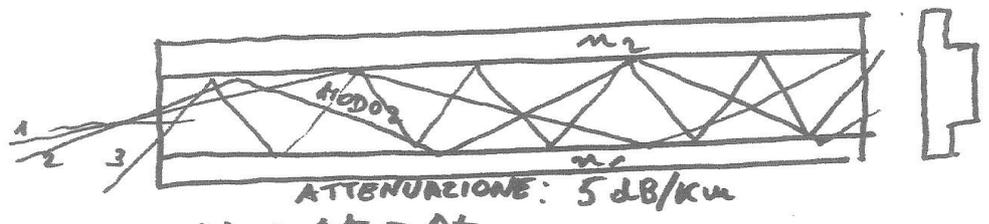
$$N.A. = \text{sen} \alpha_L = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

PROPAGAZIONE IN UNA FIBRA MONOMODALE (RAGGI QUASI PARALLELI ALL'ASSE DELLA FIBRA)

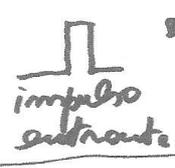
6



PROPAGAZIONE IN UNA FIBRA MULTIMODALE STEP INDEX



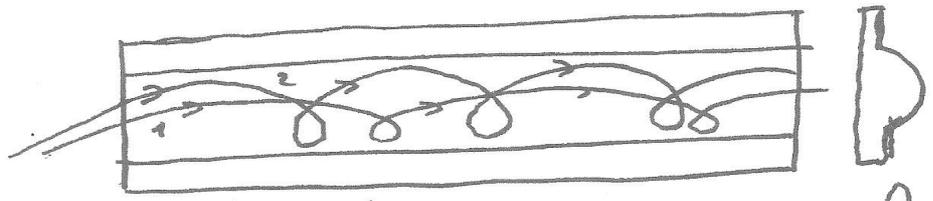
ATTENUAZIONE: 5 dB/km
 $\Delta t_3 > \Delta t_2 > \Delta t_1$
 DISP. MODALE $\Delta t \approx 10-20 \text{ ns/km}$



banda chilometrica
 $B = \frac{0,44}{\Delta t} = 22-44 \text{ MHz} \cdot \text{km}$



PROPAGAZIONE IN UNA FIBRA MULTIMODALE GRADED INDEX



$\Delta t_1 \approx \Delta t_2$



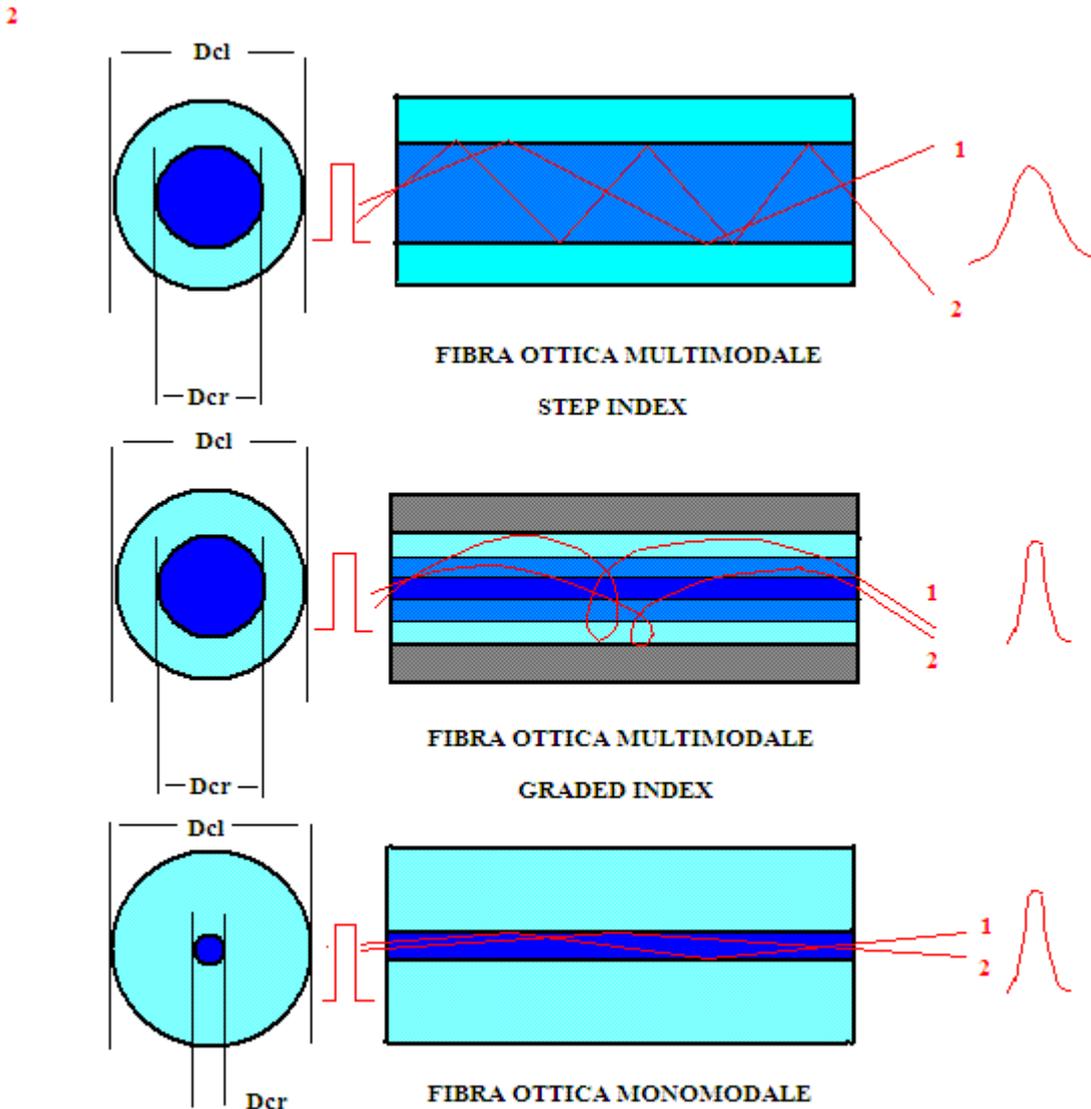
$\Delta t \approx 0,3 \text{ ns/km}$ DISPERSIONE MODALE

BANDA CHILOMETRICA
 $B = \frac{0,44}{\Delta t} = 1,46 \text{ GHz} \cdot \text{km}$

INTERFERENZA INTERSIMBOLICA MINORE RISPETTO ALLA FIBRA STEP INDEX



Le fibre ottiche monomodali sono caratterizzate da un diametro D_{cr} del core (nucleo) compreso tra 4 e 10 μm (micrometri o micron) e da un diametro D_{cl} del cladding (mantello) di 125 μm . In esse, essendo molto piccolo il diametro del core, la radiazione infrarossa immessa da un diodo LED o da un diodo LASER, è costretta a propagarsi quasi parallelamente all'asse. Il termine monomodale è connesso proprio al fatto che i vari percorsi di propagazione della radiazione (a zig-zag, ma con angoli molto piccoli) corrispondono in pratica ad un unico modo di propagazione, quasi parallelo all'asse. In virtù di questa caratteristica i ritardi di propagazione associati ai raggi passanti per i singoli punti della sezione del core sono in pratica coincidenti, il che implica una dispersione modale trascurabile ed un allargamento molto ridotto degli impulsi di radiazione uscenti dalla fibra.



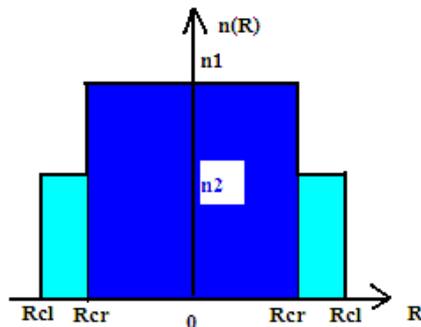
La variazione dell'indice di rifrazione dal valore n_1 (nel core) al valore n_2 (nel mantello) è sempre a gradino, dato il piccolissimo diametro del core.

L'attenuazione è intorno a 0,45 dB/km (per una lunghezza d'onda di 1300 nm) e la larghezza di banda chilometrica (unitaria) B va da 10 GHz x km a 100 GHz x km.

Le fibre ottiche multimodali sono caratterizzate da un diametro D_{cr} del core compreso tra 50 e 60

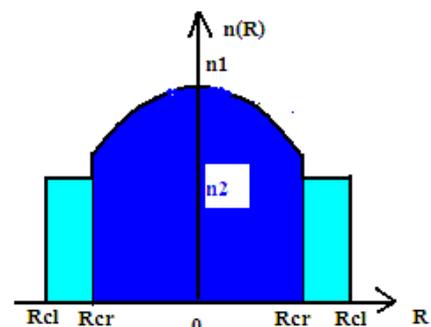
μm e da un diametro D_{cl} del cladding che può variare da 125 a 750 μm .

VARIAZIONE DELL' INDICE DI RIFRAZIONE
IN FUNZIONE DELLA DISTANZA R DALL'ASSE
DI UNA FIBRA OTTICA MULTIMODALE



FIBRA STEP INDEX

n_1 : indice di rifrazione del core
 R_{cr} : raggio del core
 n_2 : indice di rifrazione del cladding
 R_{cl} : raggio del cladding



FIBRA GRADED INDEX

Le prime fibre ottiche multimodali erano caratterizzate da una variazione a gradino dell'indice di rifrazione (step index), il che implicava un'elevata dispersione modale, determinata dal fatto che erano notevolmente differenti i ritardi di propagazione associati ai raggi passanti per i singoli punti della sezione del core. Questo causava un notevole allargamento degli impulsi di radiazione uscenti dalla fibra ed una conseguente notevole riduzione della larghezza di banda chilometrica (da 20 a 40 MHz x km). Inoltre l'attenuazione era molto elevata (5 dB/km).

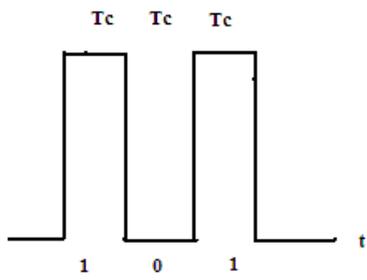
Questi inconvenienti delle fibre multimodali sono stati risolti facendo decrescere in modo graduale l'indice di rifrazione dall'asse del core verso il cladding (graded index). Con questa tecnica, poiché al diminuire dell'indice di rifrazione da n_1 a n_2 la velocità di propagazione $v = c/n_1$ aumenta con continuità dal core al cladding, l'aumento del ritardo di propagazione associato ai raggi che si propagano lungo percorsi più lunghi, lontani dall'asse del core, è compensato dalla maggiore velocità di propagazione. Pertanto i ritardi di propagazione associati ai raggi vicini all'asse ed a quelli lontani dall'asse tendono a coincidere, il che implica una dispersione modale ed un allargamento degli impulsi molto contenuti e valori della larghezza di banda chilometrica intorno a 1,5 GHz x km. L'attenuazione è intorno a 1 dB/km.

A causa della variazione graduale dell'indice di rifrazione, il core della fibra graded index può essere idealmente suddiviso in tanti sottili strati caratterizzati da indici di rifrazione decrescenti e velocità di propagazione crescenti andando dall'asse del core verso il cladding. In conseguenza di questo andamento di n , i singoli raggi si propagano non più a zig-zag, ma secondo traiettorie elicoidali con raggi crescenti dall'asse del core verso il cladding.

L'allargamento degli impulsi di radiazione infrarossa uscenti da una fibra implica la cosiddetta interferenza intersimbolica. Infatti, al crescere della frequenza di cifra (bit/s), gli impulsi della radiazione immessa tendono ad avvicinarsi sempre più, e se l'allargamento degli stessi, prodotto dalla dispersione modale, è notevole, le "code" si sovrappongono dando origine ad un'intensità complessiva, tra due bit 1, che supera il livello di riconoscimento del livello alto (bit 1). Pertanto, se la frequenza di cifra è grande e la dispersione modale è notevole, si determina un'interferenza intersimbolica inaccettabile, associata ad un elevato tasso di errore di bit.

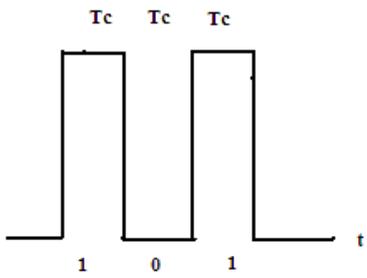
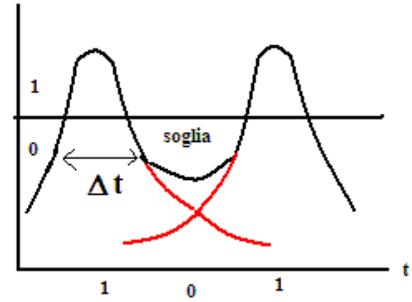
Questi inconvenienti possono essere eliminati impiegando fibre ottiche monomodali (più costose), che sono in grado di garantire un'interferenza intersimbolica molto contenuta anche operando con frequenze di cifra molto elevate : Δt (allargamento dell'impulso) = 4,4 ps/km; B (larghezza di banda

chilometrica) = $0,44 / \Delta t = 100 \text{ GHz} \times \text{km}$.



F.O.

INTERFERENZA INTERSIMBOLICA
ACCETTABILE



F.O.

INTERFERENZA INTERSIMBOLICA
NON ACCETTABILE

