

A09

---

32



Silvello Betti / Mauro Giaconi

# Comunicazioni ottiche



Copyright © MMV  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133 A/B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN 88-7999-488-0

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: maggio 2003  
II edizione: maggio 2005

## *Indice*

- 7 *Fibre ottiche*  
Mauro Giaconi
- 57 *Sorgenti, rivelatori e ricevitori*  
Mauro Giaconi
- 101 *Amplificatori ottici*  
Mauro Giaconi
- 157 *Componenti ottici passivi, giunti e connettori*  
Mauro Giaconi
- 195 *Sistemi di trasmissione in fibra ottica*  
Mauro Giaconi
- 243 *Birifrangenza e dispersione di polarizzazione*  
Silvello Betti
- 269 *Propagazione in fibra ottica in regime non lineare*  
Silvello Betti



# ***FIBRE OTTICHE***

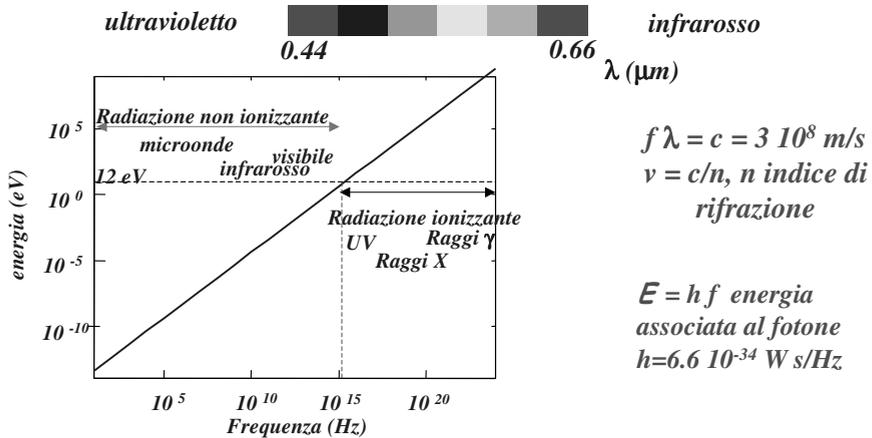
***Mauro Giaconi***

## ***Fibre ottiche: caratteristiche***

- ***piccole, diametro 125  $\mu\text{m}$ , e < 1 mm con rivestimento plastico***
- ***leggere e flessibili, curvabili anche con diametri di qualche mm***
- ***nessuna corrosione e stabili chimicamente***
- ***basse attenuazioni, 0.4 dB/km a 1.3  $\mu\text{m}$ , 0.2 dB/km a 1.5  $\mu\text{m}$***
- ***grandi bande, graded index qualche GHz km, monomodali decine o centinaia di GHz km***
- ***libere da induzione elettromagnetica e danni da fulmini***
- ***limitatissime diafonie***
- ***resistenti ad alte temperature***
- ***il contenuto informativo non è facilmente intercettabile***
- ***la silice, di cui sono fatte, è abbondante, non così il rame***

## Richiami di ottica

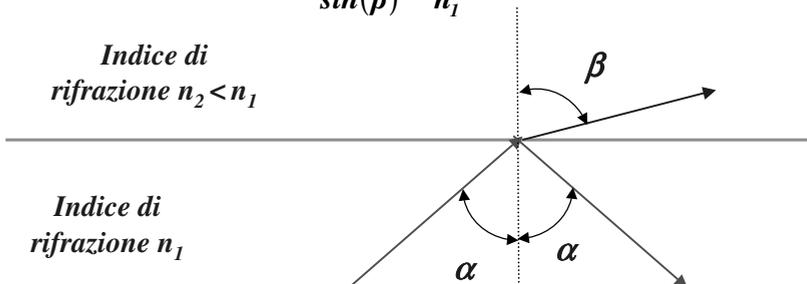
*Le onde luminose sono onde elettromagnetiche, come le onde radio, i raggi X e i raggi gamma: l'unica differenza è nella frequenza. Ad esempio, per lo spettro visibile*



## Rifrazione e riflessione

*Se un raggio di luce incide sulla superficie di separazione di due mezzi trasparenti si divide in un raggio riflesso e un raggio rifratto, secondo la legge di Snell.*

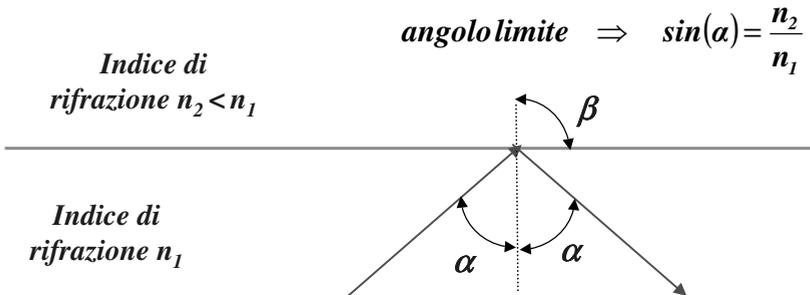
$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1}$$



## Riflessione totale

Se  $\alpha$  è tale che  $\sin(\beta) = 1$ , ovvero  $\beta = \pi/2$ , e quindi  $\sin(\alpha) = n_2/n_1$ , non si ha più raggio rifratto.

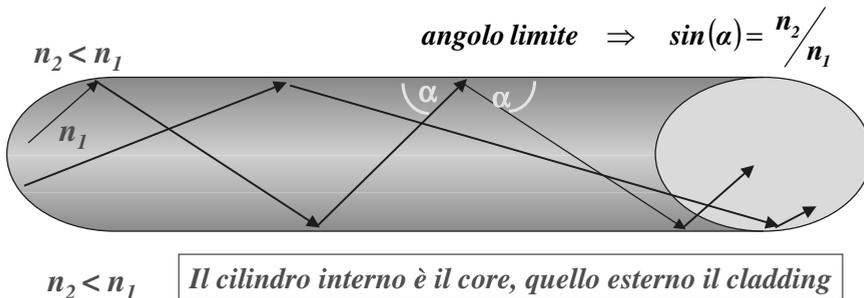
Superando tale angolo  $\alpha$  si ha riflessione totale,  $\alpha \geq \arcsin(n_2/n_1)$ .



## Propagazione in fibra ottica

Dati due cilindri concentrici, se l'indice di rifrazione di quello interno è maggiore di quello esterno, i raggi che incidono alla superficie di separazione dei cilindri con angolo maggiore di quello limite subiscono riflessione totale e si possono, così, propagare.

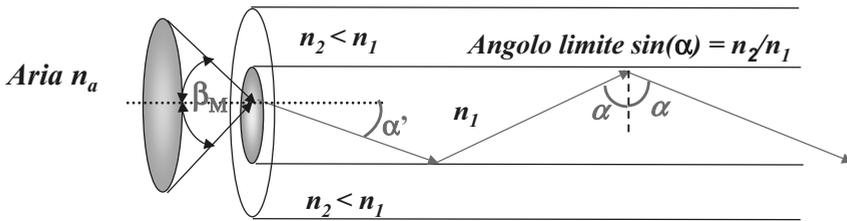
Nelle fibre, gli indici di rifrazione si possono variare drogando la silice  $\text{SiO}_2$  (il cui indice di rifrazione è circa 1.45, variabile leggermente con la lunghezza d'onda), con ossidi, quali,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ .



## Apertura numerica

*Affinché i raggi che si propagano in fibra siano guidati, cioè gli angoli di incidenza siano superiori a quello limite, i raggi incidenti dalla sorgente debbono essere contenuti in un cono di accettazione, il seno trigonometrico del cui angolo  $\beta_M$  è detto apertura numerica (NA).*

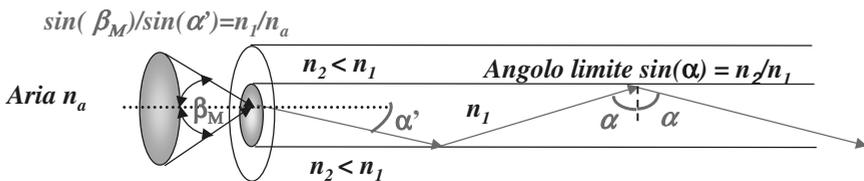
$$\sin(\beta_M)/\sin(\alpha') = n_1/n_a$$



## Apertura numerica

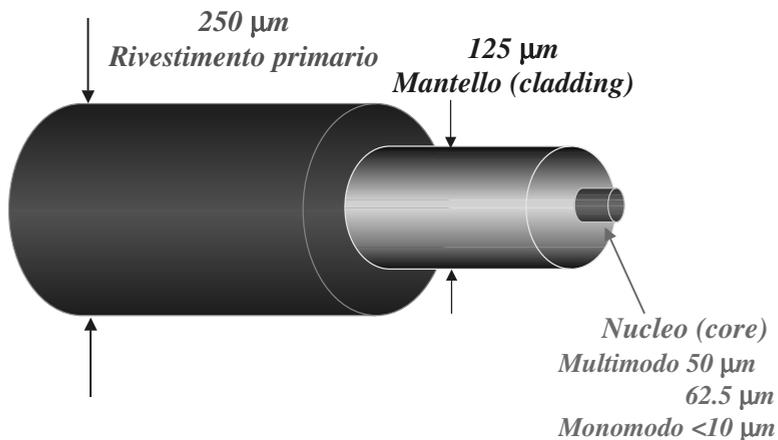
Essendo  $\frac{\sin(\beta_M)}{\sin(\alpha')} = \frac{\sin(\beta_M)}{\cos(\alpha)} = \frac{n_1}{n_a} = n_1$  e  $\sin(\alpha) = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \cos(\alpha) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$

$$NA = \sin(\beta_M) = n_1 \cdot \cos(\alpha) = n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



*Il cono di accettazione è tanto maggiore quanto maggiore è NA, e ciò è positivo per l'accoppiamento con le sorgenti ottiche, ma questo ha effetti negativi sulla banda della fibra.*

## *Struttura fisica delle fibre per telecomunicazioni*



## *Fibre ottiche: attenuazione*

### *Perdite di natura tecnologica*

- *perdite intrinseche: assorbimento nell'ultravioletto, assorbimento nell'infrarosso, diffusione (Scattering)*
- *perdite estrinseche: irradiazione (da curvature), assorbimento, diffusione di idrogeno*

### *Perdite per interconnessione*

- *perdite intrinseche: differenti indici di rifrazione, differenza di N.A, differenza diametri core*
- *perdite estrinseche: errori di disassamento, errori di separazione, disallineamento.*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

*- Code di assorbimento nell'ultravioletto ( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ )*

*la silice,  $\text{SiO}_2$ , presenta assorbimento per transizioni elettroniche nella regione dell'ultravioletto, centrato a  $0.12 \mu\text{m}$ , l'attenuazione in dB/km è di tipo esponenziale, col coefficiente dell'esponente positivo e inversamente proporzionale a  $\lambda$ , e dipende anche dai droganti e dalla loro concentrazione; tale attenuazione vale circa 1 dB/km @ 600 nm, valore che, tuttavia, scende a circa  $10^{-2}$  dB/km @  $1.3 \mu\text{m}$ , ed è quindi poco rilevante per le lunghezze d'onda di pratico impiego.*

*- Code di assorbimento nell'infrarosso ( $\lambda > 7 \mu\text{m}$ )*

*la  $\text{SiO}_2$  presenta assorbimento da transizioni elettroniche a  $9.1 \mu\text{m}$  e a lunghezze d'onda maggiori; l'attenuazione in dB/km è di tipo esponenziale, col coefficiente dell'esponente negativo e inversamente proporzionale a  $\lambda$ ; tale attenuazione presenta valori molto elevati alle grandi lunghezze d'onda, ma decresce verso le lunghezze d'onda di pratico impiego, scendendo al di sotto di 1 dB/km già verso  $1.8 \mu\text{m}$ .*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

*Per la natura amorfa della silice, tali risonanze, nell'ultravioletto e nell'infrarosso, prendono la forma di bande di assorbimento, che si estendono anche nella regione visibile.*

*Per la silice, nella gamma  $0.8 - 1.6 \mu\text{m}$  tale attenuazione è minore di 0.1 dB/km, addirittura minore di 0.03 dB/km nella gamma  $1.3 - 1.6 \mu\text{m}$ , di primaria importanza per le comunicazioni ottiche su fibra.*

*- Code di assorbimento nell'infrarosso presentano anche i droganti usati per cambiare l'indice di rifrazione, anche a lunghezze d'onda piuttosto modeste; ad esempio,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , il più critico tra i droganti usuali, comincia a indurre attenuazione per tale causa già da circa  $1.2 \mu\text{m}$  in su, mentre ciò accade per  $\text{P}_2\text{O}_5$  da circa  $1.4 \mu\text{m}$  in su e per il  $\text{GeO}_2$  da circa  $1.6 \mu\text{m}$  in su.*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

#### *- Diffusione (Scattering di Rayleigh)*

*il raggio luminoso diffonde in tutte le direzioni, per disomogeneità della fibra, piccole rispetto alla lunghezza d'onda (particelle con diversa densità, bolle di aria, etc.). Avendo i raggi diffusi angoli di incidenza tra core e cladding aleatori, la maggior parte non è guidata, con conseguente attenuazione. Tali cause non sono eliminabili.*

*La perdita è del tipo  $p = W/\lambda^4$  dB/km, ove  $W$  varia secondo la costituzione chimica del core (tipo di droganti e loro concentrazione).*

*Valori orientativi sono dell'ordine di 0.3 dB/km @1310 nm, 0.15 dB/km @1550 nm. Come è, allora, evidente, lo scattering di Rayleigh è il meccanismo più importante di attenuazione delle fibre ottiche.*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

#### *- Assorbimento*

*è causato da impurità presenti nei materiali (ioni metallici di Fe, V, Ni, Cu, Cr, etc) e principalmente di ioni ossidrilici (OH), i quali presentano picchi di assorbimento a 950, 1240 e 1390 nm, col che si definiscono le finestre ottiche:*

- la prima attorno a 850 nm (ad esempio, 800 - 900 nm),*
- la seconda attorno a 1310 nm (ad esempio, 1290 - 1330 nm),*
- la terza attorno a 1550 nm (ad esempio, 1530 - 1565 nm).*

*Le concentrazioni massime per limitare l'attenuazione sono sotto al ppb, per i metalli, dell'ordine del ppb per l'ossidrilico.*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

#### *- Perdite per diffusione di idrogeno*

*quando l'idrogeno diffonde nelle fibre, essendo presente nei materiali che compongono il cavo, o nell'ambiente circostante, esso è intrappolato dal cristallo di  $\text{SiO}_2$ , ad esempio un gruppo Si - OH, e le sue vibrazioni causano perdite per assorbimento, per lunghezze d'onda maggiori di 1  $\mu\text{m}$ .*

*Particolari materiali, come il fosforo, aggiunti alla silice per cambiare l'indice di rifrazione, sono particolarmente critici e dovrebbero essere evitati o ridotti al minimo possibile; si dovrebbe usare il fluoro come drogante; i materiali da impiegare per la realizzazione di fibre e cavi dovrebbero essere scelti con molta attenzione, al fine di limitare questo effetto, tali, cioè, da non generare idrogeno.*

### *Attenuazione di natura tecnologica*

#### *- Perdite per imperfezioni di guida*

*ove non sia rispettata la geometria ideale, longitudinale o trasversale (ad esempio, a causa di variazione del raggio del core, deformazioni del core, imperfezioni nell'interfaccia core/cladding, irregolarità longitudinali nell'interfaccia core/cladding, etc.), si ha, nelle fibre monomodali, una ulteriore attenuazione, indipendente dalla lunghezza d'onda, con valori orientativi fino a 0.2 dB/km;*

*Se la precisione del raggio del core è minore dell'uno per cento, tali attenuazioni residue sono dell'ordine del centesimo di dB/km.*

## *Attenuazione di natura tecnologica*

### *- Perdite per curvatura*

*in una fibra dritta, l'asse del fascio ottico e quello della guida coincidono, mentre nella fibra curva il fascio ottico si sposta verso l'esterno, e non coincide più con l'asse della fibra. Il campo è irradiato fuori dal core, con conseguente attenuazione.*

*Le perdite aumentano esponenzialmente con la diminuzione del raggio di curvatura  $R$ , con la diminuzione del quadrato dell'apertura numerica  $NA$  e con l'aumento del raggio del core  $\rho$  ( $\propto e^{-(R \cdot NA^2 / \rho^2)}$ ).*

*Nelle tipiche fibre monomodali, se i raggi di curvatura sono maggiori di un cm, le perdite per curvatura sono minori del centesimo di dB/km, quindi, sostanzialmente, irrilevanti.*

## *Attenuazione di natura tecnologica*

### *- Perdite per microcurvatura*

*la fibra nel cavo può essere soggetta a sollecitazioni che causano piccole curvature, continue ed aleatorie, col che l'asse della fibra non è più rettilineo e cambiano gli angoli di incidenza del fascio luminoso tra core e cladding; si ha quindi irradiazione nel cladding ed attenuazione.*

*L'attenuazione per microcurvatura può derivare anche dai processi di fabbricazione delle fibre e, se questi processi sono errati, le conseguenti attenuazioni possono variare da qualche decimo sino ad alcuni dB/km.*

*Le fibre devono, quindi, evitare il più possibile stress esterni, durante la fabbricazione e la posa. Essendo necessario proteggere meccanicamente le fibre, tale protezione deve comunque limitare la trasmissione di stress, come in seguito esaminato con maggiore dettaglio.*

*Le perdite per microcurvatura aumentano all'aumentare della lunghezza d'onda e diminuiscono all'aumentare dell'apertura numerica.*