

A09

32

Silvello Betti / Mauro Giaconi

Comunicazioni ottiche



Copyright © MMV
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
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

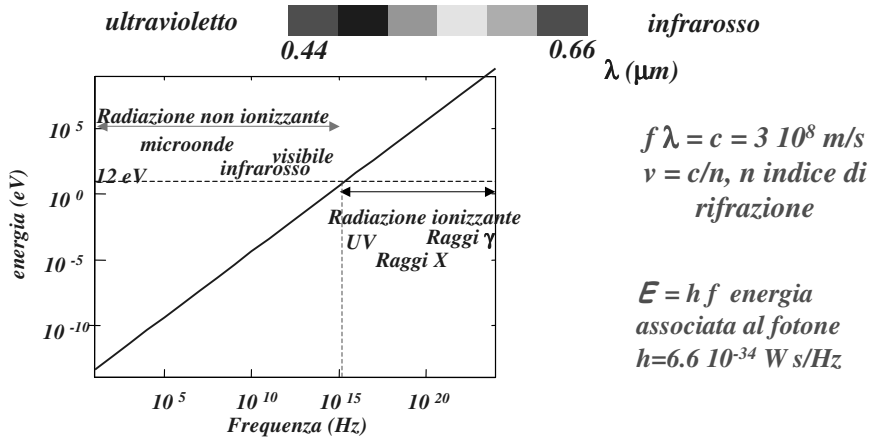
Mauro Giaconi

Fibre ottiche: caratteristiche

- ***piccole, diametro 125 μm , 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 μm , 0.2 dB/km a 1.5 μm***
- ***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

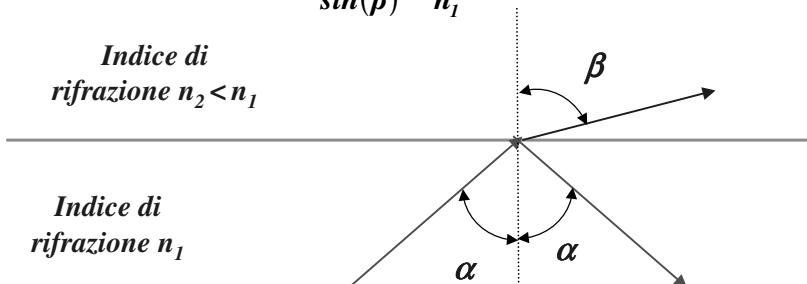
Le onde luminose sono onde elettromagnetiche, come le onde radio, i raggi X e i raggi gamma: l'unica differenza è nella frequenza. Ad esempio, per lo spettro visibile



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.

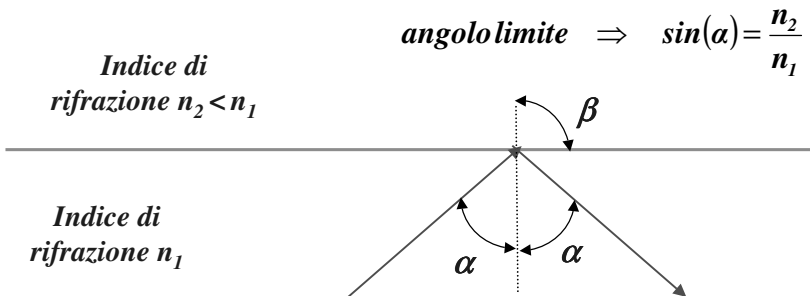
$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1}$$



Riflessione totale

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

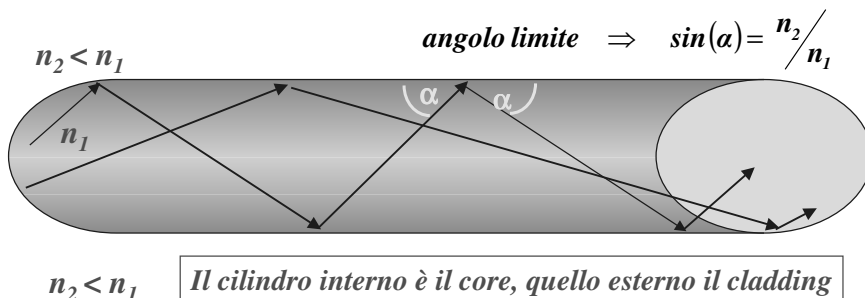
Superando tale angolo α si ha riflessione totale, $\alpha \geq \arcsin(n_2/n_1)$.



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.

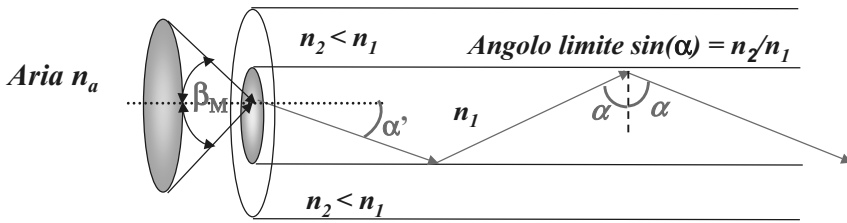
Nelle fibre, gli indici di rifrazione si possono variare drogando la silice SiO_2 (il cui indice di rifrazione è circa 1.45, variabile leggermente con la lunghezza d'onda), con ossidi, quali, GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 .



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 β_M è detto apertura numerica (NA).

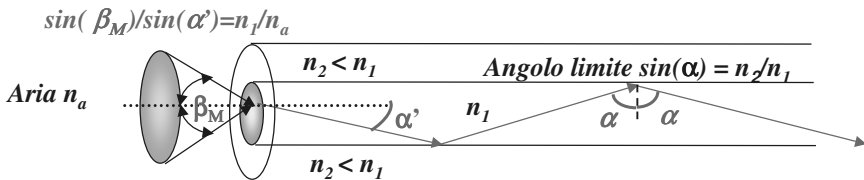
$$\sin(\beta_M)/\sin(\alpha') = n_1/n_a$$



Apertura numerica

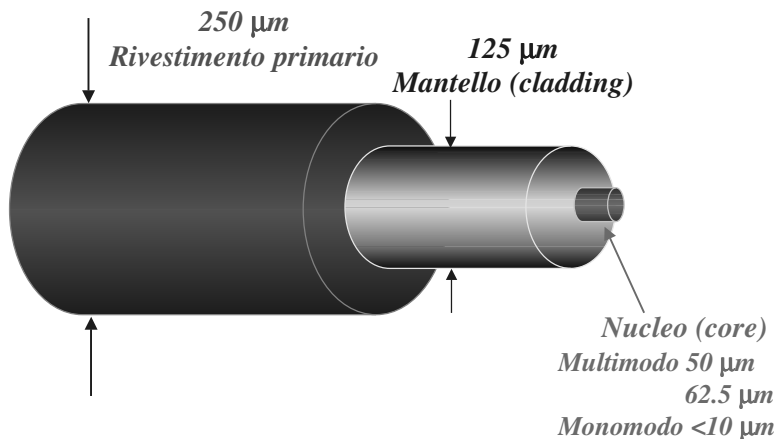
Essendo $\frac{\sin(\beta_M)}{\sin(\alpha')} = \frac{\sin(\beta_M)}{\cos(\alpha)} = \frac{n_1}{n_a} = n_1$ e $\sin(\alpha) = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \cos(\alpha) = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$

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



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, 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 λ , 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 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 λ ; 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, B_2O_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 P_2O_5 da circa $1.4 \mu\text{m}$ in su e per il 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 SiO_2 , ad esempio un gruppo Si - OH, e le sue vibrazioni causano perdite per assorbimento, per lunghezze d'onda maggiori di 1 μm .

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 ρ ($\propto e^{-(R \cdot NA^2 / \rho^2)}$).

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.