

Fibre Ottiche

Lo sviluppo delle fibre ottiche è stato spinto dalle telecomunicazioni che, inizialmente, ne hanno apprezzato le possibilità di trasmettere a grandi distanze con pochi amplificatori intermedi.

La miniaturizzazione dei componenti e l'estensione dei servizi multimediali a una frazione crescente della popolazione hanno fatto scendere i prezzi e spostato una parte del mercato verso sistemi meno performanti ma di facile uso.

La fisica delle particelle ha approfittato di questi sviluppi e le fibre ottiche sono ora un elemento comune nei sistemi di acquisizione dati.

PGI 2005 lect_4 1

Vantaggi:

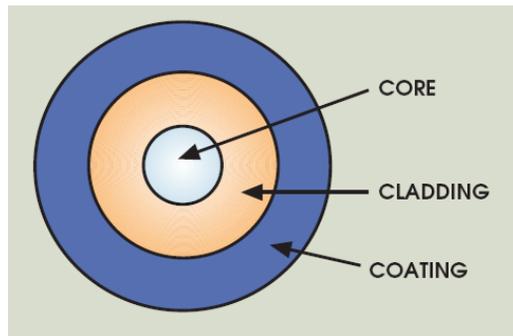
- compattezza
- costo contenuto
- immunità al rumore elettromagnetico
- assenza di *ground loops*
- bassa attenuazione
- banda passante elevatissima

Svantaggi:

- conversione del segnale da elettrico a ottico e viceversa
- precauzioni di installazione
- strumentazione di test sofisticata

PGI 2005 lect_4 2

Una fibra ottica è una guida d'onda dielettrica di sezione circolare. Consiste di 3 elementi:

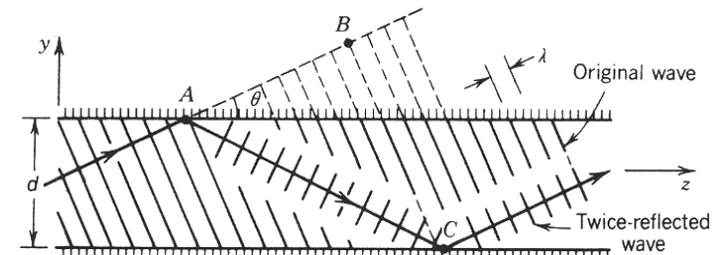


La luce si propaga nella fibra come un'onda piana.

È riflessa totalmente all'interfaccia tra *core* e *cladding*.

PGI 2005 lect_4 3

Per certi angoli di riflessione, l'onda riflessa due volte interferisce positivamente coll'onda precedente alle due riflessioni e la propagazione avviene con attenuazione trascurabile.



La figura si riferisce ad una guida d'onda piana speculare!

Questi angoli determinano i **modi** di propagazione.

PGI 2005 lect_4 4

Non tutta la luce che arriva sulla faccia d'ingresso del *core* entra nella fibra:
 l'angolo massimo rispetto alla normale del cono di luce accettata determina la *numerical aperture NA*

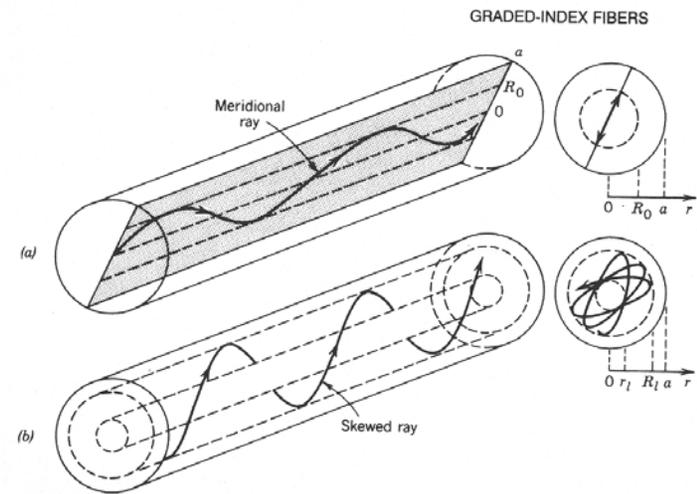
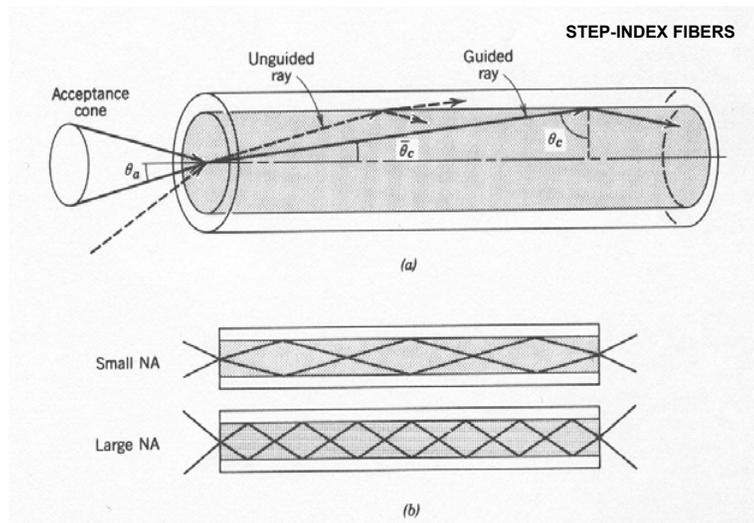
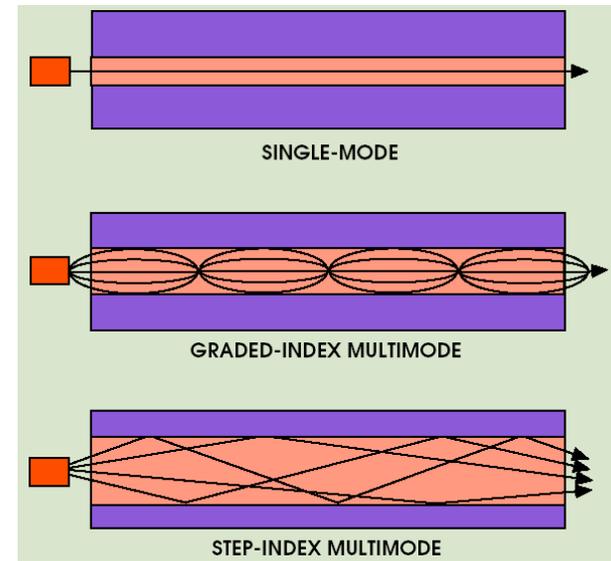
Tre tipi di fibre:

monomodali *single-mode*

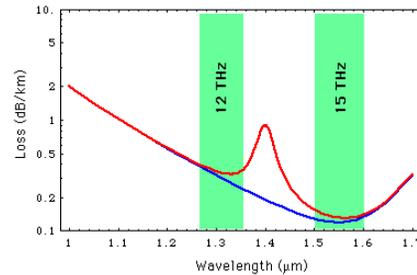
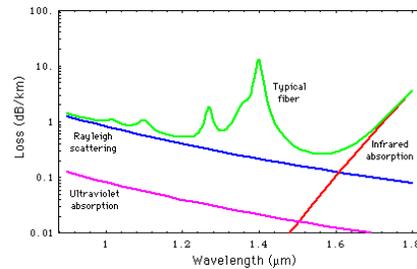
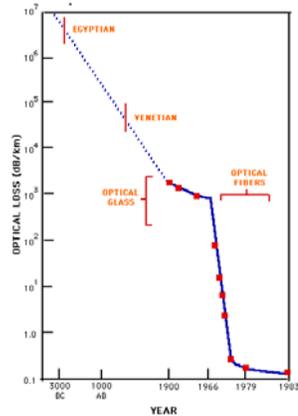
multimodali con indice parabolico *graded index*

multimodali con indice a gradino *step index*

Core in SiO₂, eventualmente drogato



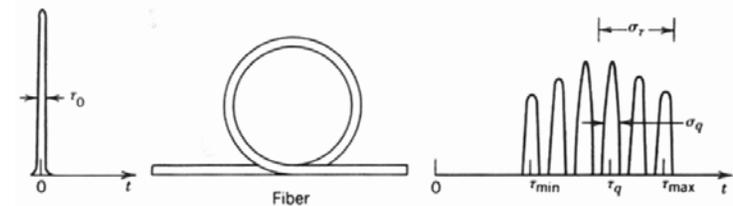
Attenuazione



PGI 2005 lect_4 9

Un impulso si propaga in una fibra **deformandosi**:

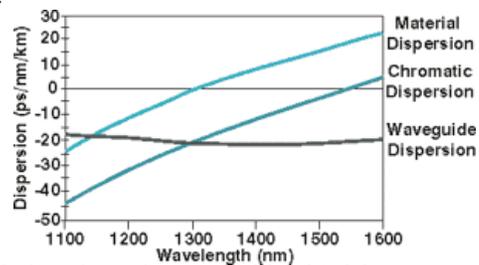
- **dispersione modale**, la più importante, poichè i differenti modi hanno percorsi di lunghezza diversa
- **dispersione intramodale**, dovuta principalmente alle velocità diverse delle varie componenti spettrali del segnale



PGI 2005 lect_4 10

La **dispersione intramodale** nelle fibre *single-mode* ha due componenti:

1. **dispersione cromatica**, le varie lunghezze d'onda viaggiano con velocità diverse (*chromatic dispersion*); è composta da
 - dispersione dovuta alle variazioni di indice di rifrazione nel materiale secondo la lunghezza d'onda (*material dispersion*);
 - dispersione di guida d'onda, dovuta alla differenza di profilo di luce secondo la lunghezza d'onda nel *core* (e nel *cladding*) (*waveguide dispersion*).



2. **dispersione di polarizzazione**, dovuta all'ellitticità del *core* o anche dalla birifrangenza indotta da tensioni meccaniche

PGI 2005 lect_4 11

Banda passante:

single-mode	graded-index @ 1300 nm	graded-index @ 850 nm	step-index
100 GHz-km	500 MHz-km	160 MHz-km	20 MHz-km

Attenuazione: da 0.1 dB/km a 10 dB/km

Dimensioni: sono date in μm e si riferiscono al diametro di *core/cladding/coating*, es. 62.5/120/250

Dimensioni del *core*:

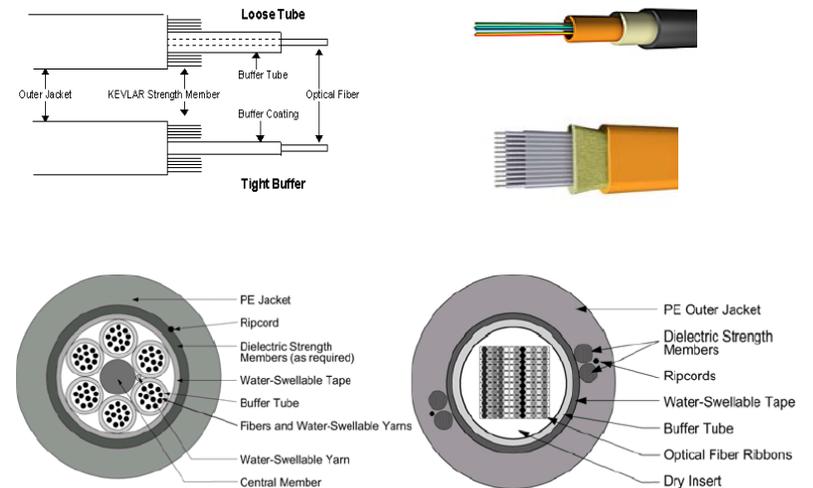
single-mode	graded index	step index
tra 3 e 10 μm	50, 62.5 o 100 μm	tra 100 e 1500 μm

PGI 2005 lect_4 12

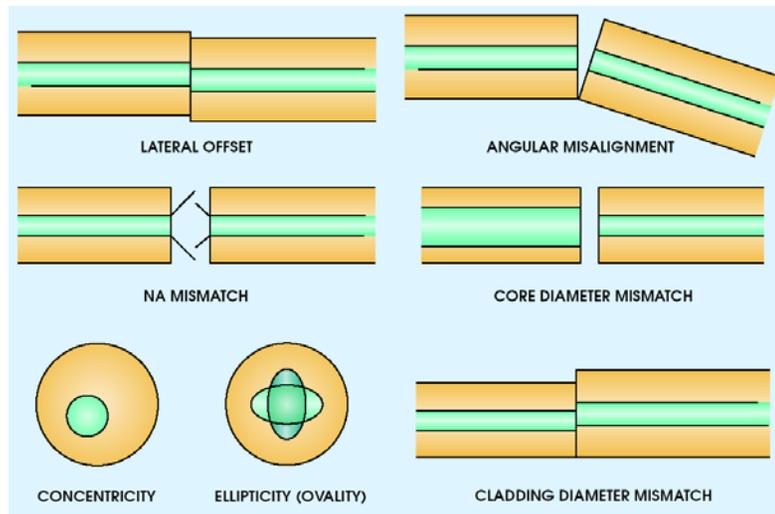
- › Segnali generati da lasers o da LEDs
Ricezione dei segnali con diodi fotosensibili
- › Frequenze di impulsi oltre 10 Gbit/s
- › Tre "finestre" di lunghezza d'onda: 850, 1300 e 1550 nm, le due nell'infrarosso in regioni di minimo dell'attenuazione
- › Molte lunghezze d'onda sulla stessa fibra:
Wavelength Division Multiplexing (WDM)
Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)
- › Connettori per cavi ad una sola fibra
Connettori multipli (MT) per nastri di 4, 8 e 12 fibre

PGI 2005 lect_4 13

Tecnologia dei Cavi Fibre Ottiche



PGI 2005 lect_4 14



PGI 2005 lect_4 15

Referenze

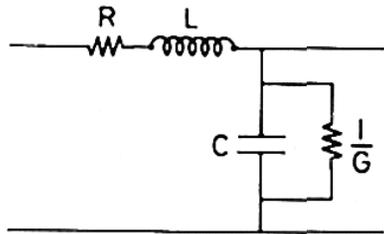
- B. E. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics* Wiley 1991
- F. G. Smith and T. King, *Optics and Photonics: an Introduction*, Wiley 2000
- J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, **3rd edition** Wiley 1998
- Sito web di Force, Inc.:
<http://www.fiber-optics.info/sitemap.htm>
- Sito web di Lascomm:
<http://www.lascomm.com/tutorial.htm>
- Lezioni di F. Vasey in ELEC 2005, *Electronics in High Energy Physics*:
<http://humanresources.web.cern.ch/humanresources/external/training/tech/special/ELEC2005.asp#Winter>

PGI 2005 lect_4 16

Cavi

Propagazione dei segnali nei cavi

Un elemento di cavo di lunghezza Δz può essere rappresentato da un circuito equivalente costituito da una induttanza L e una capacità C , accompagnate da una resistenza R e da una conduttanza G .



PGI 2005 lect_4 17

Tensione V e corrente I variano attraverso l'elemento di cavo:

$$\Delta V(z, t) = -R \Delta z I(z, t) - L \Delta z \frac{\partial I}{\partial t}(z, t)$$

$$\Delta I(z, t) = -G \Delta z V(z, t) - C \Delta z \frac{\partial V}{\partial t}(z, t)$$

Dividendo per Δz si ottengono le equazioni:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t}$$

Differenziando rispetto a z e a t rispettivamente e sostituendo:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial V}{\partial t} + RGV \quad (1)$$

PGI 2005 lect_4 18

Questa è l'"equazione dei telegrafi"

Se le perdite ohmiche e nel dielettrico sono nulle, si ottiene l'equazione della propagazione ondosa,

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2)$$

con velocità di propagazione $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Si può pensare a una soluzione della (2) in serie di Fourier: per ogni frequenza ω si ha per V e per I una soluzione del tipo

$$V(z, t) = V(z) \exp(i\omega t)$$

PGI 2005 lect_4 19

L'impedenza caratteristica in ogni punto del cavo è data dal rapporto

$$Z = \frac{V(z)}{I(z)} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

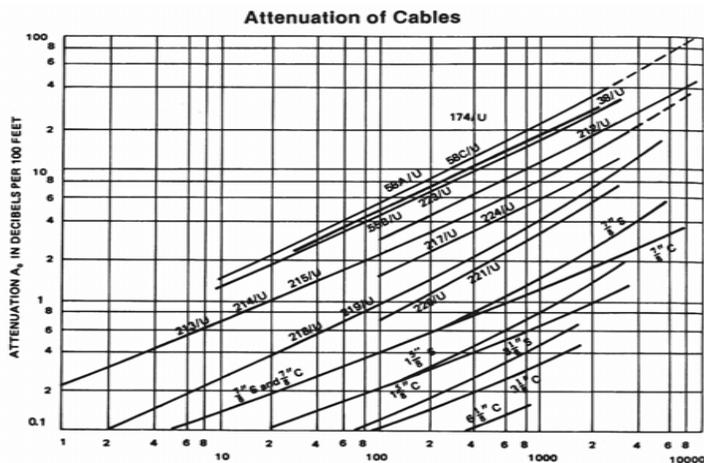
Soluzioni della (1) si propagano con la stessa velocità $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$,

ma con un'impedenza caratteristica $Z = \frac{V(z)}{I(z)} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}$ e un'attenuazione esponenziale lungo il cavo $\exp(-\alpha z)$.

Ad alta frequenza $Z = \sqrt{L/C}$ e $\alpha = \frac{1}{2}(R\sqrt{C/L} + G\sqrt{L/C})$ se R e G sono piccoli

PGI 2005 lect_4 20

In cavi reali R aumenta come $\sqrt{\omega}$ a causa dello *skin effect* nei conduttori e G aumenta come ω a causa delle perdite nel dielettrico.



PGI 2005 lect_4 21

Cavo coassiale di raggio interno a e esterno b

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\text{H/m}] \quad C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \quad [\text{F/m}]$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\Omega] \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad [\text{m/s}]$$

In pratica Z tra 50 e 93 Ω , v tra $0.65c$ e $0.99c$

Tipo	impedenza [ohm]	ritardo [ns/m]	diametro [mm]	capacità [pF/m]	tensione [kV]
RG58/U	50	5.14	3.1	93.5	1.9
RG174/U	50	5.14	1.5	98.4	1.5
RG59/U	73	5.14	3.8	68.9	2.3

PGI 2005 lect_4 22

Due **filii paralleli** (vale anche per *twisted pairs*), di diametro d e distanza b tra i centri dei filii

$$L = \frac{\mu}{\pi} \operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right) \quad [\text{H/m}] \quad C = \frac{\pi\epsilon}{\operatorname{arccosh}(b/d)} \quad [\text{F/m}]$$

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right) \quad [\Omega] \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad [\text{m/s}]$$

Per $b \gg d$ $\operatorname{arccosh}\left(\frac{b}{d}\right) \approx \ln\left(2\frac{b}{d}\right)$

In pratica Z tra 90 e 115 Ω , v tra $0.6c$ e $0.8c$

PGI 2005 lect_4 23

Dal catalogo 3M:

Tipo	impedenza [ohm]	ritardo [ns/m]	sezione [mm ²]	distanza [mm]	capacità [pF/m]
piattina	110	4.1	0.06	0.64	60
<i>twisted pairs</i>	110	4.9	0.06	0.64	43
piattina	110	4.1	0.09	1.27	40
<i>twisted pairs</i>	100	5.3	0.09	1.27	46

Siccome la sezione del conduttore è piccola la resistenza è di centinaia di ohm per chilometro e l'attenuazione DC può creare difficoltà

PGI 2005 lect_4 24