

La trasmissione in fibra ottica

OBIETTIVI CONTENUTI

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 Le fibre ottiche | 5 Cavi a fibre ottiche |
| 2 Attenuazione del segnale in un sistema di trasmissione a fibre ottiche | 6 Componenti attivi per fibre ottiche |
| 3 Dispersione nelle fibre ottiche | 7 Sensori per fibre ottiche |
| 4 La fabbricazione delle fibre ottiche | 8 Utilizzazione delle fibre ottiche |

Conoscenze

- Propagazione di un segnale entro una fibra ottica
- Confronto fra una fibra ottica e un cavo elettrico
- I limiti di una fibra ottica
- Processi di fabbricazione per una fibra ottica

Abilità

- Descrivere la propagazione di un segnale luminoso all'interno di una fibra ottica
- Confrontare fibre ottiche di diversa fabbricazione

1 Le fibre ottiche

La trasmissione di un segnale viene quasi sempre effettuata inviando un segnale ad alta frequenza denominato *portante*, il quale è stato modulato dal segnale da trasmettere, denominato *modulante*.

Le linee di trasmissione consentono di utilizzare portanti con frequenza fino a qualche GHz; per trasmettere portanti con frequenza fino a qualche centinaio di GHz vengono utilizzati mezzi trasmissivi denominati *guide d'onda*. Queste sono dei supporti in materiale conduttore aventi sezione cava che convogliano l'onda elettromagnetica costringendola a propagarsi al suo interno.

Le **fibre ottiche** sono guide d'onda dielettriche realizzate con un filo sottilissimo di materiale isolante trasparente, all'interno del quale viene convogliata un'onda elettromagnetica di tipo luminoso.

Per la trasmissione in fibra ottica vengono utilizzati raggi infrarossi con lunghezze d'onda che vanno da $1,55 \mu\text{m}$ a $0,85 \mu\text{m}$ corrispondenti, rispettivamente, alle frequenze che vanno da 193 THz ($193 \cdot 10^{12}$ Hz) a 355 THz. Pertanto si dispone di una gamma di frequenze $\Delta f = 355 - 193 = 162$ THz. Confrontando questa gamma con quella delle onde radio che vanno da 3 Hz a 300 GHz si ricava facilmente che le fibre ottiche hanno una disponibilità di frequenze 540 volte più ampia.

La fibra ottica ha avuto come prima applicazione il trasporto di un raggio luminoso

in percorsi tortuosi, impossibili da percorrere in altro modo. La scoperta del laser a semiconduttore nel 1962 e la realizzazione di vetri a basse perdite hanno portato alla utilizzazione delle fibre ottiche anche nel campo delle telecomunicazioni.

Risale al 1970 la realizzazione della prima fibra ottica con attenuazione di 20 dB/km a opera della Corning Glass. Successivamente sono state realizzate fibre ottiche con attenuazioni sempre più basse fino ai 0,4 dB/km. Si prevede la realizzazione di fibre ottiche con attenuazione di 10^{-4} dB/km. Le fibre ottiche come mezzo per la trasmissione dei segnali presentano diversi vantaggi rispetto ai cavi (linee di trasmissione) in rame:

- *bassa attenuazione;*
- *banda molto elevata;*
- *elevato prodotto capacità-passo di ripetizione* (il segnale va amplificato dopo percorsi più lunghi);
- *buone caratteristiche meccaniche;*
- *buone caratteristiche dielettriche;*
- *costo in continua diminuzione.*

Attenuazione

Confrontando un cavo in rame di ottima qualità avente una attenuazione di 0,13 dB/m e una fibra ottica di qualità media con attenuazione di 10 dB/km si può facilmente notare che l'attenuazione del cavo è 13 volte superiore.

Prodotto capacità-passo di ripetizione

Il **prodotto capacità-passo di ripetizione** è un parametro che indica la quantità di informazione binaria che può essere trasmessa al secondo per unità di distanza e viene espresso in Gigabit al secondo per km $\left[\frac{Gb}{s} \cdot km \right]$.

Negli anni Novanta si è arrivati a trasmettere mediante fibra ottica $800 \left[\frac{Gb}{s} \cdot km \right]$ contro i $10 \left[\frac{Gb}{s} \cdot km \right]$ di un ponte radio e $1 \left[\frac{Gb}{s} \cdot km \right]$ di un cavo coassiale.

Caratteristiche meccaniche

Le fibre ottiche sono caratterizzate da:

- *peso e dimensioni ridotte;*
- *buona flessibilità;*
- *buona elasticità.*

Caratteristiche dielettriche

Le fibre ottiche sono immuni ai campi elettromagnetici esterni che potrebbero alterare il segnale trasmesso e non producono campi elettromagnetici che potrebbero essere fonte di disturbi per altri canali trasmissivi. Pertanto fra due fibre ottiche parallele non avvengono i fenomeni di diafonia tipici delle linee telefoniche.

Sistemi a fibre ottiche

Un sistema di trasmissione in fibra ottica, come schematizzato in **figura 1**, è costituito essenzialmente da tre elementi:

- *sorgente luminosa (LED);*
- *fibra ottica;*
- *rilevatore o sensore ottico (fotodiodo).*

Figura 1
Trasmissione in fibra ottica



Il principio di funzionamento consiste nel fatto che una certa quantità di luce emessa dal LED entra in un estremo della fibra e viene convogliata in essa arrivando all'estremo opposto, dal quale fuoriesce per andare a colpire il fotodiodo. Per ottenere questo risultato è necessario che la fibra abbia una costituzione tale da costringere la luce a muoversi al suo interno senza fuoriuscire.

Struttura di una fibra ottica

La fibra ottica ha una struttura come quella indicata in **figura 2** ed è costituita fondamentalmente da tre parti:

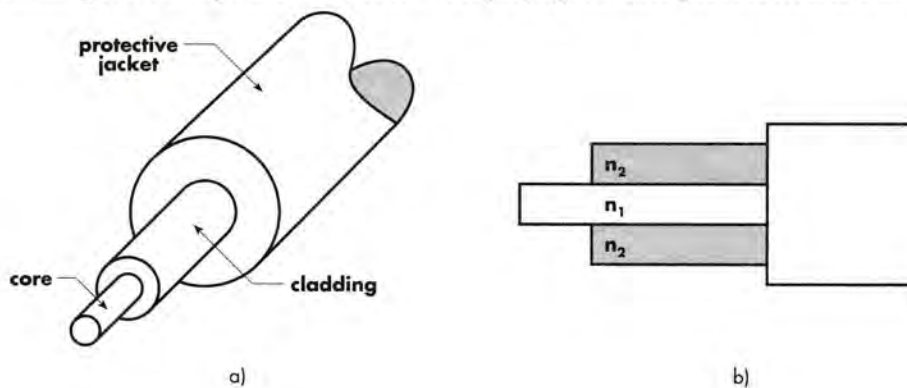
- nucleo (*core*);
- mantello (*cladding*);
- copertura protettiva (*protective jacket*).

Il **core** rappresenta la zona in cui si propaga il segnale ottico costituito da una sequenza di impulsi luminosi.

Il **cladding** serve a impedire che la luce che si propaga nel core possa fuoriuscire da esso.

Figura 2

Fibra ottica: struttura (a); indici di rifrazione (b)



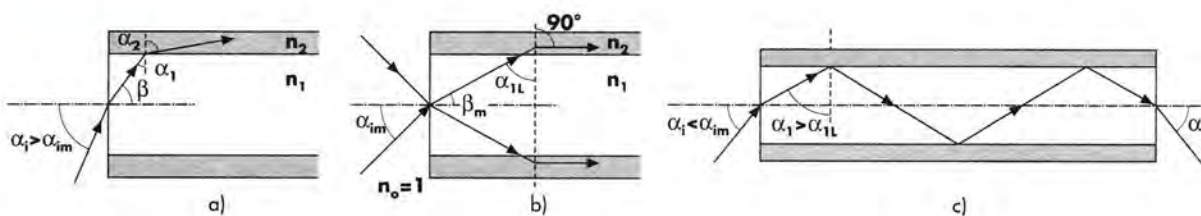
Propagazione del segnale luminoso

Figura 3

Il **protective jacket** serve a proteggere la fibra dalle azioni meccaniche, chimiche o di altra natura.

Il principio sul quale si basa la propagazione del segnale luminoso in una fibra ottica è rappresentato schematicamente in **figura 3**.

Raggi luminosi e fibra ottica: raggio disperso (a); angolo di accettazione (b); raggio trasmesso (c)



Indicando con n_1 l'indice di rifrazione del core e con n_2 l'indice di rifrazione del cladding, la composizione chimico-fisica delle due parti è tale da far rispettare la relazione:

$$n_1 > n_2$$

1

Pertanto un raggio luminoso che incide sulla superficie di separazione fra core e cladding subisce una rifrazione, come indicato in **figura 3a**.

Un raggio proveniente dalla sorgente di luce e che colpisce la superficie di separazione fra aria e core con un angolo di incidenza α_i , penetra nel core con un angolo di rifrazione β tale che $\beta < \alpha_i$ essendo $n_i > n_1$ (n_i = indice di rifrazione dell'aria).

Il raggio, nel suo percorso all'interno del core, può colpire l'interfaccia core-cladding con un angolo di incidenza α_1 e attraversarla passando nel cladding con un angolo di rifrazione α_2 . Tenendo conto della relazione **1** fra gli indici di rifrazione, si ricava che fra i due angoli α_1 e α_2 deve essere verificata la relazione $\alpha_2 > \alpha_1$, per cui il raggio, passando dal core al cladding, si allontana dalla perpendicolare. Diminuendo l'angolo di incidenza α_i (fra aria e core) aumenta l'angolo di incidenza α_1 fra core e cladding provocando anche un aumento dell'angolo di rifrazione nel cladding. Ciò finché l'angolo α_2 non raggiunge il valore di 90° , come in **figura 3b**.

Raggi guidati

Diminuendo ulteriormente l'angolo di incidenza α_i il raggio non passa più dal core al cladding ma viene riflesso all'interno del core e lì si propaga attraverso una serie di riflessioni successive, come indicato in **figura 3c**.

Pertanto, esiste un valore di α_i , che indichiamo con α_{im} , al di sotto del quale il raggio che penetra nel core vi rimane intrappolato e si propaga al suo interno.

Tutti i raggi che penetrano nel core con un angolo di incidenza inferiore ad α_{im} vengono denominati **raggi guidati** e la loro propagazione viene detta **propagazione guidata**. I raggi che incidono sul core con un angolo superiore ad α_{im} subiscono una riflessione che è solo parziale in quanto una parte della loro energia penetra nel cladding (raggio rifratto) e viene persa. A ogni riflessione il raggio perde parte della sua energia e dopo un certo numero di riflessioni viene assorbito completamente dal cladding. Questi raggi vengono detti **raggi irradiati**.

Angolo di accettazione

Da quanto detto si rileva facilmente la necessità che la sorgente invii alla fibra ottica tutta la sua luce entro un cono la cui apertura angolare è $2 \cdot \alpha_{im}$.

Poiché tutti i raggi che colpiscono il core con un angolo inferiore ad α_{im} vengono convogliati nella fibra, detto angolo viene denominato **angolo di accettazione**.

Apertura numerica

L'**apertura numerica NA (Numerical Aperture)** è uno dei principali parametri di una fibra ottica ed è legata all'angolo di accettazione mediante la relazione seguente:

$$NA = \text{sen } \alpha_{im} \quad 2$$

Il valore di NA è strettamente legato ai valori degli indici di rifrazione del core e del cladding dalla relazione

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 3$$

Accoppiamento attraverso un mezzo diverso dall'aria

Quando la luce arriva al core della fibra attraverso l'aria, l'angolo di accettazione α_{im} può essere ottenuto mediante la relazione seguente:

$$\alpha_{im} = \arcsen NA \quad 4$$

Se la fibra è accoppiata con un mezzo avente un indice di rifrazione n_3 , l'angolo di accettazione può essere ricavato utilizzando la relazione seguente:

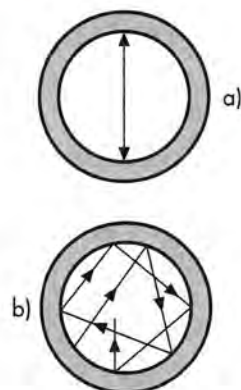
$$\text{sen } \alpha_{im} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_3^2}} \cdot NA \quad 5$$

in cui NA è l'apertura numerica riferita all'accoppiamento con l'aria, valore che normalmente viene fornito dal costruttore.

Il valore reale di NA è spesso diverso da quello teorico definito mediante la relazione

3. Le principali cause di tale differenza sono:

- la variazione dell'indice di rifrazione non è mai perfettamente a gradino (step), come ipotizzato, ma è più graduale;



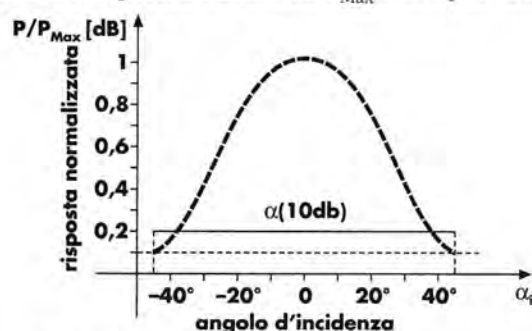
- alcuni raggi guidati all'interno del core, invece di passare per l'asse della fibra (**figura 4a**) durante le continue riflessioni; seguono percorsi diversi (**figura 4b**) contribuendo a variare il valore di NA;
- i raggi che entrano nella fibra con un angolo di incidenza di poco superiore a quello corrispondente a NA vengono completamente assorbiti soltanto dopo un certo numero di riflessioni, per cui, se la fibra è corta, essi riescono a raggiungere l'estremità opposta prima di essere completamente assorbiti dal mantello;
- i raggi che entrano nella fibra con un angolo di poco inferiore all'angolo di accettazione hanno una probabilità di raggiungere l'estremo opposto che diminuisce con l'aumentare della lunghezza della fibra stessa.

Figura 4
Percorso dei raggi in una fibra ottica: raggi meridiani (a); raggi con percorso a elica (b)

Valore misurato
di NA

Un metodo diverso per definire il valore di NA deriva dal seguente ragionamento. Un raggio luminoso che entra nella fibra con angolo di incidenza nullo (parallelo all'asse) arriverà all'estremo opposto con una intensità superiore rispetto a un raggio uguale che entra con un angolo di incidenza maggiore. Rilevando, mediante un opportuno sensore normalizzato, l'intensità del raggio che arriva all'estremo opposto per diversi angoli di incidenza si ottiene un grafico simile a quello riportato in **figura 5**. In essa è riportato l'andamento della potenza rilevata dal sensore al variare dell'angolo di incidenza, rapportata alla potenza massima P_{Max} corrispondente a un angolo nullo.

Figura 5
Misura
dell'angolo di
accettazione



Con riferimento ai risultati delle misure effettuate, il valore di NA misurato è quello corrispondente all'angolo che ha provocato una riduzione di 10 dB rispetto al valore massimo. Valori tipici di NA sono compresi fra 0,15 e 0,25 a cui corrispondono angoli di accettazione che vanno da 17,2° a 28,9°.

2 Attenuazione del segnale in un sistema di trasmissione a fibre ottiche

In un sistema di trasmissione a fibre ottiche, come schematicamente rappresentato in **figura 1**, vi sono diverse cause che possono provocare l'attenuazione (diminuzione di potenza) del segnale ottico emesso dal LED del trasmettitore fino a quando esso non viene assorbito dal rilevatore in ricezione.

Una prima analisi del problema porta a individuare le seguenti zone in cui si può verificare una attenuazione:

- lungo la fibra;
- nelle connessioni fra due fibre;
- nell'accoppiamento fra sorgente e fibra;
- nell'accoppiamento tra fibra e rilevatore.

Attenuazione
nella fibra

Le principali cause che provocano attenuazione in una fibra sono:

- impurezze nel core;
- fenomeni di scattering;
- curvatura della fibra;
- imperfezioni sulla superficie di separazione core-cladding.

Le **impurezze nel core** della fibra possono essere costituite da ioni metallici che assorbono radiazioni e ogni ione presenta un picco di assorbimento intorno a una certa lunghezza d'onda. I più comuni ioni e le relative lunghezze d'onda sono: Ni^{++} con $\lambda = 690$ nm; Mn^{+++} con $\lambda = 550$ nm; Cr^{+++} con $\lambda = 650$ nm.

A titolo di esempio ricordiamo che una fibra ottica con attenuazione di 1 dB/km deve avere una purezza pari a 2,5 parti su 10^9 per gli ioni Cu^{+++} , di 1 parte su 10^9 per gli ioni Fe^{+++} e Cr^{+++} .

L'esempio serve a dare un'idea del grado di purezza richiesto ai materiali usati per la costruzione delle fibre ottiche.

Un altro ione particolarmente nocivo è l'ossidrile OH^- che presenta due picchi di assorbimento; uno a 970 nm e l'altro a 750 nm, valori che appartengono alla gamma di trasmissione di molte fibre.

Lo **scattering** è una dispersione del raggio luminoso dovuta a fenomeni di diffusione che nascono a causa di disomogeneità del materiale con cui è realizzato il core. Queste disomogeneità possono essere costituite da particelle estranee, da bolle d'aria, da piccoli cristalli (ricordiamo che il vetro non è un cristallo ma un liquido ad altissima viscosità) ecc. Queste disomogeneità possono essere ridotte affinando il processo di produzione. Ne esistono, tuttavia, altre sulle quali è impossibile intervenire e che costituiscono un limite insuperabile alla riduzione dell'attenuazione. Queste disomogeneità, che producono il cosiddetto **scattering di Rayleigh**, sono le fluttuazioni locali dell'indice di rifrazione che avvengono su distanze inferiori alla lunghezza d'onda della luce. Queste fluttuazioni possono essere dovute alla variazione della temperatura e a cambiamenti nella composizione del vetro, che, essendo un liquido, tende a modificare continuamente la sua struttura.

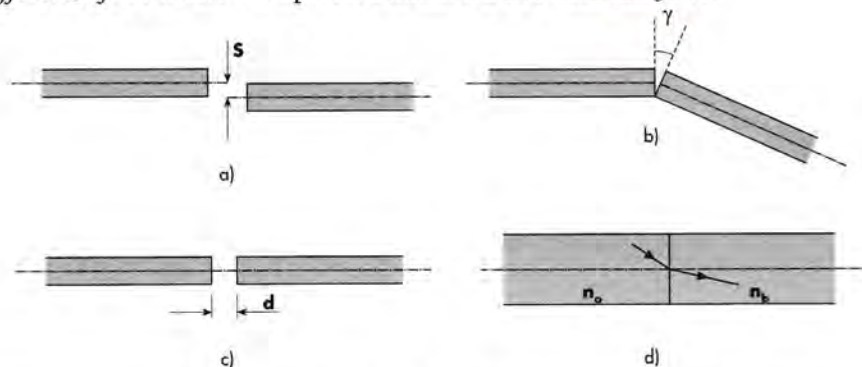
La **curvatura della fibra** può essere causa di attenuazione in quanto alcuni raggi che incidono con un angolo di poco inferiore all'angolo di accettazione possono subire una parziale rifrazione invece della totale riflessione nelle zone di curvatura. Le perdite per curvatura aumentano esponenzialmente col diminuire del raggio di curvatura: anche piccole variazioni della curvatura producono elevate variazioni della attenuazione.

L'attenuazione sulle connessioni può essere attribuita alle seguenti cause:

- spostamento laterale degli assi (**figura 6a**);
- spostamento angolare degli assi (**figura 6b**);
- separazione delle estremità delle due fibre (**figura 6c**);
- differenza dell'indice di rifrazione fra le fibre e il materiale che le separa (questa attenuazione può essere ridotta utilizzando un opportuno materiale di adattamento);
- differenza fra gli indici di rifrazione delle due fibre (**figura 6d**);
- differenza fra i valori dell'apertura numerica NA delle due fibre.

Attenuazione
sulle connessioni

Figura 6
Attenuazione
sulle giunture
di fibre ottiche



Attenuazione
sull'ingresso
della fibra

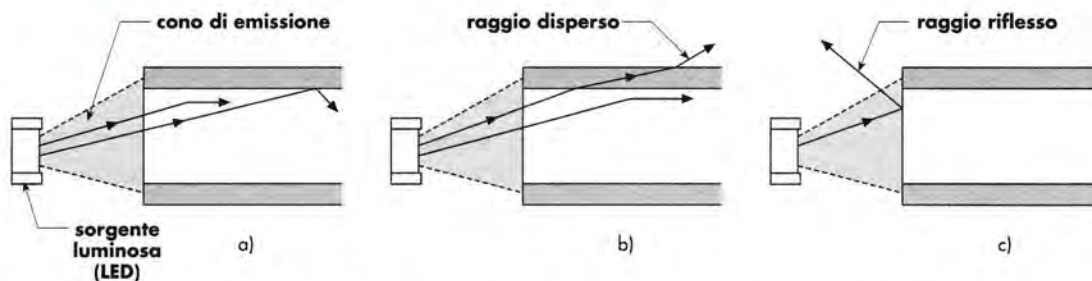
Il punto di connessione fra sorgente e fibra ottica è, in genere, una zona con forti perdite e quindi con elevata attenuazione. Le perdite sono dovute al fatto che la sorgente emette luce in molte direzioni, sulla base del relativo diagramma di emissione o curva fotometrica, mentre la radiazione che si propaga nella fibra è solo quella compresa nel cono di accettazione.

Le cause di **attenuazione all'ingresso della fibra** sono principalmente tre:

- della luce emessa dalla sorgente solo una parte colpisce il core della fibra (**figura 7a**);
- dei raggi che incidono sulla sezione del core solo quelli aventi inclinazione inferiore all'angolo di accettazione vengono trasmessi regolarmente, gli altri si disperdono (**figura 7b**);
- una parte della luce che colpisce il core viene riflessa e non entra nella fibra (**figura 7c**).

Figura 7

Attenuazione all'ingresso di una fibra ottica



L'attenuazione di accoppiamento fra sorgente e fibra dipende fortemente dal tipo di sorgente utilizzata (LED o laser).

I risultati migliori si ottengono con il laser in quanto la luce emessa è convogliata in un cono con angolo quasi nullo.

L'attenuazione sull'accoppiamento tra fibra e rivelatore è, in genere, molto bassa in quanto quasi tutta la radiazione che fuoriesce dalla fibra viene catturata dal sensore.

Attenuazione
all'uscita della
fibra

3 Dispersione nelle fibre ottiche

Il segnale luminoso trasmesso attraverso una fibra ottica è quasi sempre una sequenza di impulsi luminosi di durata molto breve.



La **dispersione in una fibra** consiste nel fatto che l'impulso in ricezione ha una durata superiore a quella dell'impulso trasmesso.

Vi sono due tipi di dispersione:

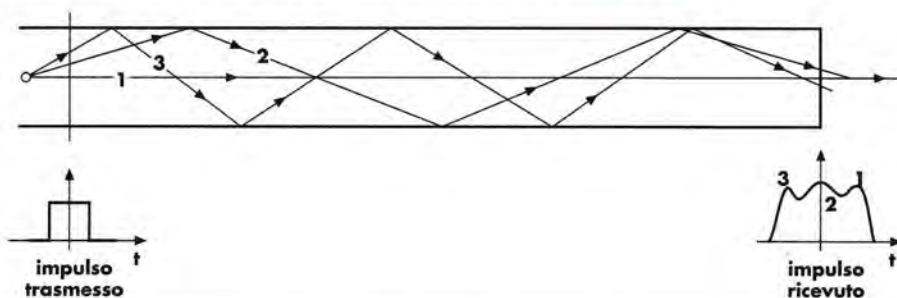
- la *dispersione modale*;
- la *dispersione cromatica*.

Dispersione
modale

Per capire il fenomeno della **dispersione modale** analizziamo come si propaga l'impulso luminoso lungo la fibra facendo riferimento alla **figura 8**.

Figura 8

Dispersione modale



Se consideriamo l'impulso luminoso trasmesso, notiamo che esso è costituito da un gran numero di raggi che incidono sulla fibra con inclinazione diversa anche se compresi nell'angolo di accettazione. Nella **figura 8** ne sono stati indicati tre. Il primo si propaga lungo l'asse della fibra, il secondo e il terzo si propagano guidati dal core mediante riflessioni successive. Analizzando il percorso dei vari raggi si scopre facilmente che il primo raggio ha il percorso più breve mentre gli altri raggi hanno percorsi sempre più lunghi e poiché la velocità è uguale per tutti, essi giungono all'estremità opposta in tempi sempre maggiori. Da ciò deriva che la durata dell'impulso luminoso in arrivo è maggiore ed è pari alla durata dell'impulso trasmesso più il tempo di ritardo fra il

raggio a percorso minore e quello a percorso più lungo. Infatti l'impulso in arrivo è dato dalla sequenza dei vari raggi che arrivano in tempi diversi. La durata dell'impulso in ricezione è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza della fibra, poiché, con l'aumentare di essa, aumenta la differenza dei percorsi e quindi il tempo di ritardo fra il primo raggio e l'ultimo. La presenza di diversi raggi che si muovono nella fibra seguendo percorsi diversi viene denominato **comportamento multimodale** della fibra. La **dispersione modale** τ_m rappresenta il ritardo fra i diversi modi di propagazione e si misura in ns/km. Essa può essere ricavata mediante la relazione

$$\tau_m = \frac{L \cdot n_1}{c} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

6

in cui L è la lunghezza della fibra e c la velocità della luce.

Una forte diminuzione della dispersione modale si ottiene nelle:

- fibre monomodo;
- fibre a profilo d'indice graduale (*graded index*).

Fibre monomodo

Le **fibre monomodo** sono quelle che hanno un diametro del core molto piccolo (inferiore a $6 \mu\text{m}$) e una apertura numerica molto piccola ($NA = 0,1$), contro un diametro del core di circa $100 \mu\text{m}$ e un $NA = 0,25$ di una fibra multimodale. Pertanto esse accettano, praticamente, solo il raggio che si propaga lungo l'asse denominato *low order mode ray*, e quindi la propagazione al suo interno avviene in un solo modo (monomodo). Grazie alla presenza di un solo modo di propagazione, queste fibre sono prive di dispersione modale, per cui la durata dell'impulso ricevuto è quasi uguale alla durata dell'impulso trasmesso (figura 9).

Fibre graded index

Nelle fibre esaminate in precedenza il valore dell'indice di rifrazione è costante su tutta la sezione del core e subisce una brusca variazione passando dal core al cladding. Per questo motivo esse vengono denominate fibre *step index* (figura 10a).

Le **fibre graded index** sono caratterizzate dal fatto che l'indice di rifrazione, invece di essere costante su tutta la sezione del core, varia gradualmente passando dal suo centro alla periferia. Normalmente il profilo è di tipo parabolico e il valore dell'indice di rifrazione è massimo al centro e minimo ai bordi, come si può vedere in figura 10b.

Figura 9
Trasmissione monomodo

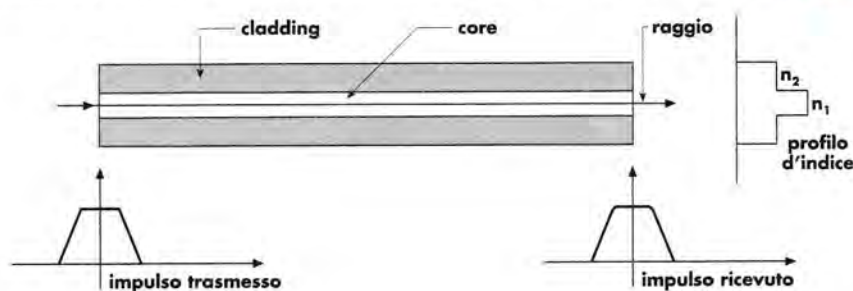
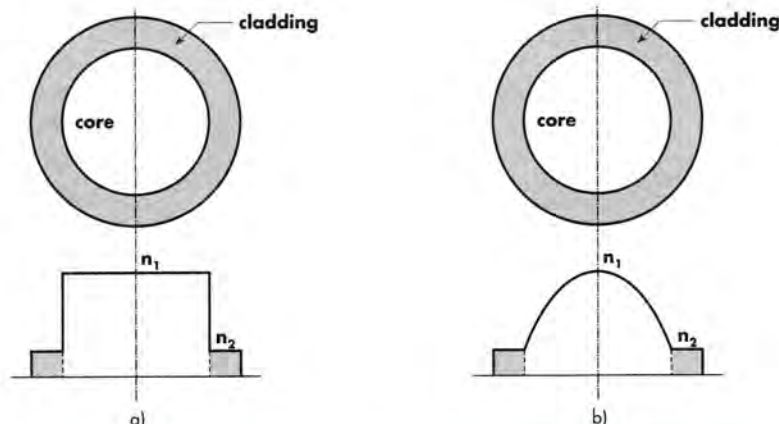
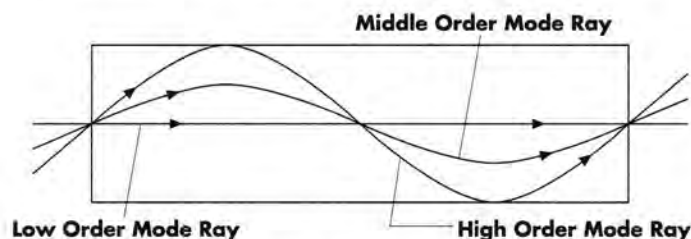


Figura 10
Fibra multimodo step index (a);
fibra graded index (b)



Modi di propagazione

Figura 11
Propagazione dei raggi in una fibra graded index



Il Low Order Mode Ray si muove lungo l'asse della fibra dove l'indice di rifrazione è massimo e, conseguentemente, la velocità è minima. Questo raggio compie il percorso più corto ma ha la velocità minore; gli altri raggi hanno percorsi più lunghi ma si muovono con velocità maggiori.

Grazie alla graduale variazione dell'indice di rifrazione i percorsi più lunghi vengono effettuati con velocità più elevate consentendo a tutti i raggi di raggiungere il ricevitore quasi contemporaneamente e ottenendo una forte diminuzione della dispersione modale.



La **dispersione cromatica** nasce dal fatto che la luce prodotta dalla sorgente non è mai monocromatica ma contiene radiazioni con diverse lunghezze d'onda; ognuna delle quali si propaga in modo diverso all'interno della fibra.

Dispersione cromatica

La dispersione cromatica è costituita da due componenti:

- la **dispersione cromatica da materiale**;
- la **dispersione cromatica da guida**.

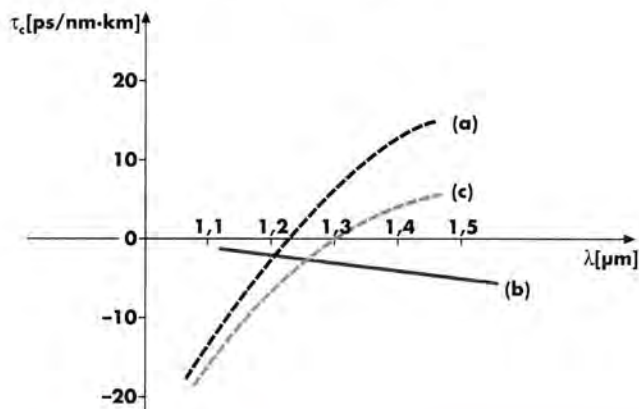
La **dispersione cromatica da materiale** nasce perché il materiale si comporta con un indice di rifrazione diverso per ogni lunghezza d'onda, per cui le diverse componenti cromatiche si muovono con velocità differente.

La **dispersione cromatica da guida** nasce dal fatto che all'interno della fibra vi possono essere diversi modi di propagazione per le diverse componenti cromatiche.

Le due componenti di dispersione cromatica variano, al variare della lunghezza d'onda, come indicato in **figura 12**.

Si nota che la dispersione da materiale (curva a) aumenta con l'aumentare della lunghezza d'onda, mentre la dispersione da guida (curva b) diminuisce con l'aumentare della lunghezza d'onda, per cui in parte si compensano.

Figura 12
Dispersione cromatica: da materiale (a); da guida (b); complessiva (c)



Banda passante

Il fenomeno della dispersione influenza negativamente la banda passante. Abbiamo visto che la dispersione produce un allargamento temporale dell'impulso ricevuto T_{HR} (tempo di livello alto del segnale ricevuto) rispetto a quello dell'impulso trasmesso T_{HT} .

Indichiamo con $\Delta t = T_{HR} - T_{HT}$ l'allargamento provocato dalla dispersione e con T_{LT} la distanza temporale fra due impulsi trasmessi; cioè il tempo di livello basso del segnale trasmesso. Allora possiamo notare che se $\Delta t > T_{LT}$ si produce, in ricezione, un accavallamento fra i due impulsi consecutivi; fenomeno che prende il nome di **interferenza intersimbolica**. Ciò produce una limitazione sulla frequenza massima dei segnali che possono essere trasmessi con la fibra ottica. Se consideriamo una fibra lunga 1 km la **banda passante** per unità di lunghezza si ricava mediante la formula seguente:

$$B = \frac{0,44}{\Delta t} \quad 7$$

In cui:

B = banda passante di 1 km di fibra espressa in [MHz · km]

Δt = allargamento temporale dell'impulso ricevuto dopo 1 km espresso in [μs].

Il fenomeno della dispersione aumenta con l'aumentare del percorso effettuato dalla luce; ne consegue che l'allargamento dell'impulso ricevuto aumenta con l'aumentare della lunghezza L della fibra. Pertanto la banda passante di una fibra di lunghezza L diminuisce con l'aumentare della lunghezza, come indicato dalla formula seguente:

$$B_L = \frac{0,44}{\Delta t \cdot L} \quad 8$$

esempio

- 1** Una fibra ottica lunga 1 km produce un allargamento temporale dell'impulso pari a 3 ns/km pertanto ha una banda passante $B = \frac{0,44}{3 \cdot 10^{-3}} = 146,7 \text{ MHz} \cdot \text{km}$. Lo stesso tipo di fibra, se lunga 2 km avrebbe una banda passante dimezzata, cioè $B_L = \frac{0,44}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 73,35 \text{ MHz}$.

Confronto tra fibre ottiche

Le fibre ottiche vengono classificate mediante due numeri che indicano, rispettivamente, il diametro del core e il diametro del cladding. La tabella 1 riporta i principali parametri di alcune fibre molto utilizzate.

Tabella 1

Tipo di fibra	Monomodale 9/125	Multimodo 50/125	Multimodo 62,5/125	Multimodo 100/140	
Diametro del core	9,5±0,5	50±3,0	62,5±3,0	100±5,0	μm
Diametro del cladding	125±3,0	125±3,0	125±2,0	140±3,0	μm
Diametro esterno	250±15,0	250±15,0	250±15,0	250±15,0	μm
Diametro rivestimento	900±100	900±100	900±100	900±100	μm
Apertura numerica	0,11	0,2±0,02	0,275±0,015	0,28±0,030	μm
Attenuazione a 850 nm	–	2,8	3,5	5	dB/km
Attenuazione a 1330 nm	0,4	1,0	1,0	3	dB/km
Attenuazione a 1550 nm	0,2	–	–	–	dB/km
Banda passante 850 nm	–	400	160	160	MHz · km
Banda passante a 1330 nm	–	800	500	200	MHz · km
Dispersione cromatica a 1330 nm	3,5				ps/(nm · km)
Dispersione cromatica a 1550 nm	20				ps/(nm · km)

4 La fabbricazione delle fibre ottiche

I materiali utilizzabili per la fabbricazione delle fibre ottiche devono avere caratteristiche ottiche, fisiche e geometriche idonee per una fibra ottica. Fra queste caratteristiche rivestono particolare importanza:

- la trasparenza;
- l'omogeneità;
- l'assenza di impurezze che producono attenuazione;
- l'uniformità del diametro del core e del cladding;
- la duttilità (possibilità di ottenere fili sottilissimi).

I materiali usati per la fabbricazione delle fibre ottiche sono:

- i polimeri;
- i vetri.

Fibre di polimeri

Le fibre realizzate con polimeri sono di basso costo e di qualità scadente. Sono utilizzate per distanze brevi ($10 \div 20$ m) e per velocità inferiori a 10 Mbit/s. Queste fibre vengono usate moltissimo per il trasporto della luce da sorgenti remote a pannelli di comando, indicatori d'immagine ecc.

Fibre di vetro

Le fibre di buona qualità utilizzate per la trasmissione di segnali ad alta velocità sono realizzate in vetri ossidi. I più utilizzati sono:

- la silice, SiO_2 ;
- il borosilicato di sodio, $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}_3$;
- il silicato di piombo.

Questi ultimi sono interessanti perché consentono di avere una variazione dell'indice di rifrazione fra core e cladding piuttosto elevato (da 1,5 a 1,65) e quindi una elevata apertura numerica; inoltre richiedono processi produttivi poco costosi.

Le fibre di alta qualità utilizzano silice pura e richiedono processi costruttivi complessi e costosi. Durante i processi di fabbricazione è importante evitare la contaminazione del materiale sia da parte del crogiolo che lo contiene sia da parte dell'ambiente.

Metodi di fabbricazione

I metodi più utilizzati per la fabbricazione delle fibre ottiche in vetro sono:

- il metodo del doppio crogiolo;
- il metodo CVD (*Chemical Vapour Deposition*) della deposizione chimica in fase di vapore.

Il metodo del **doppio crogiolo** può essere suddiviso in due fasi:

- formazione delle barre di vetro;
- filatura o tiraggio (*pulling*) della fibra ottica.

Nella prima fase i componenti che dovranno costituire il vetro vengono ridotti in polvere e miscelati nella opportuna dose. Ad esempio, il vetro destinato al core avrà una composizione diversa da quello destinato al cladding. Le polveri vengono mescolate, fuse e rese omogenee prima di effettuare l'operazione di tiraggio col quale vengono prodotte le barre. Questa operazione, schematizzata in **figura 13a**, consiste nell'immergere una barra seme nel vetro fuso e poi tirarla verso l'alto. In questo modo si ottengono barre con diametro di $5 \div 10$ mm e lunghezza di qualche metro. Le barre così ottenute vengono immagazzinate, proteggendole entro tubi di silice, in attesa di essere utilizzate per la fase successiva.

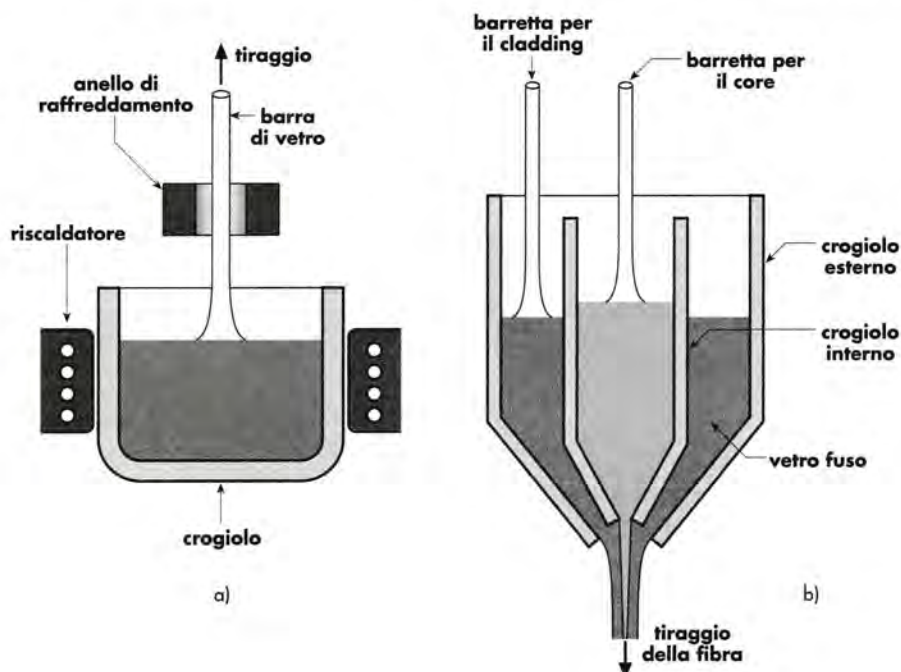
La realizzazione della fibra viene effettuata fondendo in due crogioli concentrici due barre secondo lo schema riportato in **figura 13b**.

Nel crogiolo interno viene fusa la barra che ha la composizione idonea alla realizzazione

del core; mentre nel crogiolo esterno viene fuso il vetro che formerà il cladding. I due crogioli, contenenti i due tipi di vetro, terminano nella parte inferiore con due ugelli perfettamente concentrici. Dall'ugello centrale fuoriesce il vetro del core e viene avvolto da uno strato del vetro contenuto nel crogiolo esterno e che costituirà il cladding. Questa tecnica fornisce buoni risultati per la fabbricazione di fibre con indice di rifrazione a gradino (step-index) e richiede molta precisione e cura in tutte le varie fasi; inoltre comporta un elevato rischio di contaminazione da parte dei crogioli e dell'aria.

Figura 13

Metodo del doppio crogiolo: produzione delle barrette di vetro (a); tiraggio della fibra (b)

**Metodo CVD**

Il **metodo CVD** consiste nella formazione di una serie di strati sovrapposti di vetro utilizzando materiale allo stato di vapore. Gli strati vengono realizzati su un supporto e poi vengono separati da esso ottenendo una barra denominata preform. Questo metodo può essere realizzato con una delle seguenti tecniche:

- IVPO: *Inside Vapour Phase Oxidation*;
- OVPO: *Outside Vapour Phase Oxidation*.

Nella **tecnica IVPO** si utilizza, come supporto, un tubo di vetro all'interno del quale viene iniettato vapore di vetro, come indicato in **figura 14a**. Il tubo di vetro che funge da supporto viene riscaldato esternamente con un riscaldatore che si muove alternativamente a destra e a sinistra.

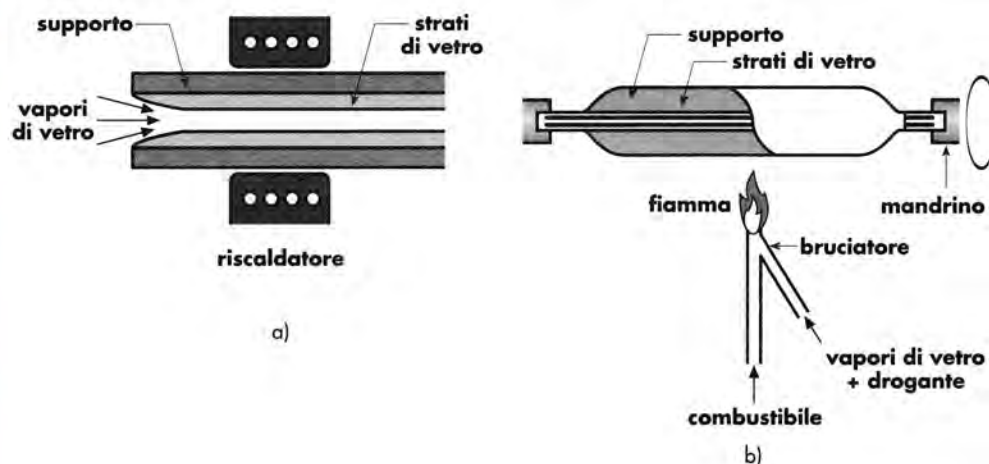
Il vetro iniettato nel tubo lambisce le sue pareti e vi si attacca grazie all'azione del riscaldatore. Lo strato assume uno spessore tanto più grande quanto maggiore è il tempo. È possibile modificare la composizione del vapore di vetro per realizzare strati con differente indice di rifrazione. Per aumentare l'indice di rifrazione si aggiunge alla silice pura ossido di fosforo (P_2O_5) oppure ossido di germanio (GeO_2); per diminuirlo si aggiunge ossido di boro (B_2O_3).

Variando opportunamente la composizione si possono realizzare strati sovrapposti con indice di rifrazione che varia gradualmente. È possibile realizzare $80 \div 100$ strati fino a raggiungere uno spessore di circa 1 mm.

I primi strati saranno a indice di rifrazione basso per formare il cladding; i successivi saranno con indice di rifrazione crescente per formare il core. Quando la stratificazione

è abbastanza spessa da essere vicini alla strozzatura viene aumentata la temperatura aumentando la quantità di calore fornita dal riscaldatore. In questo modo viene provocato il collasso del materiale stratificato che si stacca dal tubo di supporto costituendo una barra che viene sfilata; inoltre l'aumento di volume degli strati produce una forte diminuzione del foro interno fino a farlo quasi scomparire. La barra di vetro ottenuta viene denominata *preform*. Da essa verrà ottenuta la fibra mediante una successiva operazione di tiraggio.

Figura 14
Metodo CVD:
tecnica IVPO
(a); tecnica
OVPO (b)



La **tecnica OVPO** consiste nel depositare esternamente, su una barretta di allumina, strati di vetro sovrapposti.

Il procedimento è rappresentato schematicamente in **figura 14b**.

La barretta di allumina, sostenuta da due mandrini, viene posta in rotazione; in un bruciatore a metano vengono immessi, oltre al combustibile, vapori di SiCl_4 , GeCl_4 , BCl_3 . Nella combustione questi vapori si trasformano chimicamente in SiO_2 , GeO_2 , B_2O_3 formando il vapore di vetro. Questo si deposita sulla barretta dando luogo allo strato vetroso.

La rotazione del supporto e il movimento longitudinale alternativo del bruciatore consentono di realizzare strati uniformi su tutta la barretta. Variando la composizione del vapore è possibile cambiare l'indice di rifrazione dello strato vetroso in formazione. Questa tecnica, concettualmente simile a quella IVPO, comporta un maggiore rischio di contaminazione a opera di prodotti della combustione, di cui il più pericoloso è il gruppo ossidrilico OH^- .

Quando lo spessore è sufficientemente elevato, viene sfilata la barretta di supporto portando a collasso lo spessore vetroso.

Il preform così ottenuto viene sottoposto a un trattamento di purificazione per eliminare le impurezze contenute, di cui la più dannosa e diffusa è il radicale OH^- .

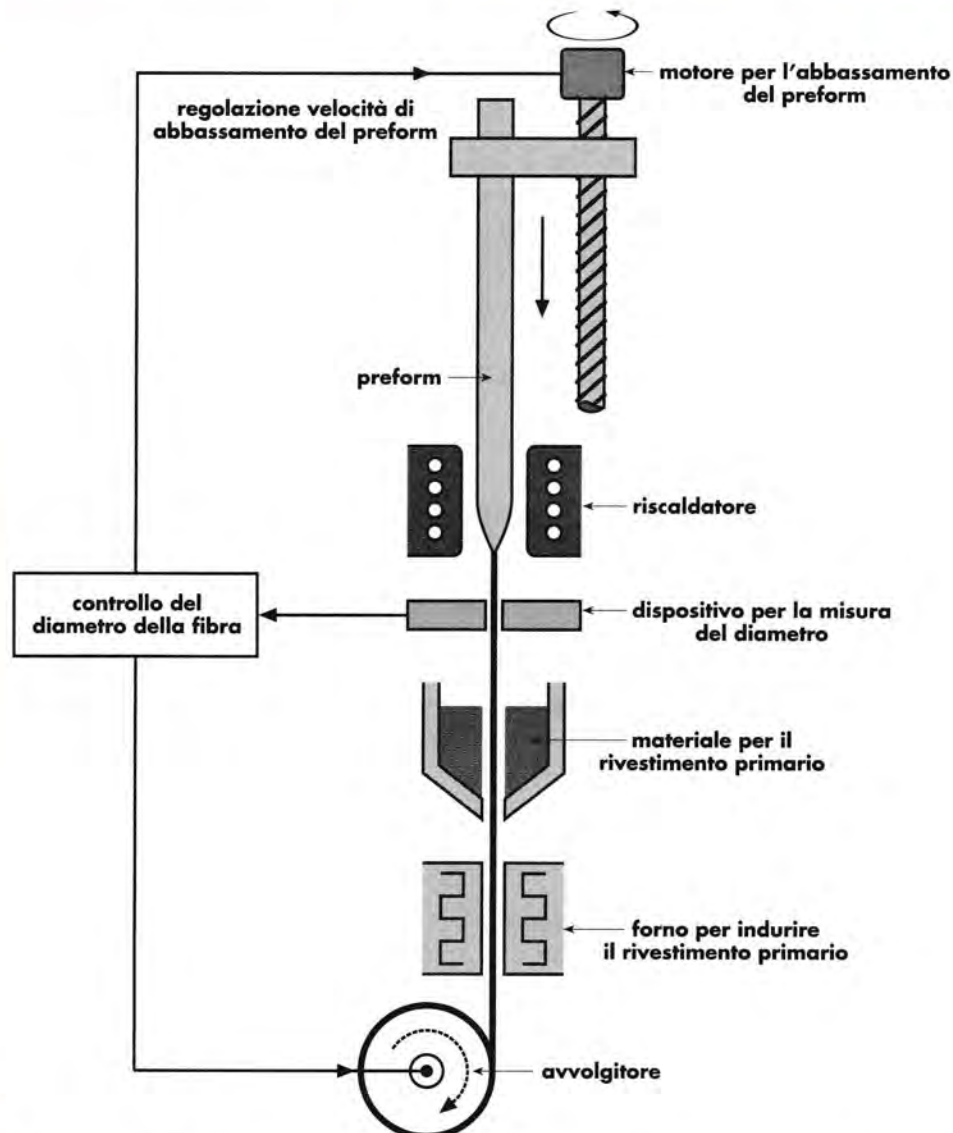
Il preform ottenuto con una delle tecniche precedenti viene sottoposto a tiraggio (*fiber pulling*) per ottenere la fibra.

Il processo è schematizzato in **figura 15**.

Il preform, passando in un riscaldatore, viene portato alla temperatura di 2000°C per conferirgli una adeguata viscosità e viene tirato verso il basso in modo da ridurlo in un filo sottilissimo che rappresenta la fibra. Questa passa attraverso un crogiolo che contiene un materiale fuso che serve a realizzare il rivestimento primario. Questo viene poi indurito facendolo passare in un forno. Infine la fibra viene avvolta su un avvolgitore a velocità controllata, il cui diametro dell'avvolgitore deve essere sufficientemente grande per impedire il danneggiamento della fibra (una piegatura eccessiva può produrre fratture che ne compromettono il funzionamento).

**Tiraggio della
fibra**

Figura 15
Impianto per il
tiraggio della
fibra



Il diametro della fibra è sottoposto continuamente a verifica dimensionale attraverso un sistema di controllo che agisce sulla velocità di discesa del preform e su quella di rotazione dell'avvolgitore, regolandoli opportunamente per ottenere un diametro costante.

5 Cavi a fibre ottiche

Le dimensioni di una fibra sono talmente piccole e la fibra talmente fragile da renderne impossibile l'utilizzo senza opportuni accorgimenti atti ad aumentarne la resistenza meccanica e la maneggevolezza. Esiste in commercio una vasta gamma di cavi per fibre ottiche, contenenti una o più fibre rivestite in modo da assumere una adeguata dimensione e una sufficiente resistenza meccanica, assolutamente necessarie per la loro manipolazione e per la posa del cavo. La **figura 16** riporta due esempi di cavo in fibra ottica per trasmissioni a distanza.

Il rivestimento della singola fibra può essere di due tipi:

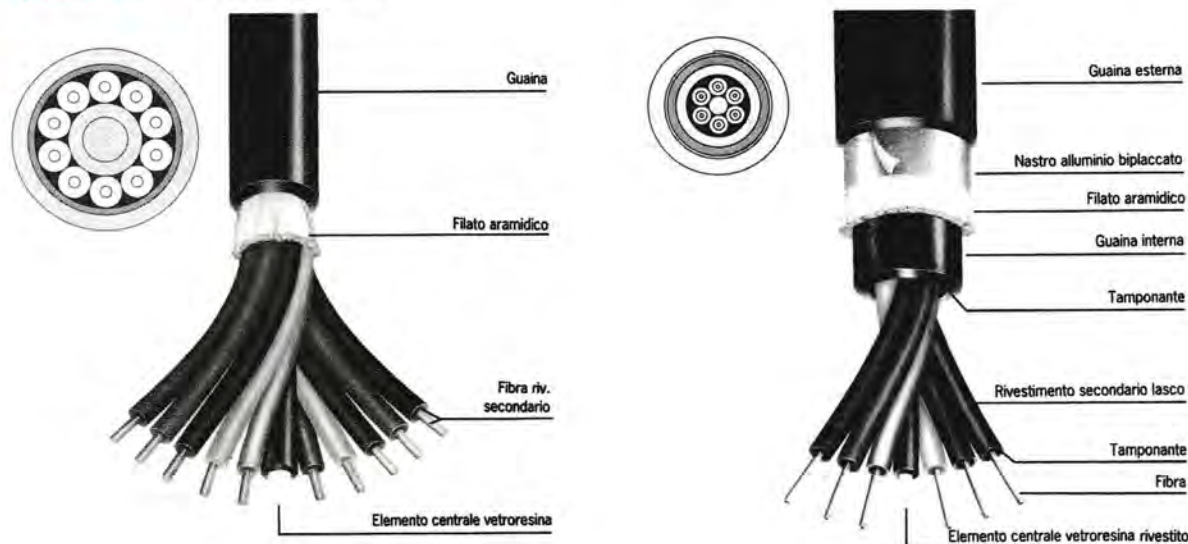
- *lasco* (loose);
- *aderente* (tight).

Nel caso del rivestimento lasco un tubetto di materiale plastico contiene una o più fibre che sono libere di scorrere al suo interno; il tubetto viene poi riempito di gel tixotropico che ha la funzione di impedire l'ingresso di acqua e agevolare il movimento delle fibre nei casi di allungamento del cavo durante la posa o durante l'esercizio.

Nei cavi in cui le fibre hanno un rivestimento aderente, la fibra è protetta da un rivestimento in silicone (fino al diametro di 0,4 mm) più un ulteriore strato di materiale resistente tipo nylon fino a 0,9 mm.

Figura 16

Cavi in fibre ottiche



Le fibre con rivestimento aderente possono essere cordate direttamente fra di loro o protette singolarmente con kevlar e con una sottile guaina di termoplastica. Quando siano previsti carichi di tiro molto elevati durante la posa, viene inserito nel cavo un rinforzo rigido, generalmente non metallico, in vetro poliestere intorno al quale vengono cordate le fibre. Nel caso dei cavi da interrare o quando sia necessaria una protezione contro i roditori, viene applicata sotto la guaina un'armatura metallica o in materiale dielettrico duro. Il rivestimento dei cavi viene realizzato con materiali vari come: PVC, poliuretano, polietilene, kevlar ecc.

Lo sviluppo della tecnologia e delle conoscenze ha ridotto negli ultimi anni il costo dei sistemi di trasmissione in fibra ottica in modo da consentire una sempre maggiore utilizzazione di questo mezzo trasmissivo. In figura 17 è riportato un esempio di cavo in fibra ottica per brevi distanze.

Fibre ottiche per piccole distanze

Figura 17

Fibra ottica per collegamenti corti

Cavetti ottici con fibra ottica da 200 μm e connettori



Fibre in silice (PCS) ricoperta di materiale plastico con un filo dal diametro di 200 μm , un indice di rifrazione a gradini ed un'apertura numerica della fibra di 0,27.

Attenuazione (820 nm) 7 dB/km nom, 10 dB/km max. Larghezza di banda 25 MHz/km. **Nota:** i cavetti ottici sono stati studiati per un funzionamento da 800 ad 880 nm. Al di fuori di queste lunghezze d'onda l'attenuazione aumenta sensibilmente e non è più specificata. La fibra ottica e gli elementi Kevlar® sono ricoperti da una guaina in PVC con un diametro esterno totale di 4,8 mm nominali. Ciascuna estremità è dotata di connettore SMA da 9 mm (MIL-S-1853). Questi cavetti di collegamento sono disponibili in varie lunghezze e possono essere collegati l'un con l'altro mediante il connettore in linea RS. Il campo di temperatura di esercizio va da -15°C a +50°C. Il raggio minimo di piegatura è di 50 mm, la massima resistenza alla trazione ammessa è di 300 N. Materiale del connettore: ottone nichelato. La massima attenuazione in linea è di 2 dB per connettore.

Avvertenza: non superare il raggio di piegatura minimo stabilito.

6 Componenti attivi per fibre ottiche

Il segnale che si propaga in una fibra ottica è di tipo luminoso, o meglio è una radiazione elettromagnetica appartenente al vicino infrarosso o al visibile. Il segnale in questione è originariamente di tipo elettrico costituito da un impulso di tensione, generalmente compatibile TTL; pertanto è necessario convertire l'impulso elettrico in impulso luminoso.

A tale scopo vengono utilizzati opportuni LED aventi caratteristiche ottiche e geometriche idonee, oppure i laser a semiconduttore.

In ricezione si presenta il problema inverso per cui è necessario convertire l'impulso luminoso in impulso elettrico affinché esso possa essere riconosciuto ed elaborato dall'apparecchiatura elettrica che costituisce il ricevitore. A tale scopo vengono utilizzati sensori ottici che possono essere fotodiodi a struttura PIN o circuiti integrati Integrated Detector Preamplifier (IDP) che, oltre a contenere il fotodiodo, ne amplificano il segnale. I LED per fibre ottiche hanno caratteristiche ottiche e geometriche diverse rispetto a quelli destinati alla visualizzazione di immagini o alla costruzione di display.

I più importanti parametri di un LED per fibre ottiche sono:

- *potenza luminosa emessa (output power);*
- *curva di emissione;*
- *lunghezza d'onda della radiazione emessa (wavelength);*
- *velocità di commutazione.*

La **potenza luminosa emessa** è un fattore sul quale i costruttori concentrano molti sforzi di ricerca per aumentare l'efficienza e ottenere potenze luminose elevate, convertendo la maggior parte della potenza elettrica in potenza luminosa ed evitando la produzione di calore che creerebbe problemi di dissipazione.

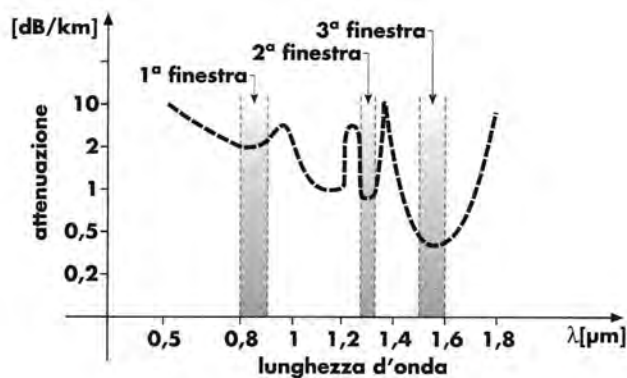
La **curva di emissione** deve essere tale da consentire al LED di emettere la sua luce entro un cono molto stretto, in modo da essere ricevuto totalmente dalla fibra. In tal senso è opportuno ricordare che il diametro del core di una fibra varia da 50 μm a 100 μm e quindi la luce proveniente dal LED deve essere contenuta in un fascio di diametro inferiore a quello del core. Pertanto può avvenire che un LED da 100 μW possa dare risultati migliori rispetto a uno di potenza molto maggiore (5 mW) ma con una curva di emissione meno direttiva.

La **lunghezza d'onda** della luce emessa risulta molto importante in considerazione del fatto che una fibra ottica produce attenuazioni diverse a lunghezze d'onda diverse, come si può notare in **figura 18**, in cui è riportato l'andamento della attenuazione al variare della lunghezza d'onda. In essa si nota la presenza di tre finestre con minima attenuazione alle lunghezze d'onda:

- $\lambda = 850 \text{ nm}$;
- $\lambda = 1330 \text{ nm}$;
- $\lambda = 1550 \text{ nm}$.

LED per fibre
ottiche

Figura 18
Risposta
spettrale di
una fibra
ottica



Pertanto è opportuno che il LED in trasmissione abbia la massima emissione a una delle suddette lunghezze d'onda.

La **velocità di commutazione** è influenzata dai tempi di *turn ON* e di *turn OFF* del diodo, per cui il componente deve avere velocità di commutazione abbastanza elevate per passare dallo stato di acceso a quello di spento, e viceversa, in tempi inferiori al periodo degli impulsi che rappresentano un bit di informazione da trasmettere.

Ad esempio, un sistema di trasmissione che lavori a 20 MHz non può utilizzare un diodo con tempi di ritardo di 100 ns. In genere la banda si ottiene dividendo 0,35 per il tempo di ritardo e, nel nostro caso, si ottiene 3,5 MHz.

LED per fibre ottiche

I LED per fibre ottiche vengono realizzati con procedure diverse rispetto agli altri tipi di LED in quanto è necessario che la luce venga emessa attraverso una superficie molto piccola e avente dimensioni confrontabili con quelle del core della fibra da accoppiare. Le più comuni strutture interne dei LED per fibre ottiche sono:

- eterogiunzione planare;
- Burrus;
- edge-emitting.

Eterogiunzione planare

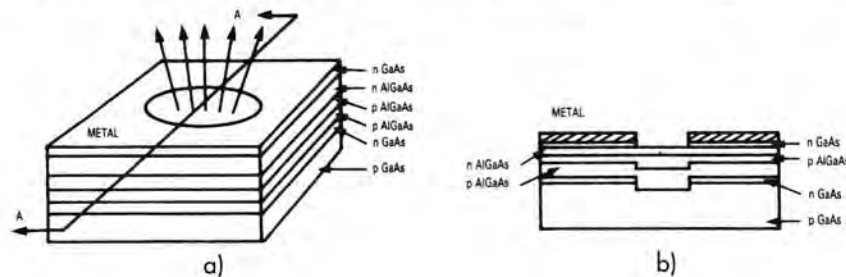
La struttura **eterogiunzione planare** è riportata in **figura 19**.

In essa si nota, superiormente, un foro circolare realizzato nello strato metallico, dal quale esce la luce generata in uno degli strati sottostanti.

Nella **figura 19b** è riportata la sezione verticale del chip e consente una visione migliore della struttura interna.

Ricordiamo che la produzione di luce in un LED avviene grazie al passaggio di corrente attraverso una giunzione e che il semiconduttore utilizzato è l'arseniuro di gallio (GaAs). Per poter concentrare l'emissione di luce in una zona piccola si adotta la strategia di far passare la corrente attraverso una piccolissima parte dell'area della giunzione.

Figura 19
LED
eterogiunzione:
struttura
interna (a);
sezione (b)



La struttura di **figura 19** viene ottenuta partendo da un substrato drogato di tipo P sul quale vengono, successivamente, cresciuti epitassialmente tutti gli altri strati, ognuno dei quali assolve a una precisa funzione.

Sul substrato di tipo P, drogato con **zinco**, viene cresciuto uno strato di tipo N drogato con **tellurio** e in esso viene realizzato un foro circolare prima di procedere alla crescita dello strato successivo. La dimensione del foro rappresenta la dimensione della futura area emittente.

Il successivo strato di tipo P, drogato con alluminio (Al), ha una resistività molto alta e uno spessore molto piccolo. In questo modo, grazie alla esiguità dello spessore, è impedita la circolazione di corrente in senso orizzontale ed è facilitata quella in senso verticale, per cui la corrente proveniente dal substrato verrà concentrata nella parte centrale definita dal foro realizzato nello strato precedente.

Lo strato successivo di tipo P è caratterizzato da un gap di energia tale da emettere fotoni con $\lambda = 850 \text{ nm}$ corrispondente al tipo di radiazione che il LED dovrà emettere. Segue uno strato di tipo N che serve a formare la giunzione P-N sulla quale si innesceranno i fenomeni di fotoemissione.

Struttura Burrus

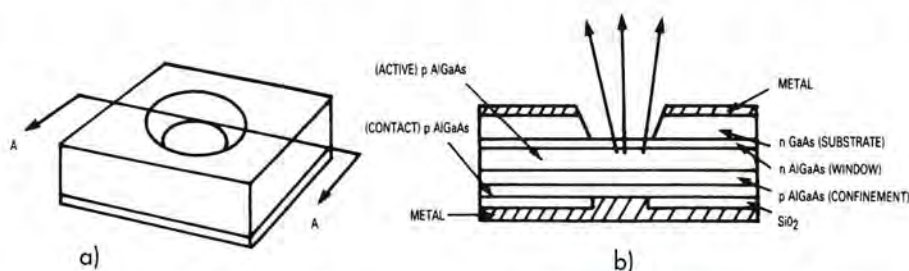
L'ultimo strato di tipo N, a forte drogaggio, serve a formare un contatto ohmico con il metallo ed evitare la formazione di un contatto rettificante. È da notare che quest'ultimo drogaggio è limitato alla superficie coperta dal metallo e non interessa il foro centrale dal quale viene emessa la luce prodotta dalla giunzione sottostante.

La struttura planare vista in precedenza consente di ridurre la superficie emittente per migliorare l'accoppiamento con la fibra ottica; tuttavia l'eccessiva concentrazione di corrente su una piccola area può provocare un eccessivo e pericoloso aumento della temperatura in prossimità della giunzione. Ciò, alla lunga, può provocare una diminuzione dell'efficienza e quindi una diminuzione della luce emessa.

Un miglioramento è ottenuto con la struttura a pozzo-inciso (*etched-well*) sviluppata nei laboratori della Bell a opera di Burrus e Dawson da cui il nome di **diodi Burrus**.

Figura 20

LED tipo Burrus:
struttura
interna (a);
sezione (b)



La struttura interna di un diodo Burrus è riportata in **figura 20**, nella quale si nota la presenza di un substrato di tipo N sul quale vengono cresciuti epitassialmente alcuni strati aventi le funzioni di confinamento (*confinement*), di produzione della luce (*active*) e di finestra (*window*) come nella struttura planare.

Successivamente viene cresciuto lo strato con funzione di contatto (*contact*), sul quale sarà realizzato uno strato di ossido di silicio.

Su questo strato verrà realizzato un piccolo foro che definirà le dimensioni dell'area emittente.

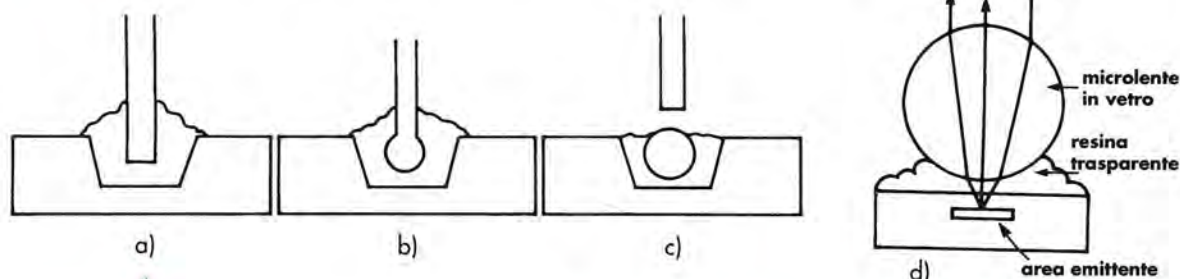
Il processo viene concluso realizzando sulla superficie opposta una incisione profonda quanto lo spessore del substrato fino a raggiungere lo strato con funzione di finestra (*window*). L'incisione deve essere perfettamente allineata con il foro realizzato nello strato di SiO_2 , in modo che la corrente proveniente dal foro attraversi la zona attiva confinata in un'area piccola e allineata con la fessura in alto da cui esce la radiazione.

La superficie emittente, sia nei diodi planari eterogiunzione sia nei diodi Burrus ha un comportamento *lambertiano*, cioè emette luce in tutte le direzioni. Vi sono diversi metodi per convogliare nella fibra la luce emessa da un diodo Burrus: la **figura 21** ne riporta alcuni. In essa si può notare come il pozzetto dal quale viene emessa la luce è riempito con una resina epossidica per eliminare l'aria (**figura 21a**); in altri casi viene interposta fra la superficie emittente e la fibra una piccola sfera di vetro con funzione di lente, la quale consente di convogliare verso la fibra tutti i raggi luminosi (**figure 21b, 21c e 21d**).

Uso di lenti

Figura 21

Accoppiamento di una fibra a un diodo Burrus: accoppiamento standard in resina epossidica (a); accoppiamento con sfera e resina (b); sfera in resina epossidica (c); effetto lente (d)

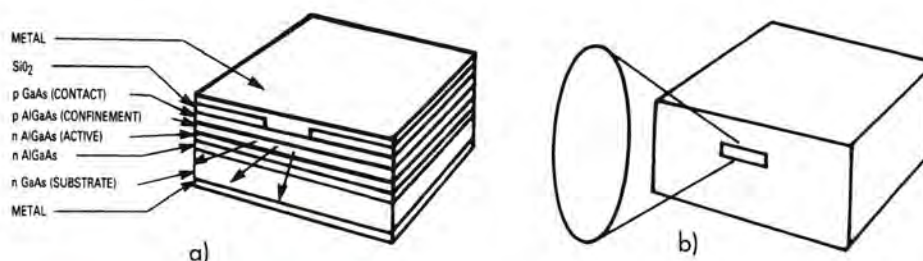


Struttura edge-emitting

Un miglioramento nell'allineamento dei raggi verso un'unica direzione si ottiene con i diodi a emissione laterale (*edge-emitting*).

La struttura di questi diodi è simile a quella dei diodi planari e Burrus, come si può vedere in **figura 22**; la differenza sostanziale è che l'emissione della luce avviene lateralmente attraverso una fessura estremamente piccola. Il comportamento di questi diodi è molto simile a quello dei laser a semiconduttore.

Figura 22
Diodo edge-emitting: struttura interna (a); cono di emissione (b)



7 Sensori per fibre ottiche

Fotodiodo

L'elemento essenziale di un sensore per fibre ottiche è il fotodiodo al quale è assegnato il compito di convertire l'impulso luminoso proveniente dalla fibra in impulso elettrico. Il fotodiodo va polarizzato inversamente e il suo comportamento è tale che quando non è colpito dalla luce consente un passaggio di corrente estremamente piccola (*dark current*); se invece è colpito dalla luce la corrente aumenta sensibilmente.

Per ottenere dei buoni risultati vengono, comunemente, adoperate le strutture PIN.

Sensori integrati preamplificati

La corrente fornita dal fotodiodo è, in genere, piuttosto piccola con valori che vanno da poche decine di [nA] a qualche decina di [μA]. Il segnale così ottenuto richiede una amplificazione che lo porti a livelli di tensione e di corrente compatibili con i circuiti integrati digitali che spesso sono di tipo TTL.

Per un approfondimento nell'analisi delle caratteristiche tecniche e funzionali di un sensore integrato per fibre ottiche si rimanda alla lettura del data sheet del sensore MFOD2404 disponibile in *Auladigitale*.

8 Utilizzazione delle fibre ottiche

Finestre di trasmissione

La scelta del tipo di fibra è, innanzitutto, legata alla lunghezza del collegamento. Per collegamenti brevi fino a 100 ÷ 150 m sono utilizzate le fibre multimodali mentre per collegamenti superiori a 200 m sono utilizzate le fibre monomodali. Le frequenze maggiormente utilizzate sono raggruppate in tre finestre che consentono le migliori condizioni rispetto all'attenuazione del segnale:

- **prima finestra:** $\lambda = 850 \text{ nm}$ (353 THz), usata soprattutto con economici laser a diodo per luce multimodale. Permette di realizzare collegamenti fino 275 m con fibre 62,5/125 (62,5 μm diametro del core e 125 μm diametro del cladding) oppure collegamenti di 550 m su fibre 50/125;
- **seconda finestra:** $\lambda = 1310 \text{ nm}$ (229 THz), usata con laser multimodali o monomodali. Permette di realizzare collegamenti di 5-10 km su fibre monomodali;
- **terza finestra:** $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (193,5 THz) usata con laser monomodali. Questa finestra permette di realizzare le distanze maggiori, con collegamenti fino 100 km con apparati relativamente economici. Sfruttando questa lunghezza d'onda, una buona fibra monomodale ha una attenuazione dell'ordine degli 0,2-0,25 dB/km.

Enti per la
standardizzazione

La standardizzazione delle caratteristiche geometriche, meccaniche e trasmissive delle fibre ottiche ha coinvolto diversi enti internazionali di cui il più importante è l'ITU (*International Telecommunication Union*) che ha emanato una serie di raccomandazioni elencate di seguito:

- ITU-T Recommendation G.650 (1997), *Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres*;
- ITU-T Recommendation G.652 (1997), *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*;
- ITU-T Recommendation G.654 (1997), *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable*;
- ITU-T Recommendation G.655 (1996), *Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*;
- ITU-T Recommendation G.955 (1996), *Digital line systems based on the 1544 kbit/s and the 2048 kbit/s hierarchy on optical fibre cables*;
- ITU-T Recommendation G.957 (1996), *Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*;
- ITU-T Recommendation G.681 (1996), *Functional characteristics of interoffice and long-haul line systems using optical amplifiers, including optical multiplexing*;
- ITU-T Recommendation G.663 (1996), *Application related aspects of optical amplifier devices and subsystems*;
- IEC Publication 793-2, Part 2 (1992), *Optical fibres – Part 2: Product specifications*.

Tecniche di
modulazione

Abbiamo visto che il segnale che si propaga in una fibra ottica è un raggio luminoso nello spettro infrarosso che funziona da *portante* cioè trasporta il segnale contenente l'informazione da trasmettere detto segnale *modulante*. Nella trasmissione a fibra ottica il segnale modulante è un treno di impulsi quindi contiene informazioni di tipo digitale. Viene utilizzata la **modulazione d'ampiezza** cioè ASK (*Amplitude Shift Keying*); per cui il segnale portante cambia continuamente da "acceso" 1 a "spento" 0.

Tecniche di
multiplexing

Per trasmettere più segnali modulanti con la stessa portante si può usare una delle seguenti tecniche di multiplexaggio: TDM, WDM.

Nel **TDM** (*Time Division Multiplexing*) la trasmissione viene suddivisa in intervalli di tempo successivi; in ognuno di tali intervalli viene trasmesso un segnale. Per esempio supponiamo che un campione di ogni segnale debba essere trasmesso ogni 1 ms, e che i segnali da trasmettere siano 10 che indichiamo con D_1, D_2 ecc. Si divide l'intervallo di 1 ms in 10 intervalli da 100 μ s che denominiamo T_1, T_2 ecc.; durante l'intervallo T_1 viene trasmesso un campione di S_1 , poi durante l'intervallo T_2 viene trasmesso un campione di S_2 e così via fino all'intervallo T_{10} in cui viene trasmesso un campione di S_{10} . Immediatamente dopo si ricomincia con un altro T_1 dedicato a S_1 e così via.

Il **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) è l'equivalente del **FSM** (*Frequency Division Multiplexing*). A differenza del TDM in cui una unica portante è utilizzata dai segnali modulanti in tempi diversi; nella WDM i segnali da trasmettere sono agganciati a portanti diverse. La maggior parte di sistemi WDM operano con fibre monomodali, con un diametro del nucleo di 9 μ m.

▶ TEST DI RIEPILOGO

- 1 Quali sono le parti che costituiscono una fibra ottica?
- 2 Il cladding rappresenta la parte di un fibra attraverso cui si propaga il raggio luminoso:
☐ a) vero ☐ b) falso
- 3 Cosa rappresenta l'apertura numerica di una fibra ottica?
- 4 In un sistema di comunicazione a fibra ottica in quali punti si può avere attenuazione del segnale?
- 5 In cosa consiste la dispersione in una fibra ottica?
- 6 Qual è la differenza fra dispersione modale e dispersione cromatica?
- 7 Quali materiali sono utilizzati nella fabbricazione delle fibre ottiche?
- 8 Come sono realizzati i cavi a fibra ottica?
- 9 Quali sono i principali parametri dei trasmettitori per fibre ottiche?
- 10 Nella trasmissione multicanale con fibra ottica quale differenza c'è fra WDM e TDM?