



PAROLE CHIAVE ►

1. Introduzione

Il riconoscimento mondiale di padre delle fibre ottiche è attribuito a **Charles K. Kao**, ingegnere cinese che lavorò nel campo delle fibre ottiche presso la STC a Londra negli anni '60.

Nel 1966 pubblicò uno studio nel quale teorizzò che le perdite allora riscontrate sui primi prototipi di fibra (dell'ordine di 1000 dB/km) erano dovute ad impurità del mezzo e non a perdite intrinseche della fibra. Teorizzò inoltre l'uso delle fibre per telecomunicazioni con attenuazioni inferiori a 20 dB/km.

Dopo queste pubblicazioni si aprì la corsa tra le aziende ottiche per la produzione di fibre con perdite sempre minori.

Per questi studi C.K. Kao ricevette il premio Nobel per la fisica nel 2009.

I vantaggi delle fibre ottiche

La trasmissione di messaggi luminosi, come descritto nell'unità di apprendimento 1, è stata una delle prime modalità di comunicazione a distanza, utilizzata fin dall'antichità. In genere si sfruttava l'aria e la visibilità degli uomini (magari forniti di lenti e successivamente di cannocchiali) per l'invio di simboli e messaggi.

Solo verso la fine dell'800 sono noti i primi esperimenti di invio della luce mediante guide trasparenti che convogliassero i raggi luminosi.

Nel 1950 negli Stati Uniti ed in Inghilterra nascono le prime fibre ottiche per l'utilizzo in medicina per endoscopie.

Con l'invenzione del LASER nel 1960, iniziano i primi esperimenti di trasmissione di impulsi luminosi entro la fibra ottica per comunicazioni a distanza, anche se le perdite di potenza luminosa all'interno della fibra sembrano scoraggiarne l'uso. Dopo le ricerche e le pubblicazioni di **Kao** (vedi notizie a lato), la Corning Glass, azienda statunitense leader nella produzione di vetri e lenti, realizzò, nel 1970, la prima fibra con perdite inferiori ai 20 dB/km, nel 1972 il miglioramento del processo produttivo ridusse l'attenuazione a 4 dB/km.

Da allora si sviluppano nuove tecniche di produzione di fibre e la comunicazione sul canale ottico prende il sopravvento per le comunicazioni digitali a larga banda per grande distanza.

I vantaggi dell'utilizzo delle fibre come mezzo trasmissivo, rispetto a cavi e ai collegamenti senza fili, sono molteplici. Derivano sia dalla natura del segnale luminoso che trasporta l'informazione sia dalla struttura stessa della fibra.

Il primo vantaggio è la *bassa attenuazione* del mezzo trasmissivo, anche per alte frequenze: le fibre attuali hanno attenuazione di 0,2 dB/km indipendentemente dalla frequenza di invio dei segnali, permettendo così collegamenti per centinaia di chilometri senza apparati intermedi di rigenerazione.

Il segnale luminoso inviato in fibra è per sua natura di frequenza alta (dai Gigahertz ai Terahertz), gli impulsi ottici possono quindi essere inviati a *frequenze elevate*, permettendo la trasmissione di grandi quantità di dati senza influire sull'attenuazione del canale trasmissivo (gli attuali sistemi di trasmissione digitali ad alta velocità hanno una frequenza di trasmissione di 40 Gbit/s).

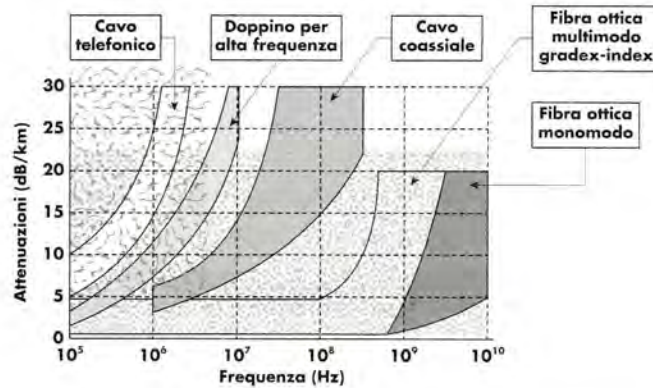


Figura 1

Grafico dell'attenuazione in funzione della frequenza dei principali cavi utilizzati in telecomunicazioni.

Inoltre la fibra è costituita da materiale dielettrico trasparente (vetro, plastica, quarzo) che la rende *immune ai disturbi elettromagnetici*, pertanto *si riduce la probabilità di ricevere in modo errato i dati*, aumentando la qualità delle comunicazioni.

I sistemi di comunicazione in fibra ottica non generano campi elettromagnetici e non si ha il fenomeno dell'inquinamento elettromagnetico che sia le grosse antenne, sia i sistemi wireless domestici generano, con potenziali rischi per la salute.

Un ulteriore vantaggio è dato dal materiale che rende *i cavi ottici molto più leggeri* e di dimensioni ridotte rispetto ai tradizionali cavi in rame, ciò semplifica e riduce i costi di installazione e di cablaggio dei sistemi di comunicazione.

Infine essendo la comunicazione attraverso una *guida chiusa*, non vi è il rischio di interferenze tra fibre adiacenti né pericoli di intercettazione dei segnali mediante apparati collocati lungo il collegamento.

Inconvenienti

A questi vantaggi vanno contrapposti i *maggiori costi* rispetto ai mezzi tradizionali, soprattutto per gli apparati optoelettronici di trasmissione, di rigenerazione, di ricezione. Anche l'installazione richiede macchinari particolari per avere alti livelli di precisione nelle connessioni e nella posa dei collegamenti.

2. La luce

La luce è composta da onde elettromagnetiche della stessa natura di quelle utilizzate nelle trasmissioni radio, esaminate nella sezione precedente.

Ciò che caratterizza la radiazione luminosa è la lunghezza d'onda λ che è molto minore di quella delle onde radio: la luce visibile ha valori che vanno da circa 400 nm per il colore viola a circa 700 nm per il colore rosso; la luce invisibile all'occhio umano si ha al di sotto del colore viola (i raggi ultravioletti) e al di sopra del colore rosso (i raggi infrarossi).

Tabella 1

Parametri delle radiazioni luminose.

Radiazione luminosa	Lunghezza d'onda λ (nm)	Frequenza (Hz)	Energia del fotone (J)
Ultravioletto	< 400	$> 750 \cdot 10^{12}$	$497 \cdot 10^{-21}$
Spettro visibile	viola	$667 \cdot 10^{12}$	$442 \cdot 10^{-21}$
	blu	$612 \cdot 10^{12}$	$406 \cdot 10^{-21}$
	verde	$545 \cdot 10^{12}$	$361 \cdot 10^{-21}$
	giallo	$517 \cdot 10^{12}$	$343 \cdot 10^{-21}$
	arancione	$484 \cdot 10^{12}$	$321 \cdot 10^{-21}$
	rosso	$429 \cdot 10^{12}$	$284 \cdot 10^{-21}$
Infrarosso	> 750	$< 400 \cdot 10^{12}$	$265 \cdot 10^{-21}$

La frequenza f delle onde luminose è legata alla lunghezza d'onda λ e alla velocità della luce c nel mezzo attraversato dalla relazione:

La velocità della luce

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

1

con

$$c = \frac{c_0}{n}$$

2

dove c_0 è la velocità della luce nel vuoto, pari circa a $3 \cdot 10^8$ m/s e n è l'**indice di rifrazione** della luce nel mezzo.

Tabella 2

Indici di rifrazione per diversi materiali.

Materiale	Indice n	Velocità della luce c (km/s)
Vuoto	1,00	300.000
Aria	1,0003	299.900
Acqua (20°)	1,333	225.060
Quarzo fuso	1,46	205.500
Vetro	da 1,50 a 1,9	da 200.000 a 157.900
Diamante	2,50	120.000
Silicio	3,40	88.200

La fisica moderna ha descritto la luce non solo come onda, ma anche come particella di energia che si propaga lungo la direzione del raggio luminoso con velocità c ; tale particella di energia è chiamata fotone e la sua energia è data da

L'energia del fotone

$$E = h \cdot f$$

3

dove h è la costante di Plank che vale circa $6,63 \cdot 10^{-34}$ joule \cdot s.

Alcuni fenomeni di interazione con la luce sono agevolmente descritti dalla natura corpuscolare mentre altri dalla sua caratteristica di onda. Per quel che riguarda la propagazione della luce all'interno della fibra ottica, è sufficiente riprendere alcuni concetti di ottica geometrica, dove si ipotizza una *propagazione rettilinea del raggio luminoso*. Quando un raggio luminoso passa da un mezzo ad un altro avente diverso indice di rifrazione n avvengono due fenomeni: una **riflessione** perché una parte della luce viene riflessa e rimane all'interno del primo mezzo ed una **rifrazione** perché la rimanente parte della luce penetra nel secondo mezzo con un angolo diverso da quello di provenienza.

Come illustrato in **figura 2**, un raggio luminoso, chiamato raggio incidente, proveniente da un mezzo n_1 , incontra la superficie di separazione dal mezzo di indice di rifrazione n_2 nel punto P . Da questo punto si originano due raggi, quello riflesso che rimane nel primo mezzo e quello rifratto che penetra nel secondo mezzo cambiando la direzione di propagazione.

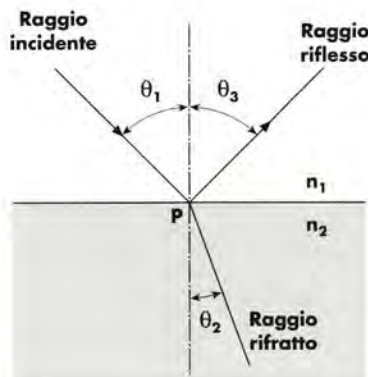


Figura 2

Riflessione e rifrazione in ottica geometrica.

Definendo gli angoli rispetto alla normale alla superficie, si chiama θ_1 l'angolo incidente, θ_3 l'angolo del raggio riflesso e θ_2 l'angolo del raggio rifratto.

Le leggi dell'ottica geometrica affermano che l'angolo di riflessione è identico all'angolo incidente:

$$\theta_1 = \theta_3$$

4

La relazione tra gli angoli incidente e rifratto è data dalla **legge di Snell**:

La legge di Snell

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

5

Se il raggio incidente è perpendicolare alla superficie di separazione dei due materiali anche i raggi riflesso e rifratto hanno la stessa direzione perpendicolare. Definendo il **coefficiente di riflessione** ρ come rapporto tra l'energia incidente E_1 e l'energia del raggio riflesso E_3 , la seguente relazione detta di **Fresnel** permette di ricavarne il valore:

La relazione di Fresnel

$$\rho = \frac{E_3}{E_1} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

6

L'energia E_2 del raggio rifratto è data da

$$E_2 = E_1(1 - \rho)$$

7

Il caso interessante per la propagazione dei raggi luminosi è quello in cui il mezzo da cui proviene la luce ha un indice di rifrazione $n_1 > n_2$. Applicando la **5**, vi è un angolo incidente, chiamato **angolo limite** θ_{lim} , per cui l'angolo del raggio rifratto vale 90° , quindi si propaga lungo la superficie di separazione dei due mezzi (**fig. 3b**). Il valore di questo angolo si ottiene dalla **5**, ponendo $\theta_2 = 90^\circ$:

L'angolo limite

$$\sin(\theta_{lim}) = \frac{n_2}{n_1}$$

8

Se l'angolo incidente supera l'angolo limite (**fig. 3c**), dovendo l'angolo rifratto superare l'angolo retto, non vi è più rifrazione ed il segnale luminoso si mantiene completamente all'interno del mezzo da cui proviene. Questo fenomeno, chiamato **riflessione totale**, avviene se si verificano due condizioni: l'indice di rifrazione del mezzo da cui proviene il raggio luminoso è maggiore del mezzo verso cui incide e l'angolo di incidenza è superiore all'angolo limite ricavato mediante la **8**.

La riflessione totale

Angolo limite: angolo di incidenza oltre il quale non si ha più rifrazione.

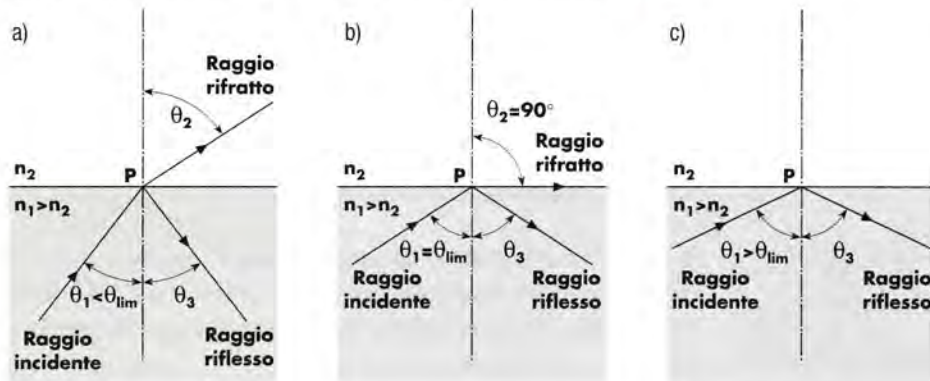


Figura 3

Fenomeno della riflessione totale: angolo di incidenza $\theta_1 < \theta_{lim}$ (a), angolo di incidenza $\theta_1 = \theta_{lim}$ (b) e angolo di incidenza $\theta_1 > \theta_{lim}$ (c).

3. La fibra ottica

La costituzione della fibra ottica

La fibra ottica è una sottilissima fibra realizzata da materiali trasparenti alla radiazione luminosa: vetro, quarzo o plastica. È formata da due strati concentrici, quello più interno chiamato **core** (*nucleo*) e quello più esterno chiamato **cladding** (*mantello*). Vi sono poi rivestimenti esterni di protezione che costituiscono il **jacket**. Il core ha un indice di rifrazione di poco superiore a quello del cladding, quindi se il raggio luminoso proveniente dal core incide sulla superficie di separazione del cladding con un angolo superiore all'angolo limite si ha la riflessione totale, per cui il raggio continua a propagarsi per continue riflessioni rimanendo all'interno della fibra, senza avere perdite di energia per rifrazione (fig. 4).

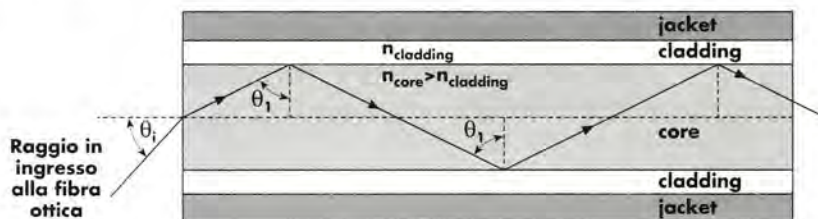


Figura 4

Propagazione del segnale nella fibra ottica.

Per mantenere la luce nella fibra ottica si pone l'indice di rifrazione del core poco superiore a quello del cladding in modo che se la luce incide quest'ultimo con un angolo superiore a quello limite rimane nel core.

Il diametro della sezione del core ha valori compresi tra circa 5 e 100 μm , mentre quello del cladding ha valori compresi tra 80 e 140 μm . È quindi necessario che all'esterno vi siano robusti rivestimenti per evitare la rottura del filamento e, nel caso di cavi ottici contenenti più fibre, sono previste protezioni metalliche esterne che rendono il cavo più resistente nelle operazioni di installazione. Se si definisce con n_{core} l'indice di rifrazione del core e n_{clad} quello del cladding applicando la **3** si trova l'angolo limite:

$$\sin(\theta_{\text{lim}}) = \frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}}$$

9

Come mostrato in **figura 5** affinché si abbia la riflessione totale, il segnale luminoso deve essere inviato nel core con un angolo di incidenza θ_i sufficientemente piccolo, in modo che l'angolo corrispondente sulla superficie core-cladding superi l'angolo limite.

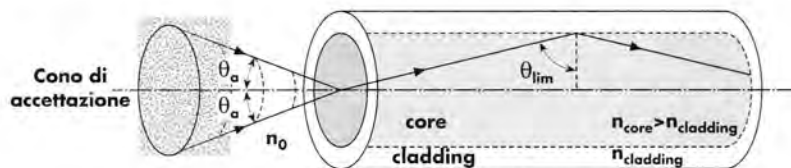


Figura 5

Cono di accettazione del segnale in fibra ottica.

Se la luce entra nel core con un angolo inferiore a quello di accettazione si propaga correttamente nella fibra ottica.

Si definisce come **cono di accettazione** l'angolo solido entro cui devono essere inviati i raggi per la propagazione all'interno della fibra ottica. Questo è delimitato dall'angolo di accettazione θ_a corrispondente al raggio che raggiunge all'interno l'angolo limite θ_{lim} .

Applicando la legge di Snell per il raggio all'ingresso della fibra, sapendo che n_0 è l'indice di rifrazione del mezzo esterno (solitamente aria) si ottiene:

$$n_0 \cdot \sin(\theta_a) = n_{\text{core}} \cdot \sin(90^\circ - \theta_{\text{lim}}) = n_{\text{core}} \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{\text{lim}})}$$

10

e quindi per la **9**

$$n_0 \cdot \sin(\theta_a) = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

11

Apertura
numerica

Apertura numerica:
esprime il seno
dell'angolo di
accettazione.

Il seno dell'angolo di accettazione, importante per la connessione tra la sorgente luminosa e la fibra, è chiamato **apertura numerica della fibra (NA)**. Se si considera il valore dell'indice n_0 circa uguale ad 1, l'apertura numerica diventa:

$$NA = \sin(\theta_a) = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

12

4. Le caratteristiche della fibra

Le fibre possono essere classificate in base al materiale con cui sono fabbricate.

- **Fibre con il core ed il cladding in vetro:** sono le più utilizzate, il vetro usato è purissimo, molto trasparente realizzato in biossido di silicio o in quarzo fuso. Il vetro puro viene successivamente drogato con impurezze, quali germanio o fosforo, per avere gli indici di rifrazione desiderati. Altre impurezze residue, dovute al processo di fabbricazione determinano l'attenuazione della fibra.
- **Fibre PCD (Plastic-clad silica):** hanno il core in vetro e il cladding in plastica. Le prestazioni sono buone anche se inferiori alle fibre in vetro.
- **Fibre plastiche:** hanno sia il core che il cladding in plastica. Pur limitate in frequenza e in perdite, sono usate per il basso costo e la facilità di utilizzo. In particolare per collegamenti corti dove il collegamento deve essere protetto da disturbi elettromagnetici e da eventuali intercettazioni del segnale.

Un'altra classificazione delle fibre è data dalla modalità di propagazione del segnale luminoso all'interno. A causa delle dimensioni molto piccole della guida d'onda, il segnale ottico all'interno del core non può irradiarsi in ogni direzione, ma solo seguendo determinati cammini ottici chiamati **modi di propagazione**.

I modi di
propagazione

Tali cammini si possono ricavare dalle equazioni di propagazione delle onde, illustrate nella sezione 10A; i modi possibili sono quelli che attraversano l'asse della fibra e che tra una riflessione e l'altra compiono solo valori di sfasamento multipli determinati dalle condizioni iniziali.

Dal punto di vista pratico si ottiene che se il diametro del core è molto piccolo (circa una o due lunghezze d'onda) si ha un solo modo di propagazione, quello lungo l'asse della fibra, se invece il diametro è maggiore è possibile calcolare il numero di modi in funzione di un parametro V detto **frequenza normalizzata della fibra**, definito come

$$V = \frac{\pi d}{\lambda_0} NA$$

13

Ove d è il diametro del core, NA l'apertura numerica della fibra, λ_0 la lunghezza d'onda del segnale luminoso nel vuoto.

Se V è inferiore a 2,405, si ha il solo modo di propagazione centrale, affinché questo avvenga si deve avere il diametro di core con valori tra 3 e 10 μm . La fibra è chiamata **monomodale**.

fibre monomodali
e multimodali

Per diametri maggiori (tipicamente 50, 62,5 o 80 μm) si hanno due tipi di fibre **multimodali**: quelle con **indice a gradino (step-index)** dove l'indice di rifrazione del cladding e del core cambia di valore in modo netto; quelle con **indice graduale (graded index)** dove l'indice di rifrazione del core cresce dalla zona periferica verso il centro della fibra in modo graduale.

Per fibre multimodali il numero dei modi di propagazione N_m è dato da

$$\text{step-index} \quad N_m = \frac{V^2}{2} \quad \mathbf{14} \quad \text{graded-index} \quad N_m = \frac{V^2}{4} \quad \mathbf{15}$$

la **15** è valida nell'ipotesi di variazione dell'indice a profilo parabolico. I vari tipi di fibre ottiche sono sintetizzati in **figura 6**.

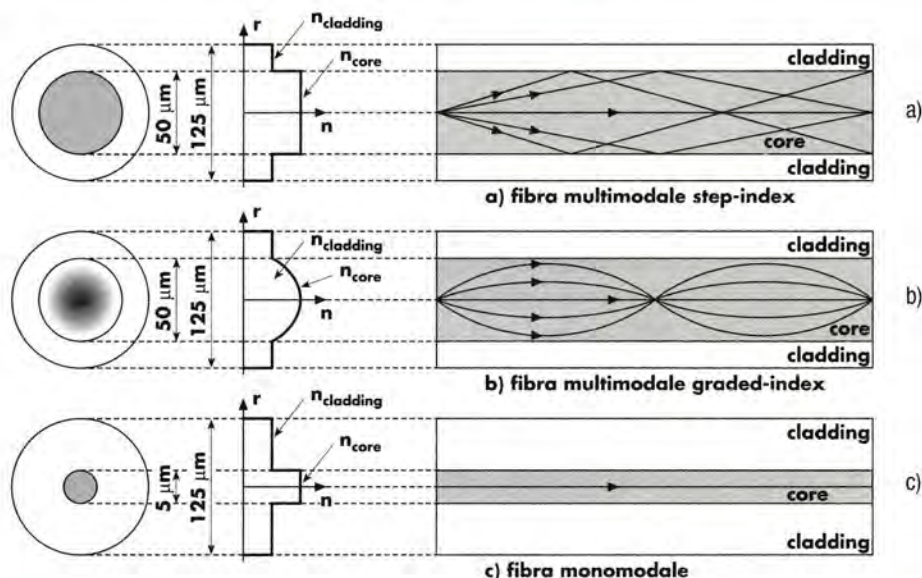


Figura 6

Fibra multimodale step-index (a), multimodale graded-index (b) e monomodale (c).

Nel caso di fibre multimodali, l'impulso ottico inviato in fibra viene suddiviso secondo i vari modi, ognuno trasporta una parte della potenza ottica, alla fine della fibra la sovrapposizione dei diversi modi permette di ottenere l'impulso di uscita.

Dispersione modale

Accade che i vari modi percorrono cammini ottici diversi per cui giungono al termine della fibra con tempi di ritardo differenti, l'impulso di uscita ha quindi una durata maggiore rispetto a quello di entrata. Questo fenomeno è chiamata **dispersione modale** perché "l'allargamento" dell'impulso è dovuto ai multipli modi di propagazione in fibra ottica.

Nel caso di fibra step-index è possibile calcolare il coefficiente di dispersione modale. Come mostrato in **figura 7** si considerano i due modi estremi, quello che compie il cammino ottico minore lungo l'asse e quello che compie il cammino maggiore secondo la riflessione totale data dall'angolo limite.

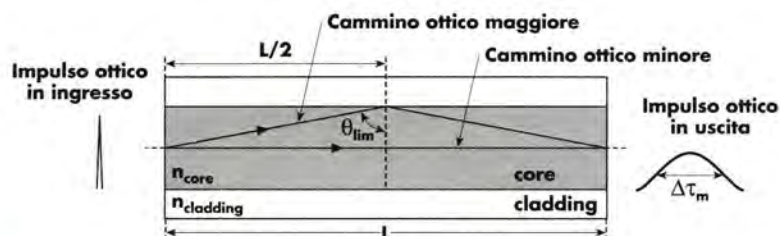


Figura 7

Dispersione modale in fibra multimodo step-index.

In una sezione di fibra di lunghezza L , il tempo di ritardo τ_1 del primo raggio e τ_2 del secondo raggio risultano

$$\tau_1 = \frac{L}{c} = \frac{L}{c_0/n_{core}} = \frac{L \cdot n_{core}}{c_0} \quad 16 \quad \tau_2 = 2 \frac{\frac{L/2}{\sin(\theta_{lim})}}{c} = \frac{L \cdot n_{core}}{c_0 \cdot \sin(\theta_{lim})} \quad 17$$

applicando la **9** si ottiene

$$\tau_2 = \frac{L \cdot n_{core}^2}{c_0 \cdot n_{clad}} \quad 18$$

e quindi l'allargamento dell'impulso luminoso $\Delta\tau_m$ è dato dalla differenza tra i due ritardi τ_2 e τ_1

$$\Delta\tau_m = \tau_2 - \tau_1 = \frac{Ln_{core}}{c_0 n_{clad}} (n_{core} - n_{clad}) \quad 19$$

Per ogni modo possibile si ha un diverso percorso della luce: la differenza di tempo tra i due percorsi limite esprime la dispersione modale.

Il coefficiente di dispersione modale

Il coefficiente di dispersione modale D_m è definito come il rapporto tra l'allargamento $\Delta\tau_m$ e la lunghezza L del tratto di fibra che determina tale allargamento

$$D_m = \frac{n_{core}}{c_0 \cdot n_{clad}} (n_{core} - n_{clad}) \quad 20$$

Per ridurre la dispersione occorre diminuire il numero di cammini ottici differenti e rendere minima la differenza tra i valori degli indici di rifrazione di core e di cladding. Nelle fibre in uso tale differenza è di pochi millesimi, per cui la **20** può essere approssimata dalla

$$D_m \cong \frac{NA^2}{2 \cdot c_0 \cdot n_{core}} \quad 21$$

(per la giustificazione vedere il problema svolto 4).

Quindi, anche a scapito di un minore angolo di accettazione, *occorre avere aperture numeriche di piccolo valore*. Valori tipici del coefficiente D_m sono di qualche ns/km.

Per la fibra graded-index, si ha un fenomeno diverso in quanto la variazione graduale dell'indice di rifrazione modifica i cammini ottici rendendoli arrotondati per la rifrazione continua che si ha anche all'interno del core. Una significativa riduzione della dispersione è data dal fatto che i modi che compiono il percorso più lungo quando si allontanano dall'asse della fibra in base alla **2**, aumentano la velocità perché nella periferia del core l'indice di rifrazione è minore. In tal modo *si ha una compensazione dei ritardi tra i vari modi*, quelli assiali compiono un cammino ottico più breve ma con velocità minore, quelli che compiono i cammino maggiori hanno anche velocità maggiore. Il coefficiente di dispersione modale D_m per le fibre graded-index scende a valori di qualche ps/km.

Per la fibra monodo, avendosi un solo modo di propagazione che trasporta tutta l'informazione *non si ha nessuno effetto di dispersione modale*.

■ Dispersione cromatica

Un'ulteriore causa di dispersione è dovuta alla radiazione luminosa che trasporta l'informazione. Essa è composta da un insieme di onde di lunghezze d'onda vicine nello spettro. Il segnale informativo è suddiviso tra queste onde che si propagano all'interno della fibra e si ricostruisce al termine della fibra. Queste onde possono avere tempi di propagazione dipendenti dal valore della lunghezza d'onda di cia-

Il coefficiente di dispersione cromatica

Se la luce non è monocromatica le sue componenti hanno differenti velocità di propagazione determinando così una dispersione cromatica.

scuna onda, quindi giungono al termine della fibra in istanti diversi, producendo un allargamento dell'impulso luminoso. Questa dispersione è chiamata **dispersione cromatica o intramodale**, perché dipende dalle lunghezze d'onda (che determinano il colore della luce) del segnale inviato.

Un primo tipo di dispersione cromatica è la **dispersione di materiale** ed è dovuta al fatto che l'indice di rifrazione del core cambia di valore in funzione della lunghezza d'onda λ , quindi in base alla **2** le onde avranno velocità diversa e quindi tempi di arrivo diversi tra loro.

Un secondo tipo di dispersione cromatica è la **dispersione di guida**, che si ha soprattutto nelle fibre monomodo. A causa del diametro ridotto del core, l'impulso luminoso penetra anche nel cladding avendo così una velocità diversa, poiché la distribuzione geometrica del fronte d'onda di propagazione dipende dalla lunghezza d'onda, si avranno penetrazioni diverse nel cladding per lunghezze d'onde diverse e quindi velocità e ritardi dipendenti dalla lunghezza d'onda.

La dispersione cromatica assume valori molto inferiori a quelle della dispersione modale, il coefficiente di dispersione cromatica D_c è definito in picosecondi/(km · nm) in quanto l'allargamento $\Delta\tau_c$ dipende oltre che dalla fibra anche dall'ampiezza dell'insieme di lunghezze d'onda $\Delta\lambda$ emesse dalla sorgente luminosa

$$\Delta\tau_c = D_c \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

22

Banda passante

Molti cataloghi di fibre ottiche non riportano i parametri di dispersione ma segnalano i limiti che questi comportano in termini di banda. Infatti se si ipotizza di inviare bit a forma di impulso binario si verifica che l'allargamento dovuto alla dispersione per trasmissione lenta non altera il riconoscimento dei livelli digitali, mentre per trasmissione veloce la modifica della forma degli impulsi rende irriconoscibile il segnale ricevuto (fig. 8).



Figura 8

Allargamento dell'impulso digitale dovuto alla dispersione e conseguente difficoltà di riconoscimento dei singoli bit.

Si pone quindi un limite alla massima frequenza di trasmissione, cioè alla massima banda di utilizzo della fibra. La relazione tra banda B e allargamento $\Delta\tau$ è data da (supponendo l'impulso di tipo gaussiano e misurandone la durata a metà dell'ampiezza massima):

$$B = \frac{0,44}{\Delta\tau}$$

23

Poiché l'allargamento è proporzionale alla lunghezza del collegamento è possibile definire il **prodotto banda-lunghezza** BL che permette di stabilire la banda del collegamento in funzione della lunghezza L

$$BL = B \cdot L$$

24

La banda del collegamento in fibra

Il prodotto banda-guadagno

Tale parametro per la dispersione modale dipende solo dal suo coefficiente D_m

$$BL_m = \frac{0,44}{D_m} \quad 25$$

mentre per la dispersione cromatica dipende dal coefficiente D_c e dalla larghezza $\Delta\lambda$ delle onde emessa dalla sorgente

$$BL_c = \frac{0,44}{D_c \cdot \Delta\lambda} \quad 26$$

Nel caso in cui si abbiano entrambe le dispersioni, anche se predomina la dispersione modale in quanto molto maggiore di quella cromatica, gli allargamenti vanno sommati quadraticamente per cui si ha

$$\Delta\tau^2 = \Delta\tau_m^2 + \Delta\tau_c^2 \quad 27 \qquad \frac{1}{B} = \sqrt{\left(\frac{1}{BL_m^2} + \frac{1}{BL_c^2}\right)} \cdot L \quad 28$$

■ Ulteriori note sulle prestazioni delle fibre ottiche

Poiché il limite della dispersione cromatica nelle fibre monomodo limita fortemente le lunghezze dei collegamenti, per sistemi digitali ad alta velocità sono state prodotte fibre **dispersion shifted** e **dispersion flattened**, dove il profilo del valore dell'indice di rifrazione di core e cladding assume forme particolari che rendono i valori della dispersione di guida e di materiale opposti tra loro per particolari lunghezze d'onda, riducendo a zero la dispersione cromatica totale (fig. 9).

Le fibre
dispersion shifted
e dispersion
flattened

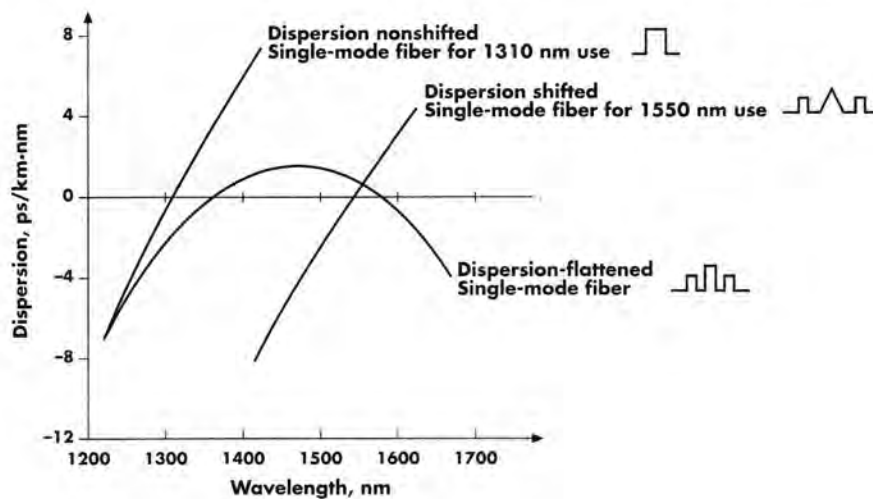


Figura 9

Dispersione cromatica per fibre dispersion-shifted e dispersion-flattened (F. Allard, *Fiber optics handbook*, Mc Graw-Hill, 1990).

L'attenuazione
della fibra

Il segnale inviato in fibra *subisce un'attenuazione di potenza durante il cammino ottico* all'interno del core. Tale perdita di potenza dipende da almeno tre fattori: la **diffusione** (*scattering*) di **Rayleigh**, l'**assorbimento** e la **perdita per piegature** sulla superficie tra core e cladding (*bend*).

La diffusione di Rayleigh è il fenomeno di perdita maggiore dovuta all'*interazione della luce con gli atomi della struttura molecolare del core e con gli atomi di even-*

tuali impurezze presenti. La parte di radiazione che incontra tali particelle viene riflessa in altre le direzioni e non può proseguire secondo i modi di propagazione per cui non giunge all'uscita della fibra. Tale fenomeno è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda λ , per cui ha un effetto maggiore per i raggi ultravioletti e minimo per gli infrarossi.

L'assorbimento è dovuto alle *impurezze presenti nel core* che assorbono l'energia luminosa e la dissipano sotto forma di calore. Quanto più il processo di fabbricazione delle fibre è preciso tanto più questo effetto diminuisce. I maggiori assorbimenti sono dovuti alla presenza di ioni OH^- presenti nelle molecole di vapore acqueo depositate nella fibra, i picchi maggiori sono a 0,95 μm , a 1,25 μm e a 1,39 μm . Al di sopra di 1,7 μm predomina l'assorbimento del biossido di silicio.

Le perdite sulla superficie tra core e cladding sono dovute a due cause: le perdite per imperfezioni microscopiche (*microbending*) sulla superficie del core create durante la fabbricazione e durante l'installazione per azioni meccaniche di pressione o tiraggi eccessivi; le perdite dovute a piegature delle fibre con raggi di curvatura troppo piccoli (*macro bending*), in tal caso parte dei raggi non viene riflessa totalmente nell'angolo di curvatura. Tale effetto è maggiore quando la piegatura della fibra è stretta, ed incide maggiormente nelle fibre monomodo. Si può evitare se i raggi di piegatura della fibra nuda sono superiori a 5 cm e quelli dei cavi ad almeno 50 cm. L'insieme dei tre effetti dà luogo ad una curva di attenuazione per unità di lunghezza in funzione della lunghezza d'onda del segnale ottico. Poiché la perdita di potenza cresce esponenzialmente con la lunghezza della fibra, si usa esprimerla in dB/km. Le curve tipiche di attenuazione delle fibre sono mostrate in figura 10.

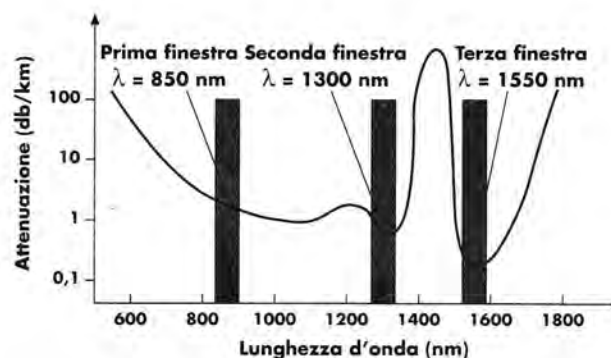


Figura 10

Attenuazione della fibra ottica in funzione della lunghezza d'onda.

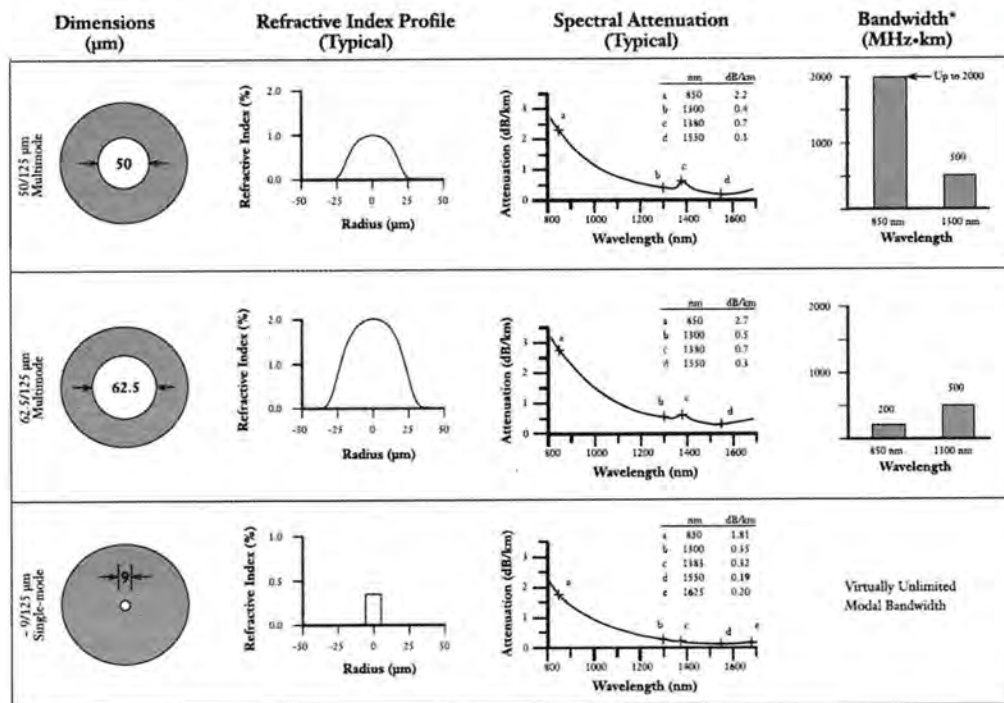
Le finestre

Le tre zone evidenziate, chiamate **finestre**, sono le regioni dove si hanno minimi di attenuazione e sono disponibili sorgenti luminose a semiconduttori, per cui si è scelto di usare queste lunghezze d'onda per i collegamenti ottici.

La prima è posizionata a 850 nm con un'attenuazione di circa 2-5 dB/km; la seconda a 1300 nm, l'attenuazione vale circa 0,5-0,7 dB/km per le fibre multimodali e 0,4-0,6 dB/km per le fibre monomodali; la terza a 1550 nm, l'attenuazione vale circa 0,2-0,3 dB/km per le fibre monomodali.

Lo sviluppo della tecnologia ha permesso di ridurre sempre più le perdite e di privilegiare alcuni tipi di fibra. Quelle maggiormente utilizzate sono le multimodali graded-index 50/125 e 62,5/125 (il primo numero indica il diametro del core, il secondo del cladding) e la monomodo 9/125.

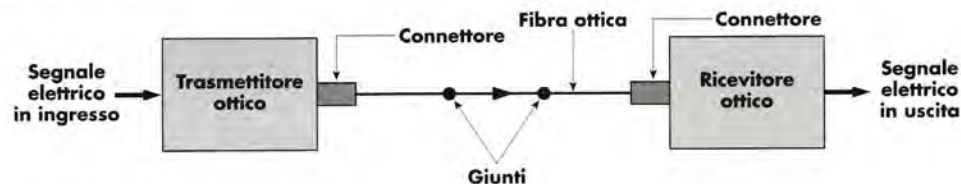
In figura 11 sono mostrati valori tipici di fibre commerciali ricavate da un catalogo recente della Corning Glass.

**Figura 11**

Parametri di fibre commerciali (catalogo Corning Glass).

5. I dispositivi ottici

Un collegamento numerico in fibra ottica (fig. 12) prevede in trasmissione una sorgente ottica connessa ad una terminazione della fibra ed in ricezione una connessione con un rivelatore ottico.

**Figura 12**

Sistema di trasmissione in fibra ottica.

Connettori e giunti

Poiché le dimensioni del core e l'apertura numerica sono piccole occorre utilizzare **connettori** specifici che abbiano un'elevata precisione meccanica, spesso per migliorare l'accoppiamento sono poste microlenti che migliorano l'invio del segnale luminoso da sorgente a fibra o da fibra a rivelatore.

In ogni caso, la perdita della connessione è significativa, determinata soprattutto dalla riflessione di Fresnel, dalle inclinazioni dei raggi che superano l'apertura numerica e dal disassamento tra dispositivi optoelettronici e fibra.

La perdita complessiva di ciascun connettore è di circa 0,3 dB per connettori metallici e ceramici e di circa 2 dB per connettori plastici.

Un altro elemento di collegamento è il **giunto**, una connessione tra due spezzoni di fibra ottica che durante l'installazione vengono uniti o tramite fusione o incollaggio delle due estremità di fibre nude. Il processo di giunzione viene effettuato con apparecchiature di precisione ma la discontinuità che la radiazione luminosa incontra nel

LED e LASER

 Scheda integrativa 10C.1
Il diodo LASER

passare da un core all'altro determina perdite dell'ordine di 0,05 dB per un giunto fuso e di 0,2 dB per un giunto meccanico.

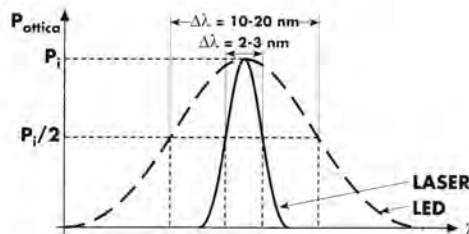
I trasmettitori per fibra ottica sono *dispositivi a semiconduttore che trasformano il segnale elettrico in ottico* emettendo onde alle lunghezze d'onda previste dalle tre finestre. I dispositivi utilizzati sono il **LED** (*Light Emitting Diode*) ed il diodo **LASER** (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*).

Il LED è un dispositivo a semiconduttore che trasforma l'energia elettrica di ogni coppia elettrone-lacuna in un fotone ad una lunghezza d'onda determinata dai livelli energetici del materiale costituente il dispositivo.

Il diodo LASER (per i dettagli vedere l'apposita scheda integrativa) prevede un funzionamento interno in cui si amplifica solo la radiazione di una determinata lunghezza d'onda, inoltre le superfici del dispositivo si comportano da specchi per cui si ha emissione secondo una direzione prestabilita.

Queste caratteristiche rendono la radiazione emessa dal LASER migliore rispetto a quella del LED per i motivi di seguito esposti.

- ▶ La **monocromaticità**: lo spettro della radiazione, come mostrato in **figura 13**, è molto più stretto, quindi il pacchetto delle lunghezze d'onda è ridotto a pochi nanometri contro i circa 10-20 nm del LED. Per questa ragione *la dispersione cromatica del segnale emesso dal LASER sarà almeno di un ordine di grandezza inferiore a quella avente come sorgente un LED*.
- ▶ La **direzionalità**, il raggio emesso dal LASER è quasi completamente rettilineo e questo garantisce un elevato accoppiamento con la fibra ottica, le perdite di connessione sono molto inferiori a quelle del LED.
- ▶ La **brillanza**, cioè la *potenza per unità di sezione* è molto maggiore nel LASER per cui la potenza che si invia in fibra è molto più elevata di quella di un LED di pari potenza ma avente un fronte luminoso più largo.
- ▶ La **velocità** con cui il LASER passa da uno stato di spegnimento ad una emissione di fotoni (corrispondente al passaggio da uno "0" logico ad un "1" logico) è molto maggiore di quella del LED.


Figura 13

Larghezza della potenza ottica emessa da LED e LASER in funzione della lunghezza d'onda (valori tipici).

Per contro, anche se di prestazioni inferiori, il LED mantiene elementi che lo fanno preferire in alcune applicazioni:

- ▶ il **minore costo** del dispositivo e dei circuiti elettronici di pilotaggio;
- ▶ il **tempo di vita maggiore**, per cui un LED ha una maggiore durata in impianto di un LASER;
- ▶ la **minore sensibilità rispetto alle variazioni di temperatura** rispetto al LASER che rendono il dispositivo più stabile nel funzionamento in impianto dove le condizioni atmosferiche modificano la temperatura di esercizio; nei trasmettitori a diodo LASER occorre prevedere una cella Peltier che mantenga stabile la temperatura del contenitore che contiene il trasmettitore ottico.

PIN e APD

In ricezione i dispositivi che ricevono il segnale ottico uscente dalla fibra e lo trasformano in segnale elettrico sono il **fotodiodo PIN** e l'**APD** (*Avalanche Photo Diode*). Il fotodiodo PIN è costituito da tre strati di semiconduttore, lo strato N drogato con atomi donori; lo strato I composto da semiconduttore intrinseco, cioè non drogato; lo strato P drogato con atomi accettori. Il dispositivo viene polarizzato inversamente ed emette un coppia elettrone-lacuna quando riceve un fotone sulle barriere tra gli strati di semiconduttore. Si ha una corrispondenza tra intensità della radiazione luminosa e la corrente emessa in uscita.

L'APD invece prevede un'elevata tensione inversa, superiore a qualche centinaia di volt, che, per ogni coppia elettrone-lacuna generata dalla radiazione luminosa, sviluppa il cosiddetto "effetto valanga" aumentando il numero delle particelle elettriche (elettrone-lacuna). In uscita si ottiene così una corrente amplificata dal processo fisico interno al trasduttore.

Il vantaggio principale dell'APD rispetto al fotodiodo PIN è che l'elevato guadagno interno, del valore variabile da circa 70 a 100, permette di rivelare radiazioni di debole potenza, così che anche per tratte lunghe la maggiore attenuazione non impedisce la riconoscibilità del segnale luminoso.

I limiti all'uso dell'APD sono i costi maggiori e la necessità di generare alimentazioni di tensione elevata, creando una serie di problemi di sicurezza degli apparati. Ma il problema principale è che il guadagno interno è molto variabile per la natura statistica dell'effetto valanga, questo implica che il segnale elettrico presenta alterazioni simili a quelle generate da un disturbo sovrapposto, questo disturbo viene chiamato rumore in eccesso (*excess noise*) e peggiora la qualità della ricezione.

Inoltre il dispositivo è molto sensibile alle variazioni sia di temperatura che di tensione di alimentazione. È quindi necessario che il dispositivo sia corredato di circuiti di stabilizzazione del punto di funzionamento.

6. Il collegamento in fibra ottica

Dopo aver scelto i componenti e il tipo di fibra da utilizzare, occorre dimensionare il collegamento tra trasmettitore e ricevitore. Cioè *stabilire la lunghezza massima del collegamento affinché il segnale venga ricevuto in modo corretto* e si sfruttino al meglio le basse attenuazioni della fibra ottica per ridurre il numero di stazioni intermedie di amplificazione o di rigenerazione del segnale. Il dimensionamento della tratta viene effettuata mediante un bilancio tra la potenza inviata e quella ricevuta, effettuato in unità logaritmiche che rendono semplice il calcolo.

I parametri necessari per il progetto sono esposti di seguito.

I parametri
necessari per
il progetto

- ▶ La potenza P_i inviata dal trasmettitore ottico in fibra, espressa in dB_m .
- ▶ La potenza minima P_o che il fotorivelatore deve ricevere per riconoscere il segnale. Tale dato, espresso in dB_m viene chiamato **sensitivity** ed è funzione della *probabilità di errore accettabile*, chiamato **BER** (*Bit Error Rate*). Minore sono gli errori accettabili, maggiore deve essere la potenza ricevuta. Per una trattazione approfondita sul BER si rinvia all'unità di apprendimento 14.
- ▶ L'attenuazione della fibra ottica α , espressa in dB/km , dipendente dal tipo di fibra scelta e dalla finestra nella quale si invia il segnale.
- ▶ La perdita α_c , in dB , di ciascun connettore dovuta alle perdite tra dispositivo optoelettronico e fibra, moltiplicata per due per gli accoppiamenti di trasmissione e di ricezione.
- ▶ La perdita α_s , in dB , dei giunti che vengono effettuati nella tratta per unire spezzoni di fibra se la distanza del collegamento è maggiore della lunghezza L_s delle bobine di fibra fornite dai produttori.

- Poiché il sistema progettato deve funzionare per lungo tempo, anche nel caso di un degrado delle prestazioni del trasmettitore o di un'interruzione e conseguente riparazione con giunti o connettori della tratta in fibra si introduce un **margin** M , espresso in decibel, da considerarsi come un'ulteriore perdita possibile. Valori tipici del margine sono 7 dB per trasmettitori a LED e 9 dB per trasmettitori a LASER.

Innanzitutto va calcolato il numero di giunti che saranno effettuati nella tratta di lunghezza L , tale numero n_g è dato da

$$n_g = \left(\frac{L}{L_s} - 1 \right) \Big|_{\text{intero superiore}} \quad \mathbf{29}$$

L'approssimazione al numero intero superiore è dovuta al fatto che il numero di giunti deve essere, ovviamente, un numero naturale, per cui, ad esempio, su una tratta di 5 km con spezzoni di 2 km servono 2 giunti, uno al 2° km e uno al 4° km. Sulla base di un bilancio di potenza, la potenza ricevuta è pari alla potenza inviata ridotta dalle perdite:

Il bilancio di potenza

$$P_o = P_i - (\alpha \cdot L + 2 \cdot \alpha_c + n_g \cdot \alpha_g + M) \quad \mathbf{30}$$

Se il valore trovato non è inferiore alla sensitivity disponibile, il collegamento di lunghezza L risulta fattibile. In caso contrario ponendo nella **30** come P_o il valore della sensitivity si calcola la lunghezza L tra sorgente e rivelatore ottici, effettivamente possibile con i dati disponibili: siccome si otterrà un valore inferiore a quello previsto tra trasmettitore e ricevitore o si scelgono dispositivi migliori o si devono porre delle stazioni intermedie ogni L chilometri, con i rigeneratori, che ogni L chilometri ricevono il segnale, rivelano il suo livello logico e poi lo ritrasmettono su un'altra tratta in fibra ottica.

La penalità aggiuntiva dovuta alla dispersione

*Nel caso la trasmissione digitale sia ad alta frequenza (superiore ai 100 Mbit/s), oltre alle perdite, occorre considerare la limitazione data dalla dispersione cromatica o modale. Per semplificare i calcoli è stato introdotto un parametro D_l , chiamato **penalità aggiuntiva**, dovuta alla dispersione, espresso in dB che viene trattato come un'ulteriore perdita nella tratta. Tale parametro si ricava sia dal coefficiente di dispersione che dalla banda di lavoro e spesso viene direttamente fornito dalle specifiche della fibra ottica. In questo caso l'equazione di bilancio **30** diventa*

$$P_o = P_i - (\alpha \cdot L + 2 \cdot \alpha_c + n_g \cdot \alpha_g + M + D_l) \quad \mathbf{31}$$

Esempio 1

Un sistema economico in fibra ottica utilizza un LED che emette in prima finestra un segnale di potenza 200 μ W. La fibra attenua 3 dB/km, il collegamento è lungo 7 km. Gli spezzoni di fibra hanno lunghezza 1 km, i giunti perdono 0,6 dB ciascuno ed i connettori 1,3 dB. La sensitivity è di -41 dBm ed il margine di sicurezza previsto è di 6 dB. Determinare se il sistema può ricevere segnali in maniera accettabile.

Si calcola la potenza emessa dal LED in unità logaritmiche e applicando la **29** si ricava il numero dei giunti n_g

$$P_i = 10 \cdot \log(0,2) = -7 \text{ dB}_m \quad n_g = \left(\frac{7}{1} - 1 \right) = 6$$

Applicando la **30** si ricava la potenza ottica ricevuta

$$P_o = -7 - (3 \cdot 7 + 2 \cdot 1,3 + 6 \cdot 0,6 + 6) = -40,2 \text{ dB}_m$$

Poiché tale valore è superiore alla sensitivity, cioè la potenza minima richiesta il sistema riceve i segnali in maniera accettabile.

7. Il cablaggio strutturato in fibra ottica

Per le connessioni delle reti, sia locali che geografiche, si utilizzano le apposite normative del cablaggio strutturato, che comprendono sezioni dedicate ai collegamenti ottici. Le norme specificano le caratteristiche delle fibre e dei componenti (connettori giunti, LED, LASER, ecc.) e le modalità di installazione e di misura delle prestazioni della rete.

Inizialmente la progettazione delle reti locali (LAN) prevedeva l'utilizzo della fibra solo per lunghe dorsali per supportare le grandi quantità di dati, successivamente la necessità di connettere stazioni di lavoro a reti WAN e MAN ha portato a definire reti ad elevata velocità (chiamate Gigabit Ethernet) dove la fibra viene impiegata anche nel cablaggio orizzontale.

Rimandando al testo già citato (J. Trulove, *LAN Wiring*, 2006 McGraw-Hill) nella sezione 10A per il dettaglio sulle specifiche del cablaggio ottico, qui si illustrano le caratteristiche principali delle fibre prescritte.

Le fibre sono di tre tipi: multimodo graded index 62,5/125, multimodo graded index 50/125 e monomodo 4 o 8/125. Le prime due fibre sono utilizzate in prima e seconda finestra mentre la fibra monomodo può operare in seconda e terza finestra. In **tabella 3** sono riportate i parametri principali di queste fibre.

Le fibre utilizzate
nel cablaggio
strutturato

Tabella 3

Caratteristiche delle fibre
standard per il cablaggio
strutturato.

Tipo di fibra	Dimensioni core/cladding (μm)	Lunghezza d'onda operativa (nm)	Attenuazione (dB/km)	Prodotto banda- lunghezza (MHz-km)
Multimodo graded index	62,5/125	850	3,5	160
		1300	1,5	500
	50/125	850	3,5	500
		1300	1,5	500
Monomodo	4-10/125	1300	0,5	–
		1550	0,4	–

Sulla base di questi parametri, le norme ISO11801 del 2001 suddividono le tre tipologie di fibre sopracitate in quattro categorie, indicandone per ciascuna il limite di banda e quindi delle reti nella quale impiegarla (**tab. 4**).

Si specificano inoltre due tipi di cavo ottico: quello **aderente** (*tight*) in cui le fibre sono ben serrate nella guaina e quello **lasco** (*loose*) dove la fibra all'interno della protezione esterna è libera di assorbire eventuali dilatazioni termiche del cavo. Il primo viene usato negli interni o nelle linee verticali, il secondo nei collegamenti esterni tra edifici separati.

Inoltre i cavi devono avere guaina in materiale LSZH (*Low smoke zero halogen*), a bassa emissione di fumi tossici, e possono essere protetti esternamente da armature metalliche antiroditori per evitare rotture da parte di topi. Si specifica poi che il cavo per dorsali deve contenere almeno sei singole fibre.

Tabella 4

Classificazioni delle fibre
secondo lo standard
ISO11801.

Tipo di fibra	Dimensioni core (μm)	Prodotto banda modale-lunghezza (MHz · km)			Applicazioni
		LED a 850 nm	LED a 1300 nm	LASER a 850 nm	
OM1	50 o 62,5	200	500	-	Piccole reti, $f_{\text{max}} = 1 \text{ Gbit/s}$
OM2	50 o 62,5	500	500	-	La più diffusa, $f_{\text{max}} = 622 \text{ Mbit/s}$ con sorgente a LED
OM3	50	1500	500	2000	Per reti che possono evolversi a distanze grandi con $f_{\text{max}} = 10 \text{ Gbit/s}$
OS1	4-10	-	-	-	Usata solo per MAN e WAN con distanze maggiori di 550 m, per reti Ethernet Gigabit

**Gli standard
secondo la IEEE
802.3z**
Tabella 5
Standard dei collegamenti
ottici per reti LAN secondo
lo standard IEEE 802.3z.

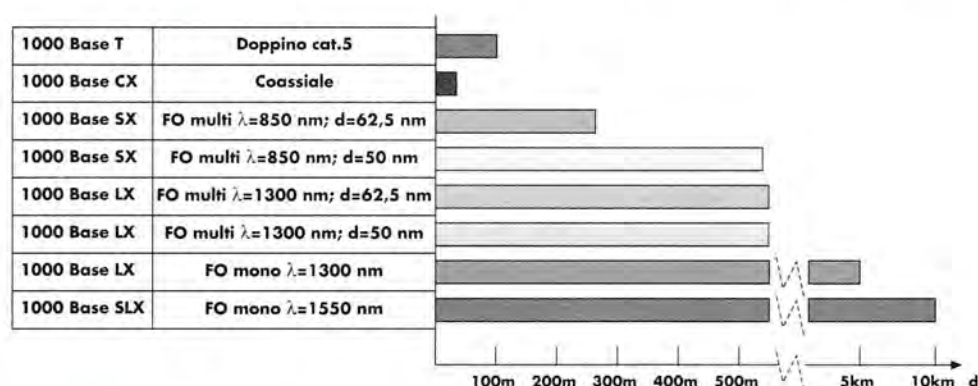
Le norme TIA-EIA-568-C e le successive IEEE 802.3z prescrivono le caratteristiche delle reti con dorsali ottiche, indicando le fibre da utilizzare e le distanze minime garantite (tab. 5).

Tipologia di rete	Velocità di trasmissione	Tipo di fibra	Distanza minima della dorsale in fibra
10 Base FL	10 Mbit/s	Multimodo (OM1)	2 Km
100 Base FX	100 Mbit/s	Multimodo (OM1)	400m
100 Base SX	100 Mbit/s	Multimodo (OM1)	300 m
1000 Base SX	1 Gbit/s	Multimodo (OM2)	200-550 m
1000 Base LX	1 Gbit/s	Multimodo (OM2)	400-550 m
		Monomodo (OS1)	5 Km
1000 Base SLX	1 Gbit/s	Monomodo (OS1)	10 Km

Le distanze dipendono dalla frequenza della rete, dal tipo di fibra e dalla finestra in cui si lavora: queste ultime vengono riconosciute dalle sigle SX, corrispondente a “*short wavelength*” cioè la prima finestra a 850 nm; LX, corrispondente a “*long wavelength*” cioè la seconda finestra a 1350 nm; SLX, corrispondente a “*super long wavelength*” e ELX corrispondente a “*extra long wavelength*” cioè la terza finestra a 1550 nm.

Le reti Ethernet Gigabit mantengono la possibilità di utilizzare cavi in rame di categoria 5 per la 1000 Base e di categoria 7 per la 10GBase. In questo caso i costi del cablaggio sono molto inferiori, ma anche le distanze tra le stazioni sono decisamente minori di quelle consentite dal mezzo ottico.

Un confronto tra le distanze consentite dagli standard per la rete Gigabit Ethernet è riportata in **figura 14**, dove è anche indicata la tipologia del mezzo trasmissivo.


Figura 14

Distanza prevista dalle norme IEEE 802.3ab e 802.3z per la rete Gigabit Ethernet.

Nel giugno 2002 si è approvata la definizione della rete Ethernet a 10 Gbit/s (10-GBE) progettata per la migrazione delle reti LAN a reti WAN (Wide Area Network) e MAN (Metropolitan Area Network), per consentire scambi di grandi quantità di dati anche lungo dorsali di 40 km.

La topologia e i protocolli di comunicazioni rimangono quelli dello standard Ethernet, le velocità e le maggiori distanze sono dovute principalmente all'utilizzo di Laser accoppiato ai tre tipi di fibra. In **tabella 6** sono riportati le prestazioni definite dallo standard IEEE 802.3z per le cosiddette reti “Gigabit Ethernet”.

La rete 10GBase LX4 prevede 4 flussi dati di frequenza di circa 2,5 Gbit/s inviati sulla stessa fibra con quattro segnali di lunghezza d'onda diversa, seguendo la tecnica a moltiplicazione di lunghezza d'onda.

Tipologia di rete	Velocità di trasmissione	λ (nm)	Fibra multimodo 62,5/125		Fibra monomodo 10/125		Fibra multimodo 50/125	
			BL (MHz-km)	distanza (m)	BL (MHz-km)	distanza (m)	BL (MHz-km)	distanza (km)
1000 Base SX	1 Gbit/s	850	160-200	220-275	400-500	500-550	–	–
1000 Base LX	1 Gbit/s	1300	500	550	500	550	–	5
1000 Base SLX	1 Gbit/s	1550	–	–	–	–	–	10
1000 Base ELX	1 Gbit/s	1550	–	–	–	–	–	70
10 GBase SR	10 Gbit/s	850	160-200	26-33	500-2000	82-300	–	–
10 GBase LR	10 Gbit/s	1300	–	–	–	–	–	10
10 GBase LX4	10 Gbit/s	1300	500	300	500	300	–	10
10 GBase ER	10 Gbit/s	1550	–	–	–	–	–	40

Tabella 6

Parametri per le reti Gigabit Ethernet secondo lo standard IEEE 802.3z.

non solo teoria**1****La storia del LASER**

In figura il premio Nobel A. Schawlow con un laser a coloranti (tratta da "Enciclopedia britannica on-line"). Il laser è un dispositivo che genera un segnale ottico di elevata qualità, basandosi sul fenomeno dell'emissione stimolata di fotoni, da cui il nome "*Light Amplification by Stimulated Emission*".

I principi teorici alla base del funzionamento del laser derivano dalla teoria quantistica sviluppata principalmente da Albert Einstein e Max Planck, che spiega il legame tra la radiazione emersa o assorbita da un materiale ed i livelli di energia dei suoi elettroni e degli orbitali relativi. Nel 1953 in Unione Sovietica Nikolay Basov and Aleksandr Prokhorov svilupparono un oscillatore quantistico basato sull'emissione stimolata e sul cosiddetto pompaggio del materiale per mantenere l'emissione di radiazione.

Contemporaneamente Charles Townes produsse il primo amplificatore a microonde (MASER) basato sull'emissione stimolata. Nel 1958, presso i Bell Labs, Charles Townes e Arthur Schawlow svilupparono un amplificatore ottico in grado di amplificare la radiazione luminosa tramite l'emissione stimolata.

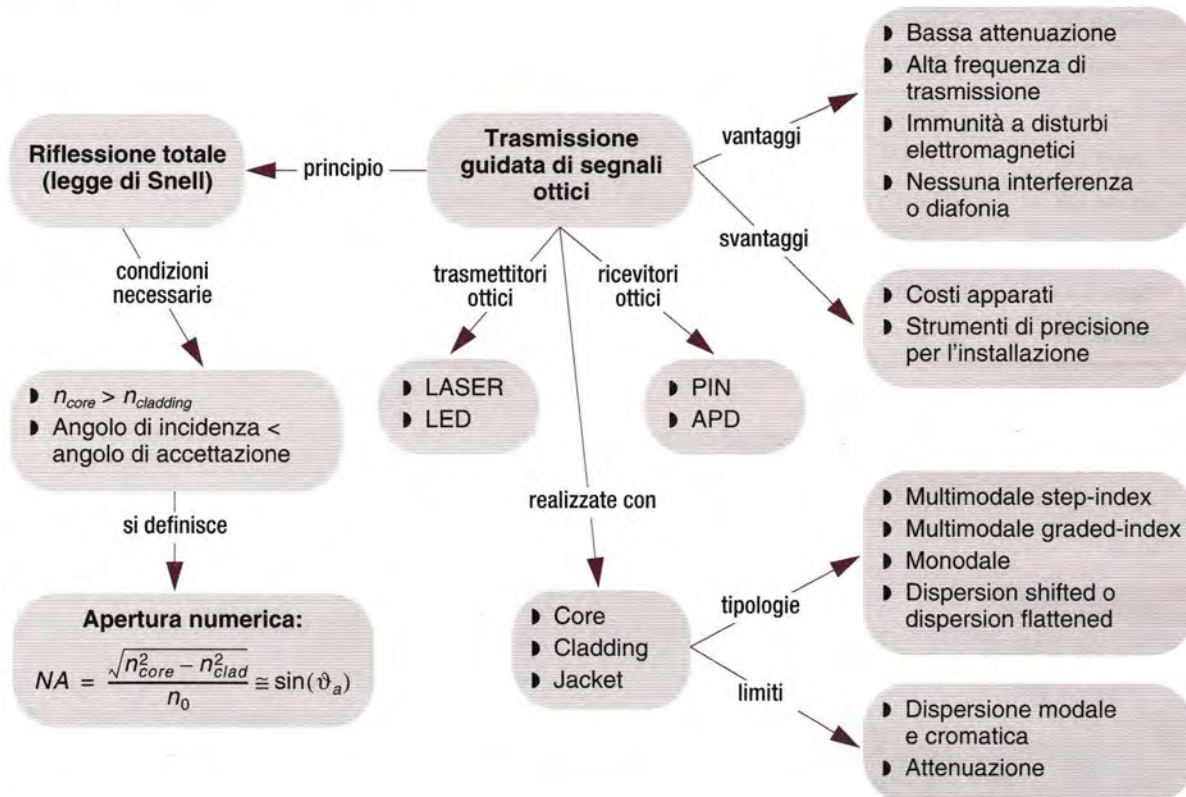
Nel 1958 i laboratori brevettarono il dispositivo.

Nello stesso periodo, Gordon Gould negli Stati Uniti e Prokhorov in Unione Sovietica proposero un dispositivo che includeva un risonatore ottico come elemento base. Lo stesso Gould propose la sua idea mediante pubblicazioni nel 1959, nelle quali introdusse il termine "LASER", e ne chiese il brevetto nel 1959, ma la richiesta venne impugnata dai laboratori Bell. Ne nacque un contenzioso legale che diede ragione a Gould solo nel 1987. Nel 1960 presso i laboratori di ricerca della Hughes fu costruito il primo laser funzionante basato sul cristallo di rubino, emettente luce rossa. Nel 1962 fu progettato il primo diodo laser a semiconduttore ad arseniuro di Gallio (GaAs) funzionante a bassissime temperature (77 °K). Solo nel 1970 sia in Unione sovietica sia nei Bell Labs furono sviluppati diodi laser ad etero-giunzione funzionanti in modo continuo, a temperatura ambiente.

Nel 1964 Charles Townes, Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov ricevettero il premio Nobel della Fisica per i loro lavori sull'elettronica quantistica che portarono alla costruzione di oscillatori e amplificatori basati sul principio del Maser-Laser. Nel 1981 N. Bloembergen e A. Schawlow ricevettero il premio Nobel della Fisica per le applicazioni del laser in spettroscopia.

Facciamo il punto

Fibre ottiche



Test

- Par. 1 **1** La fibra ottica è preferibile al cavo coassiale come mezzo di trasmissione perché:
 a ☐ costa meno;
 b ☐ ha dimensioni minori;
 c ☐ si installa con più facilità;
 d ☐ ha attenuazione minore alle alte frequenze.
- Par. 2 **2** Se un raggio luminoso incide su un materiale con indice di rifrazione maggiore di quello da cui proviene:
 a ☐ l'angolo di incidenza è maggiore di quello di rifrazione;
 b ☐ si ha sempre riflessione totale;
 c ☐ la velocità della luce cresce quando attraversa la superficie di separazione;
 d ☐ l'angolo di incidenza è minore di quello di rifrazione.
- Par. 3 **3** Il jacket della fibra ottica:
 a ☐ riflette la radiazione nel cladding e nel core permettendo la propagazione;
 b ☐ deve avere un indice di rifrazione più basso del core;
 c ☐ è uno strato di plastica esterno al cladding per proteggere la fibra da danni meccanici;
 d ☐ è uno strato esterno a tenuta stagna per mantenere il vuoto nel core.
- Par. 4 **4** La dispersione:
 a ☐ è una modifica della lunghezza d'onda nel corso della propagazione;
 b ☐ causa una diminuzione del picco ed un allargamento dell'impulso luminoso;
 c ☐ è una perdita di potenza nella propagazione all'intero del core;
 d ☐ non avviene mai se la sorgente è un LASER.
- Par. 4 **5** Un valore tipico di larghezza spettrale di un LASER per fibra ottica è:
 a ☐ 1300 nm;
 b ☐ 3 nm;
 c ☐ 850 nm;
 d ☐ 20 nm.

Problemi svolti

Il numero dei pallini ● indica il grado di difficoltà.

- Parr. 2 e 3 **1** Una fibra ottica ha gli indici di rifrazione $n_{core} = 1,5$ e $n_{clad} = 1,48$. Si calcoli l'apertura numerica e si dimostri che un raggio entrante nel core con un angolo di 30° non viene riflesso totalmente alla superficie core-cladding.

Soluzione

Considerando l'indice di rifrazione n_0 uguale a 1, applicando la **12** si trova

$$NA = \frac{\sqrt{1,5^2 - 1,48^2}}{1} \approx 0,244$$

Sempre dalla **12** si ricava il valore dell'angolo di accettazione θ_a :

$$\theta_a = \arcsin(0,244) \approx 14,13^\circ$$

Per cui un raggio entrante con un angolo θ_i di 30° superiore all'angolo di accettazione non verrà riflesso totalmente dalla superficie core-cladding.

Per verificarlo si può calcolare il valore dell'angolo θ_1 di incidenza su tale superficie innanzitutto si calcola l'angolo θ_{core} in ingresso alla fibra, applicando la legge di Snell **5**:

$$\sin(\theta_{core}) = \frac{n_0 \cdot \sin(\theta_i)}{n_{core}} = \frac{0,5}{1,5} \approx 0,33 \Rightarrow \theta_{core} = \arcsin(0,33) \approx 19,47^\circ$$

L'angolo di incidenza θ_i sulla superficie core-cladding è il complementare di θ_{core} come si può vedere anche dalla **figura 5** e quindi $\theta_i \approx 90 - 19,47 \approx 70,53^\circ$.
L'angolo limite dato dalla **9**, vale

$$\theta_{lim} = \arcsin\left(\frac{1,48}{1,5}\right) \approx 80,63^\circ$$

Quindi, poiché l'angolo θ_i è inferiore all'angolo limite, non si ha il fenomeno della riflessione totale.

Parr. 3 e 4



2 In una fibra ottica step-index, utilizzata in seconda finestra, il core ha diametro $50 \mu\text{m}$ ed indice di rifrazione $n_{core} = 1,5$; il cladding ha diametro $100 \mu\text{m}$ ed indice di rifrazione $n_{clad} = 1,485$. Determinare l'angolo limite, l'apertura numerica, il coefficiente di dispersione modale ed il numero di modi di propagazione.

Soluzione

Applicando la **9** si ricava l'angolo limite

$$\theta_{lim} = \arcsin\left(\frac{n_{clad}}{n_{core}}\right) \approx 81,89^\circ$$

Dalla **12** si ricava l'apertura numerica NA

$$NA = \frac{\sqrt{1,5^2 - 1,485^2}}{1} \approx 0,212$$

Infine dalla **20** si ricava il coefficiente di dispersione modale D_m

$$D_m = \frac{1,5}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,485} (1,5 - 1,485) \approx 5,05 \cdot 10^{-11} = 50,5 \cdot 10^{-12} = 50,5 \text{ ns/km}$$

Dalla **13** si ricava il valore della frequenza normalizzata V e per ricavare il numero dei modi N_m si applica la **14**:

$$V = \frac{\pi \cdot 50}{1,3} 0,212 \approx 25,62 \quad N_m = \frac{25,62^2}{2} \approx 328$$

Par. 4



3 Determinare la lunghezza di un collegamento in fibra ottica multimodale sapendo che a causa della dispersione modale e cromatica si ha un allargamento degli impulsi ottici $\Delta\tau = 115 \text{ nsec}$.

Il coefficiente di dispersione D_c cromatica vale $80 \text{ [ps/nm} \cdot \text{km]}$, gli indici di rifrazione di core e cladding valgono rispettivamente $1,495$ e $1,485$. La sorgente ottica emette a $\lambda = 820 \text{ nm}$, con larghezza spettrale $\Delta\lambda = 60 \text{ nm}$.

Soluzione

Per analizzare l'allargamento dovuta alla dispersione modale, si ricava il coefficiente di dispersione modale D_m , applicando la **20**

$$D_m = \frac{1,495}{3 \cdot 10^8 \cdot 1,485} (1,495 - 1,485) \approx 3,3 \cdot 10^{-11} \approx 33 \cdot 10^{-12} = 33 \text{ ns/km}$$

Per un tratto di lunghezza L (in km) si ottiene l'allargamento $\Delta\tau_m = 33 \cdot L \text{ ns}$.

Applicando la **22** si ricava l'allargamento $\Delta\tau_c = 80 \cdot 60 \cdot L = 4,8 \cdot L \text{ ns}$.

Applicando la **27** si uguaglia l'allargamento totale degli impulsi a quello dato dall'effetto dei due contributi:

$$115^2 = (33^2 + 4,8^2) L^2$$

Da cui si ottiene

$$L = \sqrt{\frac{13225}{1112,04}} \approx 3,45 \text{ km}$$

Par. 4

4

Giustificare la relazione approssimata 21.



Soluzione

Ricordando la 20:

$$D_m = \frac{n_{core}}{c_0 \cdot n_{clad}} (n_{core} - n_{clad})$$

Moltiplicando a numeratore e denominatore per $(n_{core} + n_{clad})$:

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{n_{core}}{c_0 \cdot n_{clad}} (n_{core} - n_{clad}) \frac{(n_{core} + n_{clad})}{(n_{core} + n_{clad})} = \\ &= \frac{n_{core}}{c_0 \cdot (n_{core} - \Delta)} \cdot \frac{NA^2}{(n_{core} + n_{clad})} \end{aligned}$$

Chiamando Δ la differenza $\Delta = (n_{core} - n_{clad})$ si ottiene:

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{n_{core}}{c_0 \cdot (n_{core} - \Delta)} \cdot \frac{NA^2}{(n_{core} + n_{core} - \Delta)} = \frac{n_{core}}{c_0 \cdot (n_{core} - \Delta)} \cdot \frac{NA^2}{(2n_{core} - \Delta)} = \\ &= \frac{n_{core} \cdot NA^2}{c_0 \cdot [(2n_{core})^2 - 3n_{core} \cdot \Delta + \Delta^2]} \end{aligned}$$

Se trascuriamo i termini con Δ , in quanto molto piccoli rispetto al primo, si ottiene:

$$D_m \approx \frac{NA^2}{c_0 \cdot 2n_{core}}$$

Problemi da svolgere

Par. 3

5



Si consideri una fibra ottica multimodo avente l'apertura numerica $NA = 0,14$ e l'indice di rifrazione del cladding $n_{clad} = 1,480$. Calcolare l'angolo limite ed il coefficiente di dispersione modale. Che percentuale di potenza inviata dal trasmettitore ottico entro l'angolo limite penetra nel core?

Par. 6

6



Un sistema di trasmissione utilizza una fibra ottica in 2ª finestra avente attenuazione di 0,35 dB/km su un tratto di 50 km, ogni chilometro vi sono le perdite dei giunti di 0,1 dB. I connettori perdono 0,5 dB ciascuno. La sensitivity del diodo PIN è di -39 dB_m . Il LASER emette una potenza ottica di -13 dB_m . Determinare il bilancio di potenza ed il margine di sicurezza ottenuto.

Par. 6

7



Un sistema di trasmissione digitale opera su fibra ottica in 2ª finestra, ha i seguenti parametri: potenza emessa dal LASER -3 dB_m , perdite della fibra 0,5 dB/km; perdita di ogni giunto 0,4 dB; lunghezza dello spezzone 1,5 km; perdita di ogni connettore 0,7 dB; sensitivity dall'APD -55 dB_m (alla frequenza di 35 Mbit/sec) e -44 dB_m (alla frequenza di 500 Mbit/s); margine di sicurezza 9 dB. Determinare la lunghezza massima del collegamento alle due frequenze di lavoro 35 Mbit/sec e 500 Mbit/s. Se si considera una penalità aggiuntiva di 5 dB dovuta alla dispersione cromatica (alla frequenza di 500 Mbit/s), di quanto si riduce la lunghezza?

Parr. 4 e 6



8

Un collegamento telefonico nazionale alla frequenza di 1 Gbit/s utilizza un LASER in 3^a finestra che emette un segnale di potenza ottica di 0,5 mW e di larghezza spettrale $\Delta\lambda = 4$ nm. In ricezione l'APD ha sensitivity -38 dB_m. La fibra attenua 0,3 dB/km con spezzoni di 2,5 km. I connettori perdono 0,5 dB ciascuno ed i giunti 0,3 dB. Il margine di sicurezza richiesto è di 9 dB.

Determinare la lunghezza massima di una tratta senza rigeneratori per l'effetto delle sole perdite di potenza.

Se la fibra ha un coefficiente di dispersione cromatica di 13 ps/nm · km e la banda del sistema è di 0,5 GHz, determinare la lunghezza massima della tratta dovuta alla dispersione.

Parole chiave

Individuare i termini e i raggruppamenti delle parole chiave di inizio sezione (vedere l'esempio risolto della sezione 2A).