

I mezzi trasmissivi

1 Introduzione

La trasmissione dell'informazione a distanza può essere attuata attraverso un canale che sia in grado di ospitare una o più grandezze fisiche le quali sono, a loro volta, le vettrici di tale informazione. Gli attuali canali di trasmissione utilizzano due grandezze fisiche elettriche, il **campo elettrico** e il **campo magnetico** tra loro interagenti (**campo elettromagnetico**), a diverse frequenze di lavoro e, in conseguenza di ciò, con propagazione su mezzi trasmissivi diversi. Tali mezzi trasmissivi sono:

Possibili mezzi trasmissivi

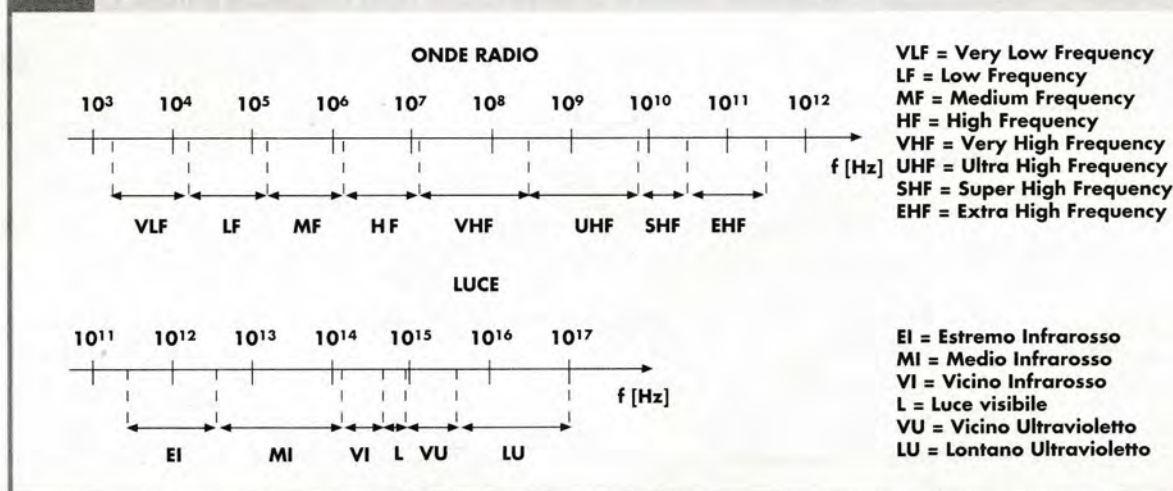
- **supporti metallici a elemento doppio** (cavo coassiale, linea bifilare, doppiini telefonici ecc.) e **a elemento singolo** (guide d'onda);
- **supporti non metallici** (fibre ottiche);
- **spazio vuoto o aria** (onde radio terrestri o satellitari).

Frequenze utilizzate

Se esiste un supporto materiale che fa da sostegno al campo elettromagnetico (i primi due casi) spesso si parla anche di **onde guidate**.

Le frequenze utilizzate nella trasmissione sono estremamente variabili e coprono il campo compreso tra poche migliaia di Hz e 10^{15} Hz secondo la classificazione di figura 1.

FIG. 1 Classificazione delle frequenze usate nella trasmissione dell'informazione.



La distinzione tra onde radio e luce è del tutto formale trattandosi di un diverso aspetto della stessa realtà elettromagnetica. Per frequenze superiori a 10^{17} Hz si entra nel campo delle **radiazioni ionizzanti** che vengono indicate con i termini: **raggi X** e **raggi γ** . La zona delle frequenze comprese tra 1 GHz e 40 GHz (zona UHF e SHF) è stata divisa ulteriormente in diverse bande dall'IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineering*) secondo quanto indicato in figura 2.

FIG. 2 Suddivisione delle frequenze tra 1 e 40 GHz secondo l'IEEE.

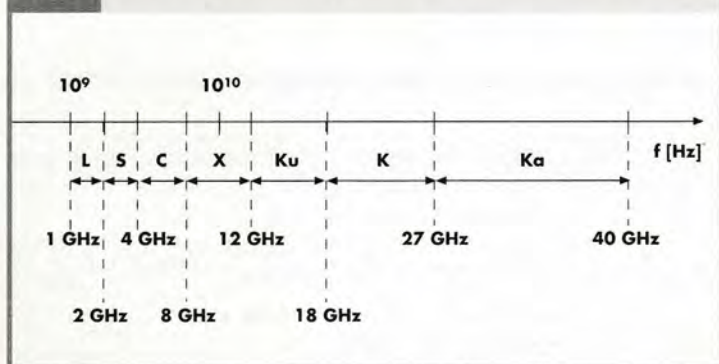
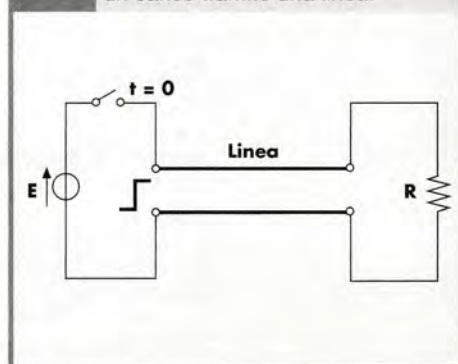


FIG. 3 Collegamento di un generatore a un carico tramite una linea.



Esistono anche altre denominazioni che tendono a suddividere in altre bande di frequenza a seconda della loro utilizzazione.

Quando le cariche elettriche vengono accelerate in qualsiasi modo da un opportuno dispositivo, sia per inviare energia in un utilizzatore a distanza sia per imporre una situazione elettromagnetica che trasmetta informazione a una stazione ricevente, il campo elettrico dovuto alla presenza di cariche e il campo magnetico dovuto al loro movimento non si stabiliscono istantaneamente nel mezzo trasmissivo ma si propagano a una velocità finita: la velocità c dell'onda elettromagnetica (della luce) che nello spazio vuoto è di circa $3 \cdot 10^8$ m/s. Si immagini, per esempio una linea che colleghi un generatore a un carico come in figura 3. La tensione E imposta all'istante $t = 0$ dalla chiusura dell'interruttore non può raggiungere istantaneamente il carico R ma potrà "camminare" sulla linea a una velocità finita e raggiungerà il carico con un certo ritardo. Questo può essere spiegato in termini di campo elettrico e campo magnetico che sono guidati dai conduttori dal generatore al carico, ma può anche essere più facilmente spiegato in termini di induttanza e capacità distribuita dei due conduttori. La velocità di propagazione dipende dal mezzo che circonda i conduttori e nel quale si forma il campo elettromagnetico. Per linee in aria la velocità di propagazione è molto prossima alla velocità della luce nello spazio vuoto mentre è più bassa per dielettrici solidi. Se il generatore impone una tensione che varia nel tempo con legge sinusoidale, la distanza che tale tensione percorre in un periodo è detta **lunghezza d'onda λ** :

Lunghezza d'onda



$$\lambda = u \cdot T$$

1

con u = velocità di propagazione e T = periodo della tensione sinusoidale. Sarà allora anche:

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

2

Ammissa $u = c = 3 \cdot 10^8$ m/s, si ottengono le lunghezze d'onda: $\lambda = 6000$ km per $f = 50$ Hz, $\lambda = 100$ m per $f = 3$ MHz, $\lambda = 10$ cm per $f = 3$ GHz. Come si vede, il ritardo tra generatore e carico diventa importante per linee tanto lunghe (oppure per frequenze così elevate) per cui vi sia una parte apprezzabile del periodo presente sulla linea di collegamento. In questi casi il ritardo può essere espresso più convenientemente in termini di lunghezza d'onda.

Onde elettromagnetiche

$\lambda > \frac{1}{5} \lambda$

Lo studio dei canali di trasmissione deve essere affrontato con le teorie delle onde elettromagnetiche se la lunghezza del mezzo trasmissivo è confrontabile con $1/4$ di lunghezza d'onda. Negli altri casi esistono metodi di studio più semplici come, in particolare, la teoria usata nel capitolo 2 per i circuiti a regime sinusoidale. In tali circostanze si parla di tensioni e correnti e dei loro angoli di fase, mentre se la dimensione della linea diventa confrontabile con $1/4$ di lunghezza d'onda occorre operare in termini di campo elettrico e campo magnetico. Nei prossimi paragrafi sarà affrontato lo studio della propagazione del campo elettromagnetico in canali su supporto metallico, su fibre ottiche e nello spazio vuoto.

■ ■ 11 ■ ■ Fibre ottiche

Fibre ottiche

Guide d'onda

Le onde elettromagnetiche di frequenza più elevata appartengono alla regione che nella figura 1 è definita luce, tra l'estremo infrarosso e il lontano ultravioletto. Se le frequenze inferiori possono propagarsi per onde su supporti metallici, *la luce può propagarsi solo se viene "guidata" all'interno di particolari mezzi chiamati fibre ottiche*. L'uso delle linee di trasmissione cessa infatti la sua praticità a frequenze prossime a 5 GHz a causa della forte attenuazione subita da un segnale che in esse si propaga. Le onde elettromagnetiche con frequenze comprese nella banda SHF e EHF vengono fatte transitare in particolari mezzi trasmissivi detti **guide d'onda**, costituite da *tubi di sezione rettangolare o circolare le cui dimensioni trasversali sono confrontabili con un quarto della lunghezza d'onda*. In tali circostanze non è più valida l'ipotesi di onda TEM ma, a causa dell'assenza di uno dei conduttori di supporto per l'onda nelle linee di trasmissione, si ottengono **onde TE** (*Trasversali Elettriche*: solo il campo elettrico è trasversale) oppure **TM** (*Trasversali Magnetiche*: solo il campo magnetico è trasversale). Questo significa che, nel caso di onda TE, esiste anche una componente del campo magnetico nella direzione di propagazione mentre nel caso di onda TM esiste una componente del campo elettrico nella direzione di propagazione. *Le guide d'onda non consentono la trasmissione di onde con frequenza inferiore a una frequenza detta di taglio e costituiscono l'anello di congiunzione tra la propagazione in linea e la propagazione in guida*. *Le fibre ottiche possono essere viste come le guide d'onda per le radiazioni luminose* e quindi sono costituite da un particolare supporto che è in grado di trasmettere le frequenze superiori a una certa frequenza. Le fibre ottiche hanno avuto uno sviluppo notevole quando due ricercatori inglesi, Kao e Hockam nel 1966, hanno dimostrato che la notevole attenuazione fino ad allora riscontrata era dovuta alla presenza di impurità nei vetri che le costituivano mentre le perdite intrinseche dei materiali impiegati ammontavano a pochi dB/km ed erano funzione della lunghezza d'onda della luce e per le frequenze più elevate l'attenuazione teorica era trascurabile. I risultati teorici hanno dato un grande impulso alla costruzione e alle verifiche sperimentali e così nel 1970 si ottenne la prima fibra ottica con una attenuazione di 20 dB/km. Ul-

Vantaggi delle fibre ottiche

teriori studi consentirono di ottenere le attuali fibre ottiche con una attenuazione, per ~~lato~~ di una certa lunghezza d'onda, di soli 0.2 dB/km (20 dB ogni 100 km).

I vantaggi più importanti nell'uso di fibre ottiche sono:

- immunità ai disturbi elettromagnetici esterni;
- isolamento galvanico tra trasmettitore e ricevitore;
- attenuazione inferiore rispetto sia alle linee di trasmissione sia alle guide d'onda;
- grande capacità di canali per ogni fibra;
- assenza di diafonia;
- basso peso e ridotto ingombro meccanico.

Gli svantaggi più evidenti sono:

- tecnologia costruttiva in continua evoluzione e quindi poca standardizzazione;
- difficile connessione tra diversi tronchi;
- accessori costosi.

Lo studio delle fibre ottiche dovrebbe essere sviluppato utilizzando gli strumenti del campo elettromagnetico ma questo non potrebbe essere trattato in questa sede, per le difficoltà che si incontrerebbero. D'altra parte, per una prima conoscenza non legata agli aspetti energetici, è possibile utilizzare gli strumenti dell'ottica geometrica, noti dalla fisica e che sono comunque ripresi nel successivo paragrafo.

12 Ottica fisica e ottica geometrica

La luce è un'onda elettromagnetica e, sebbene la frequenza sia molto più elevata rispetto alle onde già analizzate, la medesima natura ne provocherà un comportamento analogo. Innanzitutto essa costituisce un'onda piana che si propagerà in modo TEM ossia manterrà il vettore \vec{E} (campo elettrico) e il vettore \vec{H} (campo magnetico) trasversali rispetto alla direzione di propagazione x : campo elettrico, campo magnetico e direzione di propagazione formano una terna destra nello spazio. Per tenere conto della fase temporale occorre considerare, come nelle linee di trasmissione e nelle onde elettromagnetiche nello spazio vuoto, l'influenza del mezzo in cui il campo si sta propagando e quindi occorre considerare la sua impedenza. Nel caso dello spazio vuoto l'impedenza è un numero reale e quindi i due vettori sono in fase temporale.

Campo elettrico e campo magnetico si propagano alla stessa velocità di $3 \cdot 10^8$ m/s nello spazio vuoto ma inferiore in altri mezzi di diversa costante dielettrica relativa maggiore di 1 (vedere la 18). I punti che si trovano alla medesima fase temporale, e che si stanno muovendo nello spazio, sono detti nell'ottica geometrica i fronti d'onda e tali fronti trasmettono la perturbazione elettromagnetica successivamente nei diversi punti. Questi ultimi subiscono la vibrazione variabile nel tempo con la legge imposta dalla sorgente.

Si supponga ora che l'onda elettromagnetica luminosa si stia propagando nello spazio vuoto (o nell'aria che ha le medesime caratteristiche elettromagnetiche del vuoto) e incontri sul suo cammino un mezzo di diversa natura la cui superficie di separazione sia perfettamente piana e liscia. Si supponga pure che l'onda incida con la direzione di propagazione perpendicolare alla superficie di separazione del mezzo e quindi con i fronti d'onda paralleli a tale superficie come in figura 38. Le diverse caratteristiche fisiche del mezzo 2 rispetto al mezzo 1 danno origine a un effetto simile a quello che si presenta nel caso di una linea di trasmissione non perfettamente adattata: si ottengono un'onda trasmessa e un'onda riflessa. L'intensità dei campi nell'onda trasmessa e nell'onda riflessa è legata al "disadattamento" del mezzo 2 rispetto al mezzo 1 e può essere calcolata mediante un coefficiente simile al coefficiente di riflessione nelle linee.

Si possono allora considerare ancora le relazioni 93 che forniscono i campi delle onde progressive aggiungendo, come nelle linee, i campi delle onde regressive. Oc-

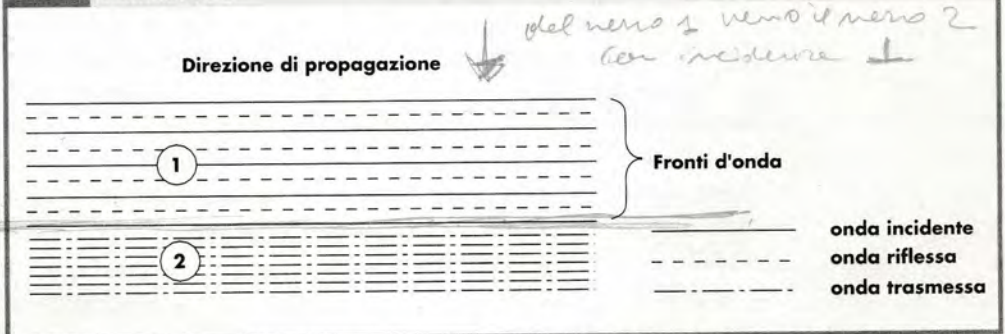
Fronti d'onda

corre tenere presente che il campo magnetico, legato alle correnti generalizzate, subirà una inversione di fase rispetto al campo incidente. Nel mezzo 1 si avrà allora:

$$\bar{E}_{\theta 1} = j\bar{Z}_{01}H_M \cdot \left[\underbrace{e^{j(\omega t - \beta_1 r)}}_{\text{onda progressiva}} + \underbrace{\bar{\Gamma} \cdot e^{j(\omega t - \beta_1 r)}}_{\text{onda regressiva}} \right] \quad 99a$$

$$\bar{H}_{\varphi 1} = jH_M \cdot \left[\underbrace{e^{j(\omega t - \beta_1 r)}}_{\text{onda progressiva}} - \underbrace{\bar{\Gamma} \cdot e^{j(\omega t - \beta_1 r)}}_{\text{onda regressiva}} \right] \quad 99b$$

FIG. 38 L'onda incidente, incontrando la superficie di separazione, determina un'onda trasmessa e una riflessa.



Coefficiente di riflessione

Il **coefficiente di riflessione** $\bar{\Gamma}$, in generale complesso, tiene conto della variazione del modulo e della fase del campo riflesso rispetto al campo incidente e viene definito come:

$$\bar{\Gamma} = \frac{\bar{E}_{\theta 1}^-}{\bar{E}_{\theta 1}^+} = -\frac{\bar{H}_{\varphi 1}^-}{\bar{H}_{\varphi 1}^+} \quad 100$$

Come nella linea non adattata una parte dell'onda incidente entra nel carico, così nel mezzo 2 ci sarà un'onda che potrà essere espressa dalle:

$$\bar{E}_{\theta 2} = j\bar{Z}_{02}H_M\bar{T} \cdot e^{j(\omega t - \beta_2 r)} \quad \bar{H}_{\varphi 2} = jH_M\bar{T} \cdot e^{j(\omega t - \beta_2 r)} \quad 101$$

Coefficiente di trasmissione

Il **coefficiente di trasmissione** \bar{T} , anch'esso in generale complesso, tiene conto della variazione di modulo e fase del campo trasmesso nel mezzo 2 rispetto al campo incidente:

$$\bar{T} = \frac{\bar{E}_{\theta 2}^+}{\bar{E}_{\theta 1}^+} = \frac{\bar{H}_{\varphi 2}^+}{\bar{H}_{\varphi 1}^+} \quad 102$$

Si osservi che nei due mezzi sono diverse sia le impedenze caratteristiche \bar{Z}_0 sia le costanti di fase β .

Si potrebbe dimostrare che:

$$\bar{\Gamma} = \frac{\bar{Z}_{02} - \bar{Z}_{01}}{\bar{Z}_{02} + \bar{Z}_{01}} \quad 103$$

$$\bar{T} = \frac{2\bar{Z}_{01}}{\bar{Z}_{02} + \bar{Z}_{01}} \quad 104$$

La relazione 103 è analoga alla 69, ottenuta per le linee di trasmissione.

Il fatto che $\bar{\Gamma}$ e \bar{T} siano, in generale, complessi fa pensare che *esistano*, come è poi nella realtà, *materiali in cui l'impedenza caratteristica non sia puramente reale* ma in generale complessa (il che giustifica la scelta simbologica effettuata). In tali materiali, non sicuramente nello spazio vuoto, *saranno presenti sia perdite dielettriche sia perdite magnetiche*. Esisteranno materiali in cui tutta l'onda incidente verrà trasmessa (mezzo adattato $\bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{02}$ e $|\bar{\Gamma}| = 0$) e altri materiali in cui tutta l'onda incidente verrà completamente riflessa (massimo disadattamento $|\bar{\Gamma}| = 1$).

Quando $\bar{Z}_{01} = \bar{Z}_{02}$ si ha $\bar{T} = 1$: *tutta l'onda incidente viene trasmessa e continua nel suo cammino senza apprezzabili diminuzioni di intensità nel campo elettromagnetico*. Il mezzo incontrato si dice *trasparente all'onda elettromagnetica luminosa*. Nel caso di onda completamente riflessa il materiale viene chiamato **specchio**.

L'onda riflessa incontrerà, nella sua propagazione a partire dall'ostacolo, un materiale con caratteristiche elettromagnetiche uguali all'onda incidente e quindi la **velocità di propagazione** dell'onda riflessa è uguale a quella dell'onda incidente. L'onda trasmessa dovrà invece propagarsi in un mezzo con caratteristiche elettromagnetiche diverse e quindi con velocità diversa. La velocità di propagazione è inversamente proporzionale alla radice quadrata della costante dielettrica relativa (formula 18) e, visto che tutti i materiali hanno tale costante maggiore o uguale a uno, la velocità nel mezzo 2 sarà minore o uguale alla velocità nell'aria. L'onda trasmessa viene detta, nell'ottica geometrica, **onda rifratta** e il meccanismo di trasmissione viene detto **rifrazione**.

Se si ricorda ora la 2 si vede che, con la diminuzione della velocità di propagazione si deve avere, a parità di frequenza, una diminuzione della lunghezza d'onda della radiazione (si osservi che il materiale è un dispositivo passivo lineare e quindi non è in grado di variare la frequenza del segnale: potrebbe farlo solo se fosse un generatore oppure un dispositivo non lineare). Quindi al diminuire della velocità di propagazione i fronti d'onda tendono a raggrupparsi come indicato nella figura 38, dove si è supposta la velocità nel mezzo 2 minore che nell'1.

Si consideri ora un fronte di un'onda elettromagnetica luminosa che incide sulla superficie di separazione con una direzione di propagazione formante un **angolo σ** con la perpendicolare (fig. 39a). Si consideri dapprima la sola onda rifratta: dopo un intero periodo il fronte sarà passato dalla posizione l alla posizione m nel mezzo 1 e dalla posizione l' alla posizione m' nel mezzo 2. Contemporaneamente sulla superficie di separazione il fronte d'onda avrà "spazzolato" una distanza **AB** in comune tra l'onda incidente e l'onda rifratta.

Se si indica con ψ l'angolo formato tra la direzione di propagazione dell'onda rifratta e la perpendicolare si può scrivere:

$$\sin \psi = \frac{AD}{AB} = \frac{\lambda_2}{AB} \quad \sin \sigma = \frac{BC}{AB} = \frac{\lambda_1}{AB} \quad 105$$

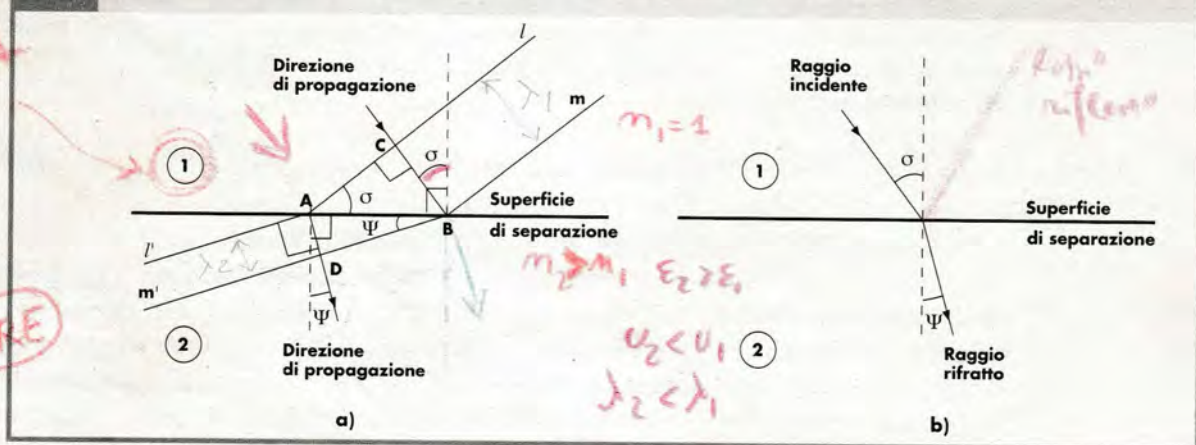
Ricordando la 2 si ricava:

$$AB = \frac{\lambda_2}{\sin \psi} = \frac{\lambda_1}{\sin \sigma} \quad AB = \frac{u_2}{f \sin \psi} = \frac{u_1}{f \sin \sigma} \quad 106$$

Quindi:

$$n_{12} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\sin \sigma}{\sin \psi} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad 107$$

FIG. 39 Il fenomeno della rifrazione (a) e sua interpretazione su un singolo raggio di luce (b).



Indice di rifrazione

La costante n_{12} viene detta **indice di rifrazione** del mezzo 1 rispetto al mezzo 2. Se il primo mezzo è l'aria, l'indice di rifrazione ottenuto viene detto **indice di rifrazione assoluto** del mezzo 2:

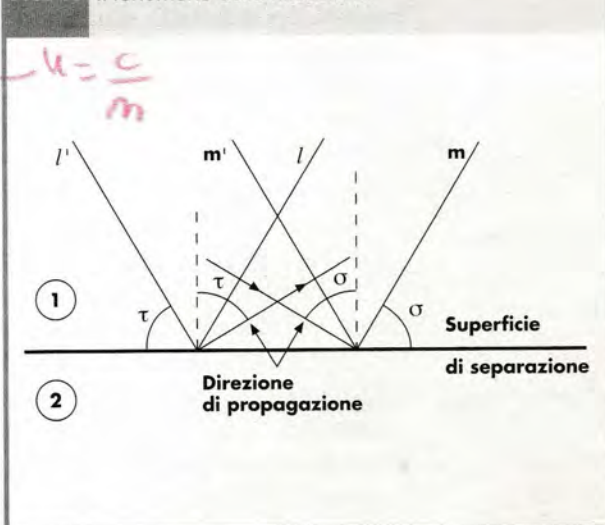
$$n_2 = \frac{c}{u_2} = \frac{\sin \sigma}{\sin \psi} = \frac{c}{u_2} = \sqrt{\epsilon_r} \quad 108$$

Si osservi che passando dal vuoto a un altro materiale, la velocità di propagazione diminuisce e quindi l'angolo ψ diminuisce rispetto a σ : la direzione di propagazione tende ad avvicinarsi alla perpendicolare alla superficie di separazione. Sempre dalla **108** si vede che, noto l'indice di rifrazione assoluto, è possibile determinare la velocità di propagazione della luce nel materiale considerato (tab. 1).

TAB. 1 - Velocità di propagazione della luce in funzione dell'indice di rifrazione (alla frequenza del verde)

Mezzo	Indice di rifrazione assoluto	Velocità di propagazione
vuoto	1	$3 \cdot 10^8$ m/s
aria	1,00029	$2,99 \cdot 10^8$ m/s
acqua (25 °C)	1,33	$2,26 \cdot 10^8$ m/s
ghiaccio	1,31	$2,29 \cdot 10^8$ m/s
vetro (crown)	1,50	$2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (flint)	1,65	$1,82 \cdot 10^8$ m/s
arseniuro di gallio (GaAs)	3,60	$0,83 \cdot 10^8$ m/s
silicio (Si)	2,417	$1,24 \cdot 10^8$ m/s
diamante	2,417	$1,24 \cdot 10^8$ m/s
quarzo	1,51	$1,98 \cdot 10^8$ m/s

FIG. 40 Il fenomeno della riflessione.



In termini più semplici, l'indice di rifrazione può essere espresso sempre dalle **107** e **108** facendo riferimento alla figura 39b, dove è evidenziato un singolo raggio luminoso. Dall'indice di rifrazione assoluto di due materiali è possibile calcolare l'indice di rifrazione relativo tra loro:

$$n_{12} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_1/c}{u_2/c} = \frac{1/n_1}{1/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{109}$$

Si noti come la velocità di propagazione nei vari materiali sia inversamente proporzionale all'indice di rifrazione assoluto del materiale. Se si riuniscono i risultati della **107** e della **109** si ottiene:

Legge di Snell

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \varphi}{\sin \psi} \quad \text{110}$$

La relazione ottenuta è nota come la **legge di Snell** ed esprime il legame di proporzionalità inversa tra i seni degli angoli coinvolti e gli indici di rifrazione dei due mezzi. Per l'onda riflessa si verifica la situazione di figura 40. Gli angoli dei fronti d'onda incidente e riflessa misurati rispetto alla superficie di separazione sono uguali: lo saranno pure gli angoli misurati sulle direzioni di propagazione rispetto alla perpendicolare. In ultima analisi risulta $\sigma = \tau$.

Come già detto, si è soliti indicare con il termine **raggio** la direzione di propagazione e quindi gli angoli σ , τ e ψ sono detti, in relazione a tali raggi, rispettivamente **angoli di incidenza, di riflessione e di rifrazione**.

Utilizzando le relazioni già note e svolgendo alcuni calcoli, si potrebbe dimostrare che, nell'ipotesi di onda incidente con direzione di propagazione perpendicolare alla superficie, il coefficiente di riflessione è legato all'indice di rifrazione dei materiali dalla seguente relazione:

$$|\bar{r}| = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \text{111}$$

Noti quindi gli indici di rifrazione dei due materiali è possibile, nel caso di incidenza perpendicolare, valutare l'intensità dell'onda rifratta rispetto a quella incidente.

Se l'incidenza non è più perpendicolare, ma come nel caso di figura 39, la situazione si complica e il coefficiente di riflessione viene anche a dipendere dall'angolo di incidenza. Inoltre i coefficienti di riflessione del campo elettrico e del campo magnetico non sono più uguali tra loro e si possono avere situazioni in cui addirittura il coefficiente di riflessione del campo magnetico è nullo (angolo di Brewster). Quindi il rapporto tra le intensità dei campi riflessi e incidenti è in generale funzione dell'angolo di incidenza: aumentando l'angolo di incidenza, a parità di indici di rifrazione dei materiali, si ha un incremento del modulo del coefficiente di riflessione del campo elettrico. In effetti con incidenze quasi radenti anche materiali che sembrano assorbire la luce (corpi neri) diventano specchi.

Si potrebbe dimostrare che la potenza dell'onda trasmessa è superiore a quella dell'onda riflessa con incidenza normale; aumentando l'angolo di incidenza diminuisce la potenza trasmessa (rifratta) e cresce quella riflessa.

Si consideri ora il caso in cui si passi da un materiale con indice di rifrazione maggiore a un altro con indice di rifrazione inferiore: la situazione è ancora quella di figura 39b purché si rovesci la direzione di propagazione. Quindi il raggio incidente (inferiore) si trova più vicino alla perpendicolare mentre il raggio rifratto si trova più lontano. All'aumentare dell'angolo di incidenza si otterrà la situazione di figura 41 (si indicano solo le direzioni dei raggi). L'angolo σ per cui $\psi = 90^\circ$ viene detto **angolo limite**. Se si aumenta ulteriormente tale angolo non si ottiene più rifrazione ma solo riflessione: tutta la potenza viene trasferita nell'onda riflessa. Noto l'indice di rifrazione dei materiali è possibile determinare l'angolo limite. A tal fine basta applicare la legge di Snell 110 con $\psi = 90^\circ$:

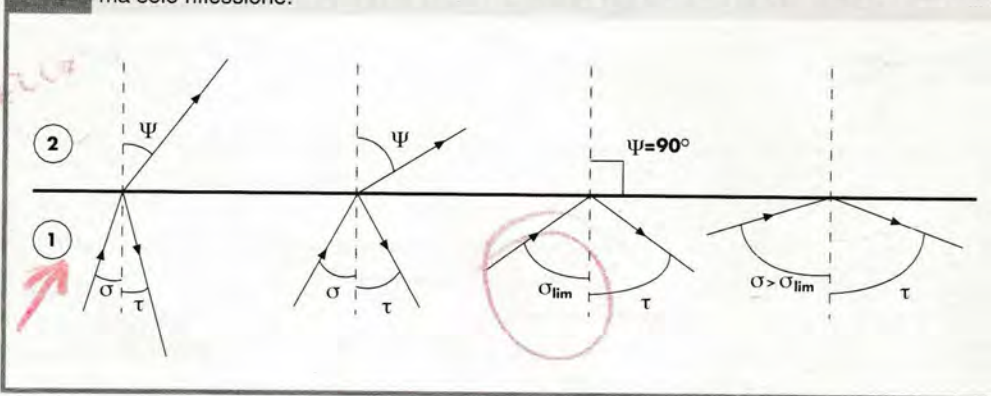
$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \sigma}{\sin \psi}$$

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \sigma_{lim}}{\sin 90^\circ} = \sin \sigma_{lim} \Rightarrow \sigma_{lim} = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

112

Nel caso del vetro l'angolo limite è circa 42° . Con incidenze superiori a tale angolo non vi è più onda trasmessa ma si ha riflessione totale e tutta la potenza viene trasferita nell'onda riflessa.

FIG. 41 Se il raggio incidente forma un angolo σ superiore a quello limite non si ha più rifrazione ma solo riflessione.



13 Struttura delle fibre ottiche e propagazione

Una **fibra ottica** (fig. 42) è costituita da un **nucleo vetroso o di quarzo (core)** sede della luce in propagazione e da un **mantello esterno (cladding)** che, a causa del diverso indice di rifrazione rispetto al core, mantiene confinata la radiazione. La fibra ottica è poi rivestita da uno **strato protettivo** che le conferisce resistenza meccanica e protezione dagli agenti esterni. Il diametro del nucleo varia, a seconda della tec-

nologia costruttiva, tra 10 μm e 50 μm mentre il mantello e il rivestimento protettivo hanno un diametro tipico di 125 μm e 250 μm .

FIG. 42 La struttura delle fibre ottiche.

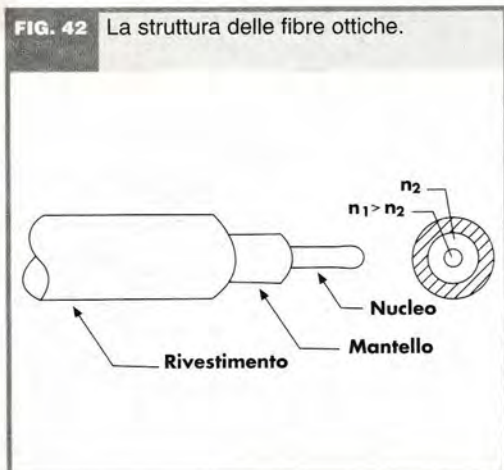
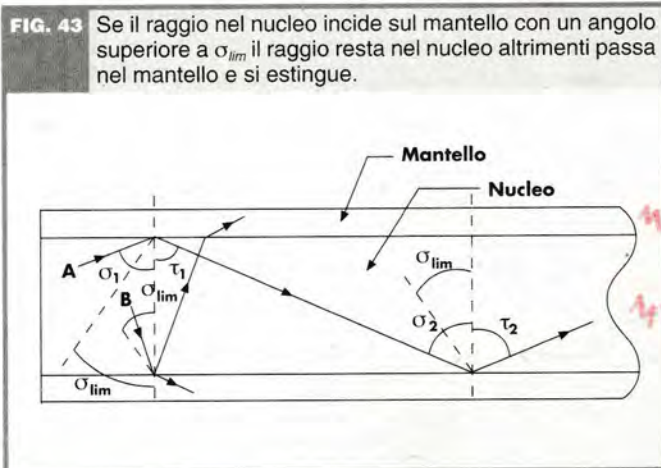


FIG. 43 Se il raggio nel nucleo incide sul mantello con un angolo superiore a σ_{lim} il raggio resta nel nucleo altrimenti passa nel mantello e si estingue.



L'indice di rifrazione del nucleo è leggermente superiore a quello del mantello (pochi percento) così che la luce, incidente sulla superficie di separazione con un angolo superiore all'angolo limite, venga completamente riflessa (raggio guidato). Se al contrario incide con un angolo inferiore all'angolo limite, essa verrà rifratta nel mantello e qui completamente estinta (raggio irradiato). Dopo la prima riflessione totale il raggio di luce esce con un angolo di riflessione pari all'angolo di incidenza e quindi incontra l'altra estremità della superficie di separazione con un angolo di incidenza ancora superiore all'angolo limite. Facendo riferimento alla figura 43, il raggio A è di tipo guidato infatti, incidendo sulla superficie di separazione con un angolo σ_1 superiore all'angolo limite, è riflesso con un angolo $\tau_1 = \sigma_1$; incide la seconda volta con un angolo $\sigma_2 = \tau_1$ e viene riflesso con un angolo $\tau_2 = \sigma_2$. Per continue riflessioni il raggio di luce si propagerà lungo la fibra ottica senza perdite di potenza (salvo le attenuazioni dovute alle impurità della fibra ottica). Il raggio B è invece irraggiato, infatti incide con un angolo inferiore all'angolo limite e viene quindi rifratto nel mantello dove viene fortemente attenuato per la costruzione dissipativa realizzata. In effetti per i raggi come B vi sarà anche la presenza, indesiderata, di raggi riflessi nel nucleo (non tutta la potenza viene trasferita nell'onda trasmessa) però il raggio riflesso incontrerà la seconda volta la superficie di separazione con un angolo inferiore all'angolo limite. Qui verrà nuovamente rifratto e riflesso e nel raggio riflesso la potenza contenuta sarà ancora diminuita: dopo qualche riflessione si avrà la completa estinzione del raggio B.

Per ottenere una buona propagazione lungo la fibra ottica è necessario fare in modo che i raggi di luce siano di tipo guidato. Facendo riferimento alla figura 44 occorre allora immettere la luce nella fibra ottica secondo un opportuno angolo massimo di apertura γ_M . Il raggio immesso nella fibra ottica proviene dall'aria (o da altro mezzo) con indice di rifrazione n_0 ($n_0 = 1$ se aria). La legge di Snell 110 assicura che:

$$n_{01} = \frac{n_1}{n_0} = \frac{\text{sen} \gamma_M}{\text{sen} \psi} \quad 113$$

Apertura
numerica

Si definisce **apertura numerica NA** della fibra ottica:

$$NA = n_0 \text{sen} \gamma_M \quad 114$$

ed esprime la capacità di accettazione della fibra ottica stessa: più essa è grande, più ampio risulta l'angolo solido del cono di accettazione.

FIG. 44 Se il raggio di luce viene immesso con un angolo non superiore a γ_M è di tipo guidato.

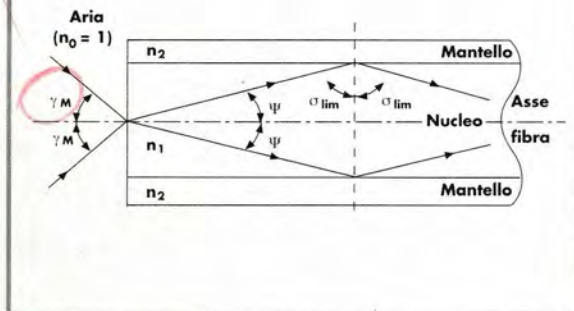
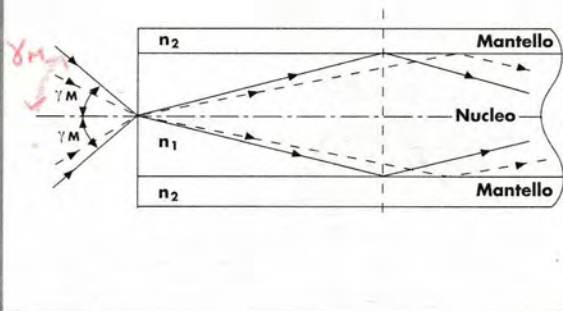


FIG. 45 I raggi guidati possibili potrebbero essere infiniti.



L'apertura numerica è legata all'angolo limite tra nucleo e mantello. Infatti dalla **113** si ha:

$$NA = n_0 \sin \gamma_M = n_1 \sin \psi \quad 115$$

mentre dalla figura 44 si vede che risulta $\psi = 90^\circ - \sigma_{lim}$; ricordando allora che $\sin(90^\circ - x) = \cos x$ si ottiene:

$$NA = n_1 \sin \psi = n_1 \sin(90^\circ - \sigma_{lim}) = n_1 \cos \sigma_{lim} = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \sigma_{lim}} \quad 116$$

Ricordando la **112** si può anche scrivere:

$$NA = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \sigma_{lim}} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 117$$

Nota l'apertura numerica di una fibra ottica è possibile determinare con la **114** l'apertura massima dell'angolo di accettazione:

Angolo di accettazione

$$\gamma_M = \arcsen \frac{NA}{n_0} = \arcsen \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} = \arcsen \frac{\sqrt{(n_1 + n_2) \cdot (n_1 - n_2)}}{n_0} \quad 118$$

con $n_0 = 1$ nel caso in cui la luce sia immessa nella fibra a partire dall'aria.

La **118** evidenzia che l'angolo massimo di accettazione cresce all'aumentare della differenza tra gli indici di rifrazione dei materiali che costituiscono il nucleo e il mantello. Se nucleo e mantello hanno lo stesso indice di rifrazione, la luce può essere accettata solo per $\gamma_M = 0$, ossia solo sull'asse della fibra ottica.

Sembrerebbe che una differenza marcata tra gli indici di rifrazione del nucleo e del mantello possa essere un vantaggio per una fibra ottica, in effetti sono opportuni alcuni chiarimenti; al riguardo si faccia riferimento alla figura 45. Poiché sono possibili infinite direzioni secondo cui la luce può essere accettata, all'interno della fibra ottica sono teoricamente possibili infiniti percorsi diversi per i raggi guidati, uno per ogni direzione di accettazione possibile. Nella realtà non è vero che tutti i raggi incidenti entro l'angolo di accettazione massimo possono diventare raggi guidati. La propagazione lungo una fibra ottica può avvenire solo secondo un numero finito di modi che si potrebbe dimostrare, con calcoli non semplici, essere:

$$M = \frac{1}{2} \left(\pi \frac{D}{\lambda} NA \right)^2 \quad 119$$

5 angoli di incidenza
7 angoli di RIFLESS
4 angoli di RIFRAZ

v. 243 RAGGIO

γ_M angolo massimo di apertura (d' accettazione)

dove M è il numero di modi possibili, D è il diametro del nucleo della fibra ottica e λ è la lunghezza d'onda della luce utilizzata. Nella relazione 119 hanno, ovviamente, senso solo i valori interi e vanno scartate le cifre dopo la virgola. Se $M = 1$ la fibra ottica si dice **monomodale** (o **monomodo**) mentre se $M > 1$ la fibra ottica si dice **multimodale** (o **multimodo**). Al crescere dell'apertura numerica, a parità di altre condizioni, cresce M e crescono quindi i modi di propagazione nella fibra ottica: ai diversi modi corrispondono differenti cammini della luce nella fibra.

Se l'indice di rifrazione della fibra ottica è costante nel nucleo, la costanza della velocità di propagazione comporterà, con cammini diversi, tempi di propagazione del segnale diversi; in particolare, facendo riferimento alla figura 45 si vede subito che un raggio entrante con una direzione parallela all'asse della fibra raggiunge la posizione individuata dalla linea tratteggiata effettuando un percorso minore, rispetto a quello del raggio entrante con l'angolo massimo di accettazione: *il minore percorso comporta quindi, a parità di velocità, un tempo minore*. Tutti i raggi con angoli entranti intermedi impiegheranno tempi intermedi.

La differenza di tempo di propagazione tra i due raggi limite Δt viene detta **dispersione modale**. Analiticamente, con semplici calcoli geometrici, si potrebbe dimostrare che, detta l la lunghezza della fibra, risulta:

$$\Delta t = \frac{l}{c} \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) \quad 120$$

In ultima analisi, per ogni modo di propagazione esiste un particolare angolo di accettazione della fibra ottica e quindi un diverso valore del tempo impiegato a percorrerla.

Ammessi allora di inviare in entrata alla fibra ottica un impulso di una certa durata, la dispersione modale porterà, in uscita, a una serie di impulsi "dispersi" nel tempo: tali diversi impulsi si sovrappongono e quindi in uscita alla fibra ottica si ottiene un allargamento dell'impulso d'entrata.

La 120 mostra che *per diminuire la dispersione modale* è necessario diminuire la differenza tra gli indici di rifrazione del nucleo e del mantello (valori tipici $n_1 = 1,48$, $n_2 = 1,46$) ma ciò comporta anche una diminuzione dell'apertura numerica NA e di conseguenza anche una riduzione dei modi di propagazione nella fibra ottica (di solito dai 10 ai 40 modi). La diminuzione dell'apertura numerica non deve però essere eccessiva in quanto questo porta a problemi di immissione della luce nella fibra. *La scelta degli indici di rifrazione del nucleo e del mantello deve allora essere un giusto compromesso tra la dispersione modale e l'apertura numerica*.

Le fibre ottiche sono caratterizzate da un **indice di dispersione modale** riferito all'unità di lunghezza in km e al tempo misurato in ns:

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= \frac{\Delta t}{l[\text{km}]} 10^9 = \frac{10^9}{c[\text{km/s}]} \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) = \frac{10^9}{3 \cdot 10^5} \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) \approx \\ &\approx 3,33 \cdot 10^3 \cdot \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) \quad [\text{ns/km}] \end{aligned} \quad 121$$

La 119 mostra che *per diminuire il numero dei modi* all'interno di una fibra ottica è necessario diminuire, a parità di altre condizioni, *il rapporto D/λ* e quindi costruire fibre ottiche con un **piccolo diametro del nucleo**. Con le aperture numeriche tipiche delle attuali tecnologie è possibile ridurre il diametro fino a ottenere fibre ottiche **monomodali**. Il diametro che si impiega in questi casi è circa di $5 \mu\text{m}$ per luce con una lunghezza d'onda compresa nel lontano infrarosso.

Sempre dalla 119 si scopre che se $M < 1$ non esiste alcun modo possibile per la propagazione della luce nella fibra ottica: il modo 1 della fibra ottica è detto **il modo fondamentale**. Definito quindi un diametro del nucleo della fibra ottica, sarà defi-

nita una lunghezza d'onda minima della luce che in essa può propagarsi. Tale lunghezza d'onda viene detta **lambda cut-off** e si ricava imponendo $M = 1$ nella **119**:

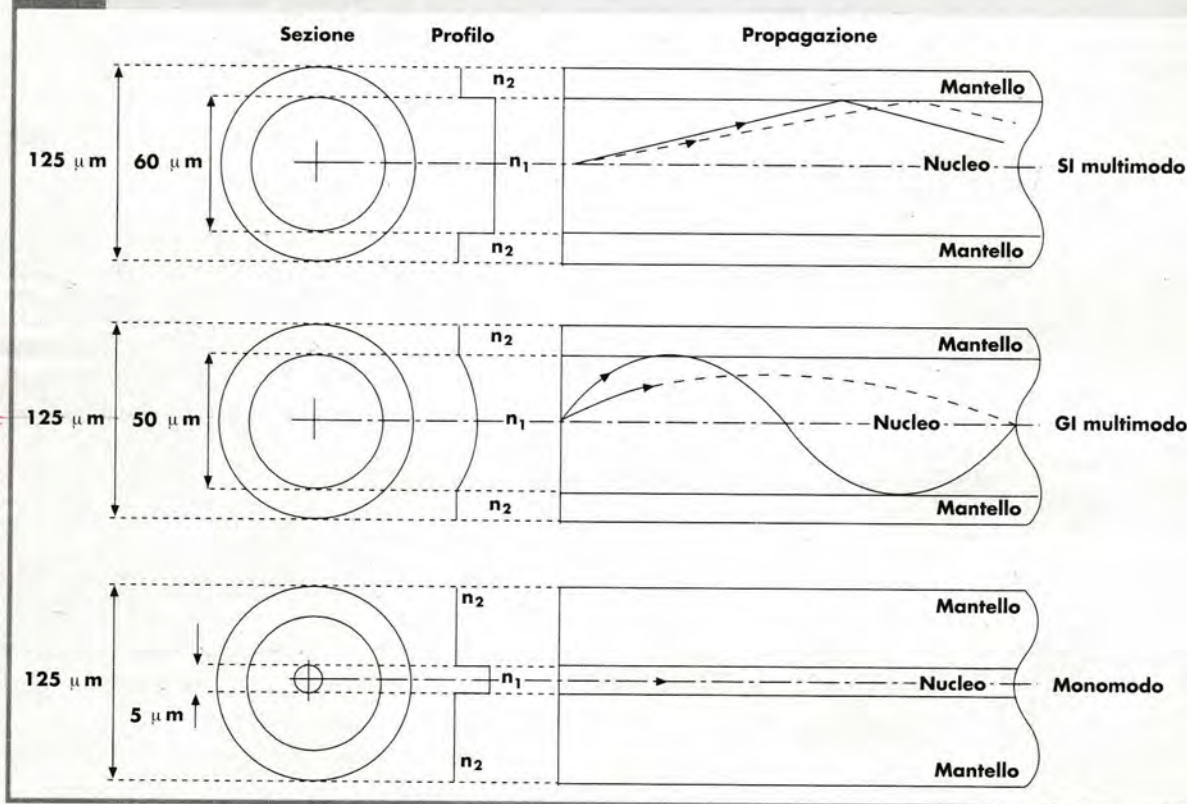
$$\lambda_{cut-off} = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi \cdot D \cdot NA$$

122

Modalità
realizzative
del nucleo

Per controllare la dispersione modale esiste un'altra alternativa che si basa su una particolare costruzione della fibra ottica. Si realizza il nucleo con un indice di rifrazione che varia in modo graduale dal centro alla periferia secondo un profilo detto appunto **graded index** (con *indice graduale*) che costituisce l'alternativa alla realizzazione **step index** (con *indice a gradino*). Nella figura 46 sono indicati, per confronto, gli andamenti dell'indice di rifrazione nelle diverse modalità costruttive dei profili.

FIG. 46 Andamento dell'indice di rifrazione nelle diverse modalità realizzative dei profili.



Nelle fibre ottiche graded index (GI) i raggi luminosi non seguono un cammino rettilineo fino al mantello, come accade invece nelle fibre step index (SI): i raggi relativi ai diversi modi di propagazione seguono percorsi curvi che si possono pensare ottenuti come limite di un percorso a spezzata che si avrebbe con piccole variazioni a gradino dell'indice di rifrazione; la variazione continua dell'indice di rifrazione provoca una continua variazione della velocità di propagazione della luce (vedere la **108**). Nelle zone periferiche nelle quali l'indice di rifrazione è inferiore, la velocità di propagazione è superiore e così, nonostante la diversa lunghezza dei cammini, è possibile fare in modo che i raggi dei diversi modi impieghino lo stesso tempo per percorrere la fibra ottica. Con una adeguata costruzione è allora possibile ridurre la dispersione modale: evidentemente, essendo opportuno ridurre la dispersione modale, le fibre ottiche più diffuse sono la step index monomodo e la graded index multimodo.

La velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nella fibra dipende dalla costante dielettrica, il cui valore varia in funzione della frequenza della radiazione. In

conseguenza di questo fatto l'indice di rifrazione di un materiale dipende dalla frequenza della radiazione luminosa che lo sta investendo. Il fenomeno, scoperto da Newton, è noto come **dispersione cromatica** e si manifesta in una fibra ottica con una ulteriore dilatazione del tempo dell'impulso. La velocità di propagazione della luce policroma (con diverse componenti a frequenze diverse) è la **velocità di gruppo** (vedere la 55) e di conseguenza lungo il percorso della fibra ottica si avrà un **ritardo di gruppo** τ_g secondo la 56. Nelle fibre ottiche si fornisce il **coefficiente di dispersione cromatica** m definito come:

$$m = \frac{\tau_g}{\Delta\lambda} \quad 123$$

per unità di lunghezza della fibra ottica; l'unità di misura è solitamente il ps/nm·km. Se è nota la larghezza dello spettro di frequenza della sorgente, espressa come $\Delta\lambda$, è possibile determinare il ritardo di gruppo, ossia quello che nelle fibre ottiche viene appunto detto **dispersione cromatica**.

14 Banda passante

La dispersione modale e la dispersione cromatica comportano un allargamento dell'impulso luminoso che si sta propagando lungo la fibra ottica ma in effetti agiscono anche sulla banda passante. Per chiarire il problema si immagini di inviare in una fibra ottica due impulsi successivi: la dispersione modale provocherà la situazione di figura 47. Se gli impulsi sono abbastanza vicini tra loro come in figura 47a, si ha in uscita una parziale sovrapposizione degli stessi (**interferenza intersimbolica**) mentre se gli impulsi sono troppo distanti, come in figura 47b, non si utilizzerà in modo adeguato la fibra ottica. La soluzione tecnica limite è quella di figura 47c in cui il periodo di ripetizione degli impulsi è pari a $T = 2\Delta t_m$. Di conseguenza, è facile ricavare la frequenza massima degli impulsi e quindi, tenuto conto che la fibra trasmette le armoniche fino a frequenza zero, anche la **banda passante modale**:

Banda passante modale

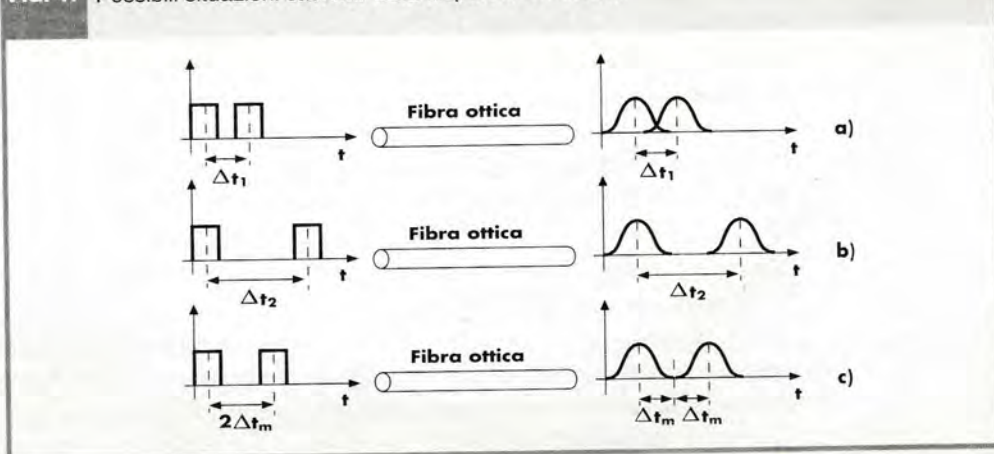
$$f_{MAX} = \frac{1}{2\Delta t_m} \quad B_m = f_{MAX} - 0 = \frac{1}{2\Delta t_m} \quad 124$$

Banda passante cromatica

Analogamente è possibile definire una **banda passante cromatica**, legata al ritardo di gruppo, data da (ricordando la 123):

$$B_c = \frac{1}{2\tau_g} = \frac{1}{2m\Delta\lambda} \quad 125$$

FIG. 47 Possibili situazioni causate dalla dispersione modale.



Le due frequenze massime formano due poli abbastanza vicini nel diagramma di Bode della risposta in frequenza della fibra ottica. Per determinare la **banda passante effettiva** della fibra ottica si può ricorrere alla seguente relazione:

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{B_m^2} + \frac{1}{B_c^2}}}$$

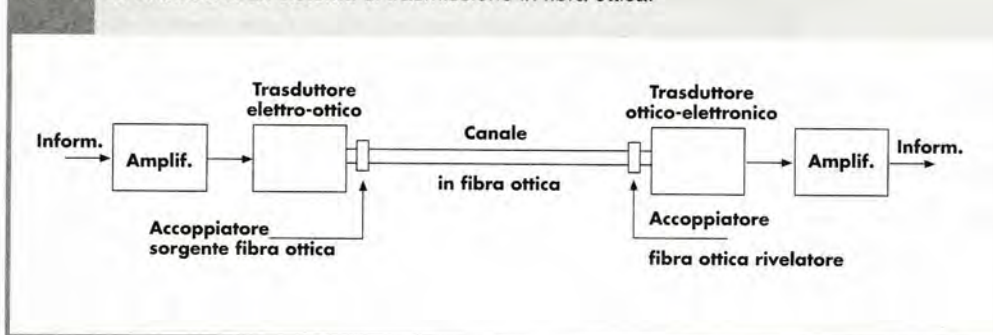
126

Per aumentare la banda passante si può ridurre quasi a zero la dispersione cromatica, in modo da rendere trascurabile il termine B_c , utilizzando come sorgente un **diodo laser** che emette luce a elevata purezza cromatica (quasi monocromatica $\Delta\lambda = 1 \div 3$ nm).

15 Costituzione di un canale in fibra ottica

La realizzazione di un canale di trasmissione in fibra ottica richiede l'uso di dispositivi che siano in grado di trasformare l'informazione, solitamente di tipo binaria elettrica, in arrivo al trasmettitore, in forma binaria luminosa. All'uscita della fibra ottica sarà poi necessaria la riconversione dalla forma binaria ottica alla forma binaria elettrica. Sarà allora necessario utilizzare opportuni trasduttori elettro-ottici all'ingresso della fibra ottica e trasduttori ottico-elettrici all'uscita della stessa (fig. 48).

FIG. 48 La struttura di un sistema di trasmissione in fibra ottica.



I trasduttori elettro-ottici (sorgenti) possono essere di due tipi fondamentali.

- **LED** (Light Emission Diode) all'arseniuro di gallio: **a semplice giunzione** (due zone diversamente drogate di GaAs) e **a doppia giunzione** (tre zone GaAs + Al/GaAs/GaAs + Al);
- **LD** (Laser Diode) all'arseniuro di gallio e fosforo di indio con geometria a striscia (giunzione di tre zone InP/InGaAsP/InP).

La radiazione emessa è incoerente nel caso di LED, perché è dovuta alla ricombinazione casuale delle cariche in eccesso che attraversano la giunzione, mentre è coerente nel caso di LD perché l'emissione di un fotone è stimolata da un altro fotone già emesso. Per poter far avvenire una emissione stimolata è necessaria la presenza di molti portatori di cariche in eccesso (lacune ed elettroni) che può essere ottenuta solo con elevati valori di corrente specifica nella giunzione (pompaggio). Quindi gli LD devono essere alimentati da una corrente elettrica di segnale superiore ai LED ma per essi si avrà il vantaggio della coerenza della radiazione (ciò comporta un fascio poco aperto e quindi più facile da accoppiare a una fibra monomodale) e della monocromaticità (emissione di una sola lunghezza d'onda e quindi assenza di dispersione cromatica).

I trasduttori ottico-elettrici (rivelatori) possono essere di due tipi fondamentali.

- **Fotodiodi: PIN** (zona P/zona Intrinseca/zona N) in regione inversa, **APD** (Avalanche Photo Diode) simili ai PIN ma nella regione di moltiplicazione a valanga.
- **Fototransistor.**

La scelta di un dispositivo oppure di un altro è legata alla sensibilità, alla velocità richiesta e al rumore introdotto.

Particolare cura deve essere posta nel realizzare l'accoppiamento tra la zona in cui viene emessa la radiazione elettromagnetica (oppure viene applicata) e la fibra ottica collegata al dispositivo. Sebbene i trasduttori sia elettro-ottici sia ottico-elettrici esistano anche per altre applicazioni, è necessario utilizzare dispositivi appositamente realizzati per l'uso con fibre ottiche. All'uscita della sorgente o all'entrata del rivelatore sono poi presenti accoppiatori costruiti per mantenere l'allineamento tra la terminazione del dispositivo e la fibra ottica stessa.

In sintesi (paragrafi 12, 13, 14 e 15)

- 1) Le fibre ottiche sono il mezzo trasmissivo per le onde elettromagnetiche alle frequenze della luce.
- 2) Le fibre ottiche, grazie al diverso indice di rifrazione del nucleo rispetto al mantello, determinano una riflessione della luce che rimane nel nucleo e quindi guidata nella sua propagazione.
- 3) La dispersione modale e quella cromatica allungano la durata degli impulsi trasmessi e limitano la banda passante della fibra ottica.

SCHEDA INTEGRATIVA

8

Limitazioni tecnologiche delle fibre ottiche

La radiazione luminosa che si propaga lungo la fibra ottica subisce una attenuazione dovuta ad alcune cause che vengono qui di seguito esposte.

Diffusione (scattering). Nel processo costruttivo di una fibra ottica nascono alcune imperfezioni non eliminabili, che non garantiscono la perfetta omogeneità della fibra stessa. Sono presenti alcune contaminazioni di elementi metallici e alcune micro-bolle d'aria, oltre ad alcune non omogeneità di materiale vetroso. Le impurità presenti contribuiranno a "sparpagliare" la luce secondo angoli non controllati e quindi anche superiori all'angolo limite, che garantisce la riflessione totale tra nucleo e mantello. I raggi non riflessi vengono rifratti nel mantello e quindi la potenza totale in transito nella fibra ottica subisce un'attenuazione. I costruttori di fibre ottiche forniscono il valore della attenuazione al chilometro per diffusione, spesso espressi in dB.

Assorbimento. Si è già evidenziato nel paragrafo 12 che le impurità presenti in una fibra ottica contribuiscono in modo notevole alla attenuazione della luce da essa trasportata. Si deve quindi rendere minima la presenza di tali impurità costituite da ioni metallici (Fe, Co, Ni, Cu, Cr, Al ecc.) e da ioni OH^- dovuti alla residua presenza d'acqua. Mentre la presenza di impurità metalliche produce una attenuazione gradualmente variabile con la frequenza, la presenza degli ioni OH^- produce alcuni picchi in corrispondenza di particolari lunghezze d'onda. La radiazione luminosa si "accoppia" con lo ione perché l'energia del corrispondente fotone è quella che compete a un salto di livello quantico di un elettrone. Le lunghezze d'onda che danno questi picchi di assorbimento sono 950 nm, 1250 nm e 1400 nm. In figura 1.5 è indicata una situazione tipica. Per evitare le forti attenuazioni dovute agli ioni OH^- si utilizzano intervalli di lunghezza d'onda detti **finestre**, compa-

tibili con i dispositivi emittenti (LED e diodo laser) per la trasmissione lungo una fibra ottica:

- prima finestra: 800÷900 nm;
- seconda finestra: 1250÷1350 nm;
- terza finestra: 1500÷1550 nm.

Si osservi che esistono due minimi relativi in corrispondenza di 1300 nm e 1550 nm e quindi si cerca di trasmettere a queste lunghezze d'onda. La lunghezza d'onda di 1300 nm è già stata utilizzata per la trasmissione a larga banda su distanze fino a 100 km senza ripetitori mentre la seconda è oggetto di studio per future applicazioni.

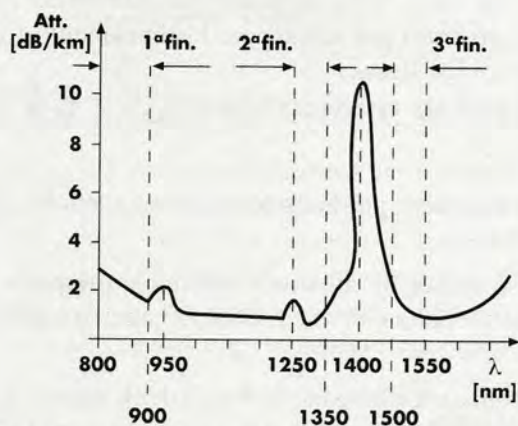


Fig. 1.8 - Andamento tipico dell'attenuazione dovuta all'assorbimento.

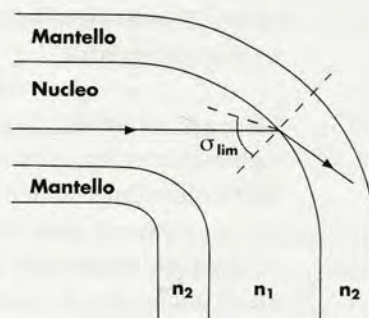


Fig. 2.8 - Le curvature possono determinare la rifrazione.

Perdite per interconnessione. Le fibre ottiche devono essere connesse tra loro tramite giunti di diversa natura i quali garantiscano il passaggio della radiazione luminosa tra una fibra e l'altra. Il collegamento fisico di una fibra ottica con un'altra è un problema abbastanza complesso, sia per le dimensioni delle fibre ottiche sia per la precisione richiesta in tale operazione. Si tenga poi presente che tali operazioni devono essere eseguite in cantiere e in condizioni ambientali spesso avverse che aumentano i problemi e non consentono una perfetta riuscita. Nascono così perdite che sono dovute alle seguenti cause:

- differenza tra gli indici di rifrazione dei due spezzoni;
- differenza tra le aperture numeriche dei due spezzoni;
- differenza tra i diametri del nucleo dei due spezzoni;
- disassamento tra gli assi dei due spezzoni;
- separazione tra i due spezzoni;
- disallineamento angolare.

Per ognuna delle cause esposte è possibile ricavare una espressione per l'attenuazione ma tale calcolo esula dallo scopo del presente testo.