

IROE-CNR
via Panciatichi 64, 50127 Firenze
<http://www.iroe.fi.cnr.it>

Appunti di Optoelettronica

(Fibre ottiche, sorgenti e rivelatori ottici, componenti)

PARTE 2

Ing. Massimo Brenci

INDICE:

Parte seconda

8. Le fibre ottiche nelle telecomunicazioni

- 1.1 Cavi ottici
- 1.2 Sorgenti ottiche
 - 1.2.1 Fisica della luce laser
 - 1.2.2 Schema del laser
 - 1.2.3 Eccitazione del materiale attivo nei laser
 - 1.2.4 Principali sorgenti laser
 - 1.2.5 Sorgenti e rivelatori a semiconduttore

9. Connessione di fibre ottiche

10. Misura delle caratteristiche trasmissive

- 1.3 Misura dell'attenuazione
 - 1.3.1 Metodo del taglio
 - 1.3.2 Metodo di retrodiffusione
- 1.4 Misura della larghezza di banda
- 1.5 Misura dell'Apertura Numerica

11. Componenti speciali

- 1.6 Accoppiatori a fibra ottica
- 1.7 Mux-demux in lunghezza d'onda
- 1.8 Lenti con indice graduale (GRIN-rods)

8. LE FIBRE OTTICHE NELLE TELECOMUNICAZIONI

Le fibre ottiche vengono principalmente utilizzate come:

- conduttori di luce (per illuminazione di zone difficilmente accessibili, per sistemi di trasporto di luce laser in applicazioni biomediche, ecc.),
- conduttori di immagini (in fibroscopi per applicazioni mediche e industriali),
- sistemi sensoriali (per la misura di grandezze quali sforzi e deformazioni, vibrazioni, accelerazioni, pressione, temperatura, ecc.),
- guide per trasporto di segnali per telecomunicazioni.

Quest'ultima costituisce l'applicazione maggiore (e da un punto di vista industriale la più importante). Ciò fa sì che sia assolutamente possibile affermare che l'introduzione delle fibre ottiche nel campo delle telecomunicazioni abbia rappresentato un evento storico.

L'idea di trasmettere segnali mediante la luce è, forse, vecchia quanto l'uomo. Pensiamo, ad esempio, ai segnali inviati mediante l'accensione di fuochi, ai segnali di fumo, alle successive comunicazioni effettuate mediante l'uso di specchi. Un più sofisticato sistema di telecomunicazioni ottiche (che in sostanza rappresentava un telegrafo ottico) fu inventato in Francia da Chappe nel 1791. Tale sistema, chiamato "Semaphore", prevedeva una catena di torri alla sommità delle quali era installato un braccio rotante. Alle due estremità di questo erano fissati altri due bracci più piccoli, anch'essi rotanti, come è indicato in FIG. 22 .

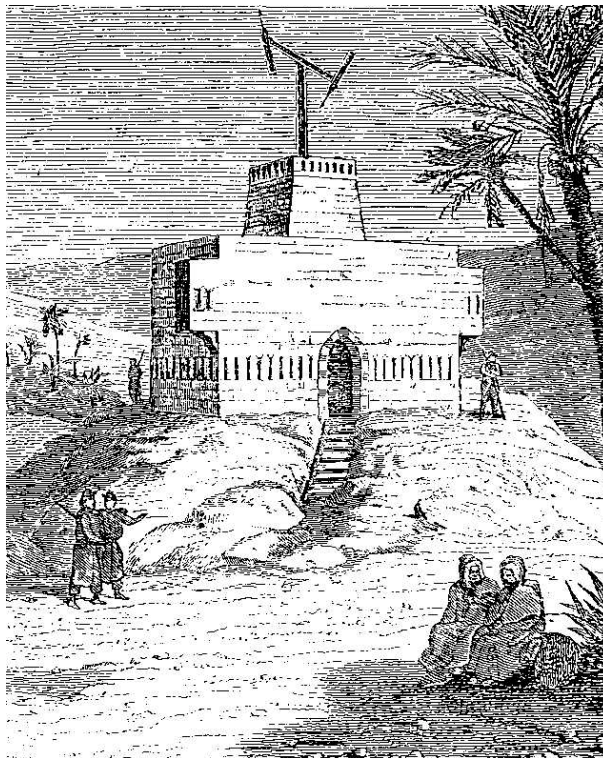


FIG. 22

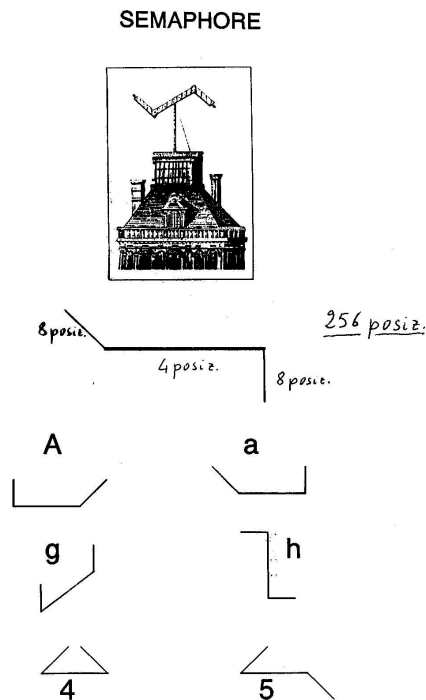


FIG. 23

A questi tre bracci venivano fatte assumere, istante per istante, varie posizioni in accordo con un codice prestabilito (v. a titolo di esempio la FIG. 23). Altri esperimenti di comunicazioni ottiche furono tentati, per scopi militari, durante la seconda guerra mondiale, utilizzando parabole e fotomoltiplicatori. Attualmente, sistemi di trasmissione che sfruttano la direttività dei fasci laser vengono usati per trasmissioni particolari su brevi distanze (applicazioni tipiche sono le comunicazioni fra navi militari, oppure le comunicazioni nello spazio libero).

Nelle comunicazioni terrestri su lunghe distanze, tale tipo di comunicazioni risulta sensibile alle condizioni meteorologiche. Infatti, anche nelle zone dello spettro in cui l'atmosfera si presenta più trasparente, possono aversi fenomeni di diffrazione e di deflessione dei raggi luminosi causati dalle turbolenze o disomogeneità dell'aria; in particolari condizioni i raggi luminosi possono essere addirittura completamente assorbiti. Su lunghe distanze, quindi, può risultare senza dubbio più conveniente l'uso di sistemi di comunicazione guidata.

Le fibre ottiche rappresentano l'unico tipo di guida d'onda ottica attualmente utilizzabile in pratica. Rispetto ai sistemi tradizionali (cavi metallici e guide d'onda metalliche) presentano vari vantaggi legati soprattutto al loro piccolo diametro, alla loro flessibilità e al fatto di essere costituite da materiale dielettrico. Se si pensa che ogni fibra ottica ha una larghezza di banda dell'ordine dei GHz e che, date le piccole dimensioni, varie fibre possono essere riunite insieme a formare un cavo di dimensioni contenute, è possibile comprendere come le fibre ottiche forniscano la possibilità di utilizzare, con un limitato ingombro, larghezze di banda molto estese.

Un generico sistema di telecomunicazioni, è essenzialmente costituito da un trasmettitore (comprendente una sorgente che genera una portante la quale viene opportunamente modulata), da un mezzo di propagazione (comprendente eventualmente amplificatori intermedi) e da un ricevitore.

Anche un sistema di telecomunicazioni a fibra ottica risponde a questo schema generale. Tuttavia, l'elemento caratteristico è costituito dal fatto che la portante è a frequenza ottica. E' quindi necessaria (nel trasmettitore) una sorgente ottica tale da poter essere modulata da un segnale elettrico di B.F., e, in ricezione, occorrerà un fotorivelatore che operi la conversione da segnale ottico a segnale elettrico. Quale linea di trasmissione è richiesta una guida d'onda ottica (fibra ottica), la quale tuttavia, all'atto pratico, non viene utilizzata singolarmente, ma come costituente di un fascio di fibre raccolte in un cavo.

8.1 Cavi ottici

Le fibre ottiche sono provviste di uno o più rivestimenti protettivi di materiale plastico, alcuni dei quali vengono applicati durante il processo stesso di realizzazione delle fibre.

Nelle usuali applicazioni, tuttavia, sono richiesti ulteriori rinforzi e rivestimenti che, in parte, sono analoghi a quelli utilizzati per la realizzazione dei cavi metallici.

A seconda delle applicazioni alle quali sono destinati, esistono vari tipi di cavi a fibra ottica.

La sezione di un tipico cavo a fibre ottiche di tipo terrestre per telecomunicazioni su lunghe distanze è mostrata in FIG.24 . Come si vede, ciascuna fibra è inguainata all'interno di un rivestimento secondario.

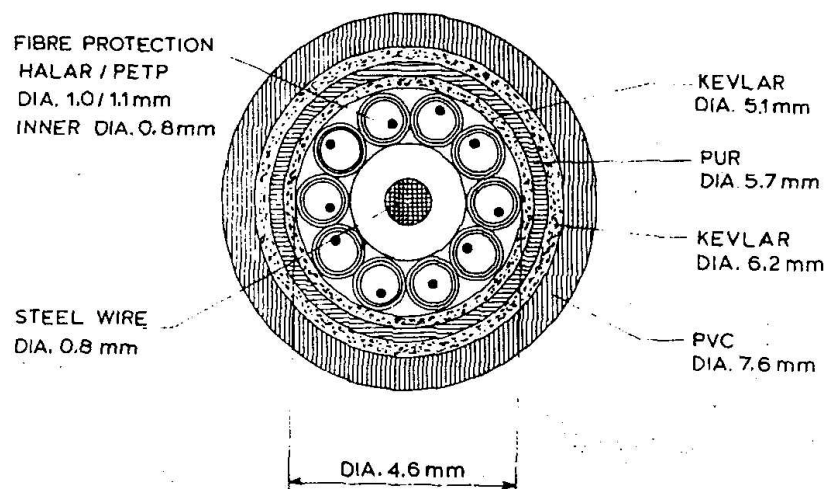


FIG.24

Tale rivestimento può assumere due aspetti:

1) *"loose" (lasco)* come rappresentato in FIG. 24, è costituito da un tubicino plastico (polietilene, polipropilene o nylon) all'interno del quale è alloggiata in modo lasco la fibra

1) *"tight" (stretto)*: in questo caso il rivestimento è applicato direttamente sulla fibra;

Il nucleo centrale del cavo è costituito, generalmente, da una treccia di acciaio che rappresenta il cosiddetto "strength member" (elemento di tiro). Questa treccia ha la funzione di sopportare gli sforzi applicati al cavo, soprattutto durante la procedura di

posa.

Il cavo ottico viene poi completato allo stesso modo dei cavi tradizionali, mediante ulteriori rivestimenti di guaine protettive.

Lo "strength member", come è stato già detto, viene introdotto per aumentare la resistenza a trazione del cavo. Le caratteristiche cui deve soddisfare sono: modulo di Young alto, leggerezza, flessibilità. Per la sua realizzazione possono essere utilizzati, come detto sopra, fili di acciaio, ma non è raro il fatto che, in alcuni cavi, sia costituito da materiali quali fibre al carbonio (Kevlar). I fili di acciaio sono i più usati nei cavi di tipo convenzionale per il loro basso prezzo e la loro resistenza, mentre i fili di Kevlar sono interessanti in particolari applicazioni ove siano richiesti leggerezza e perfetto isolamento elettrico.

Molti cavi comprendono, al loro interno, "doppini" di rame. Essi vengono inseriti per condurre l'alimentazione ai ripetitori.

La tabella seguente pone a confronto, a scopo di curiosità, le dimensioni ed il peso di due noti cavi coassiali con quelli di un cavetto monofibra:

<i>Tipo di cavo</i>	<i>diam. est. (mm)</i>	<i>Peso (Kg/Km)</i>
RG 14	14	310
RG19	19	1100
cavetto monofibra	3-5	12

A svantaggio dei cavi coassiali bisogna considerare non solo il peso e l'ingombro, ma anche la loro scarsa immunità al rumore e la loro sensibilità ai campi elettrici e magnetici. Essi, inoltre, possono presentare fenomeni di cross-talk che non avvengono nel caso dei cavi a fibra ottica. Tuttavia quest'ultimi pongono maggiori problemi per la realizzazione di giunti e derivazioni.

Le FIGG. 25 e 26 mostra lo schema di un diverso tipo di cavo che è di uso comune. Come si vede una o più fibre vengono alloggiare in scanalature ricavate in un nucleo che, generalmente, è di materiale plastico (es. polietilene).

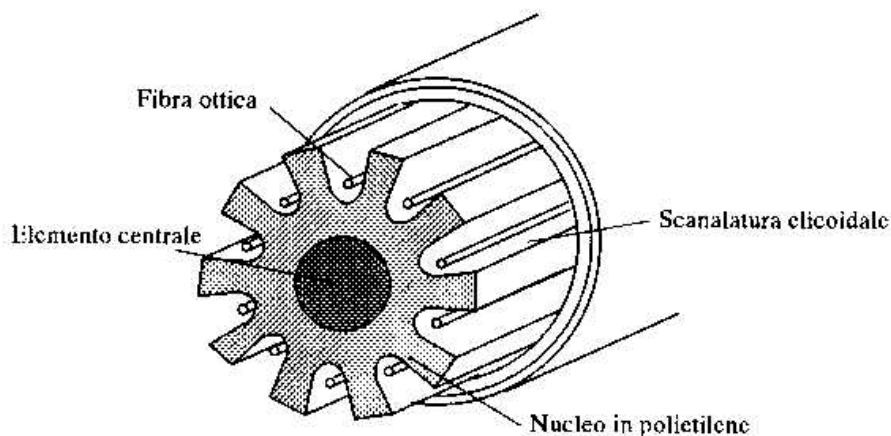


Fig. 3.30 Struttura di base di un cavo ottico scanalato monofibra.

FIG. 25

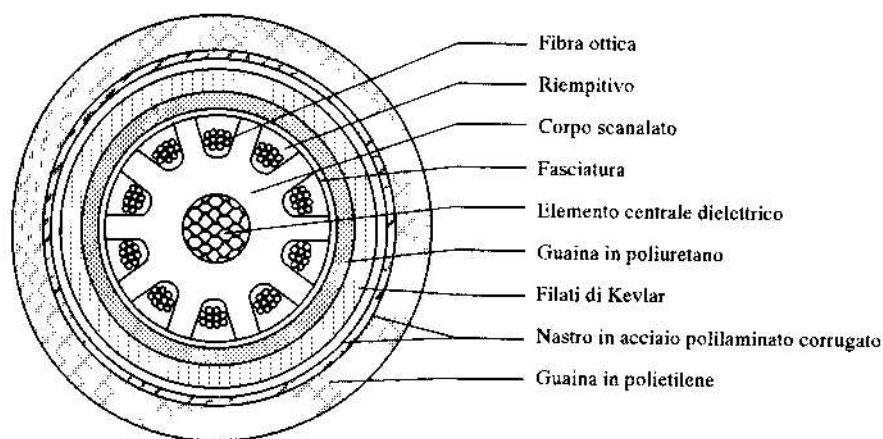


Fig. 3.33 Cavo ottico scanalato multifibra a 100 fibre.

FIG. 26

La FIG. 27 mostra come possano essere realizzati cavi più complessi “cordando” un certo numero di cavi più semplici.

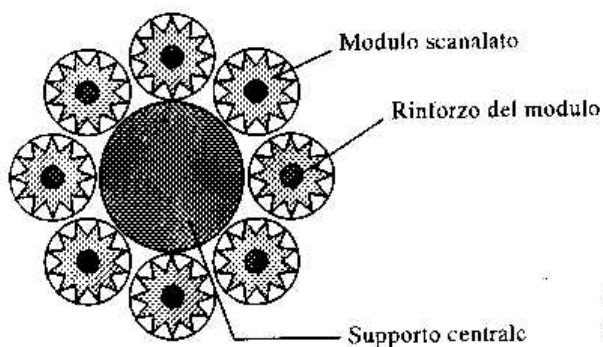


Fig. 3.31 Schema di cavo ottico scanalature monofibra cordate.

FIG. 27

Di grande interesse risultano i cavi a nastro (“ribbon cables”). Varie fibre (generalmente da 4 a 12) vengono assemblate una accanto all'altra in modo da formare un nastro di fibre (v. FIG. 28).

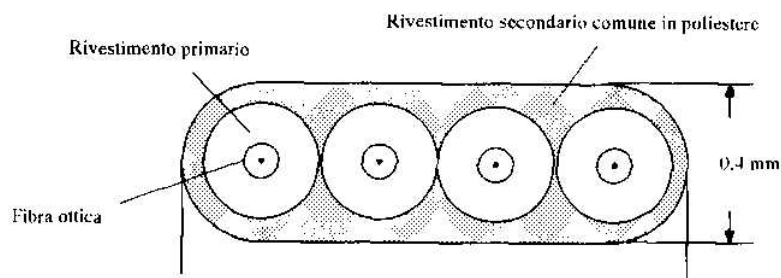


FIG. 28

Vari nastri possono essere sovrapposti e alloggiati opportunamente in modo da

realizzare cavi con alta densità di fibre. In FIG. 29 è schematizzato un tipico cavo a nastro.

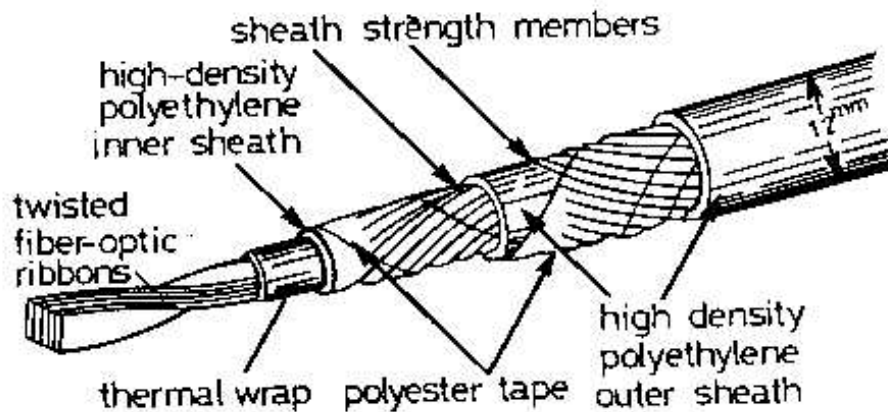


FIG. 29

La FIG. 30 mostra un tipico cavo con 100 fibre realizzato sovrapponendo, nelle cave di un corpo scanalato, vari nastri di fibre. Assemblando insieme più cavi di questo tipo, possono essere realizzati cavi contenenti, tipicamente, 600 fibre, come quello schematizzato in FIG. 31.

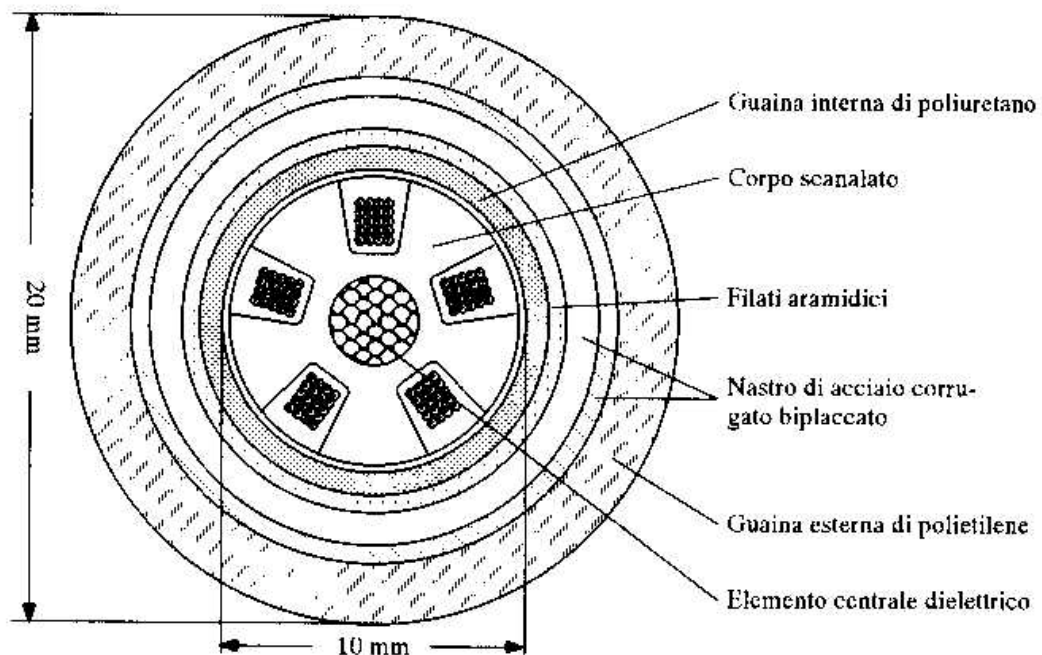


Fig. 3.37 Cavo ottico a nastri della capacità di 100 fibre.

FIG. 30

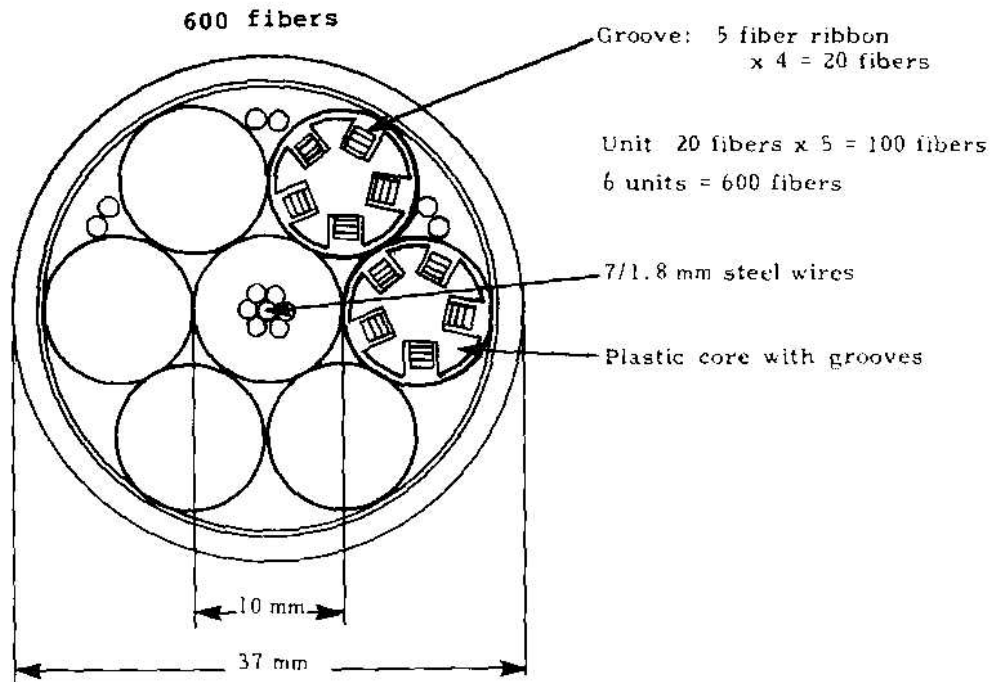


FIG. 31

Le Figg. 32 e 33 mostrano lo schema di un tipico cavo sottomarino in due diverse versioni. I requisiti più stringenti di questo tipo di cavo sono la resistenza alle sollecitazioni di trazione e alla pressione idrostatica, l'assoluta impermeabilità. Per questo motivo il cavo viene armato con una o più corone di fili di acciaio e rivestito da filati di polipropilene. Al fine di limitare i danni alle fibre ottiche che potrebbero essere causate da eventuali infiltrazioni di acqua, gli alloggiamenti delle fibre stesse vengono spesso riempiti di grasso.

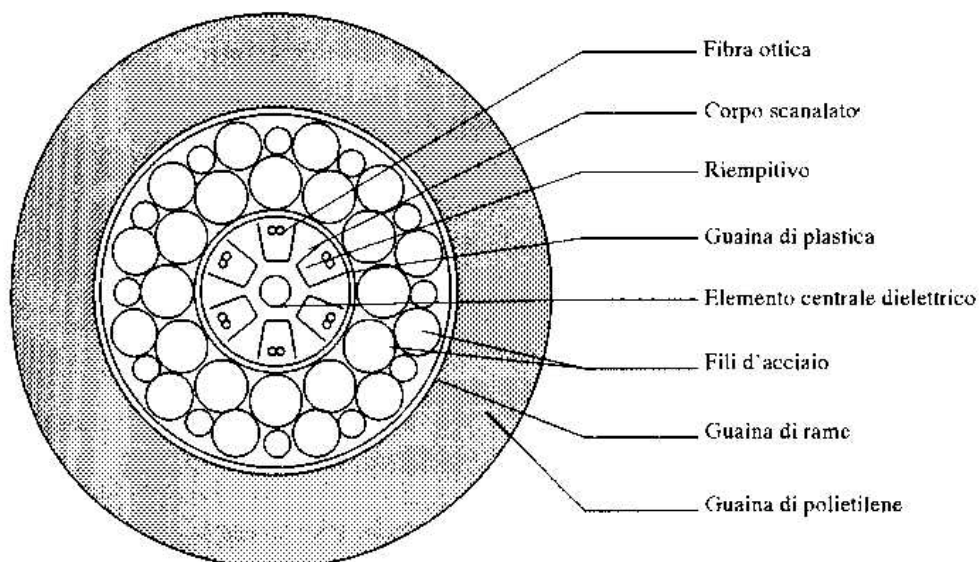


Fig. 3.41 Cavo ottico sottomarino da fondo.

FIG. 32

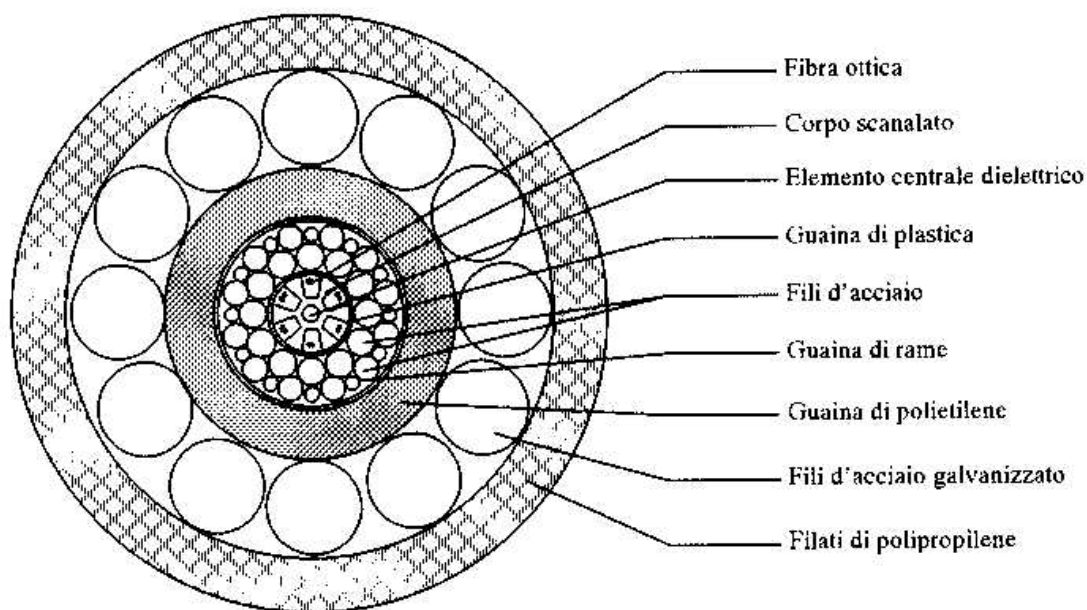


Fig. 3.42 Cavo ottico sottomarino armato.

FIG. 33

Problemi per i cavi sottomarini sembrano essere costituiti, non solo da ancore e reti da pesca, ma anche dagli squali, che spesso “gradiscono” questi cavi. Sembra che il motivo di ciò sia da ricercare nel fatto che la corrente di alimentazione dei ripetitori, trasportata dai doppiini metallici posti all'interno del cavo, provochi un campo e.m. in grado, a volte, di sollecitare particolari sensori posseduti dagli squali (ampolle di Lorenzini) che servono loro per localizzare vari tipi di pesci. Poiché il costo di ogni riparazione si aggira, di solito, sui 500 milioni di lire, si cerca di porre i cavi a profondità tali da essere difficilmente raggiunti dagli squali (2 Km) e, inoltre, i cavi vengono spesso rivestiti con schermature apposite.

8.2 Sorgenti ottiche

8.2.1 Fisica della luce laser

a) *Generalità*

Le sorgenti usate nei sistemi di telecomunicazione, sono essenzialmente quelle a semiconduttore costituite in linea di principio, come vedremo, da una o più giunzioni p-n. Riteniamo, tuttavia, utile accennare anche alle sorgenti laser di tipo tradizionale.

Al fine di comprendere il funzionamento delle sorgenti ottiche occorre effettuare alcune premesse, ricordando il concetto di livelli energetici di un sistema atomico.

Consideriamo, ad esempio, un sistema atomico molto semplice costituito da una carica positiva attorno alla quale ruota una carica negativa (elettrone).

Secondo la meccanica classica l'energia dell'elettrone può assumere con continuità tutti valori permessi dalle condizioni di equilibrio dell'atomo. Ovvero l'elettrone può ruotare su qualsiasi orbita, purché con velocità opportuna in modo da compensare con la corrispondente forza centrifuga l'attrazione del nucleo.

La meccanica quantistica ha smentito questa rappresentazione dimostrando come l'energia dell'elettrone possa, al contrario, assumere solo un numero discreto di valori. L'elettrone in altre parole, può portarsi solo su un certo numero di *livelli di energia*.

Può essere utile ricordare altresì, come atomi eccitati tendano a ritornare verso stati di energia più bassa e, in tali transizioni, cedere l'energia acquistata nel processo di eccitazione, sotto forma di radiazione e.m. di lunghezza d'onda ben determinata.

b) *Emissione spontanea*

Consideriamo un elettrone che abbia in qualche modo acquistato dall'esterno un eccesso di energia, cioè sia stato portato ad un livello di energia E_2 maggiore di quello corrispondente allo stato di minima energia E_1 (stato fondamentale). Esso tenderà a liberarsi, emettendo radiazione, dell'eccesso di energia acquistato, al fine di ritornare al suo stato fondamentale.

Questo processo può avvenire senza il concorso di cause esterne all'elettrone. In tal caso l'elettrone passa **spontaneamente** dal livello E_2 al livello E_1 (FIG. 34a) cedendo energia verso l'esterno sotto forma di onda e.m. la cui frequenza è data da:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

dove h = costante di Plank.

La quantità:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

dicesi **fotone** e rappresenta, in accordo con la meccanica quantistica, la minima quantità di energia e.m.

Supponiamo che al tempo t il sistema considerato possieda n_2 elettroni di

energia E_2 . Il numero di elettroni che nell'unità di tempo passano dal livello E_2 al livello E_1 risulterà proporzionale al numero di elettroni n_2 . Cioè:

$$\frac{dn_2}{dt} = -A \cdot n_2$$

dove: dn_2/dt è il numero di elettroni che per unità di tempo passano dal livello E_2 al livello E_1

A = probabilità di emissione spontanea (dipende dal particolare atomo considerato)

Si ha anche che:

$$\tau = \frac{1}{A}$$

dove: τ = vita media (tempo di permanenza nel livello metastabile E_2).

c) emissione stimolata

Se, al contrario del caso precedente, mentre l'elettrone si trova sul livello E_2 viene, in un certo istante, colpito da un fotone di energia coincidente (o molto vicina) a quella che lui stesso può generare spontaneamente, ($h\nu=E_2-E_1$), esso viene stimolato a diseccitarsi e a portarsi dal livello E_2 al livello E_1 (FIG. 34b). In tal caso cede un altro fotone di energia $h\nu=E_2-E_1$ che si somma al fotone stimolante.

In analogia al caso in cui si ha emissione spontanea, il numero di elettroni che, nell'unità di tempo, passano dal livello E_2 al livello E_1 sarà proporzionale al numero di elettroni presenti nel livello E_2 :

$$\frac{dn_2}{dt} = -W_{21} n_2$$

dove: dn_2/dt = numero di elettroni che, per unità di tempo, passano dal livello E_2 al livello E_1 per effetto dell'emissione stimolata

W_{21} = probabilità di emissione stimolata (dipende dall'intensità dell'onda stimolante e dal particolare materiale considerato)

d) assorbimento

Supponiamo questa volta che l'elettrone si trovi sul livello fondamentale E_1 (livello di energia minore) e che sia, in un certo istante, colpito da un fotone di energia $h\nu=E_2-E_1$ (FIG. 34c). In tal caso l'elettrone, assorbendo l'energia E_2-E_1 , è indotto a portarsi sul livello E_2 dando luogo al fenomeno dell'assorbimento. In tal caso il numero di elettroni che, per unità di tempo, passano dal livello E_1 al livello E_2 per effetto dell'assorbimento (dn_1/dt), sarà proporzionale al numero n_1 di elettroni presenti nel livello E_1 :

$$\frac{dn_1}{dt} = -W_{12} n_1$$

W_{12} = probabilità di assorbimento (dipende dall'intensità dell'onda e.m. stimolante e dal particolare materiale considerato).

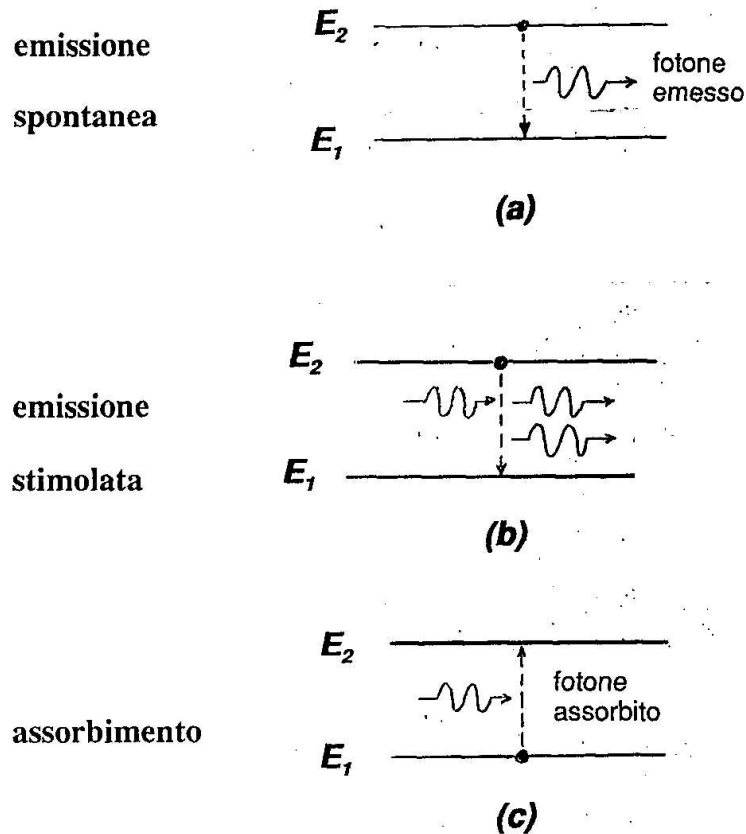


FIG. 34

f) Osservazioni

⇒ Esiste una fondamentale differenza fra emissione spontanea ed emissione stimolata. Nel primo caso gli atomi, opportunamente eccitati, restituiscono l'energia ricevuta a partire da un istante casuale. Quindi le onde sono emesse dai vari atomi in modo *isotropo* nello spazio e non hanno nessuna relazione di fase fra loro. Ciò accade comunemente nelle lampade ad incandescenza e nei tubi a scarica elettrica dove, rispettivamente, l'agitazione termica e gli elettroni della scarica producono l'energia necessaria per l'eccitazione degli atomi. Nel secondo caso l'emissione avviene nel medesimo istante in cui l'atomo è colpito dalla radiazione stimolante. Quindi, a differenza dell'emissione spontanea, i fotoni emessi sono coerenti rispetto al campo inducente, cioè i loro contributi si sommano all'onda e.m. iniziale con la stessa fase temporale.

⇒ A parità di condizioni (stesso materiale, stessa intensità di energia stimolante)

le probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali:

$$W_{21} = W_{12}$$

Ciò, in parole povere, significa che se l'onda stimolante incide su due atomi, uno eccitato e l'altro no, la probabilità che l'atomo eccitato si disecciti *amplificando* l'onda incidente (cioè emettendo un altro fotone in aggiunta a quello incidente), è pari alla probabilità che l'atomo non eccitato si ecciti assorbendo il fotone incidente e quindi *attenuando* l'onda. In media, quindi, in condizioni di equilibrio, questi due processi tenderanno a compensarsi. Affinchè l'amplificazione prevalga, invece, sull'attenuazione occorre che il numero di atomi per unità di tempo dn_2/dt che, per emissione stimolata passano dal livello E_2 al livello E_1 , sia maggiore del numero di atomi dn_1/dt che, per effetto dell'assorbimento, passano dal livello E_1 al livello E_2 :

$$\frac{dn_2}{dt} > \frac{dn_1}{dt}$$

ma poichè, come abbiamo detto, la probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali ($W_{21} = W_{12}$), occorre che sia:

$$n_2 > n_1$$

cioè occorre che il numero di atomi eccitati sia maggiore del numero degli atomi non eccitati, ovvero che la *popolazione* del livello E_2 (numero di atomi nel livello E_2) sia maggiore della popolazione del livello E_1 .

In tali condizioni si dice che si ha una **inversione di popolazione** in quanto ciò non si verifica nelle usuali condizioni di equilibrio termodinamico per le quali (vedi la statistica di Boltzman) si ha:

$$n_2 < n_1$$

All'equilibrio termodinamico, infatti, un materiale si comporta notoriamente come assorbitore.

Se invece si avesse:

$$n_2 = n_1$$

i due fenomeni di emissione stimolata e di assorbimento verrebbero a bilanciarsi ed il materiale diverrebbe trasparente.

8.2.2 Schema del laser

Il laser è un particolare tipo di oscillatore costituito da (FIG. 35):

- a) un materiale *attivo* (che può essere solido, liquido o gassoso) nel quale sia possibile, per effetto di un *pompaggio*, effettuare una *inversione di popolazione*.
- b) un risuonatore ottico costituito da due specchi posti ad opportuna distanza, uno dei quali parzialmente riflettente in modo da consentire l'uscita di una parte della radiazione verso l'esterno.

Se nel materiale attivo (in cui viene, come vedremo, mantenuta tramite un opportuno pompaggio, un'inversione di popolazione) avviene una prima emissione

spontanea, il fotone $h\nu$ risultante, incidendo su un altro atomo eccitato, produce per emissione stimolata un altro fotone dando luogo ad una reazione a catena tendente a diseccitare tutti gli atomi eccitati (FIG. 36).

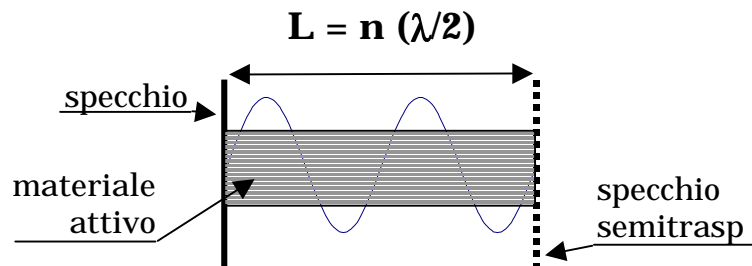


FIG.35

Fra le radiazioni emesse nelle varie direzioni, solo quella emessa perpendicolarmente agli specchi rimbalzerà avanti e indietro amplificandosi ad ogni passaggio nel materiale attivo e dando luogo ad un'onda coerente (spazialmente e temporalmente) e di frequenza:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$

Le perdite attraverso lo specchio semitrasparente consentono il raggiungimento dell'equilibrio nel processo di amplificazione all'interno della cavità.

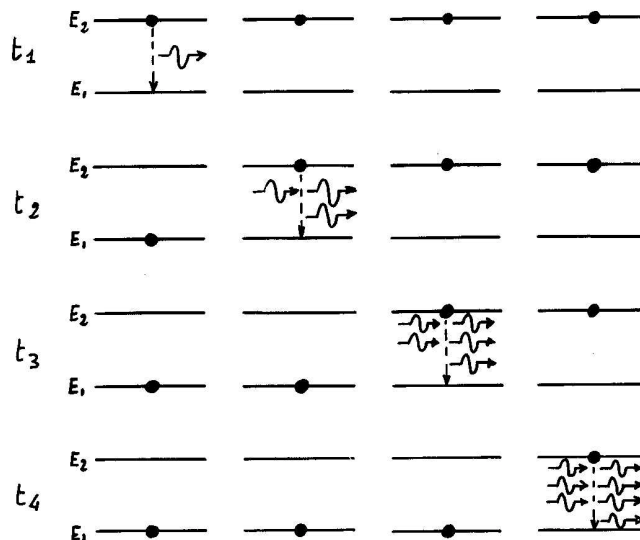


FIG. 36

Come è indicato in FIG. 35, la distanza fra gli specchi dovrà soddisfare alle condizioni di risonanza della cavità. In altre parole, considerando in prima approssimazione, che i modi del risonatore possano essere pensati come sovrapposizione di due onde piane che si propagano in direzioni opposte lungo l'asse della cavità, la condizione di risonanza prevede che la lunghezza L della cavità sia pari ad un numero intero di mezze lunghezze d'onda:

$$L = n \cdot (\lambda / 2)$$

dove n = numero intero

Questa è la condizione necessaria affinché il campo elettrico dell'onda stazionaria risulti nullo sugli specchi.

Ovvero, si può anche pensare che questa è la condizione per cui lo sfasamento di un'onda piana che percorra avanti e indietro la cavità risulti pari a zero (a meno di un numero intero di 2π). Solo in questo caso, infatti, considerando un punto arbitrario, i vari contributi dovuti alle riflessioni successive, si sommano in fase fra loro.

8.2.3 Eccitazione del materiale attivo nei laser "non semiconduttori"

E' stato mostrato come, al fine di realizzare un amplificatore, sia necessario mantenere nel mezzo attivo un'inversione di popolazione mediante un opportuno pompaggio. Premettendo che ci occuperemo dei laser a semiconduttore successivamente, riferiamoci ora ai laser di tipo tradizionale. In questo tipo di laser il pompaggio può essere realizzato nei seguenti modi:

a) Pompaggio mediante scarica elettrica

E' usato in genere per l'eccitazione di gas o vapori. La scarica viene prodotta in modo simile a quella delle lampade fluorescenti.

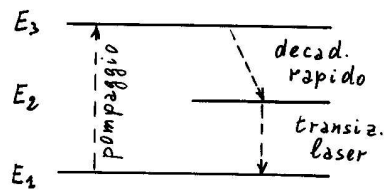
b) Pompaggio ottico (mediante lampade flash o un altro laser)

Viene usato per irradiare mezzi attivi solidi e laser a coloranti.

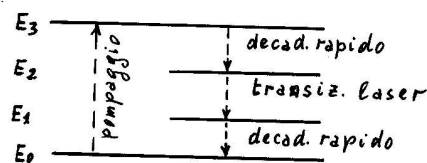
Finora abbiamo considerato sistemi aventi solo due livelli di energia E_1 e E_2 . In effetti in un sistema di questo tipo non è possibile effettuare l'inversione di popolazione dal momento che, una volta raggiunta la condizione di uguaglianza fra le due popolazioni ($n_2=n_1$), la probabilità di emissione stimolata risulta, come abbiamo già detto, pari alla probabilità di assorbimento, raggiungendo così una condizione di equilibrio (niente amplificazione).

Ciò non accade nel caso in cui il materiale attivo presenti tre o, addirittura, quattro livelli secondo quanto schematizzato in FIG. 37. In questi casi risulta possibile effettuare un'inversione di popolazione fra il livello E_2 ed il livello E_1 . Infatti supponiamo che inizialmente tutti gli atomi siano sul livello di energia più basso E_1 . Nel caso di laser a tre livelli gli atomi che vengono portati al livello E_3 decadono rapidamente al livello E_2 lasciando il livello E_3 praticamente sempre vuoto. Fino a che, per effetto di questo meccanismo la metà degli atomi inizialmente presenti sul livello E_1 non saranno sul livello E_2 , non potrà aversi inversione. L'inversione si avrà dal momento che, una volta raggiunta l'uguaglianza di popolazione fra E_2 e E_1 , un successivo atomo portato dal livello E_1 al livello vuoto E_3 decadrà velocemente sul livello E_2 . Poichè **il livello E_3 rimarrà praticamente sempre vuoto**, sarà teoricamente possibile portare tutti gli atomi del livello E_1 sul livello E_2 .

Nel caso di laser a quattro livelli l'inversione di popolazione risulta ancora più facilitata dal momento che, essendo anche il livello E_1 praticamente sempre vuoto, per avere inversione di popolazione non occorrerà che si verifichi dapprima l'uguaglianza fra le due popolazioni. Infatti, già il primo atomo che, portato sul livello E_3 decadrà velocemente sul livello E_2 , darà luogo ad una inversione di popolazione fra il livello E_2 ed il livello E_1 .

Sistema 3 livelli

- E_3 sempre vuoto
- inversione fra E_2 e E_1 dopo aver realizzato la condiz. $n_2 = n_1$

Sistema 4 livelli

- E_3 ed E_1 sempre vuoti
- inversione fra E_2 e E_1 subito

FIG. 37

8.2.4 Principali sorgenti laser (non semiconduttori)

La FIG. 38 mostra lo spettro delle emissioni dei principali laser. Esamineremo brevemente le caratteristiche di alcuni fra quelli più comunemente usati.

a) Laser ad argon

Possiede varie righe, le più intense delle quali sono a 488 nm (blu) e a 514,5 nm (verde). E' il più potente laser ad emissione visibile. Esistono in commercio vari tipi con potenze fino a qualche decina di watt.

b) Laser He-Ne

E' stato il primo laser a gas costruito ed è il più usato per misure di laboratorio. Può oscillare su varie righe, ma la principale è quella avente lunghezza d'onda di 632,8 nm (rosso). Esistono in commercio vari tipi la cui potenza può variare da qualche mW fino a qualche decina di mW. Il rendimento è di circa lo 0,1%.

c) Laser a rubino

Emette treni di impulsi sulla lunghezza d'onda di 694 nm. Può, con particolari accorgimenti, emettere un solo impulso della durata di 50 ns con elevata potenza (fino a qualche centinaio di MW). Il rendimento è di circa il 2%.

d) *Laser a NdYAG*

E' il più comune ed efficiente laser con materiale attivo solido pompato otticamente. Emette potenze continue fino a qualche centinaio di watt alla lunghezza d'onda di 1,06 μm (infrarosso). Il rendimento è dell' 1% .

Tali laser spesso sono corredati da cristalli duplicatori di frequenza (fosfato di potassio o niobato di litio) per mezzo dei quali la frequenza della radiazione emessa può essere raddoppiata ottenendo una lunghezza d'onda di 503 nm (verde). Il rendimento di conversione è del 20-30% .

e) *Laser a CO₂*

E' un laser di notevole potenza, dal centinaio di watt fino a decine di Kw. Emette nell'infrarosso alla lunghezza d'onda principale di 10,6 μm . Anche il rendimento è notevole potendo raggiungere valori intorno al 20% .

Questo tipo di laser viene utilizzato per taglio di lamiere e per saldatura.

Per le lunghezze d'onda alle quali questo laser emette, le comuni fibre ottiche di silice risultano opache. La sua radiazione, pertanto, viene condotta tramite specchi, anche se sono state realizzate fibre speciali, le quali però presentano, allo stato attuale, vari problemi.

f) *Laser a coloranti*

In questo tipo di laser il mezzo attivo è costituito da una soluzione liquida di coloranti organici. Il pompaggio, di tipo ottico, può avvenire sia tramite flash, sia tramite altri laser. I coloranti utilizzabili sono tanto numerosi da poter ricoprire tutto lo spettro visibile e del vicino I.R. . I più comuni, tuttavia, sono le rodamine, le fluoresceine e le cumarine. Il rendimento quantico dei coloranti organici è estremamente elevato, di solito vicino al 100% , nonostante ciò il rendimento complessivo dei laser a colorante risulta di circa l' 1% nel caso di pompaggio a lampade, e di circa 0,1% nel caso di pompaggio tramite laser ad Argon o ad Azoto.

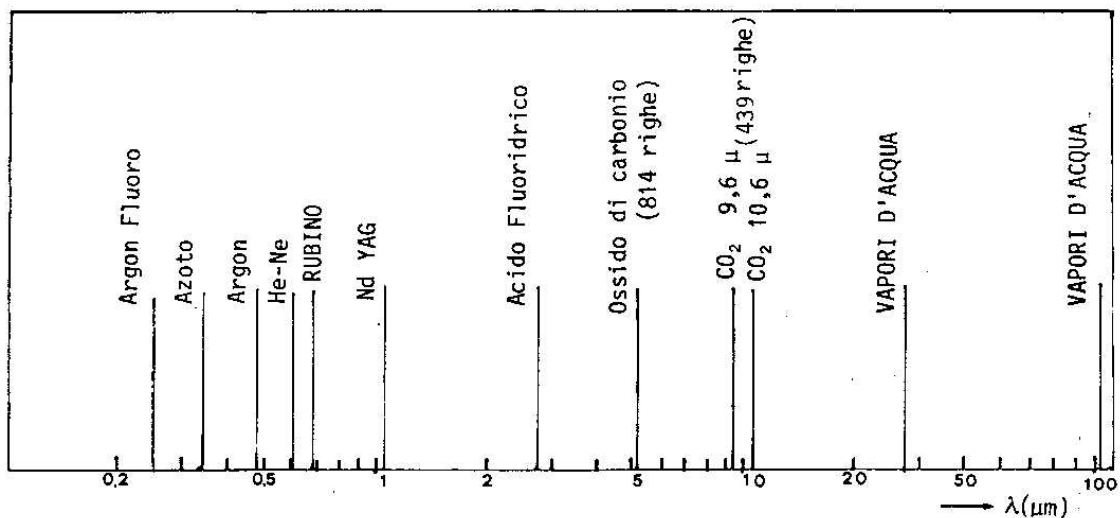


FIG. 38

8.2.5 Componenti a semiconduttore: sorgenti e rivelatori

a) **Richiamo alla fisica e alle proprietà dei semiconduttori**

Un isolante, come è noto, è un materiale la cui conducibilità è bassissima, mentre un metallo è un eccellente conduttore di corrente. Un materiale la cui conducibilità è compresa fra questi due estremi dicesi semiconduttore.

Il fatto che un materiale appartenga ad una delle precedenti classi dipende dalla struttura delle sue bande di energia.

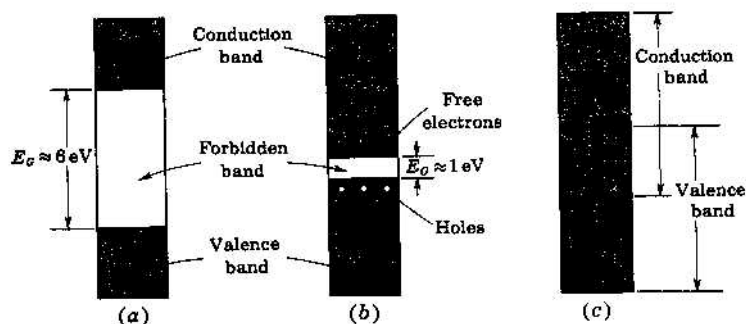


Fig. 2-3 Energy-band structure of (a) an insulator, (b) a semiconductor, and (c) a metal.

FIG. 39**Isolanti:**

La FIG. 39a mostra schematicamente la struttura a bande di energia di un isolante. La banda di valenza (piena) e quella di conduzione (vuota) sono separate da una regione di energia proibita grande. Ad esempio per il diamante tale intervallo di energia risulta $E_g \approx 6 \text{ eV}$. A causa di ciò, l'energia che può essere fornita ad un elettrone da un campo elettrico applicato, è troppo piccola per far sì che la particella si porti dalla banda di valenza a quella di conduzione, quindi il materiale risulta un isolante.

Metalli:

Se la struttura a bande di un cristallo non contiene regioni di energia proibita, la banda di valenza si sovrappone a quella di conduzione. In tal caso, sotto l'influenza di un campo elettrico applicato, gli elettroni possono facilmente acquistare un'energia addizionale e dare luogo ad una corrente.

Semiconduttori:

Un materiale che presenta una regione di energia proibita relativamente piccola ($\approx 1 \text{ eV}$) è chiamato semiconduttore. I semiconduttori più importanti, da un punto di vista pratico, sono il germanio ed il silicio che, ad una temperatura di 0° K , hanno rispettivamente $E_g = 0.785$ e $E_g = 1.21 \text{ eV}$. Energie di questo valore, a bassa temperatura, non possono essere acquistate ad opera di un campo elettrico applicato al materiale. Ne consegue che la banda di valenza rimane piena e quella di conduzione vuota; in altre parole, a basse temperature questi materiali sono isolanti. All'aumentare della temperatura, alcuni elettroni della banda di valenza acquistano un'energia termica maggiore di E_g , portandosi, quindi, nella banda di conduzione. Tali elettroni diventano quindi, elettroni liberi, cioè possono muoversi sotto l'influenza di un

campo elettrico, facendo sì che il materiale diventi da isolante, debolmente conduttore.

Come vedremo meglio in seguito, particolari atomi di impurezze possono venire introdotte nel cristallo (drogaggio del semiconduttore). Tali impurezze danno luogo alla nascita di livelli di energia permessi all'interno della banda di energia proibita, i quali contribuiscono al fenomeno della conduzione.

La struttura cristallina del germanio e del silicio sono composte da una ripetizione regolare in tre dimensioni, di una cella unitaria di forma tetraedrica, avente un atomo a ciascun vertice. Per una temperatura $T \approx 0^\circ \text{ K}$ non si hanno cariche libere (FIG. 40a) ed il cristallo si comporta come un isolante. A temperatura ambiente, invece, alcuni legami covalenti possono rompersi a causa dell'agitazione termica, dando luogo a coppie elettrone-lacuna (FIG. 40b).

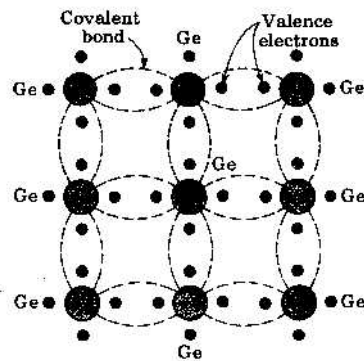


Fig. 5-1 Crystal structure of germanium, illustrated symbolically in two dimensions.

FIG. 40 a

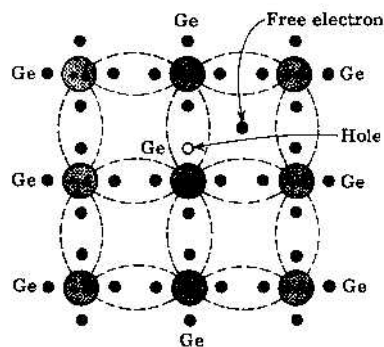


Fig. 5-2 Germanium crystal with a broken covalent bond.

FIG. 40b

L'energia E_g richiesta, a temperatura ambiente, per rompere i legami covalenti è di circa 0.72 eV per il germanio, e di circa 1.1 eV per il silicio. L'agitazione termica produce continuamente nuove coppie elettrone-lacuna (l'elettrone si porta dalla banda di valenza a quella di conduzione, lasciando una lacuna nella banda di valenza). Questo processo è bilanciato dalla ricombinazione degli elettroni nella banda di conduzione con le lacune nella banda di valenza.

Poichè in un semiconduttore puro (intrinseco) la densità degli elettroni (che si trovano nella banda di conduzione) eguaglia la densità delle lacune (che si trovano nella banda di valenza), il "Livello di Fermi" (che rappresenta lo stato di energia con il 50% di probabilità di venire riempito, se non esistesse la banda proibita) si trova a metà fra la banda di valenza e quella di conduzione (FIG. 41)

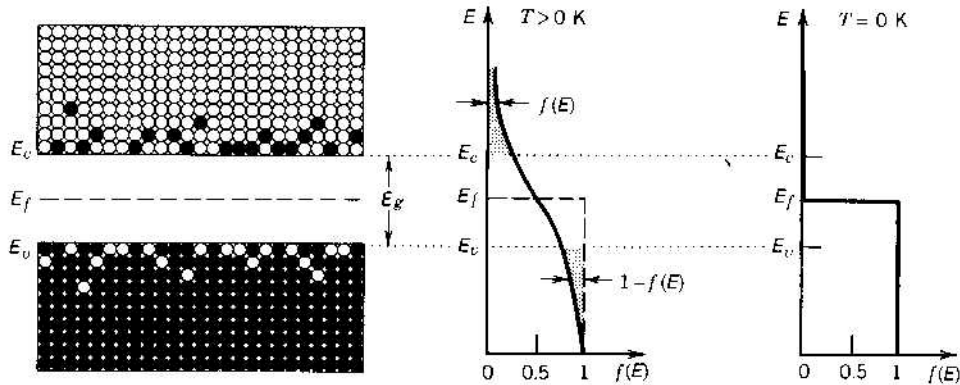


Figure 15.1-8 The Fermi function $f(E)$ is the probability that an energy level E is filled with an electron; $1 - f(E)$ is the probability that it is empty. In the valence band, $1 - f(E)$ is the probability that energy level E is occupied by a hole. At $T = 0$ K, $f(E) = 1$ for $E < E_F$, and $f(E) = 0$ for $E > E_F$; i.e., there are no electrons in the conduction band and no holes in the valence band.

FIG. 41

Consideriamo ora un semiconduttore al quale sia aggiunta una piccola percentuale di impurità di un elemento pentavalente (Sb, P, As). In tal caso, quattro dei suoi cinque elettroni di valenza occuperanno i legami covalenti, mentre il quinto elettrone rimarrà libero e sarà disponibile come portatore di corrente (FIG. 42a). Infatti, l'energia richiesta per allontanare tale elettrone dall'atomo risulta dell'ordine di solo 0.01 eV per il Ge, e di circa 0.05 eV nel caso del Si. Poiché le impurità citate "donano" cariche negative, si usa dirle "donatori" o di "tipo n".

Fig. 5-3 Crystal lattice with a germanium atom displaced by a pentavalent impurity atom.

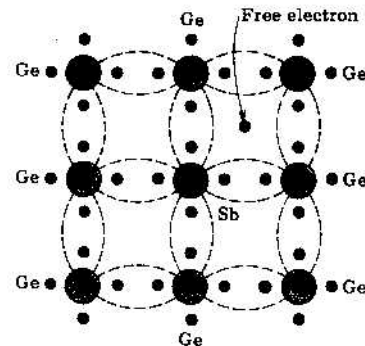


FIG. 42a

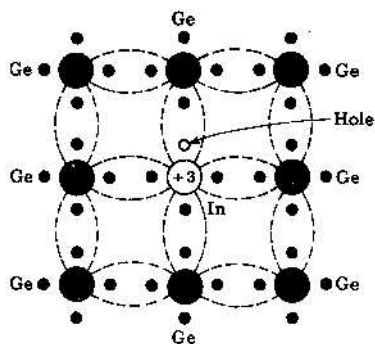


Fig. 5-7 Crystal lattice with a germanium atom displaced by an atom of a trivalent impurity.

FIG. 42b

Come è mostrato in FIG. 43b il Livello di Fermi del semiconduttore drogato con impurità di tipo n si avvicina alla banda di conduzione. Infatti, non solo aumenta il numero di elettroni, ma anche diminuisce il numero di lacune in quanto il gran numero di elettroni presenti favorisce i fenomeni di ricombinazione.

Se ad un semiconduttore intrinseco sono aggiunte impurità trivalenti (B, Ga, In), solo tre dei quattro legami covalenti possono essere riempiti, rimanendo libera una lacuna (FIG. 42b). Poichè in questo caso le impurità danno luogo a cariche positive (che accettano elettroni) esse vengono dette "accettori", o di "tipo p". Il livello di Fermi del semiconduttore drogato con impurità di tipo p, si avvicina alla banda di valenza (FIG. 43c).

In un semiconduttore di tipo p, poichè il numero di lacune è maggiore di quello degli elettroni, le buche sono dette "portatori di maggioranza", mentre gli elettroni sono detti "portatori di minoranza". Il contrario avviene per un semiconduttore di tipo n.

Per dare un'idea sulla quantità di impurezze necessarie possiamo dire che aggiungendo al germanio intrinseco una quantità di donatori nella misura di 1 parte per 10^6 , la conducibilità del Ge a 30°C , risulta di 12 volte maggiore.

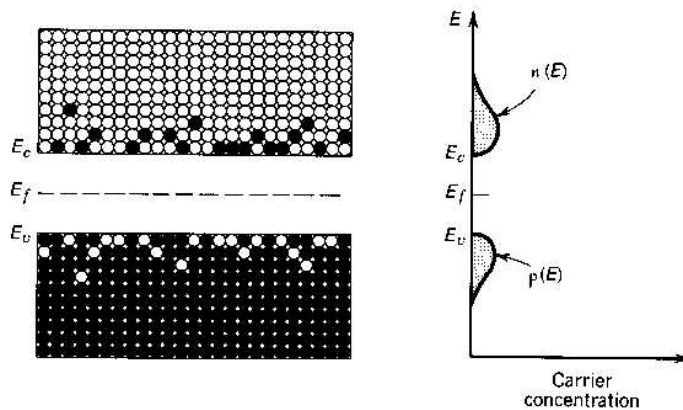


Figure 15.1-9 The concentrations of electrons and holes, $n(E)$ and $p(E)$, as a function of energy E in an intrinsic semiconductor. The total concentrations of electrons and holes are n and p , respectively.

FIG. 43a

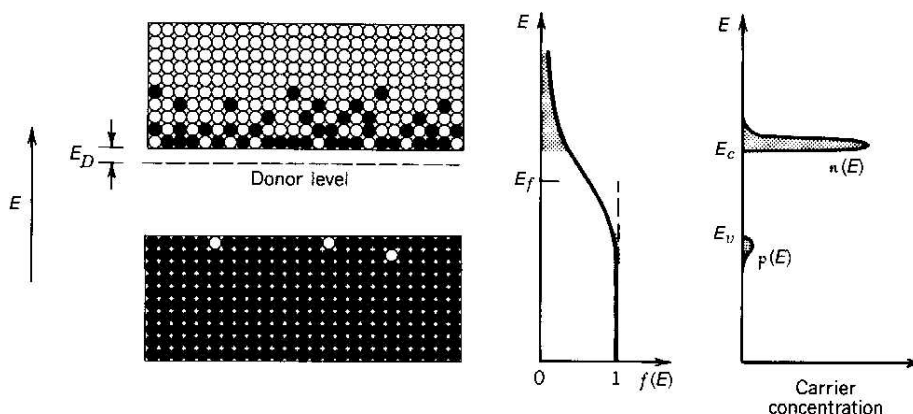


Figure 15.1-10 Energy-band diagram, Fermi function $f(E)$, and concentrations of mobile electrons and holes $n(E)$ and $p(E)$ in an n -type semiconductor.

FIG. 43b

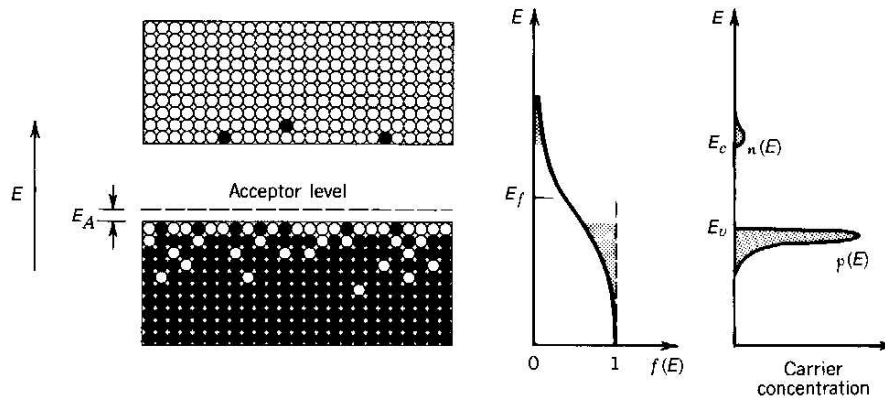


Figure 15.1-11 Energy-band diagram, Fermi function $f(E)$, and concentrations of mobile electrons and holes $n(E)$ and $p(E)$ in a p -type semiconductor.

FIG. 43c

b) **Diodi emettitori di luce (LED) e diodi laser**

Le sorgenti a semiconduttore (LED e diodi laser) sono sostanzialmente, diodi che, polarizzati direttamente, emettono luce nell'intorno di una certa lunghezza d'onda.

Quando due semiconduttori drogati, uno con impurità di tipo p e l'altro con impurità di tipo n , vengono uniti insieme, si ha una iniziale diffusione di cariche attraverso la giunzione. Per effetto della ricombinazione elettroni-lacune si crea, quindi, una "zona di svuotamento" con la formazione di una barriera di potenziale che impedisce ogni ulteriore diffusione di cariche attraverso la giunzione (FIG. 44).

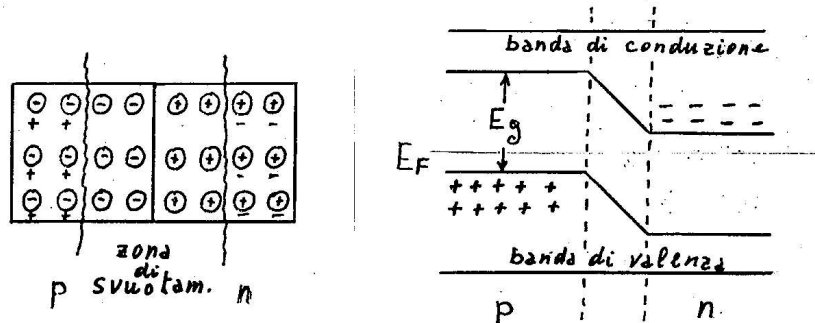


FIG. 44

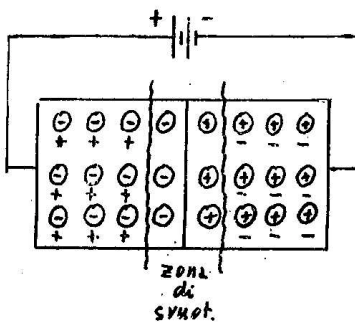
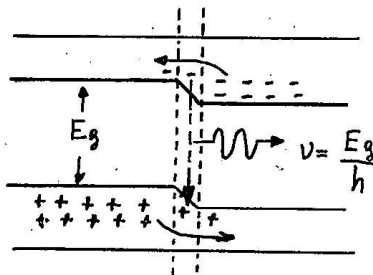


FIG. 45



Polarizzando direttamente la giunzione, la barriera diminuisce e gli elettroni cominciano a diffondersi dalla zona n alla zona p, dando luogo ad una corrente attraverso la giunzione. Si crea così, nella zona di svuotamento, una inversione di popolazione fra gli elettroni che si trovano nella banda di conduzione e le lacune che si trovano nella banda di valenza (FIG. 45). In tale zona possono aversi fenomeni di ricombinazione radiativa, nel senso che uno o più elettroni possono passare dalla banda di conduzione alla banda di valenza, nella quale si trovano le lacune, dando luogo all'emissione di fotoni la cui frequenza è data da:

$$\nu = \frac{E_g}{h}$$

dove:

E_g = gap di energia fra banda di valenza e banda di conduzione
 h = costante di Planck

La lunghezza d'onda della emissione, essendo funzione del gap di energia E_g , dipende dal particolare materiale costituente il semiconduttore. Ad esempio, nel caso dell'arseniuro di gallio (GaAs) ($E_g=1.43$ eV) l'emissione ha un picco alla lunghezza d'onda di 900 nm. Se al GaAs è aggiunto l'alluminio (GaAlAs) il picco di emissione si abbassa, risultando compreso fra 800 e 900 nm. Aggiungendo l'Indio (InGaAs) o il Fosforo (InGaAsP), il picco risulta compreso fra 1000 e 1300 nm.

In questo tipo di sorgenti, la luce emessa viene modulata semplicemente modulando la corrente che attraversa la giunzione.

Se l'emissione dei fotoni avviene in modo spontaneo, si hanno sorgenti di luce incoerente (LED: Light emitting diodes). Al fine di realizzare sorgenti coerenti (diodi laser) occorre favorire il fenomeno dell'emissione stimolata. Ciò si ottiene realizzando un risonatore (cavità Fabry-Perot) tramite lavorazione ottica delle due superfici opposte del diodo (specchi).

La FIG. 46 riporta il confronto fra l'andamento della potenza emessa, in funzione della corrente, per un LED e per un diodo laser. Come si può intuire, nei laser, per basse correnti, prevale il fenomeno dell'emissione spontanea (il diodo si comporta da LED). Superata una certa corrente di soglia, si ha l'effetto laser (prevale l'emissione stimolata) e la potenza di uscita sale rapidamente.

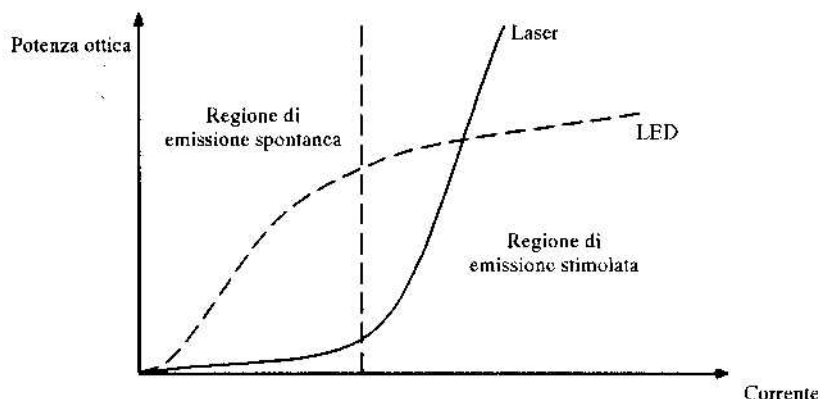


Fig. 4.18 Confronto fra le caratteristiche ottiche di un LED e di un laser.

FIG. 46

Al fine di aumentare l'efficienza delle sorgenti laser, occorre che la corrente per cui si comincia ad avere effetto laser, sia la più bassa possibile. Ciò si ottiene realizzando strutture più complesse della singola giunzione (omogiunzione), mediante l'uso di eterogiunzioni, cioè giunzioni formate utilizzando più semiconduttori, ciascuno con un differente gap di energia (v ad esempio la FIG.47).

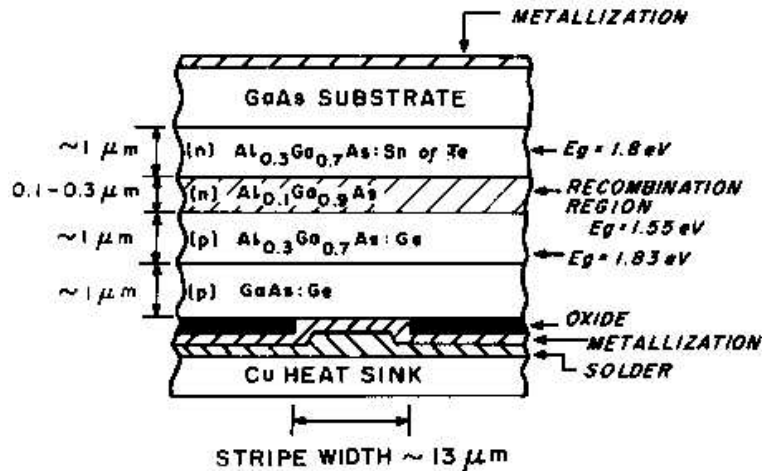


FIG. 47

A titolo esplicativo, paragoniamo le caratteristiche di una semplice giunzione (omogiunzione) con quelle di una eterogiunzione. In una omogiunzione la concentrazione di cariche minoritarie diminuisce esponenzialmente con la distanza, in accordo con le leggi della diffusione (FIG. 48a). Ciò significa che una considerevole frazione di cariche iniettate, non contribuisce al fenomeno della emissione stimolata. Questo si traduce nella necessità di dover iniettare un alto numero di cariche, ovvero grosse correnti.

Consideriamo una eterogiunzione (FIG. 48b) fra materiali aventi gap di energia proibita, rispettivamente, E_g e E_g' (con $E_g' > E_g$). In tal caso, le cariche minoritarie subiscono una sorta di confinamento per effetto della barriera di potenziale esistente. Ciò dà luogo a: 1) una maggiore probabilità di ricombinazione; 2) una minore corrente necessaria per mantenere l'inversione di popolazione. Come conseguenza si ottiene un aumento dell'efficienza, e una diminuzione della corrente di soglia alla quale inizia l'effetto laser. Anche lo spessore della regione di ricombinazione può essere ridotto (da circa 3-4 μm , a circa 1.5 μm).

Quanto detto risulta ancora più evidente nel caso di doppia eterogiunzione (FIG. 48c). In tal caso il materiale avente gap di energia E_g è delimitato da due materiali aventi entrambi gap di energia E_g' ($E_g < E_g'$). In tal caso sia gli elettroni, sia le buche sono entrambi confinati. In aggiunta a ciò, poichè l'indice di rifrazione della zona centrale, con gap di energia E_g , è maggiore di quello delle due zone adiacenti, viene a formarsi una guida planare che produce (oltre al già citato confinamento elettrico) anche un confinamento ottico della radiazione emessa. Ciò fa sì che la regione di ricombinazione possa essere ridotta notevolmente (circa 0.2 μm), e che la densità di corrente di soglia del laser possa essere ridotta a circa 1000 A/cm^2 .

Le potenze ottenibili con le sorgenti a semiconduttore sono generalmente comprese fra qualche mW e alcuni watt.

Le sorgenti a semiconduttore, e in particolare i diodi laser, sono molto usate nel

campo delle telecomunicazioni, sia per la loro semplicità di modulazione, sia per l'interfacciabilità con le fibre ottiche.

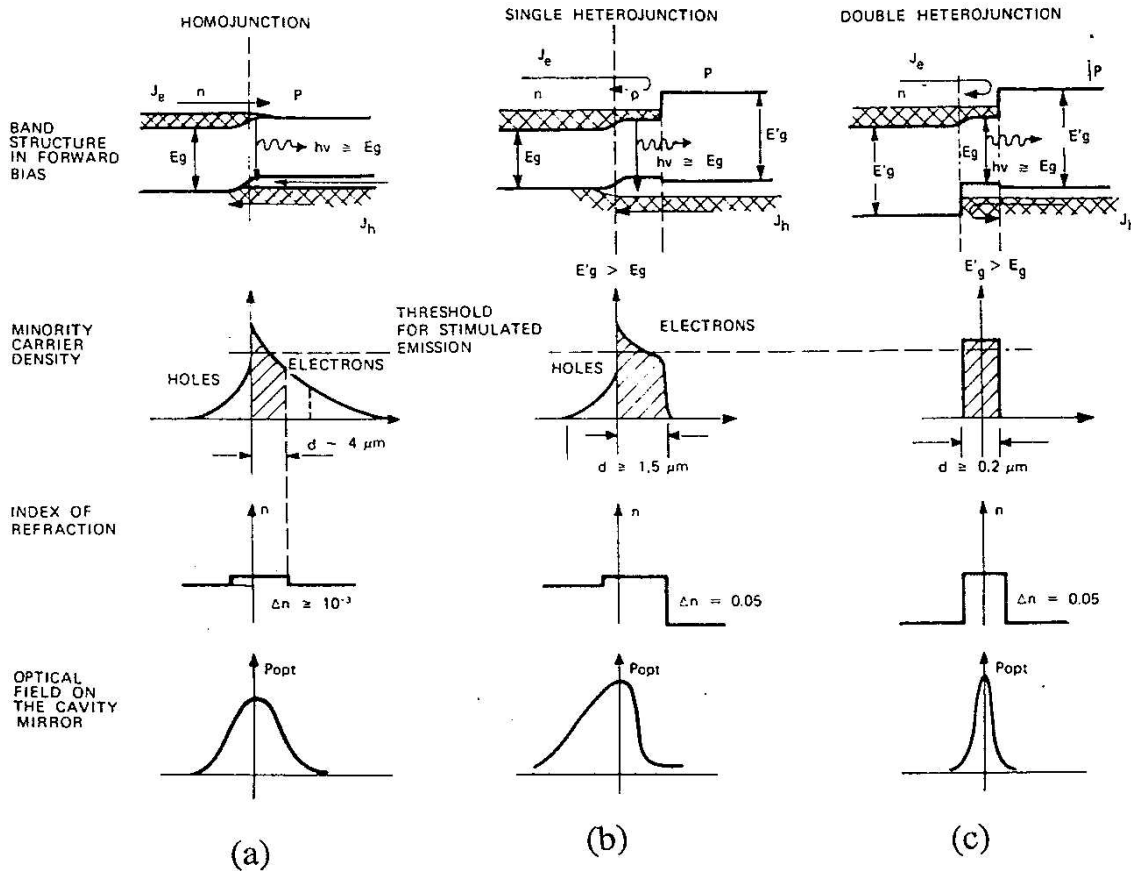


FIG. 48

c) Fotorivelatori

I fotorivelatori hanno il compito di convertire la potenza ottica ricevuta in corrente elettrica, che è opportunamente amplificata ed elaborata. I due fenomeni fisici che vengono più comunemente usati nella rivelazione della luce, sono:

- 1) riscaldamento, per effetto della radiazione ottica, di una piccola massa (termopile, bolometri, cristalli piroelettrici),
- 2) effetto fotoelettrico (che avviene quando un fotone, che incide in un materiale, ha sufficiente energia da produrre la nascita di elettroni liberi). Quest'ultimo effetto può essere usato in due modi:

- a) la radiazione che incide sul materiale produce il rilascio di elettroni all'esterno del materiale (fototubi e fotomoltiplicatori);
- b) la radiazione incidente dà luogo a cariche libere nel materiale, che producono un flusso di corrente all'interno del materiale stesso (semiconduttori)

Poiché in un sistema di telecomunicazioni a fibra ottica, i fotorivelatori svolgono un ruolo determinante, essi devono soddisfare a stringenti requisiti: alta sensibilità alle lunghezze d'onda di interesse ($0.8-0.9 \mu\text{m}$; $1.3 \mu\text{m}$; $1.5 \mu\text{m}$); basso rumore; alta velocità; dimensioni ridotte; basso costo; affidabilità; bassa potenza di alimentazione richiesta.

I componenti che rispondono più degli altri a questi requisiti, sono i dispositivi a semiconduttore, in particolare i fotodiodi (pn, pin, APD).

1) Fotodiodi con giunzione p-n

Tali rivelatori sono costituiti da una giunzione p-n **polarizzata inversamente** e che può essere colpita da radiazioni luminose tramite una finestra aperta nel contenitore del dispositivo.

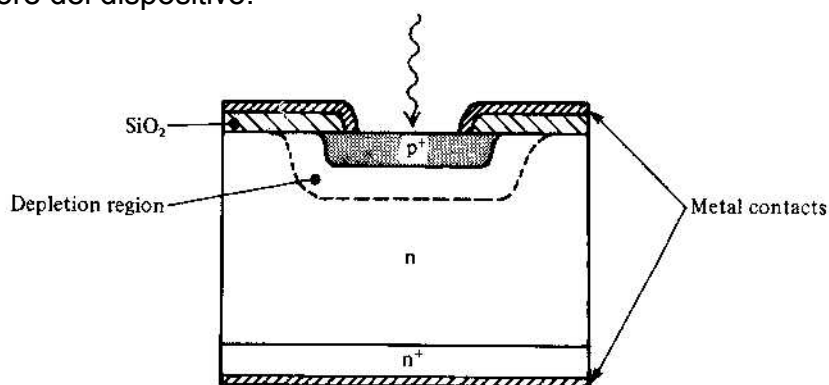


FIG. 7.27 Typical silicon photodiode structure for photoconductive operation. A junction is formed between heavily doped p-type material (p^+) and fairly lightly doped n-type material so that the depletion region extends well into the n material. The p^+ layer is made fairly thin. Metallic contacts can be made directly to the p^+ material but to obtain an ohmic contact to the n material an intermediate n^+ layer must be formed.

FIG. 49

Consideriamo quindi, una giunzione p-n polarizzata inversamente costituita da materiale che abbia un adeguato assorbimento alla lunghezza d'onda di interesse. In tal caso, (come è noto) i fotoni incidenti possono eccitare gli elettroni portandoli dalla banda di valenza a quella di conduzione. Le coppie elettroni-lacune risultanti sono separate dal campo elettrico all'interno della zona di svuotamento; in particolare, gli elettroni vanno verso la zona n, e le lacune verso la zona p, dando luogo ad una corrente (FIGG.50 e 51)

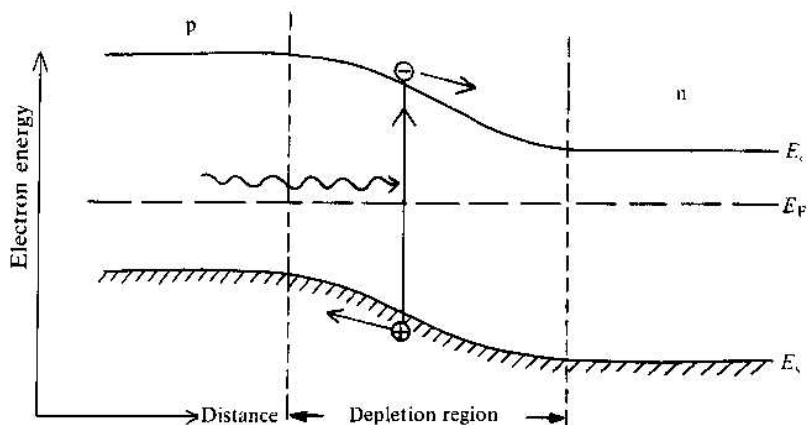


FIG. 7.25 Electron energy level diagram illustrating the generation and subsequent separation of an electron-hole pair by photon absorption within the depletion region of a p-n junction.

FIG. 50

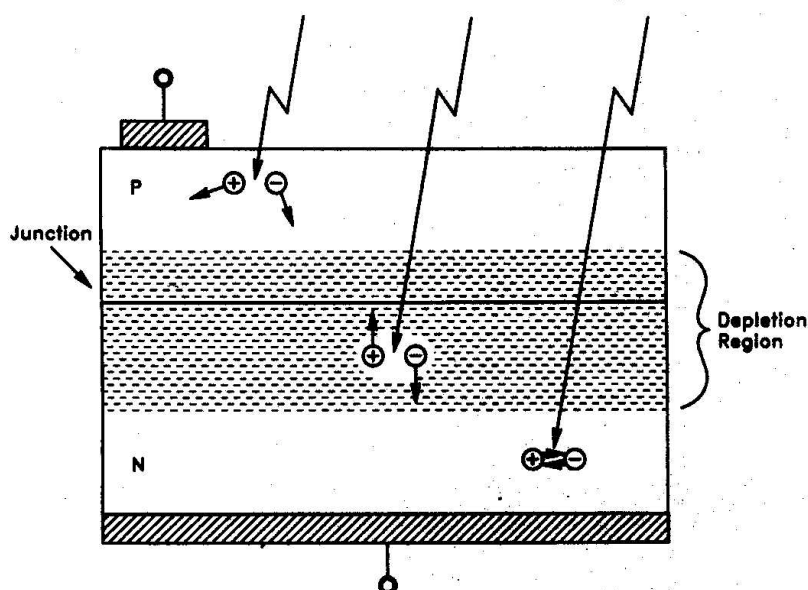


Figure 1.1 In a photodiode, holes and electrons released by photons within the depletion region accelerate toward the diode terminals, but those released outside this region travel by diffusion or simply recombine.

FIG. 51

In un tale tipo di giunzione, non tutti i fotoni che investono la zona p sono assorbiti nella zona di svuotamento (cioè dove il campo elettrico è grande). Infatti, poichè la zona di svuotamento e quella di assorbimento non necessariamente coincidono (tendendo quest'ultima ad essere più estesa), alcuni fotoni vengono assorbiti al di fuori della zona di svuotamento, dove cioè il campo elettrico è nullo (FIG. 51). Conseguentemente, non tutte le coppie elettrone-lacuna vengono separate dal campo elettrico, ma alcune subiscono semplicemente una diffusione causale che, spesso, le porta a ricombinarsi.

Al fine di migliorare l'efficienza quantica del dispositivo dovremmo aumentare l'estensione della zona di svuotamento rispetto a quella della zona di assorbimento.

Dicesi "efficienza quantica" la frazione di fotoni incidenti che è assorbita dal semiconduttore e genera coppie primarie elettrone-lacuna (numero di coppie/fotoni).

2) Fotodiodi con giunzione p-i-n (diodi pin)

Questo tipo di fotorivelatore è quello più comunemente usato nei sistemi di telecomunicazione a fibra ottica. Al fine di ottenere una regione di svuotamento maggiore o uguale alla regione di assorbimento, viene inserito uno strato di materiale intrinseco (o a basso drogaggio) fra la regione di tipo n e quella di tipo p, entrambe fortemente drogate (FIG. 52).

La larghezza della regione intrinseca può essere ottimizzata al fine di raggiungere il migliore compromesso fra alta efficienza quantica e risposta veloce.

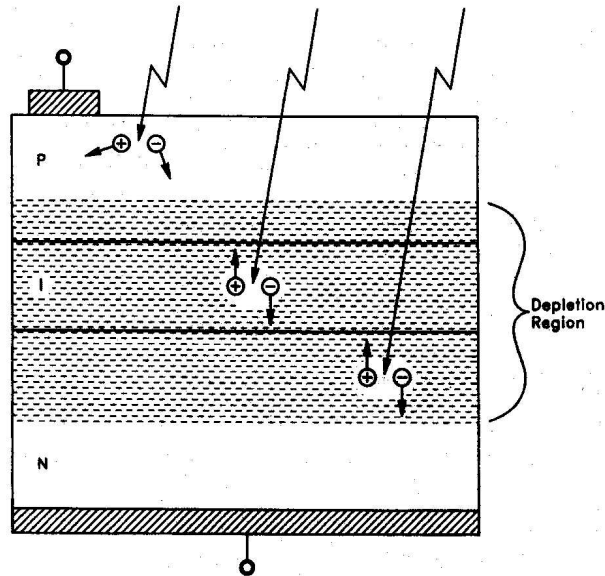


Figure 1.5 PIN photodiodes include an intrinsic interlayer that expands the depletion region to encompass carriers released by a broader range of photon wavelengths.

FIG. 52

3) Fotodiodi a valanga (APD)

E' ovvio come in un diodo PIN, all'aumentare del campo elettrico (ovvero della polarizzazione inversa) aumenti l'accelerazione dei portatori di cariche. Quando il campo diventa molto intenso ($E \approx 3 \cdot 10^5$ V/cm) gli elettroni acquistano sufficiente energia da produrre, per impatto, la nascita di altre coppie elettrone-lacuna. Si ha quindi una moltiplicazione delle cariche per effetto valanga che aumenta notevolmente l'efficienza quantica del rivelatore (FIG. 53).

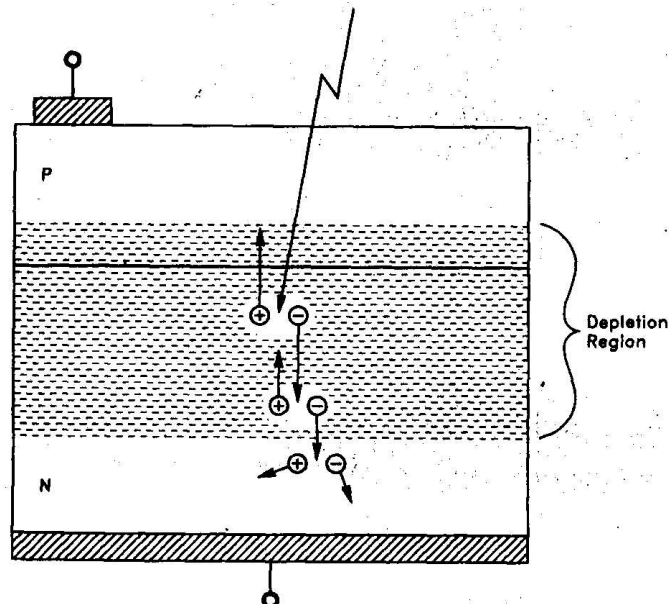


Figure 1.6 Avalanche photodiodes produce current gain through a chain reaction in which carriers released by photons and accelerated by the depletion region release further carriers through impact ionization.

FIG. 53

9. CONNESSIONE DI FIBRE OTTICHE

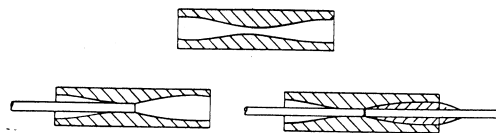
Nei sistemi di telecomunicazioni, la connessione fra fibre ottiche risulta un fattore estremamente importante. Infatti, mentre nei circuiti elettrici le connessioni, di solito, pongono problemi marginali, nei sistemi a fibra ottica possono porre problemi notevoli.

Le tecniche per connettere le fibre ottiche sono essenzialmente due: a) connessioni di tipo permanente (effettuate mediante giunti meccanici e giunti per fusione); b) connessioni removibili (effettuate mediante l'uso di connettori).

Connessioni permanenti (splices)

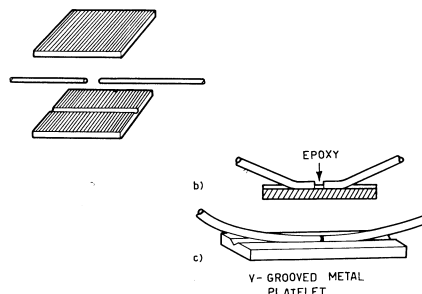
La FIG. 54 mostra, in modo esplicativo, le fasi di realizzazione di connessioni permanenti effettuate rispettivamente con tubetti capillari e con substrati con solco a "V".

• capillary tubes



fibers are inserted, pressed and gripped by injection of adhesive

• v-groove substrate



fibers are place in the v-grooves and bonded by epoxy resin

FIG. 54

In FIG. 55 è rappresentata schematicamente una saldatrice ad arco elettrico. Le fibre vengono fuse testa-testa riscaldando le due superfici mediante un arco elettrico. Si ottengono in tal modo, perdite di inserzione dell'ordine di 0,1 dB.

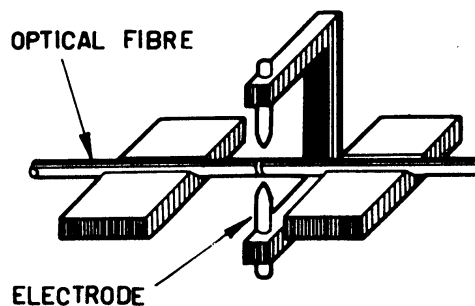


FIG. 55

Al fine di ottenere connessioni con bassa attenuazione è necessario che le facce delle fibre siano state precedentemente tagliate in modo che risultino piane e perpendicolari all'asse. L'operazione di taglio viene effettuata con apposite macchinette. Una macchina per il taglio delle fibre (breaking machine) è, usualmente, costituita da una superficie curva sulla quale viene posta in tensione la fibra ottica, e da una lama (tungsteno, carburo di diamante) che serve per incidere leggermente la fibra provocando l'inizio di una spaccatura lungo la sezione (FIG. 56). Se la tensione ed il raggio di curvatura sono stati scelti correttamente, la fibra ottica si spacca dando luogo a due sezioni piane e perpendicolari all'asse. La scelta del corretto valore di tensione "T" da applicare alla fibra e del raggio di curvatura "r" dipendono dal diametro delle fibre e dal modulo di Young del materiale costituente la fibra stessa (es: per fibre di silice con $\phi=125\text{ }\mu\text{m}$ si deve porre $r=5,7\text{ cm}$; $T= 125\text{-}175\text{ g}$).

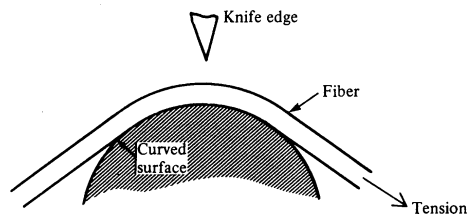


FIG. 56

Connessioni removibili (connettori "a ferrule")

I connettori che più comunemente vengono utilizzati sono quelli del tipo "a ferrule" (FIG. 57).

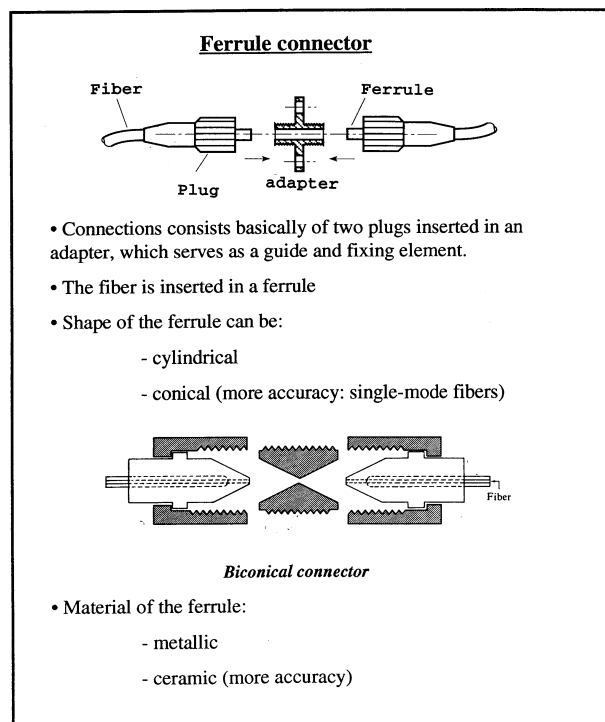


FIG. 57

La fibra ottica è alloggiata all'interno di un cilindretto centrale (ferula) munito di un foro centrale avente lo stesso diametro del mantello della fibra stessa. Il ferrule è, a sua volta, inserito all'interno di un elemento di connessione. La connessione avviene mediante l'unione di due connettori uguali, per mezzo di un adattatore.

Esistono vari tipi di connettori che differiscono per la loro qualità (entità delle perdite per attenuazione che introducono), praticità, complessità di montaggio, costo. In FIG. 58 sono schematizzati alcuni fra i connettori più frequentemente utilizzati:

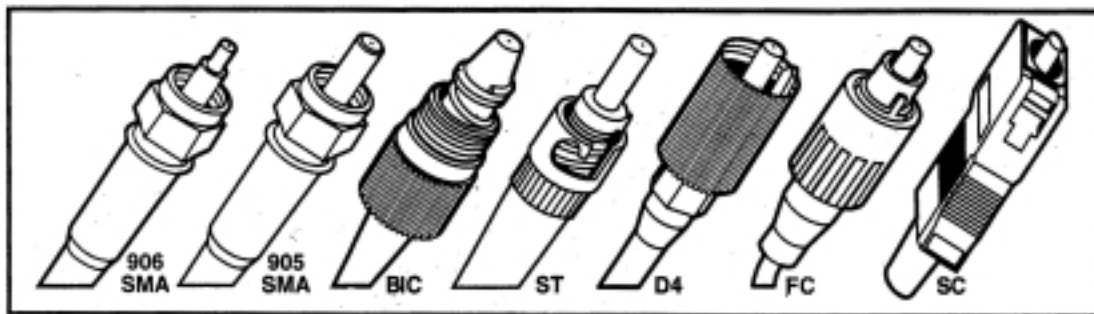


FIG. 58

I connettori di tipo commerciale presentano perdite piuttosto alte (dell'ordine di 1 dB). L'attenuazione introdotta è essenzialmente attribuibile a tre fattori: non uniformità nella geometria delle due fibre da connettere; diversità delle Aperture Numeriche; tolleranze meccaniche.

Le variazioni nella geometria delle fibre sono praticamente inevitabili sia per fibre di partite diverse, sia per fibre della stessa partita. Esse possono essere dovute ad ellitticità del nucleo o del mantello, eccentricità del nucleo rispetto al mantello, ma soprattutto a diametri leggermente diversi delle due fibre. Mentre quest'ultimo fattore non ha influenza nel caso in cui la fibra ricevente sia di diametro maggiore, nel caso contrario esso può introdurre una perdita di circa 0,9 dB, considerando che la tolleranza sul diametro di una fibre è solitamente del 5%.

Differenze nell'Apertura Numerica delle fibre si riscontra, di solito, solo per fibre di differenti partite. Considerando una differenza di circa l'1% la relativa perdita risulta di circa 0,2 dB.

Le perdite dovute a tolleranze meccaniche sono particolarmente avvertite. Possono normalmente essere introdotte perdite di circa 1 dB dovute a disallineamenti laterali, trasversali e angolari.

Alle perdite suddette si aggiungono, nel caso dei connettori, quelle dovute alla riflessione nell'interfaccia vetro-aria (di Fresnel), che ammontano, di solito, a 0,3-0,4 dB. Questa perdita può essere ridotta, quando è possibile, interponendo fra le due fibre un gel avente indice di rifrazione pari a quello del nucleo della fibra.

Non tutti i connettori risultano adatti per la connessione di fibre monomodo. I migliori per questo uso sono, prevalentemente, i connettori di tipo Biconico e di tipo FC, che, tuttavia, sono anche più complessi e richiedono una lavorazione maggiore.

Esistono in commercio anche connettori per fibre di plastica, i quali risultano economici, robusti e pratici.

10. MISURA DELLE CARATTERISTICHE TRASMISSIVE

Esaminando la propagazione della luce in una fibra ottica, abbiamo visto come una caratteristica fondamentale sia l'attenuazione della fibra stessa. Se la fibra è utilizzata come guida d'onda in un sistema di telecomunicazione, diventa fondamentale considerare anche un'altra caratteristica: la dispersione.

Al momento non esiste una vera e propria standardizzazione dei sistemi di misura, benché diverse organizzazioni nazionali ed internazionali si stiano occupando di ciò. Alcune fra le maggiori sono: EIA (Electronic Industries Association), NBS (National Bureau of Standards), BSI (British Standards Institution), DKE (Deutsche Elektrotechnische Kommission), IEC (International Electrotechnical Commission, CCITT (International Telegraph and Telephone Consultive Committee).

Questa mancanza di standardizzazione è in parte dovuta alla complessità del meccanismo di propagazione della luce all'interno di una fibra. In una fibra multimodo, infatti, l'energia si propaga secondo vari modi il cui numero è tipicamente dell'ordine di alcune centinaia. Ciascun modo subisce un'attenuazione ed un ritardo diversi. Inoltre, fattori quali imperfezioni della fibra, curvature di questa, o presenza di giunti, producono scambi di energia fra i vari modi.

E' evidente, quindi, come le caratteristiche di propagazione della fibra (attenuazione e dispersione) non siano definibili in modo assoluto, ma dipendono sia dalle condizioni ambientali (curvature, sollecitazioni meccaniche, ecc.), sia da come l'energia viene distribuita sui vari modi al momento dell'immissione della luce all'interno della fibra.

Un metodo universalmente riconosciuto valido per ottenere una sufficiente riproducibilità delle misure di propagazione su fibre ottiche, è quello di effettuare tali misure in "condizioni stazionarie" di distribuzione dell'energia sui vari modi.

Nelle fibre multimodo, infatti, a causa degli scambi di energia fra i vari modi, si ottiene, dopo un tratto di fibra più o meno lungo, una distribuzione che tende a propagarsi inalterata per la restante lunghezza di fibra, indipendentemente dalle condizioni iniziali di distribuzione dell'energia stessa (illuminazione della fibra).

A questa distribuzione viene dato il nome di "distribuzione stazionaria". In talune fibre e, in particolari condizioni di illuminazione, essa può essere raggiunta non prima di un tratto iniziale di qualche centinaio di metri.

La misura dei parametri caratteristici delle fibre ottiche risulta corretta solo se effettuata in "condizioni stazionarie". E' necessario, quindi, effettuare le misure senza considerare il primo tratto iniziale, il quale, come si è detto, è necessario per raggiungere le "condizioni stazionarie". Può, tuttavia, risultare conveniente simulare tale tratto iniziale, facendo in modo da realizzare le "condizioni stazionarie" su un breve tratto di fibra. Ciò può essere fatto, ad esempio, con:

- a) l'uso di un'ottica di illuminazione che produca un fascio luminoso avente la stessa Apertura Numerica (NA) della fibra
- b) l'uso di una fibra (dummy) per illuminare la fibra da misurare
- c) l'uso di un cosiddetto mescolatore di modi (mode scrambler, o mode mixer) sul tratto iniziale della fibra da misurare.

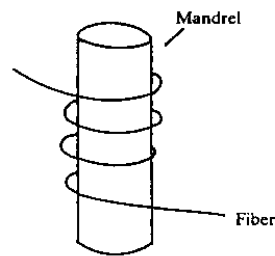
I mescolatori di modi sono basati sul fatto che ogni curvatura della fibra causa un rimescolamento nell'energia distribuita sui vari modi consentiti all'interno della fibra stessa. Quindi, in una fibra sottoposta a numerose curvature, si raggiungono rapidamente (in un tratto breve) le stesse "condizioni stazionarie" che si raggiungono

in un tratto lungo di fibra non sottoposta a curvature.

Tali mescolatori possono essere realizzati secondo varie tecniche: stringendo un breve tratto di fibra fra due superfici ruvide; costringendo la fibra ad un cammino tortuoso mediante apposite sostegni, avvolgendo la fibra attorno ad un mandrino di piccolo diametro (2-3 cm) (v. FIG. 59); ecc.

Techniques for producing mode scramblers

*winding the fiber
around a small
cylinder*



*subjecting the
fiber to sinusoidal
bends*

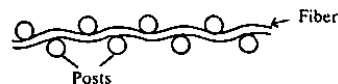


FIG. 59

10.1 Misura dell'attenuazione

I metodi utilizzati per misurare l'attenuazione di una fibra ottica sono essenzialmente due:

- metodo del taglio (o "cut back") (metodo distruttivo)
- metodo della retrodiffusione ("back scattering") (metodo non distruttivo).

10.1.1 Metodo del taglio

Consiste nel misurare la potenza ottica P_1 all'estremità di una fibra di lunghezza nota L_1 . Successivamente la fibra viene accorciata e si misura la potenza ottica P_0 all'uscita di un corto pezzo L_0 (sufficiente ad ottenere le condizioni di propagazione stazionarie) della stessa fibra. L'attenuazione è definita con:

$$A(dB) = -10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0}$$

Poichè utilizzando questo metodo è necessario tagliare la fibra, tale metodo è detto distruttivo.

E' possibile misurare l'attenuazione in corrispondenza di varie lunghezze d'onda (attenuazione spettrale), utilizzando un certo numero di filtri o un monocromatore .

. La FIG.60 rappresenta il diagramma a blocchi del sistema di misura.

Cutback method

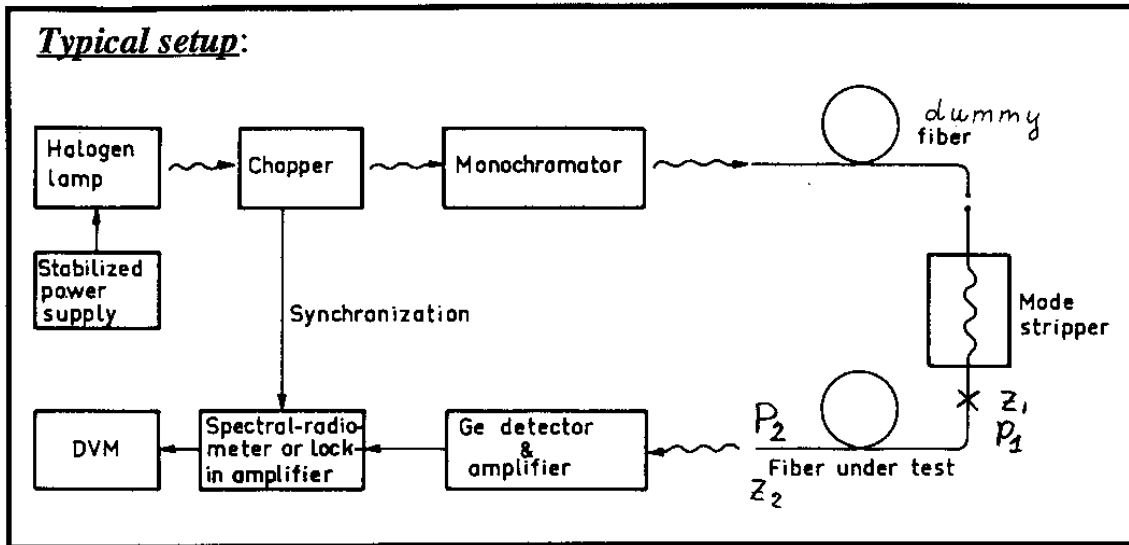


FIG. 60

Come si vede, al fine di raggiungere le condizioni di propagazione stazionarie in un tratto di fibra breve, viene, in questo caso, utilizzata una fibra dummy per illuminare la fibra da misurare. E' presente anche un cosiddetto "mode stripper". Esso è costituito normalmente da un liquido ad alto indice di rifrazione nel quale viene immersa la fibra: serve per eliminare i modi (rifrangendoli fuori) che tendono a propagarsi nel "clad" della fibra.

Nella FIG.61 è riportata una tipica curva di attenuazione spettrale di una fibra a basse perdite.

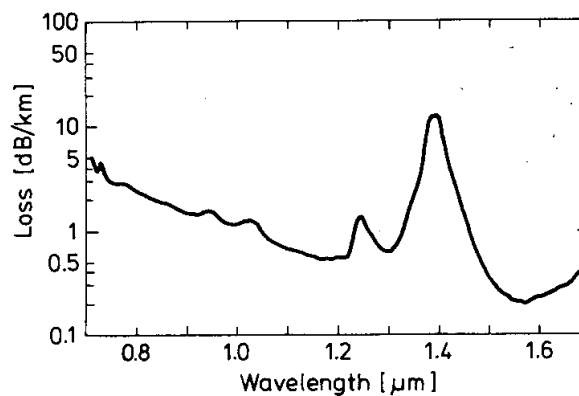


FIG. 61

10.1.2 Metodo di retrodiffusione

E' un metodo non distruttivo (non occorre tagliare la fibra) e che consente la misura anche se è disponibile una sola estremità della fibra. Si presta quindi particolarmente per effettuare misure "in campo".

Lo schema di principio di questo sistema di misura è rappresentato in FIG.62 . Una sequenza di impulsi di breve durata viene inviata all'interno della fibra. La luce relativa a ciascun impulso, propagandosi all'interno della fibra, subisce, punto per punto, una diffusione. Una piccola parte di questa luce diffusa tornerà indietro (back-scattering) dando luogo ad una sorta di eco che potrà essere rivelato. Poichè ciascuna sezione di fibra dà luogo ad un eco il cui ritardo temporale è proporzionale alla distanza di tale sezione dall'ingresso della fibra stessa, l'involuppo dei vari echi rappresenterà l'andamento della diffusione di luce lungo la fibra.

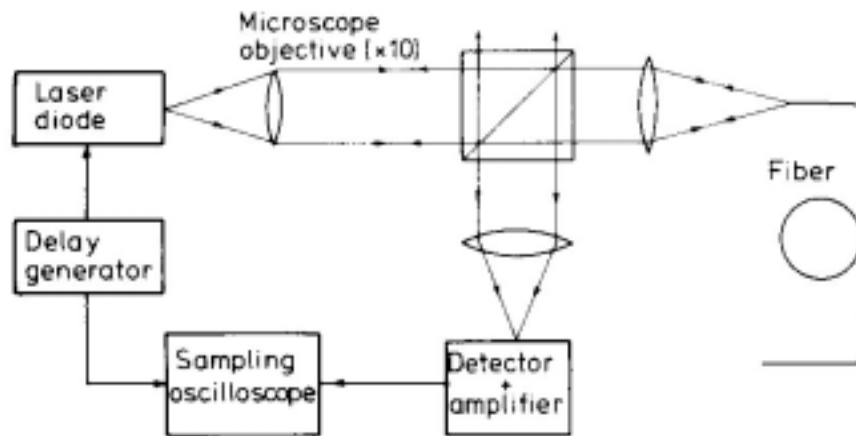


FIG. 62

Supponiamo (FIG. 63) che la fibra presenti una grossa disomogeneità in corrispondenza di un punto localizzata a distanza z dall'inizio della fibra stessa. Tale disomogeneità darà luogo ad un eco di maggiore intensità che sarà ricevuto dopo un tempo:

$$t = \frac{2z}{v}$$

dove la velocità di propagazione della luce all'interno della fibra è $v=c/n$.

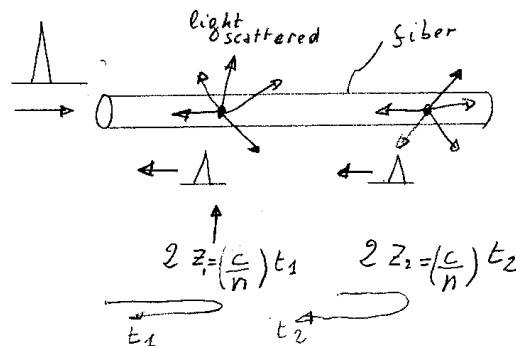


FIG. 63

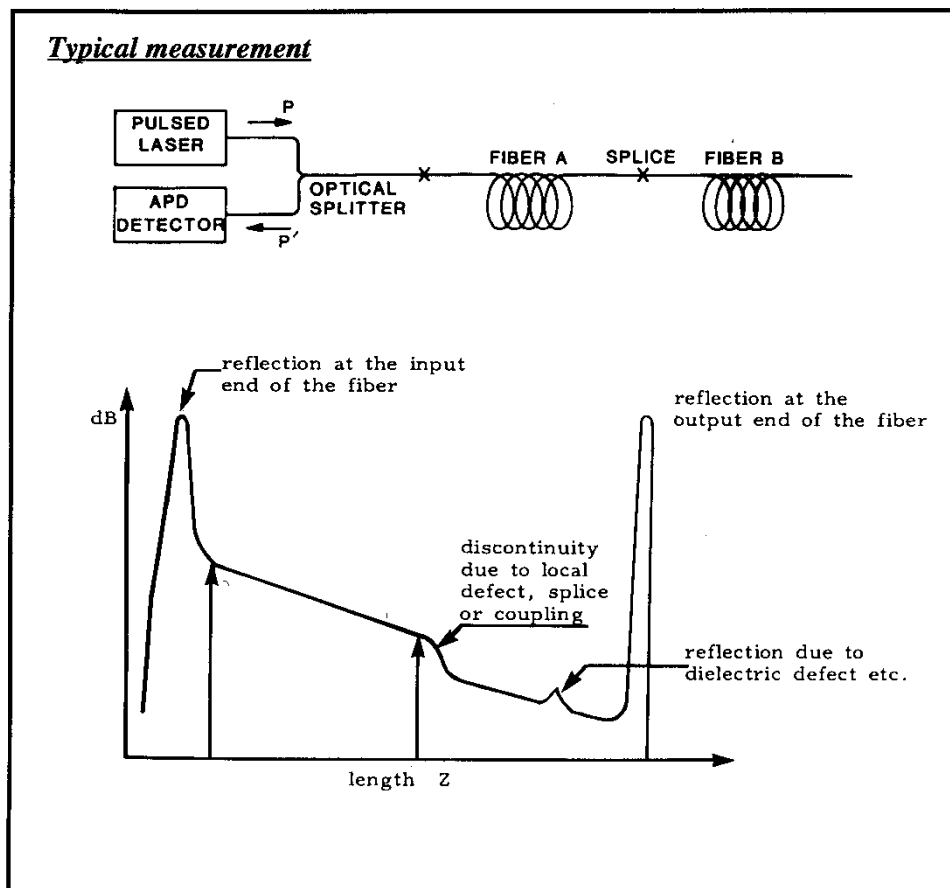
E' quindi comprensibile come, analizzando mediante ad esempio un oscilloscopio campionatore, i vari echi ricevuti, sia possibile determinare se la fibra presenta disomogeneità e, in caso affermativo, a quale distanza dall'inizio della fibra stessa.

L'involuppo dei vari echi dovuti alla retrodiffusione sezione per sezione della fibra, fornisce una curva (FIG. 64) dalla quale è possibile ricavare l'attenuazione in funzione della lunghezza della fibra.

Questo metodo si presta anche per misurare la lunghezza di una fibra, per verificare se e a quale distanza essa sia eventualmente interrotta e per misurare le perdite dei giunti.

The optical fiber loss between two points z_1 and z_2 can be calculated by analyzing the corresponding intensity of the back-scattered light P_1 and P_2 and the time at which the scattered light returns at the incident end.

$$A = \frac{10 \log P(t_1) / P(t_2)}{2(z_2 - z_1)} [\text{dB/unitlength}]$$

**FIG. 64**

10.2 Risposta in frequenza di una fibra ottica

La risposta in frequenza di una fibra (larghezza di banda), come è già stato illustrato, è limitata dalla dispersione della fibra stessa. Risulta quindi, insieme all'attenuazione, un parametro essenziale nei sistemi di telecomunicazione.

Il metodo maggiormente utilizzato per la misura di tale parametro prevede l'analisi della risposta ad un impulso unitario.

Un impulso luminoso sufficientemente stretto (tipicamente 100 psec a metà altezza) viene lanciato all'interno della fibra. A causa della dispersione l'impulso di uscita risulterà allargato.

Considerando la fibra come un quadripolo lineare i cui segnali di ingresso e di uscita siano rispettivamente $p_{in}(t)$ e $p_{out}(t)$, trovare la risposta del quadripolo significa trovare la funzione $h(t)$ la cui convoluzione col segnale di ingresso dà il segnale di uscita:

$$u(t) = h(t) * s(t)$$

il segno $*$ indica la convoluzione.

Applicando la Trasformata di Fourier si ha:

$$P_{out}(\omega) = H(\omega) P_{inp}(\omega)$$

dove gli spettri dei due segnali sono espressi da:

$$P_{out}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{out}(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$P_{inp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{inp}(t) e^{-i\omega t} dt$$

quindi la risposta in frequenza del quadripolo è:

$$H(\omega) = \frac{P_{out}(\omega)}{P_{inp}(\omega)}$$

Per ottenere la risposta all'impulso nel dominio del tempo è necessario effettuare la trasformata inversa:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

In pratica la misura si effettua acquisendo i due impulsi mediante computer ed eseguendo la trasformata di Fourier, mediante un algoritmo di Fast Fourier Transform (FFT), di ciascuno dei due. Il rapporto fra le risposte in frequenza dei due impulsi fornisce la risposta in frequenza della fibra. Tale rapporto elimina la risposta del circuito elettrico (es: sistema di rivelazione e di acquisizione) che è comune alle due risposte.

10.3 Misura della Apertura Numerica

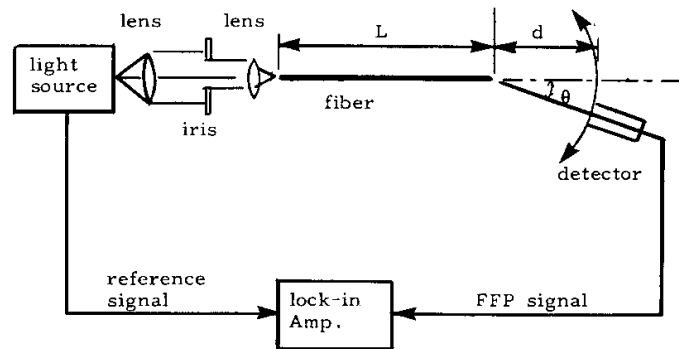
Questa misura viene effettuata (FIG.65) ponendo un rivelatore a distanza nota dalla faccia di uscita di una fibra, e muovendolo lungo un arco di cerchio avente come centro la faccia della fibra stessa (misura del far-field).

L'intensità del segnale raccolto ha, ovviamente, un andamento a campana. Si definisce, usualmente, NA il seno dell'angolo fra l'asse della fibra e il punto in cui l'intensità del segnale raccolto è di circa il 5% del valore massimo che si ha sull'asse della fibra.

Measuring NA

Scanning method

Performed by measuring the far-field angle from the fiber using a rotating stage.



The output is monitored and plotted as a function of angle.

Max. acceptance angle is obtained for 5% of max. intensity

Thus: $NA = \sin \Theta_m$

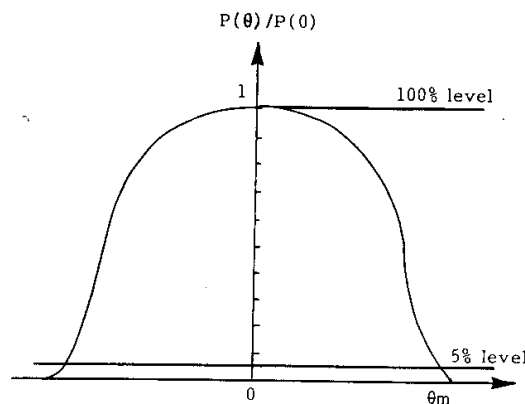
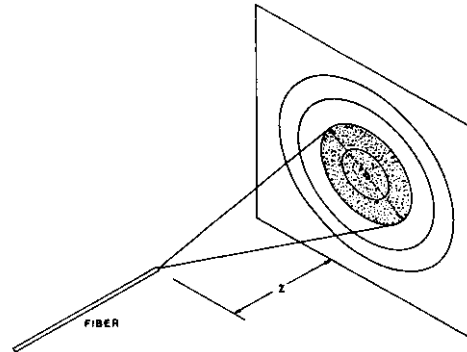


FIG. 65

Un metodo più semplice, anche se più approssimato, per misurare l'Apertura Numerica (visual method) prevede l'analisi visiva dello "spot" di uscita della fibra ottica ed il calcolo della Apertura Numerica mediante semplici considerazioni trigonometriche (FIG. 66)

Measuring NA

NA measurements of a multimode fiber involves measurements of far-field radiation pattern from the fiber



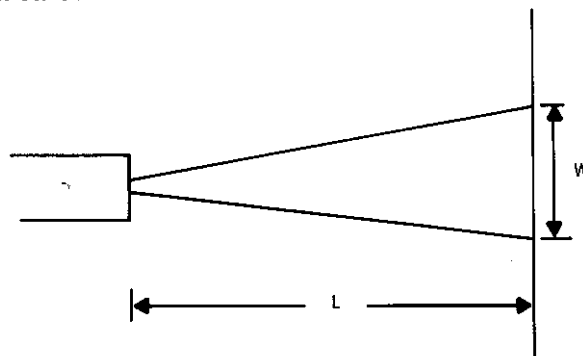
Two main methods are normally used:

- visual method
- scanning method

Visual method

This method is very useful in the laboratory applications, because it gives a quick estimate of NA.

NA obtained by trigonometric means observing the spot out of the fiber on a card:



$$NA = \sin \vartheta_a = \frac{\frac{W}{2}}{\sqrt{(\frac{W}{2})^2 + L^2}} \approx \frac{(\frac{W}{2})}{L}$$

FIG. 66

11. COMPONENTI SPECIALI

11.1 Accoppiatori a fibra ottica

Una rete per trasmissione di dati è usualmente composta da un numero di stazioni (nodi) disposte secondo un architettura a "bus", a "stella", ad "anello", ad "albero", o mista (FIG. 67).

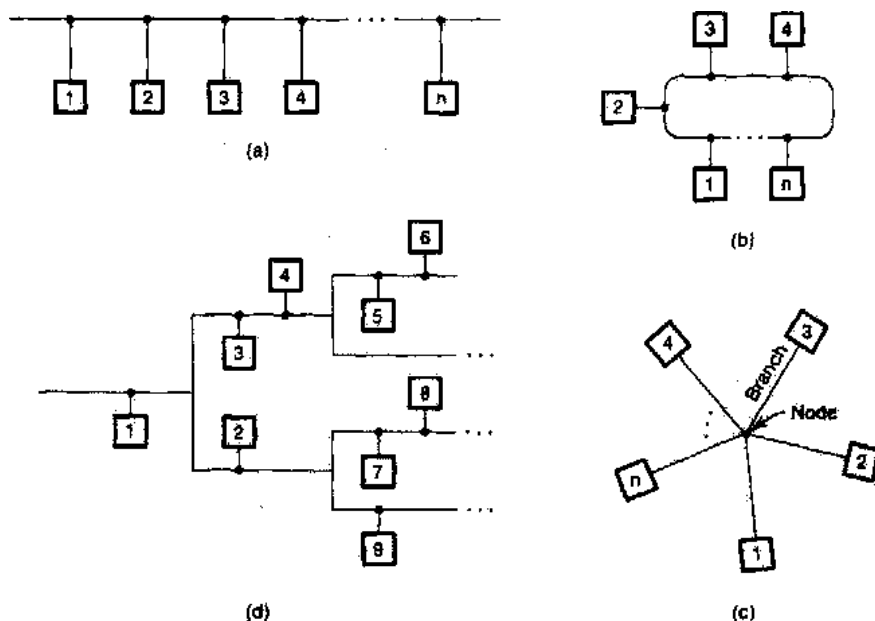
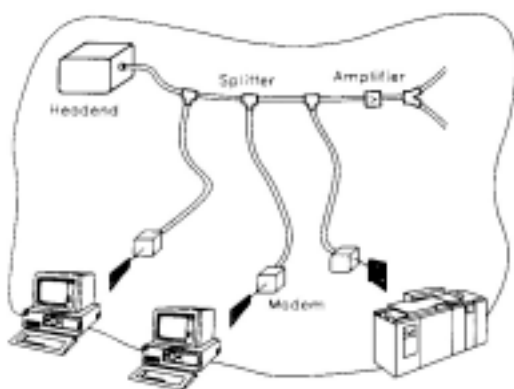


Figure 4-1 Typical topologies of local-area networks. (a) Bus network. (b) Ring network. (c) Star network. (d) Tree network.

FIG. 67



In corrispondenza di ciascun nodo è richiesto il prelievo (o l'immissione) di una parte di segnale.

Ciò può essere effettuato interrompendo la fibra ed effettuando dapprima una conversione opto-elettrica, poi una elaborazione del segnale elettrico, successivamente una conversione elettro-ottica (FIG. 67a). In tal caso il nodo è detto *attivo*, implicando l'uso di componenti attivi.

L'uso di nodi attivi può essere vantaggioso per il fatto che, in corrispondenza di ciascun nodo, il segnale viene *rigenerato*, tuttavia, in taluni casi può essere superfluo e, addirittura considerato poco affidabile a causa della maggiore probabilità di guasto dei componenti attivi rispetto a quelli passivi. In tali casi è possibile l'impiego dei cosiddetti *accoppiatori passivi* i quali rappresentano l'equivalente a fibra ottica dei connettori a "T" di tipo elettrico (FIG.67b).

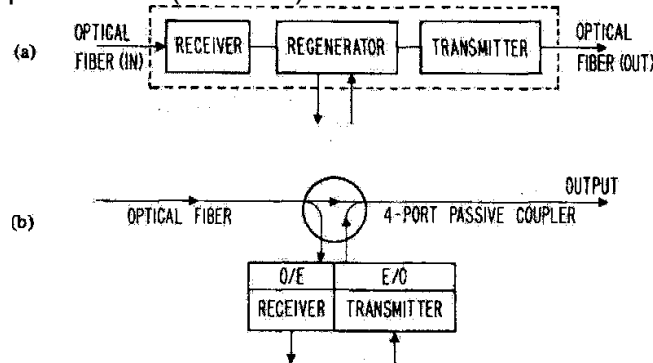


FIG. 67

Gli accoppiatori più comuni presentano un ingresso e due uscite (a 3 porte) oppure due ingressi e due uscite (a 4 porte). Tuttavia esistono in commercio anche accoppiatori con più ingressi o con più uscite (accoppiatori di tipo star). Esistono, inoltre, accoppiatori per fibre multimodo, monomodo, e per fibre di plastica.

Un accoppiatore a fibra ottica con 4 porte è rappresentato schematicamente in FIG.68. Nella stessa figura sono definiti anche i parametri caratteristici di un tale dispositivo.

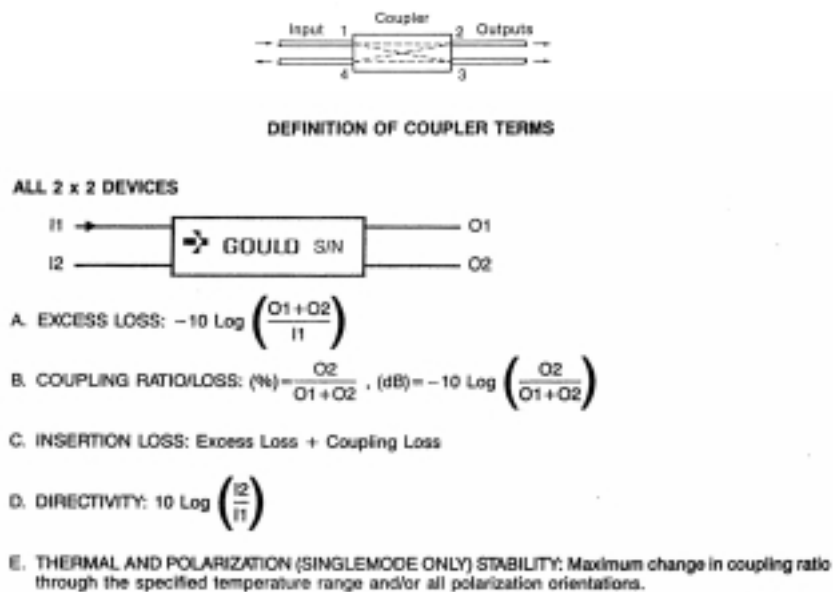


FIG. 68

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche di un tipico accoppiatore a 4 porte:

Test results

Product code	1300-C1H-50/50-02X02
Serial number.....	123880
Device typ	Multimode 2X2
Grade	Series H
Fiber Type.....	Corning MM, 50 micron core
Test date.....	09-05-1989
First test wavelength	820 nm
Excess loss	011 dB at 860 nm
Coupling ratio	51 % at 820 nm
Thermal stability	1.0 % max change

Per la realizzazione degli accoppiatori a fibra ottica viene, di solito, utilizzata una tecnica di fusione (FIG.69): due, o più, fibre vengono attorcigliate insieme per un breve tratto, riscaldate fino al rammollimento del materiale vetroso, e soggette ad una lieve trazione. Per effetto di ciò le fibre si saldano parzialmente fra di loro permettendo lo scambio reciproco di energia luminosa.

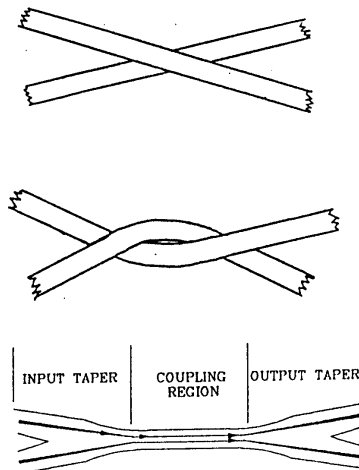


FIG. 69

Una seconda tecnica (FIG. 70) prevede una parziale lappatura del mantello di due fibre che, successivamente, vengono poste in contatto fra loro.

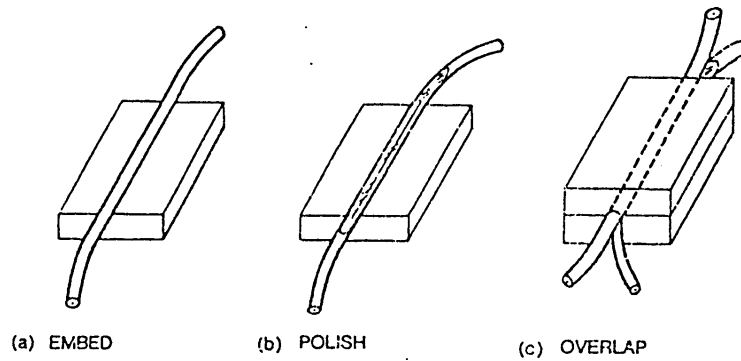


FIG. 70

10.2 Multi-demultiplicatori in lunghezza d'onda (WDM)

E' noto come, al fine di aumentare la capacità di trasporto dell'informazione di un collegamento, siano utilizzabili tecniche di moltiplicazione (es. TDM, FDM).

Nelle comunicazioni su fibra ottica, oltre a queste, può essere usata la tecnica della moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (WDM). In accordo con questa tecnica, possono essere contemporaneamente inviate nella fibra più portanti ottiche di differente lunghezza d'onda (differenti "colori"). Ciascuna portante, a sua volta, può essere moltiplicata con altre tecniche.

In alcuni sistemi, una lunghezza d'onda può essere usata per trasmettere in una direzione, un'altra lunghezza d'onda per trasmettere contemporaneamente nell'altra direzione (Full Duplex) utilizzando la stessa fibra (FIG. 71).

Per effettuare la moltiplicazione o la demoltiplicazione in lunghezza d'onda, vengono utilizzati particolari accoppiatori a fibra ottica chiamati Multi o demultiplatori in lunghezza d'onda (WDM), di cui esistono in commercio vari tipi.

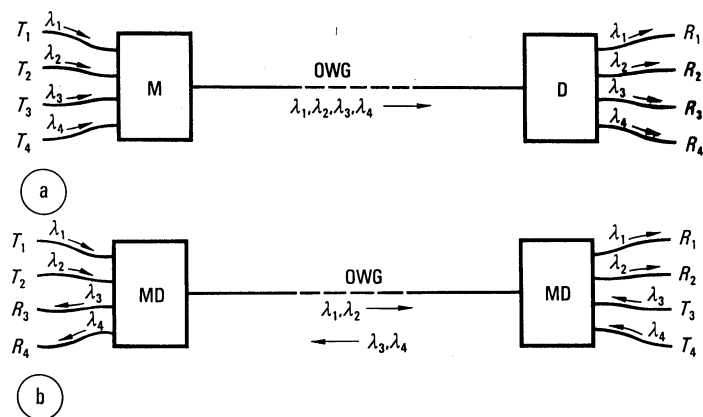


FIG. 71

Per realizzare tali dispositivi si sfrutta la dipendenza dalla lunghezza d'onda dell'angolo di riflessione o di trasmissione di mezzi dispersivi quali reticoli o prismi. Altri dispositivi fanno uso di filtri interferenziali (v. es. fig. 72)

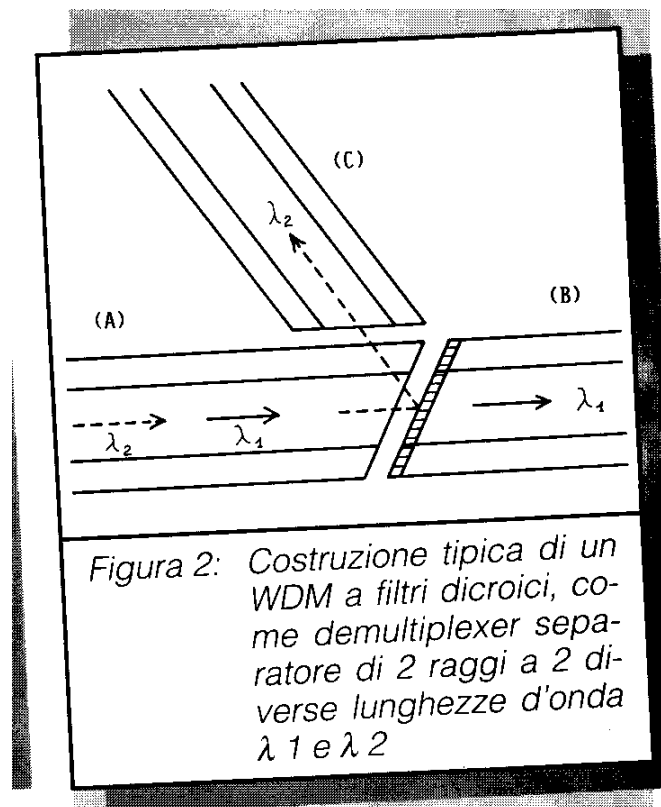


FIG. 72

11.3 GRIN-lens: Lenti con profilo dell'indice di rifrazione graduato

In alcune applicazioni può essere necessario collimare o focalizzare il fascio luminoso emergente da una fibra ottica. Vengono utilizzate a questo scopo, le cosiddette lenti con indice di rifrazione "graded" (GRIN-lens). Si tratta di piccoli cilindri di vetro (tipicamente: diametro 1-2 mm, lunghezza 3-10 mm) che si applicano all'estremità di una fibra ottica.

In una lente di tipo convenzionale, fissato l'indice di rifrazione, le proprietà ottico-geometriche sono determinate dalla curvatura delle superfici della lente stessa (i raggi luminosi, per effetto della rifrazione, subiscono deviazioni nei punti d'intersezione con le facce della lente, mentre procedono in linea retta all'interno di essa).

In particolari tipi di lenti, al contrario, l'indice di rifrazione non è costante, ma varia all'interno della lente. In questo caso, il cammino dei raggi luminosi (il comportamento ottico-geometrico della lente) è determinato dalle variazioni dell'indice di rifrazione all'interno di essa.

Una lente del tipo GRIN-lens è costituita da un piccolo cilindro di vetro il cui indice di rifrazione presenta un massimo sull'asse e decresce radialmente con una legge quadratica del tipo (FIG. 73):

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{A}{2} r^2 \right)$$

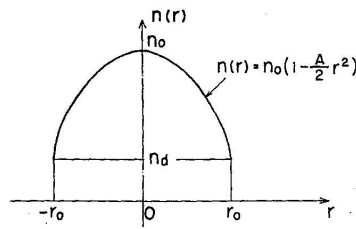


FIG. 73

Mediante un procedimento di calcolo che permette di tracciare il percorso dei raggi (ray-tracing) è possibile dimostrare che tali raggi si propagano all'interno della lente con andamento oscillante avente periodo (*pitch*) pari a:

$$P = \frac{2\pi}{\sqrt{A}}$$

in particolare, i raggi meridiani (che passano per l'asse del cilindro) seguono traiettorie sinusoidali (FIG. 74).

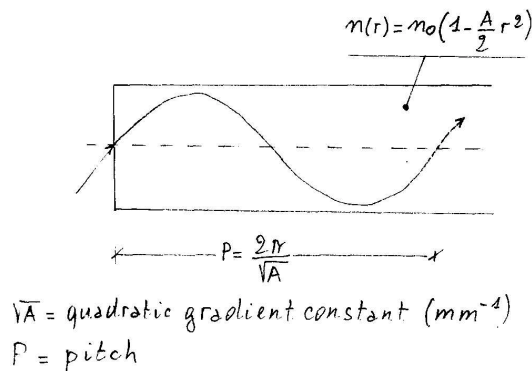


FIG. 74

Detto ciò, indicando con z la lunghezza della lente cilindrica lungo l'asse, consideriamo due casi che sono di particolare interesse:

1) *lente "quarter pitch"*

supponiamo che z sia tale che si abbia:

$$\sqrt{A}z = \frac{\pi}{2}$$

ovvero, la lente sia lunga un quarto di periodo:

$$z = \frac{P}{4}$$

in tal caso (FIG. 75) se sulla faccia di ingresso della lente incide un fascio di raggi paralleli, questi vengono foccheggiati sulla faccia di uscita, e viceversa.

Di conseguenza, la lente "quarter pitch" viene di solito utilizzata per collimare un fascio proveniente da una sorgente puntiforme.

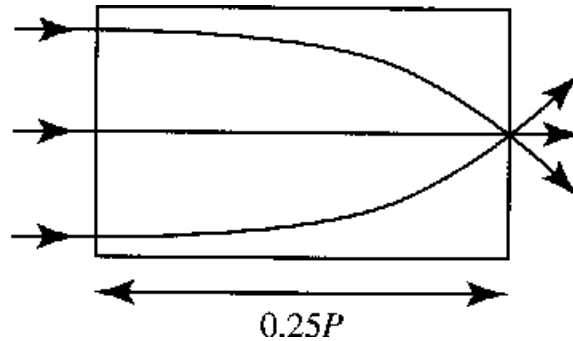


FIG. 75

2) lente "half pitch"

supponiamo che z sia tale che si abbia:

$$\sqrt{Az} = \pi$$

ovvero, la lente sia lunga mezzo periodo:

$$z = \frac{P}{2}$$

in questo caso, un raggio che incide sulla faccia di ingresso parallelamente all'asse, fuoriesce dalla faccia di uscita sempre parallelamente all'asse, ma traslato (infatti una lente *half pitch* può essere vista come due lenti *quarter pitch* in cascata).

I principali vantaggi presentati dalle microlenti GRIN rispetto alle lenti tradizionali sono essenzialmente: peso e dimensioni ridotte, possibilità di cortissime distanze focali, possibilità di essere usate in schiere in modo da sostituire complessi sistemi ottici quali, ad esempio, quelli inseriti nelle macchine fotocopiatrici.

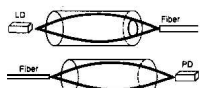
Sono mostrate sotto alcune caratteristiche delle lenti GRIN. Esse possono essere utilizzate per accoppiare sorgenti e rivelatori alle fibre ottiche, per connettere fibre ottiche fra di loro. Tali lenti, disponibili in commercio, sono prodotte dalla ditta Nippon Sheet Glass Co. Ltd. col nome di SELFOC (Self-focusing).

SELFOC®

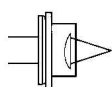
GRADIENT INDEX

micro lenses for...

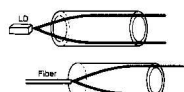
- Laser to Fiber Coupling
- Fiber to Detector Coupling



- **Focusing**



- **Collimating**



- Various other applications

Call or Write today



EUROPE N.V./S.A.

Krijgsbaan 247
B-9140 Temse Belgium
Tel. 00-32-3-711 1009
Fax. 00-32-3-711 1534

Insert 126 on OLE reply card

Model Number	Dia. (mm)	Length (mm)	NA	Acceptance Angle, 2 θ Degrees	Refractive Index No.	Quadratic Gradient Constant \sqrt{A} (mm ⁻¹)
SLS-1.0-0.25P SLS-1.0-0.50P SLS-1.0-0.75P	1.0	3.3 6.5 9.8	.37	43	1.552	0.481
SLS-1.5-0.25P SLS-1.5-0.50P SLS-1.5-0.75P	1.5	4.9 9.8 14.6				0.322
SLS-2.0-0.25P SLS-2.0-0.50P SLS-2.0-0.75P	2.0	6.5 13.0 19.5				0.242
SLW-1.0-0.25P SLW-1.0-0.50P SLW-1.0-0.75P	1.0	2.7 5.3 8.0	.46	55	1.602	0.590
SLW-1.5-0.25P SLW-1.5-0.50P SLW-1.5-0.75P	1.5	4.0 8.0 12.0				0.393
SLW-1.8-0.25P SLW-1.8-0.50P SLW-1.8-0.75P	1.8	4.8 9.6 14.4				0.328
SLW-2.0-0.25P SLW-2.0-0.50P SLW-2.0-0.75P	2.0	5.3 10.7 16.0				0.295

NOTE: The value for \sqrt{A} in the above table is only applicable for a wavelength of 0.83 μm . For the value of \sqrt{A} at other wavelengths refer to Table 3.