

# FIBRE OTTICHE PLASTICHE

STUDENTE: DOUNGUE TSUNEKO FRANCIS

2009/2010

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Fibre ottiche</b>	<b>5</b>
2.1	Cenni storici . . . . .	5
2.2	Principi di funzionamento . . . . .	6
2.3	Guida d'onda . . . . .	7
2.4	Struttura ,parametri e propagazione nelle fibre ottiche di vetro . . . . .	8
2.4.1	Struttura . . . . .	8
2.4.2	Parametri . . . . .	8
2.4.3	Propagazione nelle fibre di vetro . . . . .	10
2.5	Attenuazione e dispersione nelle fibre di vetro . . . . .	12
2.5.1	Attenuazione nelle fibre di vetro . . . . .	13
2.5.2	Dispersione nelle fibre di vetro . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Fibre ottiche plastiche (POF)</b>	<b>21</b>
3.1	Evoluzione operato sulle fibre plastiche . . . . .	22
3.1.1	POF E Polimetilmetacrilato (PMMA) . . . . .	22
3.1.2	GI-POF E Perfluoro-butenylvinylether (PFBVE) . . . . .	23
3.2	Fabbricazione della fibra GI-POF . . . . .	24
3.3	Caratteristiche delle POF . . . . .	26
3.3.1	Attenuazione nelle POF . . . . .	26
3.3.2	Dispersione nelle POF . . . . .	29
3.3.3	Accoppiamento modale e conversione modale . . . . .	30
3.3.4	Resistenza meccanica delle POF . . . . .	31
3.3.5	Resistenza termica delle POF . . . . .	32
3.3.6	La fibra Lucina . . . . .	32
3.4	Giunzioni e connettori . . . . .	35
3.4.1	Giunzioni nelle fibre ottiche . . . . .	35
3.4.2	Connettori . . . . .	37
3.4.3	Installazione della POF . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Diverse applicazioni delle POF e progetti</b>	<b>41</b>
4.1	Applicazioni nell'automobile . . . . .	41
4.2	Applicazioni nelle telecomunicazioni . . . . .	42

<i>INDICE</i>	2
4.3 Applicazioni nei sensori . . . . .	44
4.4 Altre applicazioni . . . . .	45
4.5 Progetti . . . . .	46
4.5.1 POF-ALL EU project . . . . .	46
4.5.2 POF-PLUS project . . . . .	46
<b>5 Conclusioni</b>	<b>48</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Nell'ultimo secolo si è verificata un'importante espansione della scienza dell'ottica migliorando così la qualità della vita e contribuendo ad una maggiore connettività. Il settore della fibra ottica, la quale era sottovalutata oppure meno adeguata rispetto alle tecnologie sviluppate dai ricercatori prima dagli anni ottanta dello scorso secolo, grazie ad una richiesta enorme e via via crescente della banda di trasmissione nel settore delle telecomunicazioni, dovuta in gran parte allo sviluppo di internet ed a una fornitura facilitata al suo accesso nelle abitazioni, la fibra ottica si è aggiudicata un ruolo fondamentale, ed ha spinto la ricerca ad un processo continuo di miglioramento delle sue caratteristiche. Oggi si pensa ad una sostituzione completa dei rami e dei cavi coaxiali nei collegamenti di tipo internet, ethernet ed altri. Per i collegamenti terrestri a lunga distanza (inter-regionali ed intercontinentali) si usano già al giorno d'oggi dorsali di comunicazioni a fibre ottiche.

La tecnologia con fibra ottica fa uso di luce per il trasporto di segnali digitali tramite cavi ottici. I cavi in fibra ottica sono fatti di fili di vetro molto sottili ed estremamente puro, realizzato solitamente in silicio (diossido di silicio,  $\text{SiO}_2$ ) e in grado di agire come guida d'onda per il segnale ottico. Questa tecnologia si basa sul concetto di riflessione della luce. Con perdite estremamente limitate, vengono comunemente impiegate nelle telecomunicazioni su grandi distanze e nella fornitura di accessi di rete a larga banda (dai 10 Mbit/s al Tbit/s). La riflessione interna totale è il principio alla base del successo di questa tecnologia.

Il principale svantaggio delle fibre ottiche realizzate in silicio è la loro fragilità. A causa del diametro estremamente ridotto, il costo e la difficoltà d'installazione sono elevate, le sue caratteristiche meccaniche non favoriscono il suo utilizzo nelle abitazioni e nelle uffici limitandola a collegamenti esterni tipo "step-door".

Per i motivi citati sopra si è sviluppata una nuova tecnologia ottica basata sulle fibre a nucleo plastico con diametro ben più largo di quello della fibra di vetro, facilitando così l'installazione di tali sistemi e riducendo il costo del materiale. Queste caratteristiche le conferiscono un vantaggio evidente nelle applicazioni "home-networks". Visto che in questi ultimi anni l'utilizzo della fibra nelle applicazioni "home-networks" è notevolmente cresciuto e rappresenta

un mercato più ampio e più diversificato, è chiaro che la soluzione più promettente economicamente per le comunicazioni è quella ad alta velocità e a breve distanza.

Nel capitolo 2 si trova un'introduzione sui sistemi in fibra ottica di vetro, spiegandone il funzionamento e introducendo i parametri necessari per valutarne le caratteristiche, infine di avere un'idea su cosa è una fibra ottica; nel capitolo 3 ci si focalizzerà sui sistemi in fibra ottica plastica, analizzandone le caratteristiche in confronto alle fibre di vetro e presentandone le applicazioni attuali e i progetti di ricerca futuri.

## Capitolo 2

# Fibre ottiche

In questo capitolo verranno descritte la storia e l'evoluzione delle fibre ottiche dalle origini fino ai giorni nostri, passando in rassegna modalità di funzionamento, tipologie, caratteristiche applicate a fibre di vetro.

### 2.1 Cenni storici

L'utilizzazione della luce come mezzo di comunicazione a distanza è un'idea che risale a circa 200 anni fa, ma che ha trovato difficoltà di sviluppo a causa del fatto che trasmettitore e ricevitore devono trovarsi in posizione ben visibile tra loro e da ciò conseguono inevitabili limitazioni. Per molto tempo i ricercatori hanno tentato di ovviare all'inconveniente cercando di trasmettere la luce anche lungo percorsi curvilinei. Partendo dal principio della riflessione totale interna, osservata da uno scienziato svizzero, Daniel Colladon, all'inizio del 1800, la fattibilità pratica, per riflessioni successive, della trasmissione in percorsi che non seguano necessariamente una traiettoria rettilinea, venne provata da un membro della Royal Society, John Tyndall, nel 1870. Utilizzando un recipiente colmo d'acqua ed illuminando l'estremità in alto, egli si accorse che la luce si propagava lungo di esso sino ad uscire da un apposito orifizio praticato su una parete e l'acqua, zampillando, illuminava il recipiente sottostante. L'applicazione di questo fenomeno su delle piccole fibre e la possibilità di usare la fibra ottica in vetro come guida d'onda per un segnale ottico vennero suggerite in alcuni articoli scientifici nei primi del 1900, ma solo negli anni venti si riuscì a dimostrare tali teorie. Infatti nel 1927 l'inglese J.L.Baird brevettò un dispositivo composto da una serie di bacchette di vetro capace di trasmettere delle immagini a breve distanza. Purtroppo i materiali e le tecnologie, allo stato delle conoscenze dell'epoca, non permettevano ancora di raggiungere risultati pratici apprezzabili nella trasmissione a lunghe distanze della luce, come poteva già avvenire per le comunicazioni via radio o via cavo. Determinanti nello studio delle fibre ottiche furono senza dubbio le nuove tecniche di purificazione e di filatura del vetro che permisero, nel 1953 a Kapany, un ricercatore inglese di origine indiana, di

mettere a punto fibre di vetro con guaina (cladding) ed introdurre, per la prima volta nella storia, il termine oggi usuale di fibra ottica. La rivoluzionaria idea di utilizzare la fibra nelle comunicazioni è avvenuta per merito dei ricercatori inglesi della Standard Telecommunication Laboratories, i quali, nel 1967, riuscirono ad identificare la causa principale delle elevate attenuazioni, che consistevano nella mancanza di purezza del materiale utilizzato, e che allora ne limitavano l'utilizzo. All'inizio degli anni Settanta fu la Corning Glass, una ditta americana, la prima a realizzare dei vetri ad altissima trasparenza con attenuazioni abbastanza basse da permettere spezzoni di fibra di alcuni chilometri.

## 2.2 Principi di funzionamento

La caratteristica principale della fibra ottica consiste nel confinare la luce al proprio interno e di guidarne la propagazione tramite un principio che è detto della riflessione totale. In un mezzo isotropo, la luce si propaga in linea retta. In questa sede, si vuole focalizzare ciò che accade quando la luce attraversa la superficie di separazione fra due materiali diversi. E' infatti noto che un raggio di luce, dopo un percorso di  $n$  metri, incontrando una superficie che separa due mezzi trasparenti, in parte proseguirà il percorso propagandosi nel nuovo mezzo, ed in parte si rifletterà (figura 2.1). L'entità della deviazione angolare subita dal raggio rifratto dipende dal cosiddetto indice di rifrazione;

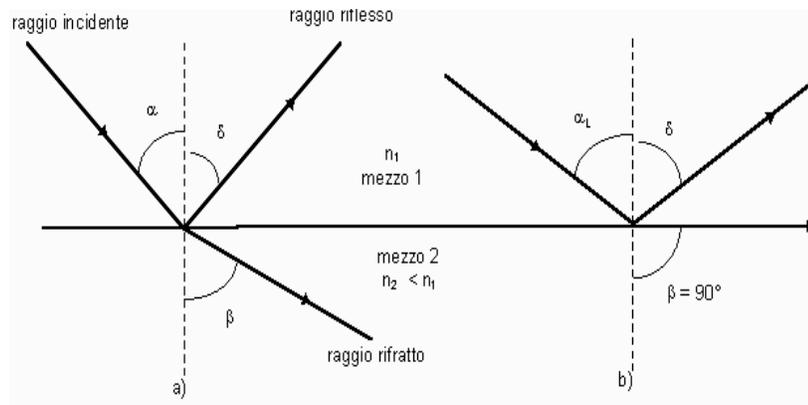


Figura 2.1: fenomeni di rifrazione e riflessioni di un raggio di luce che incontra la superficie di separazione fra due mezzi

analizzando la figura, considerata la normale al piano di separazione, l'angolo di incidenza viene definito con  $\alpha$ , l'angolo di riflessione con  $\delta$ , mentre quello di rifrazione con  $\beta$ . Sappiamo dalle leggi dell'ottica geometrica che l'angolo di incidenza  $\alpha$  è uguale a quello di riflessione  $\delta$ , mentre il raggio rifratto si propaga nel mezzo 2 con un angolo  $\beta$  che è legato ad  $\alpha$  da una relazione che viene comunemente definita Legge di Snell:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (2.1)$$

dove con  $n_1$  ed  $n_2$  si indicano gli indici di rifrazione dei due diversi mezzi; il raggio incidente, quello riflesso e quello rifratto sono contenuti nello stesso piano. Dalla formula sopra indicata emerge che se  $n_1 > n_2$  risulterà che  $\beta > \alpha$ , cioè attraversando l'interfaccia da un mezzo più denso ad uno meno denso il raggio tende ad allontanarsi dalla normale adagiandosi sulla superficie di separazione. In questo caso, all'aumentare dell'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta; quando poi l'angolo incidente supera un certo valore soglia, che verrà chiamato angolo limite, il raggio non può più uscire dal mezzo in cui è stato convogliato. In tali condizioni si manifesta il fenomeno della riflessione totale, che si presenta ogniqualevolta il raggio rifratto scompare del tutto e quello incidente viene rinviato all'interno del mezzo con un angolo uguale ed opposto a quello di incidenza. L'angolo limite, definito con  $\alpha_L$ , non è niente altro che l'angolo di incidenza che rende  $\beta=90^\circ$ ; se l'angolo di incidenza supera questo valore, scompare del tutto il fenomeno della rifrazione e si ha riflessione totale. L'angolo limite può essere ricavato facendo ricorso alla Legge di Snell, ponendo  $\sin\beta = 1$ :

$$\alpha_L = \arcsin (n_2/n_1) \quad (2.2)$$

### 2.3 Guida d'onda

Una guida ottica è un mezzo trasmissivo il cui effetto principale risulta essere quello di guidare la propagazione di un'onda elettromagnetica nella regione compresa tra le superfici che lo delimitano. Un'onda si definisce guidata quando la sua propagazione avviene prevalentemente lungo la stessa direzione del sistema che la guida e segue i cambiamenti di direzione che avvengono lungo le superfici di esso. Il più semplice di tutti i sistemi guida è quello formato da due conduttori piani, paralleli, infiniti, separati da un mezzo dielettrico. Un sistema guida può avere una struttura rettangolare cava, circolare, può essere rappresentato da superfici circolari parallele o da un cono, mentre un'onda può avere componenti elettriche o magnetiche od entrambe. Inoltre, le superfici del sistema guida possono essere dei conduttori elettrici ideali oppure disperdere energia. Da tutti questi elementi dipendono alcune proprietà delle onde, quali: la velocità di propagazione, la lunghezza d'onda direttamente influenzata dalle dimensioni della guida, la loro efficienza nel trasportare energia, la capacità di propagarsi in un sistema piuttosto che in un altro. Un particolare tipo di guide d'onda sono le fibre ottiche.

## 2.4 Struttura ,parametri e propagazione nelle fibre ottiche di vetro

Verrà brevemente descritto la struttura di una fibra ottica di vetro nel paragrafo 2.4.1 ; introdotti qualche parametri necessari per descrivere le prestazioni di una fibra ottica (paragrafo 2.4.2) ed infine nel paragrafo 2.4.3 , spiegato la propagazione delle onde nei vari tipi di fibre ottiche di vetro che verranno evidenziate.

### 2.4.1 Struttura

La fibra ottica è costituita da un sottile filo di vetro a base di silice, con un nucleo denominato “core” con un diametro che va da 10 a poche decine di  $\mu\text{m}$ , ricoperto da un rivestimento concentrico, anch’esso di vetro, trasparente alla luce ed alla radiazione infrarossa, denominato mantello “cladding”, con un diametro di circa 125  $\mu\text{m}$ . Il mantello ha un indice di rifrazione  $n_2$  di poco inferiore a quello del core  $n_1$  (dal 2 al 9 per mille in meno). Il core e il cladding, a loro volta, sono ricoperti da un rivestimento primario di materiale plastico (guaina “jacket”) per la protezione della fibra dalle abrasioni meccaniche (il suo diametro di 250  $\mu\text{m}$ ).

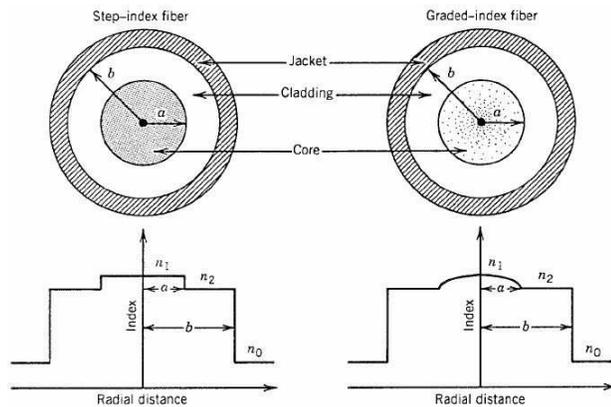


Figura 2.2: Sezione trasversale e indice di rifrazione per fibre step-index e graded-index

### 2.4.2 Parametri

- Attenuazione (dB/Km): E' il valore della potenza ottica assorbita o diffusa dalla fibra; bassi valori di attenuazione permettono, a parità di potenza iniettata e di sensibilità del ricevitore, tratte più lunghe e/o tassi di errore più bassi. (approfondimento nel paragrafo 2.5)
- Angolo di accettazione: Si definisce dunque angolo di accettazione l'angolo massimo entro cui deve essere immesso il raggio ottico all'interno della

fibra, in modo che sia garantita la propagazione per riflessioni interne senza rifrazione esterna verso il cladding.

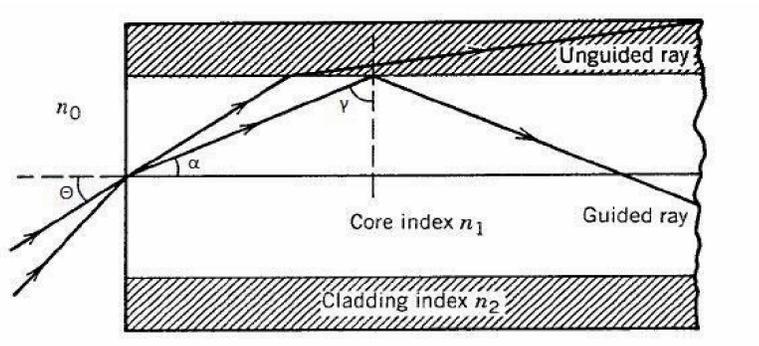


Figura 2.3: Illustrazione dell'angolo di accettazione

dove  $\theta$  è l'angolo di accettazione,  $n_0$  l'indice di rifrazione dell'aria,  $n_1$  quello del nucleo e  $n_2$  quello del mantello.

Quando il raggio incontra la discontinuità nucleo-mantello, viene rifratto nuovamente se l'angolo  $\gamma$  è maggiore di un angolo critico  $\gamma_{max}$  definito in base alla legge di Snell:

$$\sin \gamma_{max} = n_2/n_1 \quad (2.3)$$

In tal caso, il raggio viene totalmente riflesso all'interno del nucleo: questo è il meccanismo alla base del confinamento della luce nella fibra ottica. Utilizzando semplici relazioni dell'ottica geometrica si può cercare il massimo angolo che la luce può formare all'ingresso della fibra per rimanere confinata all'interno del nucleo:

$$n_0 \sin \theta_{max} = n_1 \cos \gamma_{max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.4)$$

- Apertura numerica

Indica l'angolo solido entro il quale la fibra può accettare la radiazione incidente ed è uguale al seno dell'angolo di accettazione. I valori di NA (number aperture) delle fibre variano da 0.2 ad 1.

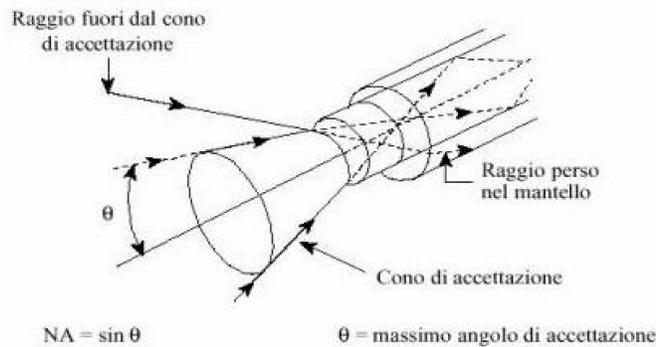


Figura 2.4: Angolo di accettazione

$$NA = \sin \theta_{max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, n_0 = 1 \quad (2.5)$$

NA significa number aperture.

- Larghezza di banda (MHz\*km)

Indica la massima frequenza di segnale che può essere immessa dalla fibra.

- Diametro del nucleo ( $\mu\text{m}$ )

E' il diametro della zona centrale della fibra dove si propaga il campo elettromagnetico.

### 2.4.3 Propagazione nelle fibre di vetro

Vi sono vari tipi di fibre ottiche ma la tendenza è quella di minimizzare il numero allo scopo di facilitare l'installazione e la manutenzione e di ridurre i costi di produzione. Esse si possono classificare in fibre ottiche:

- monomodali;
- multimodali.

Le prime presentano un profilo di indice di rifrazione a gradino; Il core presenta un diametro molto piccolo di circa  $10 \mu\text{m}$  e il cladding un diametro di  $125 \mu\text{m}$ . Le fibre monomodali sono ampiamente utilizzate nelle telecomunicazioni per l'elevato tempo di vita (20 anni), minima perdita di potenza ottica, assenza di dispersione modale poiché la trasmissione è monomodale, "single mode". Il diametro del core per ottenere una fibra monomodale vale:

$$d \simeq 0.76 \cdot \frac{\lambda}{NA}, \lambda = \text{lunghezza d'onda} \quad (2.6)$$

Le fibre multimodali non trovano grande applicazione a causa delle alte perdite di potenza e della dispersione modale. Il diametro del core è di 50

mm e quello del cladding è di 125 mm. Il profilo dell'indice di rifrazione può essere:

- a gradino, “step index”;
- graduale, “graded index”.

Nelle fibre a gradino l'indice di rifrazione è costante in tutto il core e decresce bruscamente nel cladding. In esse si manifesta notevolmente la dispersione modale per cui non trovano applicazione nelle telecomunicazioni.

Nelle fibre con profilo d'indice graduale, l'indice di rifrazione decresce gradualmente dal centro del core fino alla regione di separazione tra core e cladding. In queste fibre, i raggi non orizzontali, che si spostano dal centro del core verso la sua periferia, incontrano zone ad indice di rifrazione leggermente inferiori e subiscono successive variazioni della direzione tendenti a parallelizzare i raggi. Questi, giunti in prossimità del cladding, vengono riflessi dando luogo, complessivamente, a percorsi elicoidali. Il vantaggio delle fibre a profilo d'indice graduale è dovuto al fatto che i raggi che si avvicinano al cladding attraversano un mezzo che presenta un indice di rifrazione via-via decrescente e posseggono una velocità più alta rispetto ai raggi che compiono un percorso più breve come, ad esempio, quelli orizzontali all'asse della fibra. In questo modo tutti i raggi dell'impulso di luce giungono quasi contemporaneamente limitando, così, la dispersione modale.

Il numero di modi di propagazione  $M$  per una fibra multimodale si può valutare con la seguente formula approssimata valida se  $M \gg 1$ :

$$M \simeq \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot d_1 \cdot NA}{\lambda} \right]^2 \quad (2.7)$$

$d_1$  è il diametro del core.

Dato che l'indice di rifrazione  $n_1$  è maggiore di quello del mantello o cladding  $n_2$ , è possibile imporre l'angolo d'incidenza alla superficie di separazione tra core e cladding in modo che sia maggiore dell'angolo limite. In questo modo il raggio subisce una riflessione totale e si propaga nel core per riflessioni multiple.

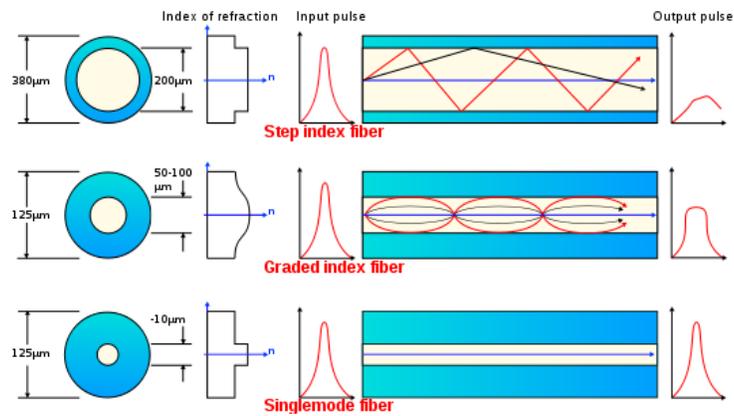


Figura 2.5: Propagazione della luce nelle fibre ottiche step - index , graded - index e single-mode

Trascurando le perdite, si può osservare che non vi è dispersione di energia radiante verso l'esterno, dato che si lavora in assenza di rifrazione; questo implica che la luce viene trasmessa con una ripartizione energetica del flusso luminoso in uscita molto simile a quella del flusso in entrata dalla lampada .

Se l'angolo di incidenza fosse inferiore a quello limite si avrebbe infatti rifrazione nel cladding, una parte del fascio luminoso si disperderebbe verso l'esterno e solo la restante parte rimanente si propagherebbe nel core ,come viene illustrato in figura 2.6. Proprio a causa di questo si lavora a riflessione totale.

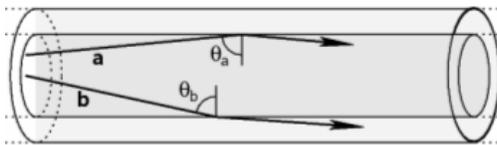


Figura 2.6: Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b) per due fasci luminosi in una fibra ottica step-index

## 2.5 Attenuazione e dispersione nelle fibre di vetro

Tratteremo in questo paragrafo di due parametri che limitano le prestazioni delle fibre ottiche nei sistemi di comunicazione. L'attenuazione e la dispersione rispettivamente nei sottoparagrafi 2.5.1 e 2.5.2

### 2.5.1 Attenuazione nelle fibre di vetro

In un sistema di trasmissione a fibre ottiche, vi sono diverse cause che possono provocare l'attenuazione del segnale ottico emesso dalla sorgente del trasmettitore, fino a quando esso non viene assorbito dal rilevatore in ricezione.

Una prima analisi del problema porta ad individuare le seguenti zone in cui si può verificare un'attenuazione:

1. nella fibra;
2. nelle connessioni fra due fibre;
3. nell'accoppiamento fra sorgente e fibra;
4. nell'accoppiamento tra fibra e rilevatore.

#### 1) Attenuazione nella fibra

Le principali cause che provocano attenuazione in una fibra sono: impurezze nel core (assorbimento); fenomeni di scattering; curvatura della fibra; imperfezioni sulla superficie di separazione core-cladding.

Le impurezze nel core della fibra possono essere costituite da ioni metallici che assorbono radiazioni, infatti ogni ione presenta un picco di assorbimento intorno ad una certa lunghezza d'onda. I più comuni ioni e le relative lunghezze d'onda sono:  $\text{Ni}^{++}$  con  $\lambda = 690$  nm;  $\text{Mn}^{+++}$  con  $\lambda = 550$  nm;  $\text{Cr}^{+++}$  con  $\lambda = 650$  nm. Normalmente una fibra ottica con attenuazione di 1 dB/Km deve avere una purezza pari a 2,5 parti su 109 per gli ioni  $\text{Cu}^{+++}$ , di 1 parte su 109 per gli ioni  $\text{Fe}^{+++}$  e  $\text{Cr}^{+++}$ . Un altro ione particolarmente nocivo è l'ossidrile OH che presenta due picchi di assorbimento; uno a 970 nm e l'altro a 750 nm, valori che appartengono alla gamma di trasmissione di molte fibre.

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

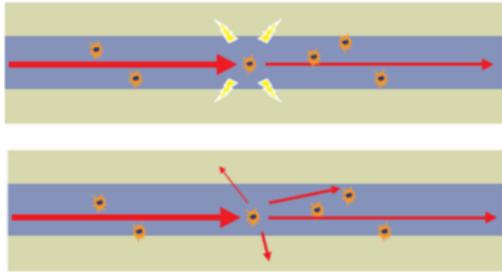


Figura 2.7: Assorbimento e scattering

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

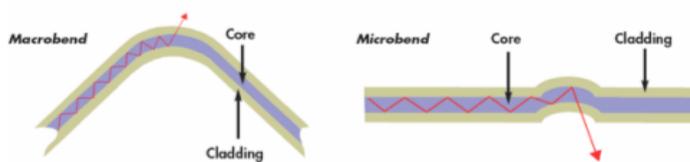


Figura 2.8: Esempi di figure di curvatura della fibra

Le imperfezioni sulla superficie di separazione core-cladding sono dovute a errori durante il processo di fabbricazione e anche alla disomogeneità dei polimeri utilizzati. Le imperfezioni provocano fenomeni di scattering e di rifrazione dei raggi.

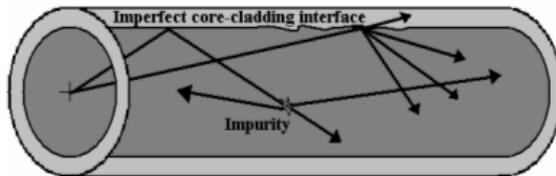


Figura 2.9: Imperfezioni sulla superficie di separazione core-cladding

## 2) Attenuazione sulle connessioni

L'attenuazione sulle connessioni tra fibre derivano da diversi fattori. L'interconnessione tra fibre ottiche è una fase molto importante e particolarmente delicata

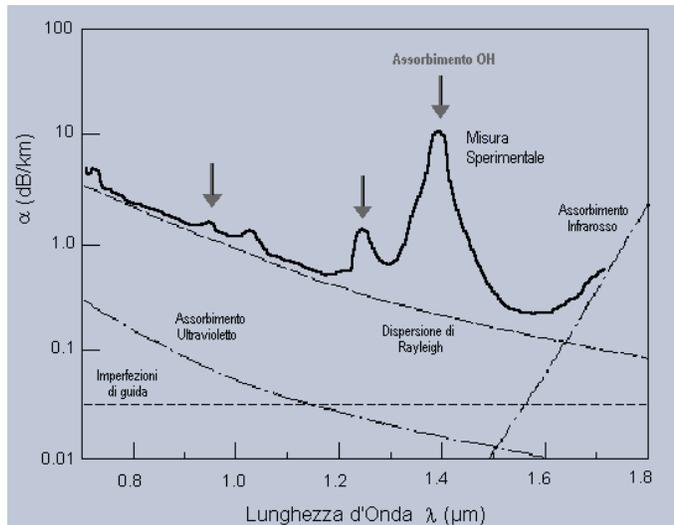


Figura 2.10: Attenuazione totale nelle fibre ottiche di vetro

per la realizzazione di un collegamento. Le cause delle perdite sono dovute soprattutto alle diverse caratteristiche trasmissive delle due fibre ottiche nel punto di connessione. Possiamo citare:

- la differenza fra gli indici di rifrazione;
- la differenza tra apertura numerica ;
- la differenza tra i diametri del core ;
- le perdite per errori di disassamento o disallineamento assiale;
- le perdite per errori di separazioni o accostamento;
- le perdite di disallineamento angolare.

La differenza fra gli indici di rifrazione determina delle perdite, perché il raggio luminoso passando da un mezzo, avente indice di rifrazione  $n_1$  ad un mezzo avente indice di rifrazione  $n_2$ , viene trasmesso soltanto in parte. Può essere risolto utilizzando un opportuno materiale di adattamento o fibre con le stesse caratteristiche

La differenza tra apertura numerica determina le perdite quando l'N.A. della fibra avente l'indice di rifrazione  $n_1$  (relativa al lato sorgente) è maggiore del N.A. della fibra avente indice di rifrazione  $n_2$  (relativa al lato destinazione).

Nella Differenza tra i diametri del core si possono distinguere due casi: uno quando l'area della sezione del core della fibra lato sorgente è maggiore di quella del lato destinazione e l'altro in caso contrario. Nel primo caso l'attenuazione è data dalla seguente figura che contiene alcuni casi di accoppiamento con diversi diametri del core.

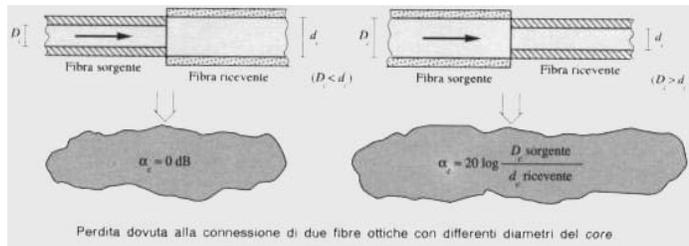


Figura 2.11: - Differenza tra i diametri del core

Le Perdite per errori di disassamento o disallineamento assiale sono dovute alla non perfetta coincidenza degli assi del core o dei cavi ottici delle due fibre che si devono connettere.

Le Perdite per errori di separazione o accostamento si hanno nel tentativo di connettere due fibre ottiche e a volte si verifica un imperfetto contatto tra di esse. In altre parole le due fibre sono affacciate, ma non sono a contatto.

Le perdite per errori di disallineamento angolare si verificano nel caso in cui gli assi delle due fibre da connettere formano un angolo  $\vartheta$ .

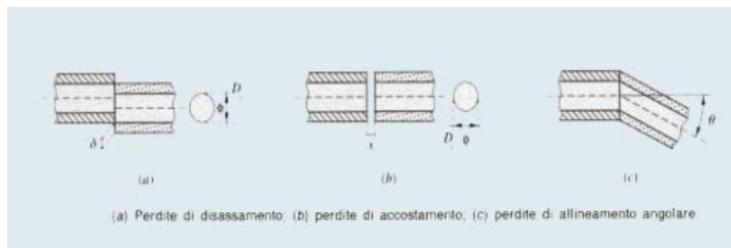


Figura 2.12: Illustrazione del disassamento, dell'accostamento e dell'allineamento angolare

### 3) Attenuazione all'ingresso della fibra

Il punto di connessione fra sorgente e fibra è, in genere, una zona con forti perdite e quindi con elevata attenuazione. Le perdite sono dovute al fatto che la sorgente emette luce in molte direzioni, mentre la radiazione che si propaga nella fibra è solo quella compresa nel cono di accettazione. Le cause di attenuazione all'ingresso della fibra sono principalmente tre:

- della luce emessa dalla sorgente solo una parte colpisce il core della fibra ;
- dei raggi che incidono sulla sezione del core solo quelli aventi inclinazione inferiore all'angolo di accettazione vengono trasmessi regolarmente, gli altri si disperdono;

- una parte della luce che colpisce il core viene riflessa e non entra nella fibra. L'attenuazione di accoppiamento fra sorgente e fibra dipende fortemente dal tipo di sorgente utilizzata (LED o laser).

I risultati migliori si ottengono con il laser in quanto la luce emessa è convogliata in un cono con angolo quasi nullo. Un'ulteriore causa di attenuazione è la lunghezza d'onda impiegata per la trasmissione. Inizialmente per la trasmissione in fibra si usava la luce visibile, anche perché era più semplice lavorare con raggi visibili piuttosto che con raggi invisibili, ma successivamente, nel tentativo continuo della tecnica di migliorare le prestazioni dei sistemi di telecomunicazioni, si effettuarono esperimenti con raggi ultravioletti ed infrarossi, e si osservò che l'attenuazione degli infrarossi era minore di quella della luce visibile all'interno delle fibre ottiche. Si passò così all'utilizzo degli infrarossi aumentando la lunghezza d'onda della luce usata e riducendo l'attenuazione del segnale, raggiungendo così distanze maggiori.

#### 4) Attenuazione all'uscita della fibra

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

### 2.5.2 Dispersione nelle fibre di vetro

La dispersione in una fibra consiste nel fatto che l'impulso in ricezione ha una durata superiore a quella dell'impulso trasmesso. Vi sono due tipi di dispersione:

- la dispersione modale;
- la dispersione cromatica.

#### a) la dispersione modale

Essa è presente perché la luce, nell'attraversare la fibra ottica, si propaga per riflessioni successive e pertanto dà luogo a vari modi di propagazione all'interno della fibra, ai quali però corrispondono differenti lunghezze di tragitti. Prendiamo tre tipi di dispersione, il primo si propaga lungo l'asse della fibra, il secondo ed il terzo si propagano guidati dal core mediante riflessioni successive. Analizzando il percorso dei vari raggi si scopre facilmente che il primo raggio ha il percorso più breve mentre gli altri raggi hanno percorsi sempre più lunghi e poiché la velocità è uguale per tutti, essi giungono all'estremità opposta in tempi sempre maggiori. Da ciò deriva che la durata dell'impulso luminoso in arrivo è maggiore ed è pari alla durata dell'impulso trasmesso, più il tempo di ritardo fra il raggio a percorso minore e quello a percorso più lungo. Quindi un impulso luminoso, immesso nella fibra, si scompone in vari raggi, ognuno dei quali segue un percorso diverso all'interno della fibra, giungendo a destinazione in tempi leggermente diversi, leggermente deformato, a breve distanza, e scomposto in vari impulsi più piccoli a grande distanza. La durata dell'impulso in ricezione

è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza della fibra, poiché, con l'aumentare di essa, aumenta la differenza dei percorsi e quindi il tempo di ritardo fra il primo raggio e l'ultimo. La presenza di diversi raggi che si muovono nella fibra seguendo percorsi diversi viene denominata comportamento multimodale della fibra.

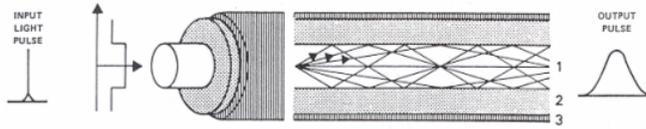


Figura 2.13: Propagazione multimodale nelle fibre step-index

facendo riferimento alla Figura 2.14, Il percorso più breve è quello con  $\alpha = 0^\circ$  ed ha lunghezza uguale alla lunghezza della fibra,  $L$ ; il percorso più lungo è quello con  $\alpha = \alpha_{max}$  ed ha lunghezza uguale a  $L/\sin \gamma_{max}$ . Prendendo come velocità di propagazione  $v = c/n_1$ , si ottiene che il ritardo temporale fra il raggio più veloce e quello più lento è pari a:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \tag{2.8}$$

$$\Delta T = \frac{n_1}{c} \cdot (L/\sin \gamma_{max} - L), \quad \sin \gamma_{max} = n_2/n_1 \tag{2.9}$$

$$\Delta T = L \cdot \frac{n_1^2}{c} (n_2 - n_1), \tag{2.10}$$

$n_1 = n_{core}$ ,  $n_2 = n_{cladding}$ .

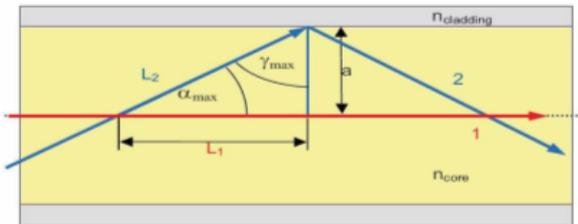


Figura 2.14: Meccanismo alla base della dispersione modale per fibre step-index

Per ottenere forti diminuzioni della dispersione modale si usano: fibre monomodali e fibre a profilo d'indice graduale (graded index).

- Dispersione modale con Fibre monomodali

Le fibre monomodali come detto in precedenza sono quelle fibre che hanno un diametro del core piccolo ed una apertura numerica molto piccola ( $NA = 0,1$ ).

Pertanto esse accettano, per la propagazione, solo il raggio che si propaga lungo l'asse. Quindi la propagazione al suo interno avviene in un solo modo e da qui la dicitura monomodo. Grazie alla presenza di un solo modo di propagazione, queste fibre sono prive di dispersione modale, per cui la durata dell'impulso ricevuto è quasi uguale alla durata dell'impulso trasmesso. L'unico difetto di questo tipo di fibre è che avendo una sezione molto minore, si ha il trasporto di una potenza luminosa altrettanto minore che limita un ulteriore aumento della portata. Questo inconveniente ha portato allo sviluppo delle fibre a profilo di indice graduale. È importante ricordare che attualmente il 90% (circa) della produzione di fibre ottiche interessa le fibre monomodali, preferite alle altre per le sue ottime prestazioni e per il basso costo di produzione .

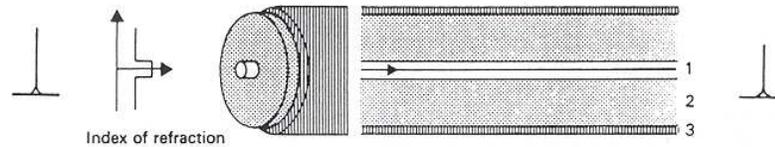


Figura 2.15: Dispersione modale nelle fibre monomodali

- Dispersione modale con fibre a profilo d'indice graduale

In questo tipo di fibre i diversi raggi che costituiscono i vari modi di propagazione hanno un percorso che, invece di essere a zig-zag come nelle step index, è approssimativamente sinusoidale. Nelle fibre a profilo d'indice graduale vi sono tre modi di propagazione: il Low Order Mode Ray, il Middle Order Mode Ray e l' High Order Mode Ray. Il Low Order Ray si muove lungo l'asse della fibra dove l'indice di rifrazione è massimo e, conseguentemente, la velocità è minima. Questo raggio compie il percorso più corto ma ha la velocità minore; gli altri raggi hanno percorsi più lunghi ma si muovono con velocità maggiori.

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

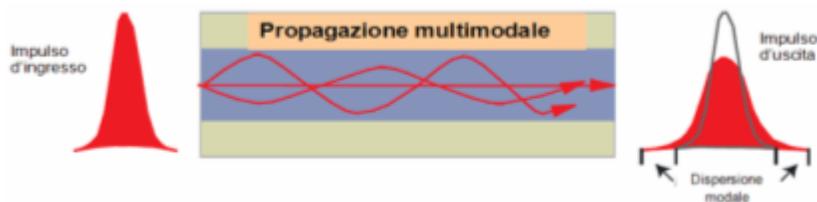


Figura 2.16: Dispersione modale con fibre a profilo d'indice graduale

La dispersione cromatica è costituita da due componenti: la dispersione cromatica del materiale e la dispersione cromatica da guida.

- la dispersione cromatica del materiale

La dispersione cromatica del materiale consiste nella dipendenza della velocità di un raggio di lunghezza d'onda  $\lambda$  dalla composizione della fibra. Se si immette nella fibra un impulso di luce bianca, le componenti cromatiche costituenti, percorrendo la fibra con velocità differenti, arrivano al ricevitore in tempi differenti generando, così, un impulso di uscita allargato e più basso rispetto a quello di entrata. Nella seguente tabella si mostra il valore dell'indice di rifrazione del vetro in funzione dei diversi colori. Si osserva che il raggio rosso, avendo più basso l'indice di rifrazione, è quello che possiede maggior velocità e pertanto giunge prima al ricevitore.

Colore	n
Violetto	1.065
Azzurro	1.594
Verde	1.581
Giallo	1.575
Arancio	1.571
Rosso	1.569

- La dispersione cromatica da guida

La dispersione cromatica da guida è dovuta alle ridotte dimensioni del core che consente il trasporto di una parte della potenza ottica anche nel cladding. La dispersione si ha poiché il cladding ha l'indice di rifrazione inferiore a quello del core. Questa dispersione dipende dal profilo di indice della fibra. Le dispersioni precedentemente descritte determinano una limitazione della banda passante dell'intero collegamento.

Le due componenti di dispersione cromatica variano, al variare della lunghezza d'onda, però la dispersione da materiale aumenta con l'aumentare della lunghezza d'onda, mentre la dispersione da guida diminuisce con l'aumentare della lunghezza d'onda, per cui in parte si compensano. Il problema della lunghezza d'onda e quindi della dispersione cromatica viene risolto, (sia pure parzialmente) con l'uso del LASER invece che del LED, come generatore luminoso, perché il diodo LASER ha uno spettro di frequenze molto più stretto di quello del LED, e determina, quindi, una dispersione cromatica inferiore e di conseguenza comporta una portata della fibra molto maggiore.

## Capitolo 3

# Fibre ottiche plastiche (POF)

Le fibre ottiche plastiche sono state introdotte come mezzi di trasmissioni ottici negli anni sessanta. Plastic or polymeric optical fibers (POF) hanno struttura quasi simile a quella delle fibre ottiche di vetro, sono composte dal nucleo (core) e dal mantello (cladding) e sono fabbricate a partire da polimeri organici, per il primo può essere una PMMA oppure una PFBVE (PMMA e PFBVE sono termini che verranno spiegati in seguito nei paragrafi successivi). La guaina utilizzata per la sua protezione è più sottile di quella di vetro. Nelle POF la luce si propaga all'interno del nucleo della fibra plastica grazie al mantello, che agisce come uno specchio, riflettendola e guidandola lungo il cammino descritto dalla fibra (vedi figura 3.1).

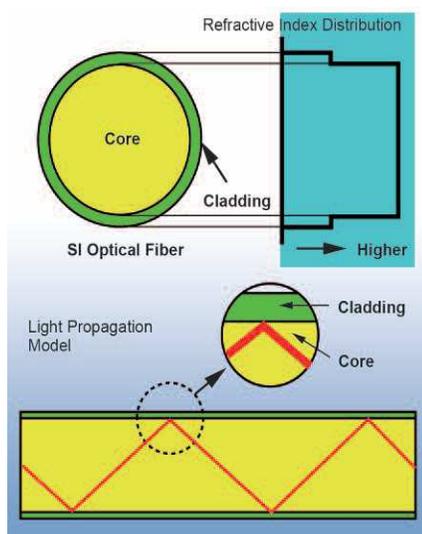


Figura 3.1: Struttura di una fibra ottica in plastica

La fibra plastica funziona sostanzialmente come una comune fibra ottica in vetro, pur differenziandosi per alcune caratteristiche. In particolare, il diametro del nucleo della fibra plastica è compreso tra 125 e 1880  $\mu\text{m}$ , quindi molto maggiore rispetto a quello di una fibra ottica di vetro convenzionale, che ha un diametro del nucleo compreso tra 8 e 10  $\mu\text{m}$ , per quanto riguarda le fibre monomodali, ed un diametro di 50 o 62,5  $\mu\text{m}$  se riferito a fibre multimodali. Il suo mantello ha un diametro compreso tra 1250 e 2000  $\mu\text{m}$ . Per capire i motivi di tale differenza, prescindendo per un momento dalle esigenze del processo produttivo, è necessario tenere presente che un requisito fondamentale della fibra ottica è la flessibilità, per poterne permettere la posa nel terreno e negli edifici. Il vetro è un materiale molto fragile ma, allo stesso tempo, rigido, e per poter assicurare la necessaria flessibilità alla fibra il suo diametro non può superare i 125  $\mu\text{m}$  circa. I polimeri, al contrario, sono più flessibili e meno fragili del vetro ed è quindi possibile realizzare fibre ottiche più grosse e con minori strati protettivi, senza perdere in flessibilità. L'attenuazione è anche elevata ed è di circa 50 a 1000dB/km per una lunghezza d'onda di 0,65  $\mu\text{m}$ .

La fibra plastica è trasparente e conduce a lunghezze d'onda di radiazione diverse da quelle della fibra ottica in vetro, mentre le fibre ottiche in vetro hanno un massimo di trasparenza nella regione vicino all'infrarosso (800-1600 nm), le fibre ottiche plastiche hanno un massimo di trasparenza, o detto in altri termini, un minimo di attenuazione, nella zona corrispondente alla luce visibile (luce verde e rossa). Nei paragrafi successivi faremo una descrizione più dettagliata delle POF.

Un'altra differenza sostanziale è che, generalmente, nelle fibre ottiche plastiche è più marcata la differenza fra gli indici di rifrazione di nucleo e mantello. L'elevata apertura numerica che ne consegue, unita allo spessore, fa delle POF delle fibre con una semplicità di accoppiamento alla sorgente ottica impensabile per qualunque fibra in vetro, per le quali sono generalmente necessari sofisticati strumenti per garantire un perfetto allineamento: spesso per la connessione fra POF e sorgente si utilizzano dei connettori in plastica a basso costo, simili ai connettori Ethernet.

## 3.1 Evoluzione operata sulle fibre plastiche

Oggi le fibre plastiche sono fabbricate con materiali plastici come polimeri che garantiscono una maggiore efficienza e un'attenuazione ragionevole per trasmissioni a breve e media portata; la PMMA e la PFBVE fanno parte di questi. Anche la sua struttura è stata modificata per il raggiungimento dello stesso scopo.

### 3.1.1 POF E Polimetilmetacrilato (PMMA)

Le prime POF fatte col nucleo in PMMA e mantello polimero fluorinato avevano perdite di circa 500dB/km. Di conseguenza, si è avviato un processo continuo di miglioramento delle PMMA e le perdite si sono ridotte dopo pochi anni a

110dB/km nello strato delle lunghezze d'onda visibili e vicino agli infrarossi. Anche se molti progressi sono stati fatti nella fabbricazione delle PMMA, le perdite nelle POF sono rimaste negli intervalli di 70dB/km a 100dB/km e 125dB/km a 150dB/km per lunghezze d'onda rispettivamente di 0.57  $\mu\text{m}$  e 0.65  $\mu\text{m}$ . Queste caratteristiche conferiscono a questo tipo di fibra una massima distanza di collegamento limitata a 50 m e in più il suo largo nucleo favorisce una dispersione modale elevata, che sfavorisce la trasmissione di più impulsi sulla sua larghezza di banda. Le dimensioni comuni per questo tipo di fibre sono di 960  $\mu\text{m}$  per il nucleo e 1000  $\mu\text{m}$  per il mantello, con una larghezza di banda di circa 4 Mhz al km per 0.65  $\mu\text{m}$  di lunghezza d'onda ed un'attenuazione di 150 dB/km.

### 3.1.2 GI-POF E Perfluoro-butenylvinylether (PFBVE)

I risultati ottenuti con le POF con nucleo alla PMMA citati sopra sono ancora ben lontani da quelle delle fibre di vetro, soprattutto al livello di attenuazione e di larghezza di banda. Benché le fibre PMMA multimodali a salto d'indice siano stati commercializzate molti anni fa, con una larghezza di banda di qualche megahertz, è solo di recente che è stato ottenuto il miglioramento della larghezza di banda dovuto ad una graduazione dell'indice di rifrazione del nucleo. L'utilizzo di fibre PMMA a profilo d'indice graduale (GI-PMMA) hanno garantito una larghezza di banda di circa 0.5Ghz al km per una lunghezza d'onda di 0.65  $\mu\text{m}$ . Ciononostante, l'attenuazione è rimasta sempre grande in questa lunghezza d'onda e le restrizioni sono sempre le stesse, in più la celerità della luce non è massima.

Nel 1996 Y. Koike ed i suoi colleghi della Keio University hanno superato i limiti di attenuazione della fibra (GI-PMMA), utilizzando sempre una fibra a profilo d'indice graduale però con nucleo fatto di un nuovo materiale, il perfluoro-butenylvinylether (PFBVE). Questa combinazione fatta di PFBVE e della graduazione progressiva dell'indice di rifrazione riduce sostanzialmente l'attenuazione ed è chiamata Graded-index-Perfluorinated optical fiber (GI-POF) oppure CYTOP o Lucina, i suoi nomi commerciali dati dalla società giapponese Asahi Glass Co., che è stata la prima a sviluppare queste nuove fibre. Questa società ha saputo trarre vantaggio dalla fluorizzazione per ottenere delle fibre al mantello in polimero ed al core in polimero perfluorinato, di cui la variazione dell'indice disegna una curva quasi parabolica. La fibra Lucina ha un mantello di 230  $\mu\text{m}$  di diametro, un nucleo di 120  $\mu\text{m}$  di diametro, una NA compreso tra 0.170 e 0.195, un'attenuazione di 20 dB /km ad una lunghezza d'onda di 0.85  $\mu\text{m}$  ed un larghezza di banda di 2.5 Ghz su 100 m. Anche se l' Asahi Glass Co. stava già collegando edifici in Giappone col suo GI-POF (la fibra Lucina) fin dal 2002, il cavo di fibra non era ancora sul mercato fino a che fu presentato commercialmente nel 2005 da Chromis Optical Fiberun, una sotto struttura di OFS e dei Laboratori Bell, che ha ottenuto la licenza per la produzione della fibra Lucina. Chromis ha sviluppato il processo di fabbricazione per estrusione per la versione commerciale della GI-POF, producendo fibre di qualità superiori ad un costo più basso rispetto a quelle fabbricate dalla Asahi Glass Co.

Oggi, tutti gli occhi sono puntati sulla Microstructured POF (M POF), un recente sviluppo in POF simile alle fibre di vetro "Holey or "Bandgap". M POF fu presentato da Van Eijkelenborg nel 2001. C'è stato da allora un interesse considerevole nell'identificare per quali applicazioni queste fibre hanno un vantaggio competitivo sulle altre tecnologie. Alcune delle caratteristiche che sono state esplorate in questo tipo di fibra sono: l'abilità di adattare il profilo di indice rifrangente cambiando la struttura del pipe della guida d'onda; l'abilità di essere estremamente birifrangente; e, più recentemente, di guidare la luce in materiale di indice basso nell'intervallo di banda delle guide di fotoni. La maggior parte delle attività svolte sulle M POF sino ad ora si sono concentrate su brevi distanze, applicazioni a banda larga, che rappresentano le principali applicazioni future del POF. I primi studi sono stati limitati alla misurazione della larghezza di banda su breve distanze. La larghezza di banda misurata è stata di 6 Ghz oltre 9 metri, corrispondenti a 2,4 Gbps oltre 100 m. Una fibra M POF prodotta più recentemente aveva prodotto una perdita di 0,5 dB/m rispetto a una lunghezza d'onda di 0.65  $\mu\text{m}$ .

## 3.2 Fabbricazione della fibra GI-POF

I processi per la produzione delle fibre ottiche plastiche si sono continuamente evoluti nel corso degli ultimi anni: sebbene i meccanismi fondamentali siano rimasti invariati, sono state via via apportate numerose migliorie che hanno portato ad un significativo miglioramento delle prestazioni complessive delle POF. Esistono essenzialmente due sistemi per la produzione di fibre plastiche: direttamente, per estrusione (extruding process), oppure a partire da un cilindro prelaborato (preform drawing process).

- Extruding process

Alla data attuale, gran parte del volume di fibre ottiche plastiche prodotte nel mondo è dato da fibre multi-mode e step-index, le quali possono essere realizzate, economicamente e su vasta scala, con il processo di estrusione diretta a partire dal polimero, del quale esistono due varianti.

Nel processo ad estrusione continua, schematizzato in Figura 3.2, i materiali di partenza (monomero, catalizzatori, controllori di processo) sono introdotti nel reattore, dove avviene la polimerizzazione del monomero ad una temperatura di 180°C. Una volta che il composto si è sufficientemente polimerizzato, tipicamente a una quota di 80% polimero e 20% monomero, viene introdotto in un estrusore a vite, dal quale la soluzione viene spinta attraverso un ugello dal quale esce la fibra. Il monomero rimanente evapora nell'estrusore e può essere recuperato ed utilizzato nuovamente per il processo di produzione. Successivamente, la fibra così creata attraversa una seconda camera, nella quale attraverso un altro ugello viene rivestita dal materiale che formerà il mantello, ottenuto con un processo di estrusione analogo. Un vantaggio di cui gode questo processo è che i materiali di partenza possono essere continuamente introdotti nei reattori senza interruzioni: questo è il motivo per cui è detto processo ad estrusione continua.

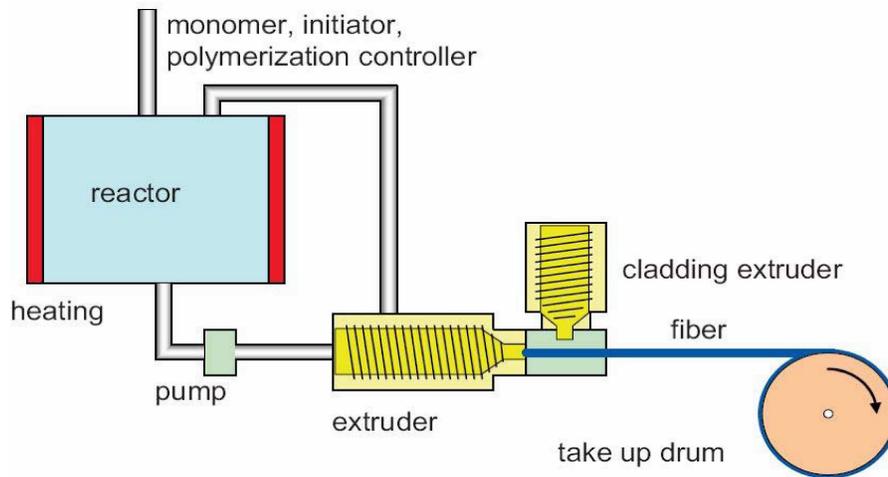


Figura 3.2: Processo di estrusione continua

L'altro processo di estrusione, detto a batch, è in realtà molto simile a quello di estrusione continua. La differenza fondamentale è che nel processo a batch non vengono introdotti continuamente i materiali di partenza, ma solamente nel volume necessario a formare una certa quantità di fibra. La ragione di questa scelta, che potrebbe sembrare controproducente, è che nel processo a estrusione continua il sistema è aperto dal lato dei materiali di partenza, e ciò può facilmente introdurre impurità che si traducono in maggiori perdite. Al contrario, un sistema chiuso come quello a batch permette un trattamento accurato dei materiali di partenza, che vengono trattati e successivamente sigillati durante il processo di polimerizzazione. Ovviamente, dal momento che un singolo batch non dura meno di 18 ore, la maggiore accuratezza si paga in termini di minore efficienza.

- Preform drawing process

Un'altra possibilità per la produzione delle POF è il processo "preform drawing", che è illustrato in Figura 3.3. Questo processo prevede che venga innanzitutto prodotto un cilindro che possiede già le caratteristiche di indice di rifrazione desiderate per nucleo e mantello, ma di diametro considerevolmente maggiore. Durante la seconda fase del processo, il cilindro viene "spremuta" fino a raggiungere il diametro desiderato per la fibra, mentre il profilo dell'indice di rifrazione viene mantenuto costante, con dimensioni ridotte in maniera proporzionale.

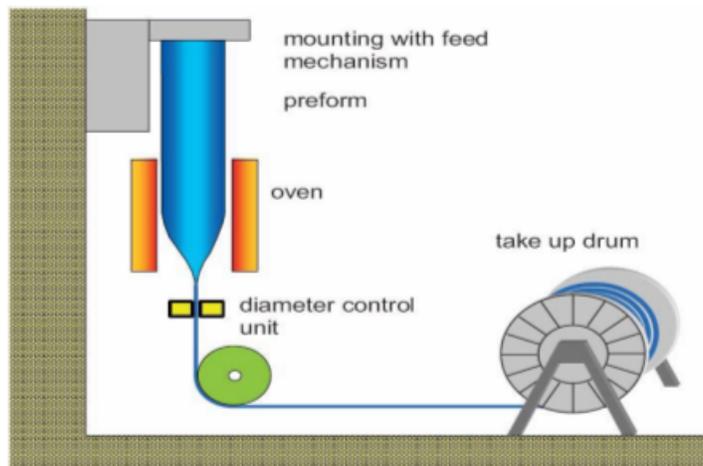


Figura 3.3: Preform drawing

Questo metodo è preferibile per realizzare fibre graded-index poiché le dimensioni maggiori del cilindro di partenza permettono di realizzare con maggior precisione il profilo desiderato, che poi sarà scalato alle dimensioni della fibra mantenendo le proporzioni iniziali. Questo metodo risulta essere vantaggioso in particolare nella produzione di fibre single-mode poiché, con lo stesso cilindro iniziale, si riesce a produrre un tratto di fibra tanto maggiore quanto minore è il suo diametro: per questo motivo, il preform drawing è il metodo principe per la produzione di fibre ottiche convenzionali in vetro (delle quali si possono produrre fino a 10 m/s), ma è poco utilizzato per la fibra ottica plastica (della quale si riesce a produrre fino a un massimo di 0,5 m/s).

### 3.3 Caratteristiche delle POF

Le principali caratteristiche delle POF sono senza dubbio l'attenuazione e la dispersione. Per questo gli studieremo particolarmente nei sotto paragrafi successivi. In più faremo un accenno su altre caratteristiche come accoppiamento modale, conversione modale, resistenza meccanica e resistenza termica.

#### 3.3.1 Attenuazione nelle POF

Come abbiamo spiegato nei paragrafi precedenti riguardo a l'attenuazione nelle fibre, gli attributi principali di qualsiasi mezzo di trasmissione sono la lunghezza su cui si può trasmettere e la velocità su quella lunghezza. Le perdite nelle POF possono essere causati da fenomeni intrinseci od estrinseci. L'assorbimento da parte del materiale costituente la fibra e la diffusione di Rayleigh sono esempi di attenuazione causati da fenomeni intrinseci, perché dipendono dal materiale utilizzato per la fabbricazione della fibra, e di conseguenza, non possono essere eliminati. Ciascuno di questi meccanismi di perdita è una funzione della

lunghezza d'onda. Tutti i meccanismi di perdite che non dipendono dai materiali costituente la fibra, sono dette estrinseci, sono dovuti, per esempio: al processo di fabbricazione, alla lavorazione meccanica in fase di installazioni e ben altro ancora.

- Attenuazione causati da fenomeni intrinseci

Nel paragrafo 2.5.1 abbiamo ampiamente spiegato la diffusione o scattering di Rayleigh, che sono fluttuazioni locali dell'indice di rifrazione che avvengono su distanze inferiori alla lunghezza d'onda della luce. La diffusione di Rayleigh si può quantificare attraverso un appropriato coefficiente di assorbimento,  $\alpha_R$ , che è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda elevata alla quarta; quindi l'effetto della diffusione di Rayleigh è più rilevante per lunghezze d'onda brevi.

Certi polimeri sono costituiti da legami molecolari del tipo "C=O, C-H" che sono soggetti a forti vibrazioni, generando così attenuazione del materiale. Tenendo presente che le frequenze di risonanza di tali legami sono proporzionali alla massa degli atomi coinvolti, si può ipotizzare un metodo per migliorare le prestazioni delle fibre ottiche plastiche, sostituendo gli atomi di idrogeno con elementi più pesanti. La Lucina con gli atomi di idrogeno del nucleo sostituiti da fluorinati risente meno questo effetto di vibrazione, I legami diventano del tipo sono C - F, C - C e C - O.

- Attenuazione causati da fenomeni estrinseci

Il processo di fabbricazione, come indicato nei paragrafi precedenti è meticoloso e potrebbe fare pensare che non ci sono impurità nella fibra ottenuta. In realtà non è così, e di conseguenza, le impurità presenti nella fibra sono cause di assorbimento. si tratta in genere di atomi di metalli, assorbiti durante il processo di fabbricazione; ma si può trattare anche di molecole d'acqua, che mostrano un assorbimento per vibrazione molto consistente nella regione infrarossa. le fibre Lucina, che non assorbono facilmente l'acqua, traggono un ulteriore vantaggio da questa condizione.

La lavorazione meccanica in fase di installazioni sul campo della fibra può causare danni oppure una curvatura eccessiva della fibra. Come nel caso delle fibre in vetro, una POF soggetta a una curvatura eccessiva, può subire una parziale rifrazione delle onde di luce in essa emessa invece della totale riflessione nelle zone di curvatura. In Figura 3.4 si trova un grafico che mostra le perdite in funzione del raggio di curvatura per una fibra ottica step-index, nel caso di una curvatura di 180°; si può chiaramente vedere che per raggi di curvatura superiori ai 20 mm l'attenuazione si annulla quasi completamente.

Ci sono molti altri meccanismi di perdite di tipo estrinseci, nel caso delle fibre di vetro ne abbiamo elencati parecchi, tale: le attenuazioni alle connessioni e le attenuazione all'ingresso ed all'uscita della fibra. Queste attenuazioni sono anche presenti nelle POF, anche se, per motivo di ampio diametro del nucleo le attenuazioni alle connessioni sono ridotte, facilitando così installazione.

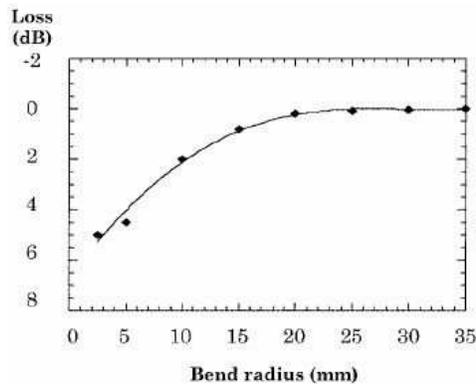


Figura 3.4: Perdite in una POF step-index in funzione del raggio di curvatura

La figura 3.5 mostra una tipica curva di perdita di una fibra PMMA. Per questo spettro di perdita, le finestre di trasmissione sono 530, 570 e 650 nm, il tutto nel campo del visibile. Le fibre di plastica più recenti ottenuti da polimeri PFBVE presentano una maggiore trasmissione della luce su una più ampia gamma di lunghezze d'onda. La figura 3.5 mostra uno spettro tipico di perdita di una fibra GI-POF(PFBVE). Confrontato con lo spettro di attenuazione delle PMMA, le PFBVE hanno due caratteristiche importanti. In primo luogo, l'intervallo di spettro utilizzabile va da 650 a 1.300 nm, e, in secondo luogo, l'attenuazione è inferiore a 50 dB / km in questa gamma di lunghezze d'onda. La buona trasparenza della fibra PFBVE nella regione NIR (near-infrared, vicino all'infrarosso) è dovuta alla mancanza di legami carbonio-idrogeno, e questo elimina il primo fattore di attenuazione osservato nella fibra PMMA. Tuttavia, le fibre PFBVE sono ancora soggette ad una forte attenuazione dovuta allo scattering che causa maggior attenuazione rispetto alla fibra di vetro. Gli scattering di Rayleigh, sono più presente rispetto al caso della fibra di vetro, per l'ordine di orientamento all'interno della struttura chimica dei polimeri, e questo fenomeno va crescendo quanto nella fibra viene drogato il nucleo per ottenere un profilo a indice graduale.

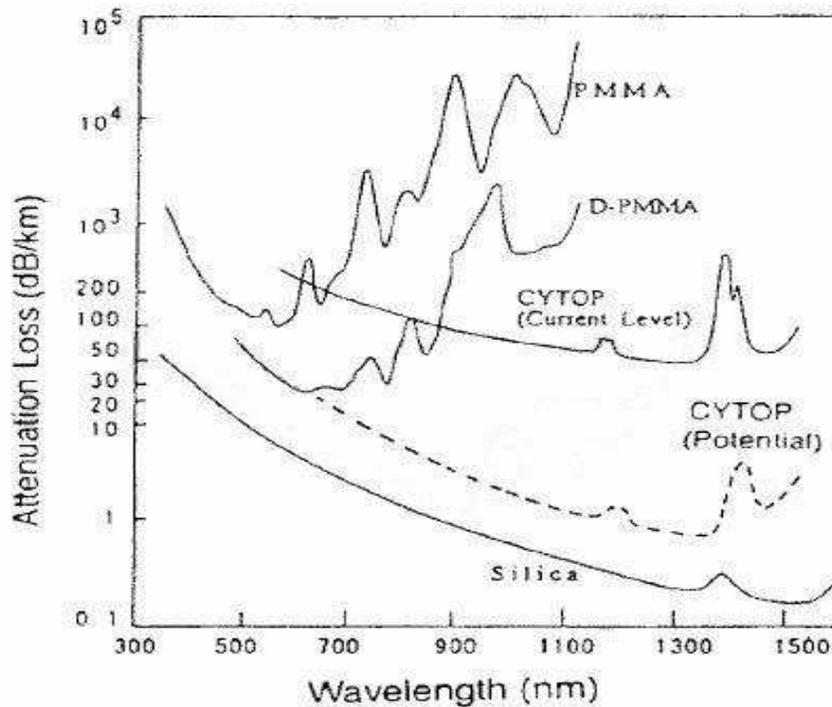


Figura 3.5: Attenuazione nelle POF

### 3.3.2 Dispersione nelle POF

La dispersione modale e la dispersione cromatica nelle POF sono di maggiore interesse. Questi due fattori sono stati ampiamente studiati precedentemente nel caso delle fibre di vetro. Adesso vedremo in dettaglio come queste vengono modificati o interpretati nelle POF.

La dispersione modale è originata dalle diverse lunghezze dei percorsi che i raggi compiono nell'attraversare la fibra: i tempi diversi con cui arrivano all'uscita della fibra portano alla dispersione degli impulsi. Se supponiamo che non vi sia conversione di modi lungo il percorso della fibra (cioè che non vi siano scambi di energia, lungo il tragitto, fra i diversi modi), è piuttosto semplice dare una stima della dispersione modale, facendo uso del modello geometrico usato nella figura 2.14; si ricava l'espressione (2.10).

Per quanto riguarda le fibre step-index, si può dimostrare sperimentalmente che la loro dispersione modale è, in realtà, significativamente minore di quella calcolata sopra con l'ipotesi che non vi sia conversione di modi. Questo si spiega poiché, in realtà, tale ipotesi è poco accurata nel caso delle POF, in cui numerose irregolarità favoriscono lo scambio di energia fra nodi adiacenti: proprio questi scambi provocano una considerevole redistribuzione dei modi portando, come

conseguenza finale, a una minore distorsione, per i motivi che saranno illustrati nel dettaglio nel paragrafo 3.3.3.

La dispersione cromatica come visto prima è suddiviso in dispersione materiale e dispersione di guida d'onda. Lo studio della prima è interessante nello studio della dispersione nelle POF. Come sappiamo, Ogni sorgente luminosa, infatti, possiede una propria ampiezza spettrale,  $\Delta\lambda > 0$ : si va dagli 1-2 nm dei diodi laser fino ai 25 nm nel caso dei LED. Dal momento che l'indice di rifrazione di ciascun materiale è dipendente dalla lunghezza d'onda, si avrà che le diverse componenti dello spettro emesse dalla sorgente viaggeranno a velocità diverse, provocando la dispersione. È da annotare che nelle fibre plastiche le radiazioni guidate hanno il loro spettro nel dominio della luce visibile, perciò, è comodissimo trasmettere una luce monocromatica infine da minimizzare una eventuale dispersione.

### 3.3.3 Accoppiamento modale e conversione modale

Accoppiamento e conversione modale sono due ulteriori meccanismi che portano alla dispersione e all'attenuazione nelle fibre ottiche plastiche.

- Accoppiamento modale o Le imperfezioni sulla superficie di separazione core-cladding

Per accoppiamento modale ci si riferisce al processo tramite il quale l'energia è trasferita da una direzione di propagazione a diverse altre (scattering), per esempio in corrispondenza di centri di diffrazione. sono dovute a errori durante il processo di fabbricazione e anche alla disomogeneità dei polimeri utilizzati. Nelle POF diversi esperimenti hanno mostrato che l'accoppiamento modale si verifica in modo particolare alla discontinuità nucleo-mantello, questo si può spiegare con il fatto che è impossibile creare un'interfaccia perfettamente liscia, nell'ordine di grandezza dei nanometri, avendo a che fare con lunghe catene di polimeri. La figura 2.9 anche in questo caso illustra perfettamente questo effetto.

L'accoppiamento modale ha un effetto positivo sulla dispersione nelle fibre ottiche plastiche e, di conseguenza, aumenta la larghezza di banda. Questo avviene perché la redistribuzione dell'energia fra i diversi modi fa sì che, lungo il tragitto, i raggi che inizialmente erano più "lenti" diventino più "veloci" e viceversa; come conseguenza si ha che il ritardo che porta alla dispersione non cresce più come in (2.10), proporzionalmente alla distanza, ma alla sua radice quadrata.

L'accoppiamento modale si traduce sempre anche in una maggiore attenuazione, infatti, ogniquale volta si verificano dei cambiamenti nella propagazione, parte della potenza della luce sarà accoppiata in modi non guidati e quindi andrà perduta.

- Conversione modale

Quanto visto finora sui modi o sulle direzioni di propagazione si applica, in realtà, solo finché si ha a che fare con guide d'onda dritte: se sono presenti delle

curvature, la soluzione più brillante è quella di considerare i due tratti prima e dopo la curva come una guida dritta, ed effettuare un cambio del sistema di riferimento in corrispondenza della curvatura. Ciò comporta, tuttavia, che formalmente la direzione di propagazione della luce cambi in corrispondenza della curvatura, come si può vedere dalla Figura 3.6

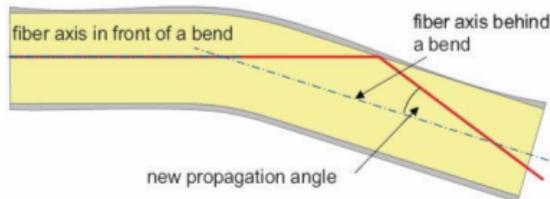


Figura 3.6: Conversione modale in corrispondenza di una curvatura

In parole povere, la conversione modale può essere vista come un caso particolare di accoppiamento modale, nel quale però il numero di modi di propagazione non aumenta. Nelle POF, generalmente la conversione modale si ha all'interfaccia nucleo-mantello, in corrispondenza di micro-curvature o di fluttuazioni dell'indice di rifrazione.

### 3.3.4 Resistenza meccanica delle POF

Le proprietà meccaniche delle POF discendono direttamente dal materiale plastico con cui sono realizzate; una prima importante osservazione riguarda il modulo di Young di tali fibre, che è di quasi due ordini di grandezza inferiore rispetto a una fibra in silice: per questa ragione, anche una fibra di diametro di 1mm è sufficientemente flessibile per essere installata senza problemi nella maggior parte delle configurazioni che potrebbero presentarsi. Per lo stesso motivo, il raggio minimo di curvatura per le POF è significativamente minore di quello per le fibre convenzionali in vetro.

Le POF mostrano un'ottima resistenza meccanica anche sotto altri aspetti; ad esempio, uno studio mostra che un allungamento della fibra plastica fino al 10% della sua lunghezza provoca maggiori attenuazioni per meno di 0,1 dB. Alcune prove preliminari effettuate in laboratorio hanno mostrato che per tiraggi fino a circa 65 N (Newton) applicati ad una singola fibra da 1,5 mm, non si percepiscono degni prestazionali. Un altro caso che può verificarsi piuttosto frequentemente in alcuni tipi di installazione è quello di curvature cicliche: è stato mostrato sperimentalmente che una fibra plastica in PMMA mostra un'attenuazione aggiuntiva minore di 0,15 dB se viene arrotolata 1000 volte con un raggio di curvatura di 5 cm.

### 3.3.5 Resistenza termica delle POF

Se da un lato, come abbiamo visto, le fibre ottiche plastiche offrono numerosi vantaggi per quanto riguarda la resistenza meccanica, lo stesso non si può dire per la loro resistenza termica. Per le POF a nucleo in PMMA la loro composizione di polimeri, infatti, non consente loro di operare a temperature superiori agli 80°-100°C: per valori di temperatura superiori a questi, esse iniziano a perdere rigidità e trasparenza; utilizzando particolari rivestimenti protettivi, è possibile arrivare al massimo a temperature attorno ai 125°C.

Un fatto importante riguardo la resistenza al calore delle POF a PMMA è che il loro comportamento è fortemente influenzato dal grado di umidità dell'ambiente. Ad esempio, se una fibra plastica è mantenuta ad una temperatura di 85°C ad un tasso di umidità dell'85% per 1000 ore, l'attenuazione aggiuntiva sarà attorno agli 0,02 dB/km; ma se aumentiamo il tasso di umidità fino al 90%, l'attenuazione introdotta aumenta vertiginosamente fino a 0,03 dB/m. Questo è dovuto, al solito, al forte assorbimento delle molecole OH nella fascia del visibile, e segna un altro punto a favore delle fibre plastiche Lucina che, come già accennato, non assorbono le molecole d'acqua.

### 3.3.6 La fibra Lucina

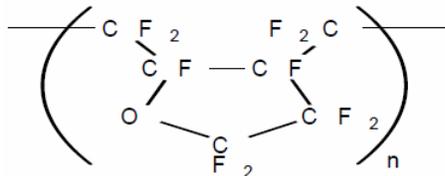
La fibra Lucina è oggi la POF la più utilizzata, perché presenta delle caratteristiche migliore delle altre fibre plastiche e perciò chiama a maggiore interessamento. Come lo sappiamo, Lucina è costituito da un polimero trasparente perfluorinati amorfa che viene sviluppato, prodotto e commercializzato da Asahi Glass CO. La Lucina ha un grande diametro di nucleo che consente una velocità di trasmissione elevata, facilità di movimentazione e di connessione, i costi di installazione bassi, e la compatibilità con LD e LED nella regione vicino all'infrarosso da 650nm a 1300nm. La Lucina viene utilizzata per entrambe le reti locali e reti domestiche.

Le caratteristiche del PFBVE, che è il polimero di base sia per il core che il mantello della Lucina, sono i seguenti:

- trasparenza per una vasta gamma di lunghezze d'onda da 650nm a 1300nm
- la dispersione del materiale è bassa
- Flessibilità
- lunga durata, Alta resistenza chimica
- non infiammabilità.

La PFBVE è costituita da legami C - F, C - C e C - O. Poiché l'assorbimento della luce causata da questi tre tipi di legami atomici appaiono in lunghezze d'onda maggiori ( $\geq 5.3\mu\text{m}$ ), alla lunghezza d'onda inferiore a 1400 nm l'assorbimento corrispondente a questi legami è nulla. La PFBVE è trasparente per le lunghezze d'onde convenzionalmente utilizzati nelle comunicazioni a sorgente

di luce (da visibile a 1300 nm) per il trasporto dei dati; perché non ha il legame C – H, che è il principale legame atomico nella plastica ordinaria, come la PM-MA. Pertanto, una fibra plastica con un legame C– H non è funzionale con una sorgente di luce a infrarossi (850 e 1300 nm).



configurazione chimica della PFBVE

La figura 3.7 mostra il risultato della risposta impulsiva e della potenza assorbita ad una frequenza elevata (1,56 GHz) all’uscire di una Lucina lunga 224 m. si nota che l’impulso è solo lievemente deformato all’uscire della fibra e ad una frequenza di 1.56 GHz si ha una perdita bassa di solo 3dB.

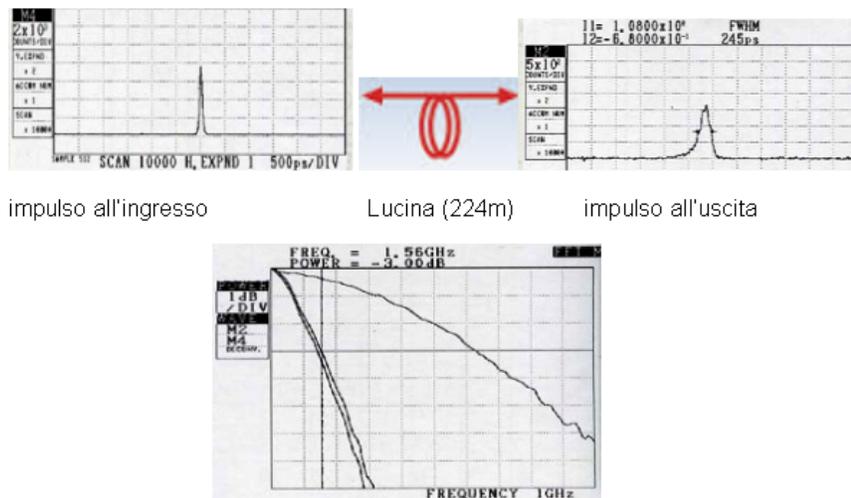


Figura 3.7: Risposta impulsiva

Tutte queste caratteristiche sono molto interessanti, e già a questo punto si potrebbe pensare che i massimi risultati sono stati ottenuti, ma non è il caso. In marzo 2009 Asahi Glass.Co ha presentato la “Lucina “X” “ il suo nuovo bijou, che dimostra avere caratteristiche ancora migliore della vecchia Lucina.

La Lucina”X “ ha un doppio mantello, ed è strettamente legato alla guaina che la circonda, formando così, un insieme compatto che facilita l’operazione di installazione. La figura 3.8 fa un confronto fra la vecchia e la nuova Lucina.

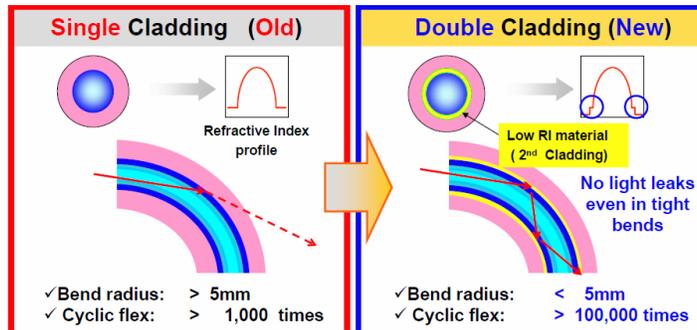


Figura 3.8: Double Clad Fiber

Il concetto Lucina X è quella di una fibra di alta velocità costituito da polimero perfluorinati (PF) GI-POF con terminazione facile e resistenza alle curve più stretto ed adatto all'elettronica di consumo, cioè:

- Alta velocità - in grado di erogare 10 Gbps oltre 100 m ( figura 3.9)

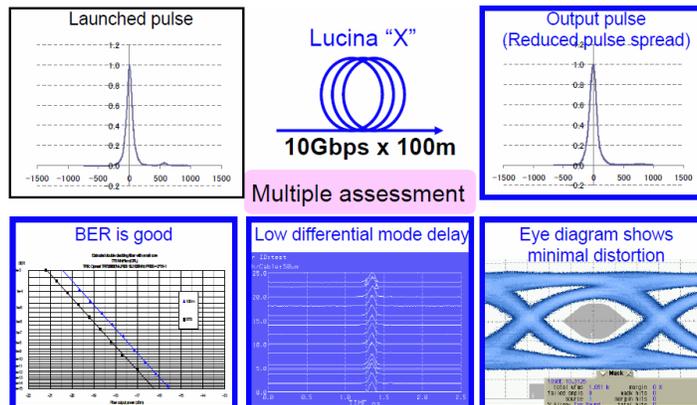


Figura 3.9: High speed capability

- Semplicità - cavi con strutture semplice e connettori con meno componenti rispetto alla fibra di vetro(figura 3.10)

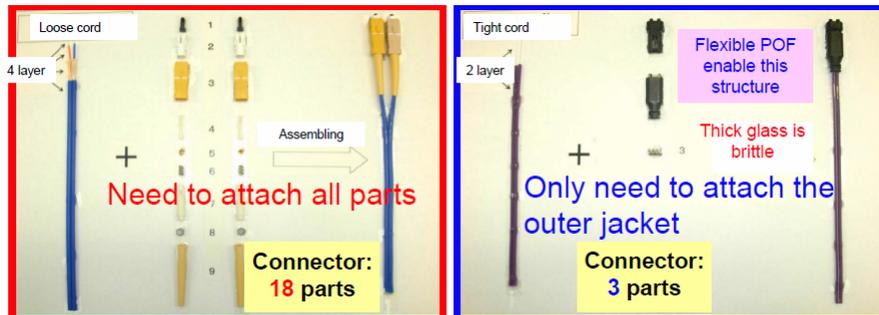


Figura 3.10: Low-cost Termination

- Robustezza - nessuna rottura delle fibre. Stabilità nella comunicazione dei dati anche in caso di curvature strette o di nodi (figura 3.11).

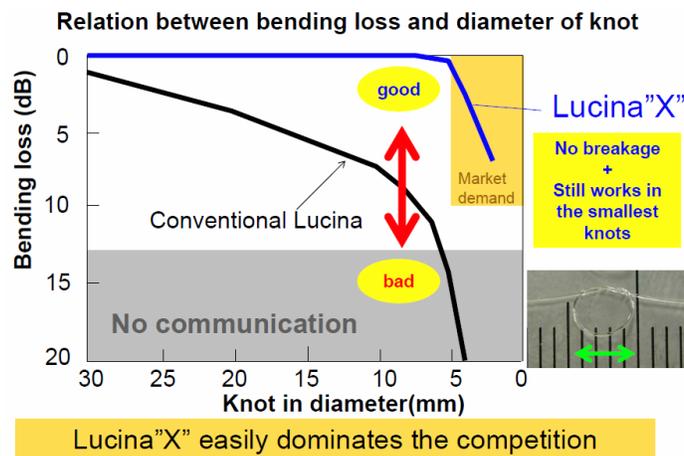


Figura 3.11: Reliability

### 3.4 Giunzioni e connettori

Poiché le fibre ottiche non sono infinitamente lunghe, esse devono necessariamente essere unite. Inoltre nella pratica, risulta sempre più semplice lavorare con cavi corti, anziché lunghi. Per questo motivo è fondamentale l'utilizzo di giunzioni e connettori.

#### 3.4.1 Giunzioni nelle fibre ottiche

Le giunzioni per fibre ottiche sono di due tipi; la giunzione permanente, chiamata splice e la giunzione non permanente, chiamata connessione.

L'unione di due fibre ottiche è un'operazione alquanto delicata poiché nel punto di giunzione le perdite dovranno essere ridotte al minimo. In particolare è più difficile effettuare una connessione che uno splice; la difficoltà di effettuare giunzioni e connessioni implica costi rilevanti, che sono particolarmente alti per le fibre monomodali di vetro, che richiedono precisioni estremamente elevate per via del loro ridotto diametro. Tuttavia, lo sviluppo recente di macchine automatiche ha praticamente risolto il problema: sono attualmente realizzabili giunzioni e connettori che assicurano allineamenti con precisione inferiori al  $\mu\text{m}$ , soddisfacendo così le stringenti tolleranze per questo tipo di fibra.

Per meno perdite dovute alle operazioni di giunzione queste condizioni devono essere verificate :

- Le due fibre devono avere lo stesso diametro;
- Le due fibre devono trovarsi a contatto tra loro;
- Le estremità delle due fibre devono essere lisce;
- Gli assi delle due fibre devono essere allineati.

Per effettuare una connessione o uno splice è necessario preparare accuratamente le estremità delle fibre di vetro. Due sono i metodi per far questo:

#### 1) Il metodo "Scribe and break"

I primi centimetri del jacket e del buffer attorno all'estremità della fibra sono rimossi, dopo di che un taglierino di diamante è usato per segnare il jacket della fibra e una tensione viene applicata ad entrambe le estremità della fibra, che si rompe in modo pulito. L'estremità della fibra è ora liscia ed ha una finitura superficiale riflettente.

#### 2) Il metodo "Lap and polish"

Questa tecnica è utilizzata per preparare un connettore smontabile. Il jacket viene rimosso all'estremità della fibra e la fibra inserita e posizionata accuratamente in una ferula di supporto; una resina epossidica viene versata dentro la ferula, legando la fibra ed il suo jacket assieme alla ferula; la fibra scoperta, sporgendo dalla ferula, è lucidata dapprima con un abrasivo a grana grossa e poi con uno a grana sottile, fino a quando esso non è livellato con l'estremità della fibra. L'estremità della fibra è ora liscia e perpendicolare all'asse della fibra.

La tecnica dello "Scribe and break" è rapida ed economica. Essa non è utilizzabile per connettori smontabili. Questa tecnica non può essere utilizzata su fibre in materiale polimerico, poiché la plastica non si rompe in modo pulito. La tecnica del "Lap and polish" è più precisa ma più lunga. Essa è utilizzabile per connettori smontabili.

Lo Splice E' una giunzione permanente tra due fibre. Gli Splices possono essere fatti con diverse tecniche:

- per via meccanica

- per fusione

Gli Splices meccanici sono prodotti allineando e congiungendo le fibre con dei dispositivi meccanici. Ciò può essere fatto in vari modi che sono il “V Block”, Il “Precision sleeve” e Il “3 Rods”. Ma l’idea di base è la stessa:

- 1) Allineare precisamente le fibre con dei dispositivi meccanici.
- 2) Tenere la giunzione assieme a resina epossidica.

Gli Splices per fusione rappresentano un’alternativa agli splices meccanici. Con questa tecnica le fibre sono saldate assieme. Le due fibre sono allineate precisamente e lo splice è creato dalla fusione delle estremità delle due fibre con un arco elettrico.

Per ragione dell’ampio nucleo e delle caratteristiche meccaniche (robustezza e flessibilità) delle POF, le giunzioni permanenti richiedono meno precisione nell’allineamento e meno accuratezza nella lucidatura delle estremità .

### 3.4.2 Connettori

Tutti i sistemi di trasmissione richiedono connettori per la giunzione tra fibre e apparecchiature attive nonché per l’accoppiamento fibra a fibra. La progettazione dei connettori deve consentire:

- una connessione e disconnessione ripetuta,
- deve avere un’attenuazione bassa,
- e anche proteggere la fibra da eventuali danni.

Per la fibra ottica di vetro, la maggior parte e probabilmente i più semplici connettori in fibra ottica sono basati su un ferule, che può anche essere fatto di metallo, ceramica o plastica. La fibra per essere collegata in modo permanente è incollata con resina epossidica all’interno del ferule (esempio le fibre di tipo ST, SC, FC o LC). In alcuni sistemi l’accoppiamento della fibra viene fatta a giunzione meccanica all’interno del connettore. La fibra di solito deve essere lucidata per dare buone prestazioni rispetto alle perdite per inserzione. A causa delle piccole dimensioni del nucleo della fibra ottica di vetro, la tolleranza sulle dimensioni del ferule è fondamentale per un buon valore delle attenuazioni per inserzione.

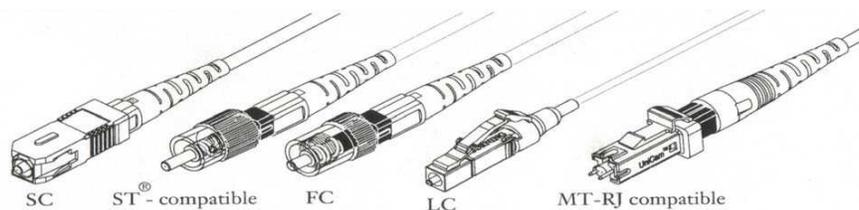


Figura 3.12: Modelli di connettori

A questo proposito, la POF richiede minor difficoltà nell'allineare la fibra. Questo la rende meno costosa e fa sì che diventi facile e veloce da assemblare con i connettori. Un certo numero di connettori sono stati sviluppati e ne sono in uso diversi. I più popolari sono il FCO5 TOSLINK (simplex) e FOC7 (duplex), sviluppato da Toshiba e adottato dalla Japanese Institute of Standards (rispettivamente JIS C55974 e JIS C5970). Hewlett-Packard ha sviluppato un semplice connettore "snap-on" chiamato Versalink. Connettori SMA sono stati adottati anche per la POF.



Figura 3.13: Connettori SMA e TOSLINK

Tutti questi connettori utilizzano un semplice strumento di taglio (lama di rasoio) o uno strumento a lama piatta e calda per produrre una finitura di alta qualità. Ci sono stati due recenti sviluppi nel mondo dei connettori POF, che sono il Small Multimedia Interface (SMI), sviluppato da Molex e il "do it yourself" connettore sviluppato per la GIPOF a PFBVE da Nexans.

- SMALL MULTIMEDIA INTERFACE CONNECTOR

Il small multimedia interface connector (SMI) è stato sviluppato specificamente per le applicazioni 1394b, ma sta trovando impiego in altre applicazioni. Questo sistema di tipo duplex connector può operare oggi a 250 Mb / s fino a 50m e nel futuro potrà raggiungere i 500 Mb / s. Questo connettore ha un ingombro ridotto di 11 mm di larghezza e 24 mm di altezza che lo rende adatto per l'elettronica di consumo. Come si può notare, è fatta da tre componenti e quindi compatibile con la Lucina "X".

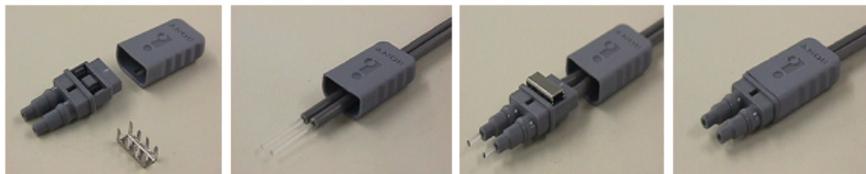


Figura 3.14: Componenti del SMI Connector

- "DO IT YOURSELF" CONNETTORI PER GIPOF

Nexans Cabling Solutions è stata attiva nello sviluppo di cavi e sistemi GIPOF con licenza della Asahi Glass. Nexans ha sviluppato un nuovo connettore SC,

compatibile con la GIPOF, fissandosi come obiettivo il basso costo e il tipo di installazione "fai da te". Questo sviluppo si basa su un nuovo sistema brevettato per il fissaggio della fibra nel connettore e il taglio della fibra senza necessità di lucidatura.

Nel compito di installazione dei connettori, il fattore chiave è il tempo di montaggio del connettore. Rispetto al costo di un connettore, il costo di installazione è così grande che è essenziale ridurre i tempi di assemblaggio, per quanto possibile. Così uno degli obiettivi di sviluppo era quello di evitare l'uso di un sistema di colla e di utilizzare invece il nuovo sistema brevettato. Il secondo obiettivo importante dello sviluppo era quello di evitare la necessità di uno specifico strumento, come uno strumento di aggraffatura.

I nuovi connettori Nexans sono a basso costo, molto facile da montare da chiunque senza una formazione specifica, in meno di 2 minuti, non hanno bisogno di specifici strumenti o lucidatura, e hanno una attenuazione misurata inferiore a 0,5 dB. Questo nuovo disegno, ora disponibile per SC, è attualmente in fase di test per tutti i connettori standard, come ST, LC, MTRJ e ben altri tipi ancora

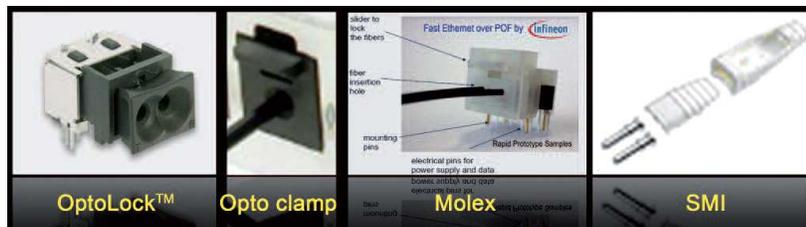


Figura 3.15: Principali connettori per POF sviluppati da MOLEX

### 3.4.3 Installazione della POF

In base al particolare ambiente, la posa delle POF potrà avvenire sfruttando la controsoffittatura e le canaline pre-esistenti esterne o interne alla parete. Si fa presente che grazie alle dimensioni ridotte delle fibre e alle ottime caratteristiche meccaniche, le POF possono essere inserite anche nelle canaline pre-esistenti, tipicamente utilizzate all'interno delle pareti per gli impianti elettrici, non essendoci problemi di interferenza, né di coesistenza di alcun tipo. A livello normativo, in ambito CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), grazie anche al contributo di Telecom Italia, è stata legalizzata proprio l'operazione di impiego di fibre ottiche in coesistenza con altri mezzi di trasporto (norma CEI 64-8): in questo modo, le operazioni di cablaggio risultano notevolmente agevolate. La procedura di installazione delle POF è estremamente semplice e non richiede la presenza di tecnici specializzati per le operazioni di connettorizzazione per la terminazione delle fibre come progettato dalla NEXANS (connettori "fai da te"). Infatti, le dimensioni generose del nucleo consentono il funzionamento anche in caso di allineamento non perfetto, rendendo quindi le POF affidabili anche senza interventi di installazione particolarmente sofisticati. A titolo di esem-

pio, in figura 3.9 sono riportate in maniera semplificata le operazioni necessarie per realizzare l'inserimento delle POF nel connettore OptoLock™. In pratica, la procedura prevede:

1. tagliare la coppia di POF mediante l'apposito cutter oppure utilizzando un normale taglierino o delle forbici;
2. separare le 2 POF per pochi cm;
3. estrarre verso l'esterno il "cassettino" del connettore OptoLock™;
4. inserire le 2 POF nel connettore;
5. spingere verso l'interno il "cassettino" del connettore OptoLock™.

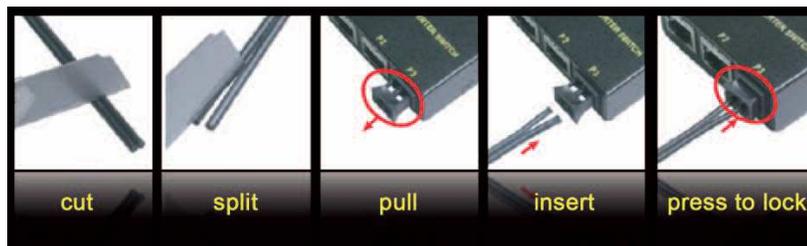


Figura 3.16: Operazioni per l'installazione delle POF

L'unica avvertenza è di connettere correttamente la coppia di POF in modo tale che, per un collegamento punto-punto, il trasmettitore di un apparato sia collegato al ricevitore dell'altro. Anche questo aspetto non risulta critico, poiché le POF trasportano informazioni mediante luce visibile, che consente di individuare il trasmettitore in maniera semplice.

## Capitolo 4

# Diverse applicazioni delle POF e progetti

I specialisti di mercato hanno proiettato una crescita delle vendite annuale sui componenti POF di oltre il 15 per cento, a partire dal 2006 fino al 2010. A differenza delle fibre ottiche di vetro, che vengono utilizzate principalmente nel settore delle telecomunicazioni, le POF hanno applicazioni in molti settori. Le due principali applicazioni delle POF sono nel controllo industriale (sensori) e nel settore automotive. La principale ragione dell'utilizzo delle POF nel settore del controllo industriale è data dalla necessità di collegamenti di dati che resistono alle interferenze elettromagnetiche (EMI, electromagnetic interference), causate dall'alta tensione e dai dispositivi ad alta corrente, come saldatrici ad arco, e da apparecchi ad alta tensione, come ad esempio apparecchiature a raggi X. Oggi, il principale interessamento nel settore POF si trova negli usi innovativi dei suoi prodotti da parte delle imprese automobilistiche.

### 4.1 Applicazioni nell'automobile

Promotori di nuove tecnologie cercano applicazioni innovative che renderebbe il lancio del loro prodotto un enorme successo. Con le POF, l'industria automobilistica sta sviluppando applicazioni eccezionali. Nel 2000 il produttore tedesco di auto Daimler-Benz ha riconosciuto che l'uso crescente di dispositivi digitali nelle automobili aumenta il peso, la suscettibilità alla EMI, e la complessità dei cablaggi. Daimler-Benz ha capito che un modo per ridurre i costi è sviluppare e comprare da uno standard comune, e la sua analisi ha indicato che sono le reti ad anello POF a rispondere ai bisogni futuri nel settore dell'automobile. Il produttore di automobili ha convinto i sei altri produttori di auto europei, tra cui BMW e Volkswagen, ad unirsi per lo sviluppo di uno standard chiamato Media Orientated Systems Transport (MOST) e ad accettare di acquistare secondo lo stesso standard. Le sette società hanno anche costituito un'organizzazione chiamata MOST Cooperation per coordinare lo sviluppo e la promozione dello

standard. La MOST Cooperation è costituita ora da 16 produttori di auto, tra cui General Motors, e più di 60 fornitori POF in tutto il mondo. Entro la fine del 2005, vi erano 40 diverse auto europee, con un bus dati POF composta di 25 milioni di nodi ottici. Il sistema più originale è stato progettato per 25 Mb / s. La prossima generazione dovrà trasmettere a 50 Mb / s, e sempre per la velocità di dati è previsto un aumento fino a 150 Mb / s. Sebbene in maggior parte è stato sviluppato per applicazioni non critiche nel settore automobilistico come: il sistema di posizionamento globale (GPS), il lettore-carica dischi audio (CD) o video (DVD), schermi a cristalli liquidi (LCD o), sistema di navigazione integrato, giochi, ecc. BMW ha anche sviluppato una distinta rete a stella POF di 10 Mb / s chiamato Byteflight per gli elementi critici, quali i sensori airbag. BMW ha ora 7 milioni di transceiver Byteflight installati nei suoi veicoli.

Una rete auto di terza generazione è attualmente in esame, chiamato FlexRay, che dovrebbe sostituire il collegamento meccanico tra il pedale del freno ed i freni con una fibra di plastica. Quando un conducente preme sul pedale del freno, la forza risultante viene convertita in un segnale luminoso e trasmessa a un “attuatore”, che converte il segnale e applica il giusto livello di frenata alle ruote. Un ricetrasmittitore per il sistema operativo di 25 Mb / s costa attualmente ai produttori di auto 4,50 dollari, prezzo che dovrebbe scendere a 3,00 dollari, nonostante l’aumento della velocità a 150 Mb / s. Trasmettitori simili per i sistemi in fibra ottica di vetro costerebbero 50-100 dollari. Negli Stati Uniti e in Giappone, i costruttori di automobili stanno progettando un sistema più avanzato, che funzionerà a 400 Mb / s utilizzando l’IBD-1394 standard. Questo sistema dovrebbe essere compatibile con lo standard MOST.

## 4.2 Applicazioni nelle telecomunicazioni

Nel campo delle telecomunicazioni, l’interesse dell’impiego di fibre è principalmente rivolto alle reti a larga banda e all’offerta di servizi “home-network”, come servizi video di IPTV; dove l’utilizzo delle fibre plastiche (vedi figura 4.1) riguarda il collegamento tra il modem/router broadband (Access Gateway - AG) connesso ad una delle prese dell’impianto telefonico e il Set Top Box (STB) posizionato vicino alla televisione. Le attuali tecnologie permettono facilmente di avere un bit rate pari a quello della tecnologia Fast Ethernet (100 Mbit/s). Ad oggi, per garantire la comunicazione bi-direzionale tra AG e STB, necessaria per il servizio IPTV, è necessario utilizzare una coppia di fibre plastiche.

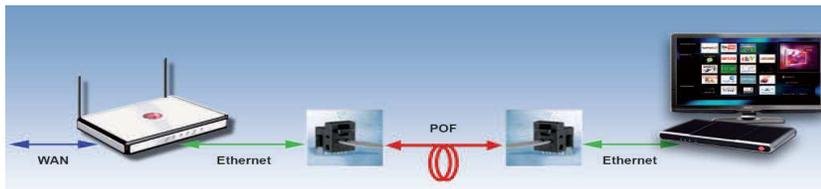


Figura 4.1: Utilizzo delle fibre plastiche in ambito home networking

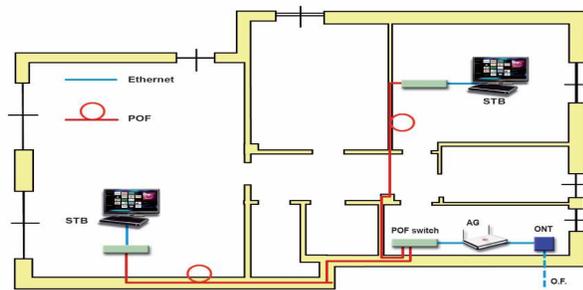


Figura 4.2: IPTV multi-room

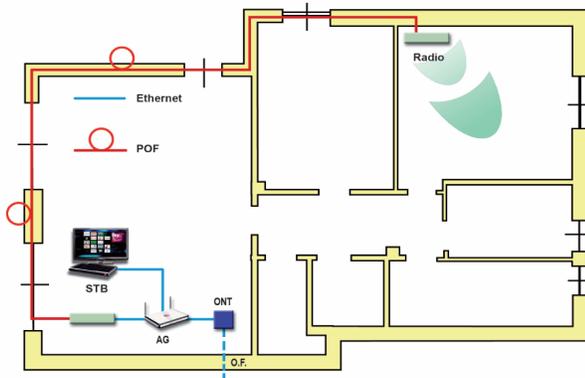


Figura 4.3: Estensione della copertura radio

In futuro, in base alla roadmap presentata da alcune aziende del settore, potrebbe essere sufficiente utilizzare una singola fibra. Il collegamento punto-punto tra AG e STB può essere realizzato mediante due adattatori elettroottici (Ethernet/POF), entrambi alimentati da corrente. Alcuni produttori stanno integrando l'interfaccia per fibra plastica su modem/router e STB, eliminando la necessità degli alimentatori. In merito alle evoluzioni previste per i servizi offerti, è possibile ipotizzare i seguenti scenari:

- IPTV multi-room;
- estensione della copertura radio (Wi-Fi).

Un esempio dell'impiego della POF è quello Presso il reparto di Cardiologia dell'ospedale Sant'Orsola-Malpighi, è stata realizzata un'architettura a stella per il collegamento dei singoli terminali all'unico punto LAN disponibile in reparto. Per ciascuno dei 7 terminali è stato utilizzato un adattatore elettro-ottico (con alimentatore integrato), mentre la connessione tra i singoli adattatori e il punto LAN ha richiesto l'impiego di 2 switch ottici con 5 interfacce POF ciascuno (anch'essi con relativo alimentatore). In altre realtà ospedaliere, si potrà valutare la

possibilità di definire architetture diverse da quella a stella, oppure architetture “miste” Ethernet + POF mediante l’impiego di switch Ethernet (oltre a quelli ottici).

La posa delle POF è avvenuta prevalentemente sfruttando la controsoffittatura e le canaline preesistenti esterne alle pareti.

### 4.3 Applicazioni nei sensori

Il sensore in fibra plastica si può utilizzare per la rilevazione di passaggio. I sensori in fibra plastica non hanno problemi di falsi contatti, costano poco e non si ossidano. Sono inoltre compatti, di facile installazione ed insensibili alle intemperie.

I vantaggi dei sensori ottici in fibra plastica rispetto ai sensori di passaggio in rame e ad infrarossi sono:

- Verifica di funzionamento: grazie all’utilizzo di luce visibile, l’allineamento si fa ad occhio in pochi secondi, non servono tester o altri strumenti: basta controllare se la luce “esce” dal cavo,
- Dimensioni ridotte: grazie al suo diametro di 2,2mm e alla sua immunità EMI, il cavo in fibra plastica passa anche nelle canaline elettriche intasate, riducendo così i costi di installazione,
- Alimentazione remota: l’estremità della fibra plastica è utilizzata come terminale ottico; il segnale luminoso viene trasportato dalla fibra fino al dispositivo elettrico, che può essere pertanto posizionato fino a 100m dal punto di rilevazione, vicino al quadro elettrico, eliminando l’alimentazione remota,
- Elevata precisione: i sensori in fibra plastica sono capaci di rilevare anche pezzi dello spessore di 1mm alla velocità di 4000 passaggi al secondo, per adattarsi a tutte le esigenze,
- Compatibilità elettromagnetica: i sensori in fibra plastica non emettono radiazioni elettromagnetiche e le apparecchiature vicine, né risentono dei disturbi generati da altre sorgenti,
- Isolamento galvanico: la fibra plastica non conduce corrente e può quindi essere collocata anche in ambienti in cui sono presenti vapori o sostanze infiammabili e esplosive, senza bisogno di usare canaline Ex-D o costosissimi cavi antideflagranti.

Due esempi di funzionamento di sensori di livello sono descritti nei seguenti paragrafi.

#### 1) Sensore di livello/passaggio

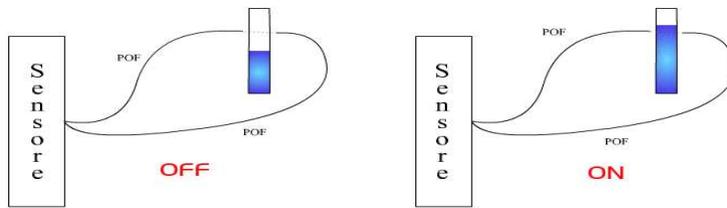


Figura 4.4: Illustrazione funzionamento elementare del sensore di livello

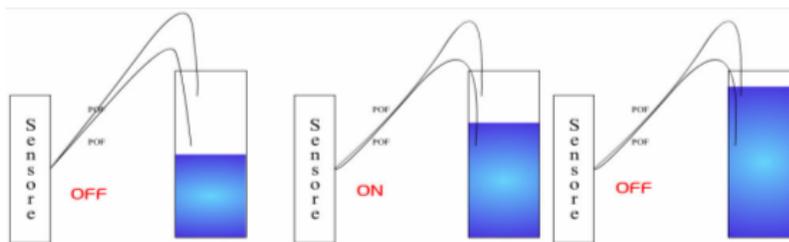


Figura 4.5: Illustrazione funzionamento elementare del Sensore doppio per livello liquido intermedio

Le due Fibre Plastiche sono affiancate. La prima fibra emette luce, la seconda la cattura e la trasporta fino al sensore che la rileva. E' possibile inserire delle microlenti davanti alle fibre per estendere la distanza tra le fibre fino ad 1m. E' anche possibile affiancare le fibre e porre uno specchietto se non è possibile affiancare le due fibre tra loro.

## 2) Sensore doppio per livello liquido intermedio

Ognuna delle due fibre, grazie ad uno splitter ottico inserito sul sensore, funziona da rilevatore. E' possibile quindi con l'utilizzo di entrambe le fibre stabilire un livello minimo ed un livello massimo per il liquido.

## 4.4 Altre applicazioni

Ci sono molto altri settori che usano le fibre ottiche di plastica in diverse applicazioni. Le sue caratteristiche lungamente messe in evidenza in questo testo la rendono utile in multipli settori e sono dei catalizzatori di molte innovazioni, come nei settori aeronautico, navale, dell'automazione industriale, della robotica, delle reti locali, della videosorveglianza e della domotica.

## 4.5 Progetti

Al livello europeo la fibra plastica suscita già da qualche anni l'interesse di molte aziende e studiosi, e così, è nato il progetto "POF-ALL project", seguito qualche anno dopo dal progetto "POF-PLUS project"; tutti due ideati e finanziati dall'unione europea per accompagnare questa dinamica. Nei sottoparagrafi 4.5.1 e 4.5.2 descriveremo in modo dettagliato questi progetti.

### 4.5.1 POF-ALL EU project

Il progetto POF-ALL, aveva come scopo lo sviluppo di una soluzione a basso costo, basato sulla POF per rendere possibile l'accesso alla fornitura a banda larga per tutti. Una attenta ottimizzazione delle tecnologie abilitanti (componenti, dispositivi e protocolli) hanno fatto l'oggetto di un test sul campo della vita reale.

Impatto previsto:

- 1) L'Europa approfitterà di una tecnologia a basso costo, ideale per gli operatori delle telecomunicazioni nella fornitura a banda larga nelle imprese e le famiglie;
- 2) L'Europa potrebbe essere indipendente dalle tecnologie extra-UE, nell'implementazione degli accessi alla rete, come lo è oggi con le tecnologie ADSL ;
- 3) Le aziende europee avranno la possibilità di esportare "le savoir-faire" del consorzio POF-ALL, di promuovere ulteriori investimenti migliorando così la competitività e la posizione dell'Europa nella sfera delle nuove tecnologie.

Il progetto POF-ALL è iniziato nel gennaio 2006 e si è ufficialmente concluso nel settembre 2008. Ulteriori sviluppi su argomenti analoghi sono oggetto del progetto POF-PLUS, riguardo EU PQ7 e coordinato dallo stesso team che ha lavorato su POF-ALL.

### 4.5.2 POF-PLUS project

Il progetto POF-PLUS si concentra sullo sviluppo di nuovi componenti fotonici e le tecnologie per la trasmissione nei sistemi di fibre ottiche plastiche (POF) a largo nucleo, finalizzate alla realizzazione della trasmissione senza precedenti di decine Gbps su questo mezzo. I diversi vantaggi della POF con diametri di base del nucleo nella gamma di 1 millimetro, ci permettono di immaginare una tecnologia estremamente semplice da installare rispetto alla fibra ottica di vetro tradizionale, o anche i cavi in rame standard (UTP, coaxial, ecc). L'estrema semplicità della POF è stata fino ad oggi ombreggiata dalla capacità di trasmissione inferiore rispetto a quelle di vetro. Le strategie per superare questa limitazione sulla base di futuri trasmettitori e ricevitori è l'obiettivo fondamentale del POF-PLUS project.

Il progetto cercherà di conseguire i seguenti obiettivi:

- Realizzazione di sistemi ingegneristici lavorando a 1Gbps oltre 50-90 metri;
- prova di dimostrazione del concetto di multi-Gbps su più di 50-60 metri (da 6 a 10 Gbps);
- prova di dimostrazione del concetto di diverse decine di Gbps per decine di metri utilizzando soluzioni ottiche parallele (multi core e cavi a nastro);
- una trasmissione affidabile di sistemi radio-over-fibre selezionate (come ad esempio il trasporto wireless UWB, Ultra Wide Bandwidth, per segnali radio).

Il successo del POF-PLUS su “multi-Gbps sulla POF” dovrebbe incidere in modo significativo in due settori di applicazione:

- 1) Prossima generazione di “home networks”, vale a dire, la rete nell’abitazione del cliente. Il progetto POF-PLUS permetterà alla rete domestica di uguagliare le prestazioni corrispondente a quella della rete FTTH esterna consegnata al cliente “door step”.
- 2) Interconnessioni ottiche per applicazioni di connettività a banda larga su breve distanze, come ad esempio: Storage Area Networks (Fibre Channel); comunicazione aziendale tra i server di grande dimensioni e i computer ad alta capacità (Fibre Channel e Gigabit Ethernet); displays per i video non compresso (ad esempio, HDMI) .

Questa applicazione (multi-Gbps sulla POF) sarà convenzionalmente denominata “Optical interconnect”.

## Capitolo 5

# Conclusioni

Per migliorare le prestazioni e ridurre i costi di certi prodotti oppure certe tecnologie, ricorriamo spesso a dei sostituiti; e qualche volta queste non ci danno il risultato atteso, però, ci possono aprire la strada ad innovazioni insospettite oppure essere complementare ai prodotti o alle tecnologie già esistenti. Le fibre ottiche entrano in questo scenario perché pensate come potenziale sostituto a quella di vetro, le sue caratteristiche hanno piuttosto contribuito a sviluppare tecnologie non favorevole alla fibra di vetro.

I lavori effettuati fino ad oggi per migliorare le caratteristiche delle POF, come per esempio: l'attenuazione decisamente più elevata, la dispersione modale sfavorito dall'ampio diametro del core ed i scattering di Rayleigh e portarli al livello di quelle della fibra di vetro non sono stati concludenti; limitando l'utilizzo delle POF a distanze ridotte, sapendo che la fibra ottica di vetro è apprezzata per le sue qualità di mezzo trasmissivo a lunga portata, è chiaro che le POF non sono degni sostituiti. Questi svantaggi citati prima, le caratteristiche meccaniche e soprattutto il suo basso costo, hanno favorito il suo impiego in diversi settori che abbiamo elencato nel paragrafo 4.

Oggi, anche senza saperlo, siamo circondati di fibre ottiche plastiche; nelle nostre case come cavi di connessioni per IPTV multi-room od estensione della copertura radio (Wi-Fi); nelle nostre macchine per gli elementi critici, quali i sensori airbag; ed in altre applicazioni importanti in fase di sviluppo o di test. Possiamo dire delle POF che sono via via elementi importanti nei strumenti che agevolano le difficoltà che incontriamo nella nostra quotidianità.

L'interesse portato alle POF è recente, e di conseguenza, il lavoro effettuato sino ad ora è sicuramente solo l'inizio; il fatto che siano innovatrici in diversi settori inciterà senza dubbio al loro continuo sviluppo. Ed non è da escludere nei anni futuri, il suo miglioramento sino ad superare i limiti posti da qualche sue caratteristiche (attenuazione, resistenza termica, dispersione Rayleigh...), così, il scenario citato prima non sarà più lo stesso e le POF saranno a tutti gli effetti sostituenti della fibra ottica di vetro.

# Bibliografia

- [1] “Le Plastic Optical Fiber e le TLC”, Notiziario, Tecnico Telecom Italia n. 3 – Dicembre 2007, pagg. 97-100
- [2] R. Gaudino, et al., "Status and recent results from the POF-ALL EU project: large-core plastic fibers for low cost, high-speed short reach applications," in 16th International Conference on Plastic Optical Fibers Proceedings, Turin, 2007.
- [3] T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, “Graded-index polymer optical fiber for high speed data communication,” Appl. Opt., vol. 33, pp. 4261–4266, Jul. 1994.
- [4] IEEE International Symposium on PowerLine Communications and its Applications, <http://www.ieee-isplc.org/2009/>
- [5] R. Van Boxel, T. Verbiest and A. Persoons, “ Switchable Bragg gratings in photochromic-doped graded-index polymer optical fibers” , POF’ 2004, 337-344,2004
- [6] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, POF Handbook - Optical short range transmission systems, 2nd ed. Springer, 2008.
- [7] <http://www.jb.man.ac.uk/research/fibre/intro2fibre.htm>
- [8] [http://w3.uniroma1.it/cattedra\\_michelotti/Esercitazione5.pdf](http://w3.uniroma1.it/cattedra_michelotti/Esercitazione5.pdf)
- [9] [http://policom.dei.polimi.it/education/tecnologie/X\\_connett\\_splice.pdf](http://policom.dei.polimi.it/education/tecnologie/X_connett_splice.pdf)  
11 <http://www.luceat.it/sensori.htm>
- [10] [http://www.lucina.jp/eg\\_lucina/lucinaX\\_eg.pdf](http://www.lucina.jp/eg_lucina/lucinaX_eg.pdf)
- [11] [http://www.lucina.jp/eg\\_lucina/tech8coreeng.pdf](http://www.lucina.jp/eg_lucina/tech8coreeng.pdf)