



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

“Le Fibre Ottiche Plastiche”

Relatore: Prof. Andrea Galtarossa

Laureando: Giacomo Camporese

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 19/07/2022

*Alla mia famiglia e alla mia fidanzata,
che mi hanno supportato e spero lo facciano ancora.*

INDICE

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	4
1.1 CENNI STORICI	5
CAPITOLO 2: FIBRA OTTICA IN VETRO	8
2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	8
2.2 STRUTTURA PRODUZIONE E PARAMETRI FONDAMENTALI	12
2.3 PARAMETRI FONDAMENTALI	13
2.5 TIPOLOGIE DI FIBRE OTTICHE	16
2.5.1 Modi di propagazione	16
2.5.3 Fibre Graded-Index	21
2.5.4 Fibre Monomodali	23
CAPITOLO 3: LE FIBRE OTTICHE PLASTICHE	25
3.1 TIPOLOGIE DI FIBRE OTTICHE POLIMERICHE	28
3.1.1 Step-index PMMA	28
3.1.2 GI-POF	29
3.1.3 Fibre plastiche composite PCF	33
3.2 PROCESSI DI PRODUZIONE	35
3.2.1 Extruding process	35
3.2.2 Preform drawing process	36
3.2.3 Stampante 3D	37
3.4 POLIMERO COMPLETAMENTE PERFLUORATO	40
3.5 IMPIEGO DELLA POF	43
3.5.1 Giunzioni	43
3.5.2 Connettori	44
CAPITOLO 4: LE PRINCIPALI APPLICAZIONI DELLE POF	46
4.1 AUTOMOTIVE	47
4.2 CONFRONTO TRA LE FIBRE DI VETRO E DI PLASTICA PER LA CASA	48
4.3 POF PER I SENSORI	49
4.3.1 Rilevamento delle radiazioni	50
4.3.2 Fibra ottica plastica integrata con uno smartphone per il monitoraggio fisiologico umano	50
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI	55
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA:	56

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

La domanda sempre più frequente di dati, la necessità di trasmettere informazioni nel minor tempo possibile, il bisogno di garantire sistemi di comunicazione efficaci ed affidabili, vedono la fibra ottica come protagonista assoluta che si sta affermando come mezzo valido per soddisfare le esigenze degli ultimi anni, sia globalmente sia nel domestico.

Dati alla mano, la differenza in capacità trasmissiva tra la fibra ottica e i tradizionali sistemi trasmissivi su cavi di rame e in radiofrequenza è sostanziale.

Essendo composte di materiale estremamente puro, diossido di silicio o silice, SiO_2 , alle volte drogato con diversi materiali, quali titanio e biossido di germanio, le fibre ottiche presentano diversi vantaggi rispetto ai normali cavi in rame:

- bassa attenuazione, fino a 0.2 dB/km, permettendo di realizzare collegamenti di decine di chilometri senza introdurre sistemi di rigenerazione;
- peso e ingombro contenuti, ogni singola fibra ottica è composta da due strati concentrici: un nucleo cilindrico centrale, o *core*, ed un mantello o *cladding* attorno ad esso. Il *core* presenta un diametro molto piccolo di circa 10 μm per le fibre Monomodali e 50 o 62.5 μm per le Multimodali, le due famiglie di fibre ottiche che verranno presentate in seguito, mentre il *cladding* ha un diametro di circa 125 μm ; esternamente viene poi applicato uno strato di acrilico che porta il diametro complessivo a 250 μm ;
- immunità alle interferenze elettromagnetiche, essendo realizzate in vetro, materiale dielettrico, non sono soggette ad accoppiamenti elettromagnetici che possono indurre disturbi al segnale trasmesso (diafonia o *cross-talk*);
- BER (*BIT ERROR RATIO*) molto piccolo, rappresenta il rapporto tra i bit non ricevuti rispetto a quelli trasmessi.

Nonostante le qualità sopra elencate, la fibra ottica presenta anche degli svantaggi rispetto alle soluzioni in rame:

- curvatura limitata, ogni fibra ha un raggio di curvatura minimo di pochi centimetri che, se superato, porta alla rottura della stessa e può causare irregolarità sulla superficie, con conseguente perdita di potenza del segnale: questo è il problema più ostico, soprattutto in fase di installazione.

- metodi di giunzione, le fibre ottiche sono giuntabili solo attraverso sistemi automatici ad arco elettrico o dispositivi meccanici a freddo, che richiedono attrezzature, componenti e formazione.

Per risolvere parzialmente queste problematiche, sono state introdotte, a partire dagli anni '60 del Novecento, dalla multinazionale della chimica DuPont, le fibre ottiche plastiche, conosciute come POF (*Polymer Optical Fiber*). Con due diverse tipologie, PMMA e GI-POF, distinte per processo produttivo e i materiali utilizzati, godono di una notevole flessibilità e robustezza meccanica grazie anche ad un diametro totale più grande, fino a 1000 μm . Rispetto alle fibre in vetro, rappresentano una soluzione economica e di facile installazione, anche se le POF non presentano le stesse prestazioni a livello di larghezza di banda e di attenuazione tipica; trovano grosso impiego nelle reti di trasmissione dati a corto raggio a banda limitata, anche se gli sviluppi di questa tecnologia fanno intendere che potrà essere utilizzata anche in altre applicazioni.

Segue ora una panoramica nel mondo delle fibre ottiche in silice pura, con cenni storici e concetti base del loro funzionamento. Successivamente si analizzeranno le fibre ottiche plastiche, confrontandole con quelle in vetro ed esponendo degli esempi di applicazione.

1.1 CENNI STORICI

Il primo uso scientifico di questa applicazione risale al 1840, quando Jean-Daniel Colladon, fisico svizzero, e Jacques Babinet, fisico francese, dimostrano di poter guidare la luce tramite riflessione interna: utilizzando un recipiente pieno d'acqua, bucatò ad una estremità per far defluire l'acqua, e indirizzando un fascio di luce verso il recipiente, notarono che quest'ultima, invece che propagarsi in linea retta, uscendo dal contenitore, seguiva la caduta del getto d'acqua, deviando quindi la sua traiettoria da rettilinea a curvilinea.

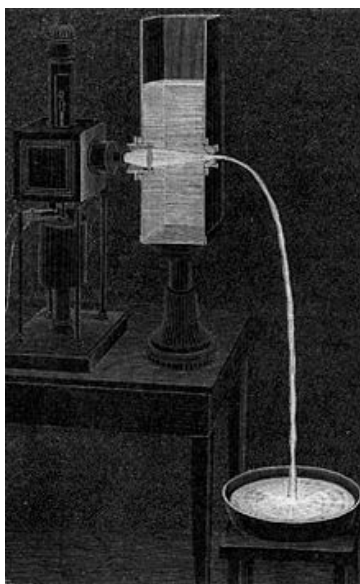


Figura 1.1: Fontana di luce realizzata da Colladon e inserita in un articolo del 1884

L'applicazione di questo fenomeno su fibre di dimensioni ridotte e la possibilità di sfruttarle come guide d'onda in vetro vennero suggerite in alcuni articoli scientifici nei primi del 1900, ma solo negli anni Venti si riuscì a dimostrare tali teorie. In quegli anni, Clarence Hansell, un ingegnere americano, e John Logie Baird, un ingegnere elettronico inglese, dimostrarono che era possibile trasmettere immagini tramite una serie di bacchette di vetro ma le tecnologie dell'epoca non permisero di raggiungere risultati apprezzabili per la trasmissione di segnali a lunghe distanze.

Grazie alle nuove tecniche di purificazione e filatura del vetro, nel 1960 Naride Singh Kapany, un fisico indiano, coniò il termine fibra ottica in un articolo che scrisse per la rivista Scientific American, dove presentava questa rivoluzionaria tecnologia.

Nel 1966 Charles Kao e George Hockham, due ingegneri della Standard Telephones and Cables, proposero di utilizzare fibre di vetro per trasmissioni a distanza mediante luce laser opportunamente modulata. I due scoprirono che l'elevata attenuazione presente allora in tutte le fibre di vetro (circa un migliaio di dB/km) non era dovuta a fenomeni fisici, bensì alle impurità presenti nel materiale; i loro studi si focalizzarono sull'analisi delle proprietà di perdita della luce, trovando il materiale più adatto alla costruzione delle fibre: vetro di silice con elevata purezza, scoperta che valse a Kao il premio Nobel per la fisica nel 2009. Corning Glass Works, azienda chimica americana, partendo dalle proposte di Kao e Hockham, nel 1970 dichiarò di aver filato una fibra ottica con un'attenuazione di 17 dB/km, risultato incredibile per quel periodo.

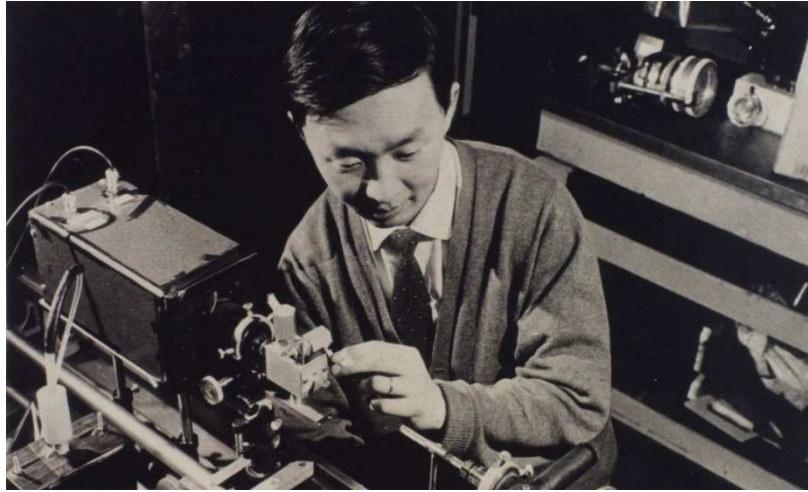


Figura 1.2: C. K. Kao mentre studia la perdita della fibra ottica nel 1966

Nel 1973 il centro di ricerca italiano CSELT (Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni del gruppo SIP, oggi TIM Open Lab) avviò, in collaborazione con la Corning Glass Works, un programma di sperimentazione per la produzione di cavi in fibra ottica e nel 1977 a Torino venne installato un cablaggio in fibra ottica di 4 km tra le centrali telefoniche urbane di Stampalia e Lucento.

Negli anni '80 l'attenuazione nelle fibre di silice scese a 0.2 dB/km, valore teoricamente limite per alcune lunghezze, non tanto per le impurità del materiale, quanto per la diffusione di Rayleigh nella matrice vetrosa.

Questa rapida evoluzione determinò il successo e la diffusione di questa tecnologia, portandola ad essere la protagonista delle telecomunicazioni moderne.

CAPITOLO 2: FIBRA OTTICA IN VETRO

2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il concetto che sta alla base delle fibre ottiche è il confinamento della luce attraverso sottili barre dielettriche realizzate in vetro o in plastica, realizzato grazie al fenomeno della riflessione totale. Per spiegarlo, andiamo ad analizzare l'incidenza obliqua di un'onda piana tra due mezzi con parametri costruttivi differenti (ϵ, μ).

Quando un'onda incide su una superficie, viene in parte rifratta nel materiale, generando l'onda rifratta, in parte riflessa, generando l'onda riflessa.

Per ogni onda introduciamo il vettore d'onda $\vec{k} = k\hat{k}$, con modulo pari a k , il numero d'onda (reciproco della lunghezza d'onda), direzione e verso nella direzione di propagazione pari al versore \hat{k} . Ogni punto del fronte d'onda è identificato da un vettore posizione $\vec{r} = x\hat{u}_x + y\hat{u}_y + z\hat{u}_z$.

Una volta che l'onda incide sulla superficie, coesistono l'onda incidente E_i , l'onda riflessa E_r e l'onda trasmessa E_t : la componente che cambia è il numero d'onda k , poiché varia la velocità dell'onda nel passaggio da un materiale ad un altro, da cui la dipendenza intrinseca tra le tre onde.

In ogni punto di incidenza deve esserci continuità, quindi le onde devono avere la stessa fase:

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad (1.1)$$

Introduciamo un sistema di riferimento Cartesiano con origine O sulla superficie, asse z normale alla superficie, asse y sulla superficie tale che il vettore d'onda della radiazione incidente (k_i) giaccia sul piano yz e formi con l'asse x una terna levogira O_{xyz} .

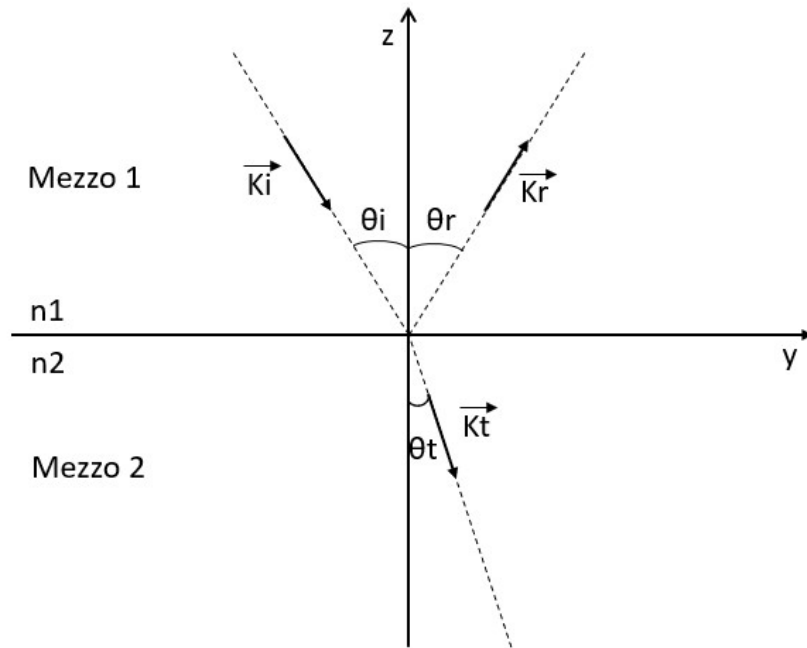


Figura 2.1: Piano di riferimento xyz

Nel punto di Incidenza, i vettori sono espressi come:

- $\vec{k}_i = (0, k_{iy}, k_{iz})$
- $\vec{k}_r = (k_{rx}, k_{ry}, k_{rz})$
- $\vec{k}_t = (k_{tx}, k_{ty}, k_{tz})$

Considerando la condizione di continuità abbiamo che:

$$k_{iy} y = k_{rx} x + k_{ry} y = k_{tx} x + k_{ty} y \quad (1.2)$$

che può essere valida solo se $k_{ix} = k_{rx} = k_{tx} = 0$ e $k_{iy} = k_{ry} = k_{ty}$.

Quindi onda riflessa e trasmessa non hanno componente x e giacciono sullo stesso piano yz dell'onda incidente.

I vettori d'onda formano con il piano z gli angoli $\theta_i, \theta_r, \theta_t$ per cui la condizione di continuità diventa:

$$k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r = k_t \sin \theta_t \quad (1.3)$$

Le onde incidente e riflessa si propagano nello stesso mezzo con indice di rifrazione n_1 e velocità v_1 , mentre l'onda rifratta si propaga nel mezzo con indice di rifrazione n_2 e velocità v_2 .

Quindi $k_i = k_r = w/v_1$ e $k_t = w/v_2$.

La relazione tra onda incidente e onda riflessa è la seguente:

$$\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_r, \theta_i = \theta_r \quad (1.4)$$

La relazione tra onda incidente e onda rifratta è invece:

$$\text{sen}\theta_i / v_1 = \text{sen}\theta_t / v_2, \text{sen}\theta_i / \text{sen}\theta_t = v_1 / v_2 \quad (1.5)$$

Ricordando che l'indice di rifrazione del mezzo è uguale al rapporto tra la velocità della luce e la velocità dell'onda nel mezzo $n = c/v$, ricaviamo la relazione tra angoli di incidenza e rifrazione:

$$\text{sen}\theta_i / \text{sen}\theta_t = n_2 / n_1 \quad (1.6)$$

Le equazioni ricavate $\theta_i = \theta_r$, $n_1 * \text{sen}\theta_i = n_2 * \text{sen}\theta_t$, sono note come Leggi di Snell.

Se il passaggio avviene da un mezzo con indice di rifrazione più basso ad uno con indice di rifrazione più alto $n_1 < n_2$ allora:

$$\text{sen}\theta_t = n_1 / n_2 * \text{sen}\theta_i < \text{sen}\theta_i \rightarrow \theta_t < \theta_i \quad (1.7)$$

Viceversa, se $n_1 > n_2$ allora $\theta_t > \theta_i$; in quest'ultimo caso, l'angolo di rifrazione non può superare $\pi/2$. Tale angolo si può ottenere se:

$$\theta_i = \sin^{-1}(n_2 / n_1) \quad (1.8)$$

Questo è detto angolo limite, oltre il quale non c'è rifrazione e l'onda viene completamente riflessa, rimanendo confinata all'interno del mezzo 1: questo è il fenomeno della riflessione totale, che permette di confinare il segnale all'interno della fibra.

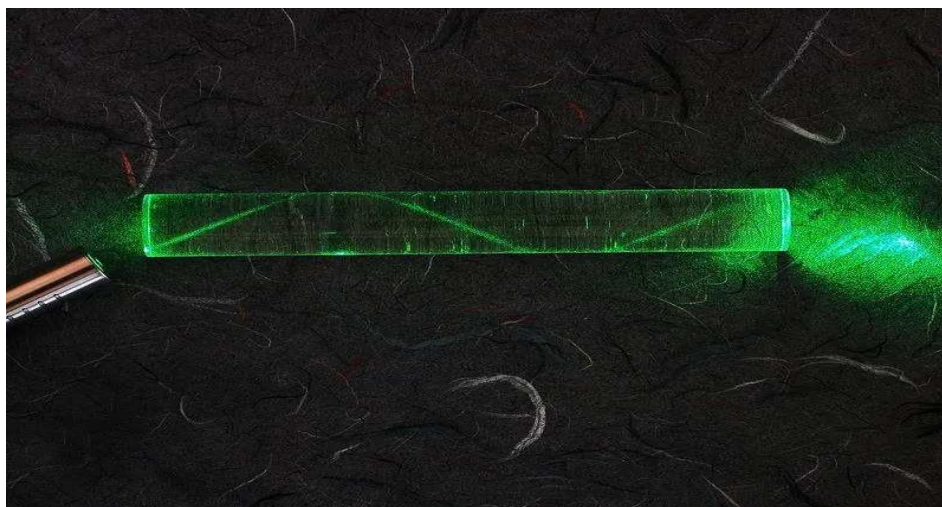


Figura 2.1: Raggio confinato per riflessione totale all'interno di un cilindro in plexiglass

2.2 STRUTTURA PRODUZIONE E PARAMETRI FONDAMENTALI

La fibra ottica è composta da due strati coassiali di materiale trasparente, realizzati in silice drogata: lo strato cilindrico interno detto nucleo o *core*, presenta un diametro che va da qualche decina fino a 100 μm (dipende dalla tipologia di fibra) e indice di rifrazione maggiore per sfruttare il fenomeno della riflessione totale, mentre lo strato di rivestimento, detto mantello o *cladding*, ha diametro che va da 125 a 700 μm .

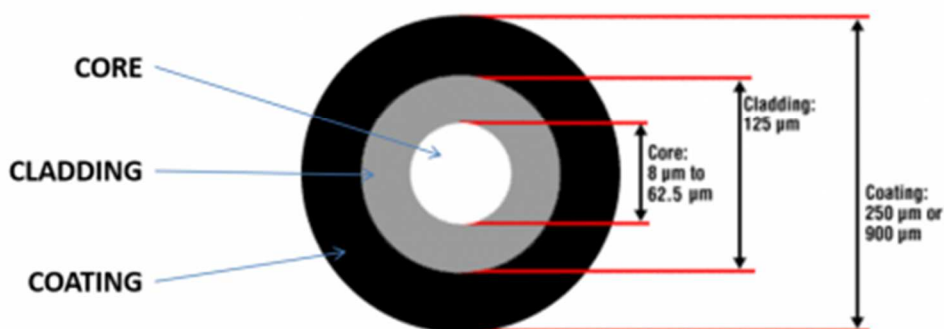


Figura 2.2: Sezione della fibra ottica

Nella pratica, nucleo e mantello sono rivestiti con una guaina di resina dura (*buffer coating*), inglobata in una tampone aggiuntivo (*buffer coalayer*) fatto di tessuto aramidico o di kevlar, ulteriormente circondato da un rivestimento finale (*jacket layer*) costituito da materiale plastico; questi stati aggiuntivi garantiscono una maggiore resistenza meccanica e non vanno a migliorare le proprietà di guida d'onda ottica.

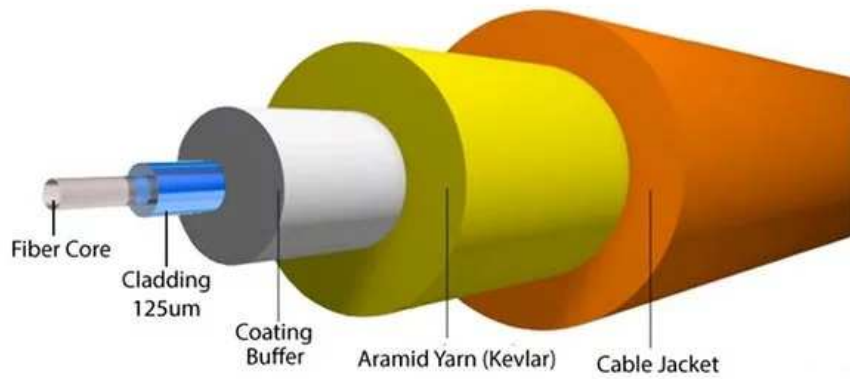


Figura 2.3: Rivestimenti esterni

2.3 PARAMETRI FONDAMENTALI

Indipendentemente dal tipo, ogni fibra è caratterizzata da alcune grandezze che ne definiscono le proprietà fondamentali.

1. Angolo di accettazione

È l'angolo massimo per cui la condizione di riflessione totale viene soddisfatta:

$$\theta_i = \arcsin(n_2/n_1) \quad (2.1)$$

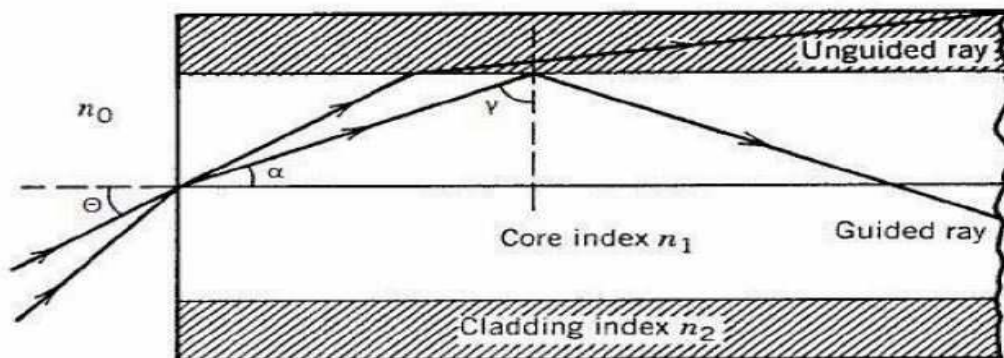


Figura 2.1: Angolo di accettazione

Nella figura θ 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 γ è maggiore di un angolo critico γ_{MAX} definito in base alla legge di Snell:

$$\sin \gamma_{MAX} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

In tal caso, il raggio viene totalmente riflesso all'interno del nucleo permettendo così il confinamento della luce nella fibra ottica e, fruttando semplici relazioni dell'ottica geometrica, è possibile trovare il massimo angolo che la luce può formare all'ingresso della fibra per rimanere confinata all'interno del nucleo:

$$n_0 \sin \theta_{max} = n_1 \cos \gamma_{max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.3)$$

È possibile definire un cono di accettazione, che avrà come vertice il centro della faccia di ingresso della fibra e come angolo al vertice l'angolo di accettazione: i raggi che attraversano il cono ed entrano nella fibra vengono riflessi totalmente all'interno del nucleo mentre quelli che non attraversano il cono ma entrano nella fibra verranno rifratti all'interno del mantello.

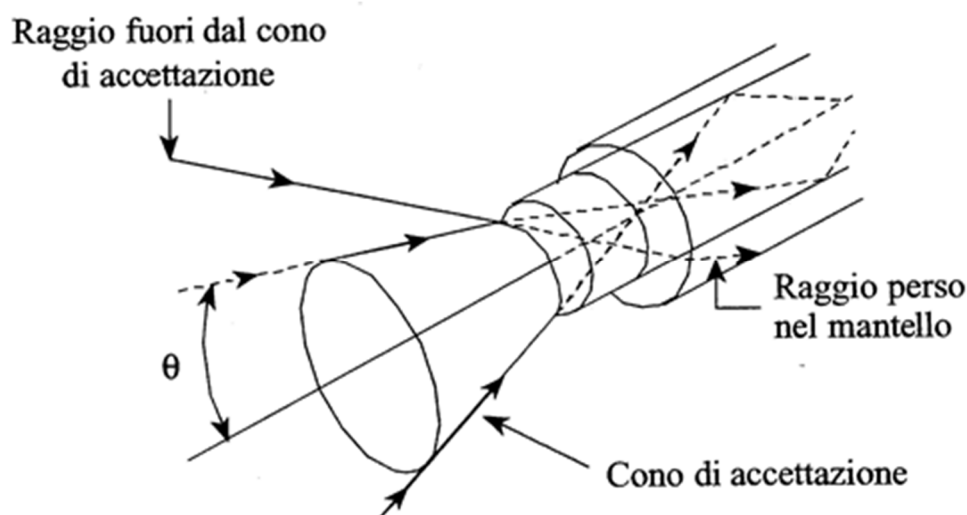


Figura 2.2: Cono di accettazione

2. Apertura numerica

Spesso non viene fornito l'angolo di accettazione (θ_α) ma una quantità ad esso legata che viene indicata come apertura numerica (o semplicemente apertura) definita da:

$$NA = \sin \theta_\alpha = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.4)$$

Risulta evidente che maggiore è NA, più semplice è accoppiare efficientemente una sorgente luminosa alla fibra, in quanto è più ampio il cono di accettazione. Per identificare univocamente i valori di n_1 e n_2 che realizzano una certa apertura numerica, nota quest'ultima, si utilizza un parametro che prende il nome di variazione percentuale dell'indice di rifrazione definito come:

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (2.5)$$

È facile, allora, rendersi conto che se $n_1 \approx n_2$, ovvero se $\Delta \ll 1$, si ottiene anche: $NA \approx n_1(2\Delta)^{1/2}$ e, quindi, più grande è la differenza tra n_1 e n_2 , maggiore sarà la variazione Δ e la NA. Una tipica fibra multimodale con core di raggio $25\mu\text{m}$ e indice di rifrazione del core $n_1 = 1,465$ e cladding $n_2 = 1,450$ ha $\Delta = 0,010$.

3. Attenuazione della potenza

È il rapporto tra la potenza del segnale all'uscita rispetto a quello in entrata dovuto alle attenuazioni del mezzo e viene espresso in dB poiché, nella pratica, la potenza d'ingresso diminuisce esponenzialmente rispetto a quella di uscita.

Data P_1 , potenza in ingresso, e P_2 , potenza in uscita, la perdita di potenza α è:

$$\alpha = 10 \log_{10}(P_1/P_2) \quad (2.6)$$

Spesso viene indicato il valore in dB/km, andando a normalizzare l'attenzione totale rispetto alla lunghezza della fibra.

Esempio: si supponga che la potenza di lancio sia 5mW e quella di uscita $30\mu\text{W}$ dopo aver attraversato 40km di fibra ottica e si voglia determinare l'attenuazione totale della fibra.

Sostituendo nella formula otteniamo: $\alpha = 10 \log_{10}(5/0,03) = 22,21\text{dB}$; divido per 40km si ottengono $0,56 \text{ dB/km}$. Ogni chilometro percorso, la potenza del segnale in ingresso diminuisce di $0,56\text{dB}$.

4. Larghezza di banda (MHz*km)

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

5. Diametro del nucleo (μm)

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

2.5 TIPOLOGIE DI FIBRE OTTICHE

La classificazione delle fibre ottiche è realizzata sulla base dei modi di propagazione della radiazione luminosa lungo di esse e delle variazioni dell'indice di rifrazione all'interno del *core*.

Questi due aspetti fondamentali permettono di definire tre tipologie nominali di fibre ottiche:

- Fibre monomodali step-index;
- Fibre multimodali step-index;
- Fibre multimodali graded-index.

Segue una trattazione sui modi di propagazione e sulle tre famiglie sopra elencate.

2.5.1 Modi di propagazione

Consideriamo la fibra ottica come una struttura dielettrica spazialmente disomogenea che limita la regione spaziale in cui la luce può propagarsi in due sole direzioni in modo tale da guidarla lungo la lunghezza della fibra. Avendo a che fare con una radiazione elettromagnetica, la fibra contiene i vettori del campo elettrico e del campo magnetico ed è possibile definire i modi come campi che mantengono la stessa distribuzione trasversale e la stessa polarizzazione a tutte le distanze lungo la guida d'onda. I principi dell'ottica geometrica perdono di validità quando si verificano degli effetti dovuti alle piccole dimensioni, dove l'energia si propaga secondo diversi modi, definiti dalla meccanica quantistica e per poterli ricavare è necessario risolvere alcune equazioni di Maxwell.

Nonostante quando definito sopra, è possibile presentare delle immediate considerazioni:

- I modi di ordine basso, quelli con angolo di accettazione inferiore all'angolo limite, sono concentrati vicino al centro della fibra mentre i modi di ordine superiore sono distribuiti verso l'esterno;
- nell'ipotesi in cui la differenza tra indici di rifrazione del core e del *cladding* sia molto inferiore all'unità è necessario considerare solo quattro componenti del campo (il modo fondamentale ne ha due), chiamati modi a polarizzazione lineare;
- l'accoppiamento delle modalità nel *core* e nel *cladding* che si propagano lungo la fibra si traducono in una perdita di potenza dei modi correnti nel *core*;
- è presente una terza categoria di modalità chiamata modo *leaky* nella quale l'energia fuoriesce gradualmente dalla guida mentre il segnale la percorre, producendo attenuazione.

Una guida d'onda con piccola estensione spaziale trasversale e una piccola differenza di indice di rifrazione tra *core* e *cladding*, cui corrisponde una piccola apertura numerica, è in grado di guidare un singolo modo trasversale e nessun modo di ordine superiore, per questo prendono il nome di monomodali, mentre le fibre multimodali supportano diverse modalità guidate; ogni modalità guidata rappresenta diversi fenomeni con impatti significativi nella scelta e nell'uso della fibra ottica come la perdita di propagazione e la dispersione cromatica.

Una modalità resta guidata all'interno della fibra finché β , coefficiente di fase della guida d'onda, soddisfa la condizione

$$n_2 k < \beta < n_1 k \text{ con } k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.7)$$

dove n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione del *core* e del *cladding* e λ la lunghezza d'onda della radiazione luminosa; il confine tra la modalità guidata e la modalità *leaky*, di perdita, è definito dalle condizioni di taglio:

$$\beta_{CUT-OFF} = n_2 k \quad (2.8)$$

Un parametro fondamentale per la definizione dei possibili percorsi che una radiazione luminosa può instaurare in una fibra ottica è la frequenza normalizzata V , definita dalla seguente relazione:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.9)$$

Se V assume valori uguali od inferiori a 2.405 la propagazione può avvenire solo in un modo, altrimenti si tratterà di fibre multimodali. Sfruttando la formula, è possibile ricavare il valore limite

del diametro di una fibra, per distinguerla da monomodale a multimodale; in particolare, una fibra *step index* ad una fissata lunghezza d'onda sarà a singolo modo se il valore della relazione risulterà uguale od inferiore a 2.405:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \leq 2.405 \quad (2.10)$$

da cui:

$$a \leq \frac{2.405\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{2\Delta}} \quad (\text{monomodale}) \quad a > \frac{2.405\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{2\Delta}} \quad (\text{multimodale}) \quad (2.11)$$

Esempio 1: si supponga di voler determinare il numero dei modi possibili in una fibra ottica con raggio del *core* $a = 4.2\mu\text{m}$, operante a 1300nm e avente indice di rifrazione $n_1 = 1.447$, $\Delta = 0.003$:

$$V = \frac{2\pi}{1.3\mu\text{m}} \times 4.2 \times 1.447 \times \sqrt{2 \times 0.003} \approx 2.275 \quad (2.12)$$

Il valore è inferiore a 2.405, quindi la fibra può assicurare un solo modo.

Esempio 2: se si dispone di una fibra ottica che opera a 1550nm con indice di rifrazione $n_1 = 1.5$ e si voglia verificare il diametro del *core* della fibra “step-index” per assicurare il funzionamento monomodale, il procedimento sarà:

$$a \leq \frac{2.405\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{2\Delta}} \quad \text{da cui} \quad a \leq \frac{2.405 \times 1.55}{2\pi \times 1.5 \times \sqrt{2 \times 0.003}} \leq 5.1 \mu\text{m} \quad (2.13)$$

Pertanto, affinché la fibra sia monomodale il suo diametro dovrà essere uguale od inferiore a $10.2 \mu\text{m}$.

La frequenza normalizzata V può essere sfruttata anche per esprimere il numero M di modi che si possono propagare in una fibra multimodale secondo la relazione:

$$M \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (2.14)$$

Riepilogando, il numero di modalità che possono esistere in una guida d'onda ottica in funzione di V può essere rappresentato nei termini di una costante di propagazione b definita come:

$$b = \frac{a^2 w^2}{V^2} = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.15)$$

Dove $w^2 = \beta^2 - k^2$, con $k^2 = 2\pi n_2/\lambda$ e scegliendo opportunamente i valori di a , n_1 e n_2 e sarà:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \leq 2.405 \quad (2.16)$$

Una fibra Step-index è una fibra con indice a gradino in cui esiste un indice di rifrazione uniforme all'interno del nucleo e un indice di rifrazione fortemente ridotto nell'interfaccia *core/cladding* a causa dell'indice di rifrazione inferiore nel *cladding*. Per le fibre multimodali, in cui la propagazione della radiazione luminosa avviene in molteplici fasci a lunghezze d'onda differenti, la variazione a gradino dell'indice di rifrazione fa sì che la luce si propaghi a zig-zag lungo l'asse fibra/*core* secondo il principio della riflessione totale. La luce che entra nella fibra con angoli di incidenza diversi percorre percorsi diversi e i raggi si propagano tutti alla stessa velocità, ma arriveranno in uscita in tempi diversi e daranno luogo a una dispersione temporale chiamata dispersione modale.

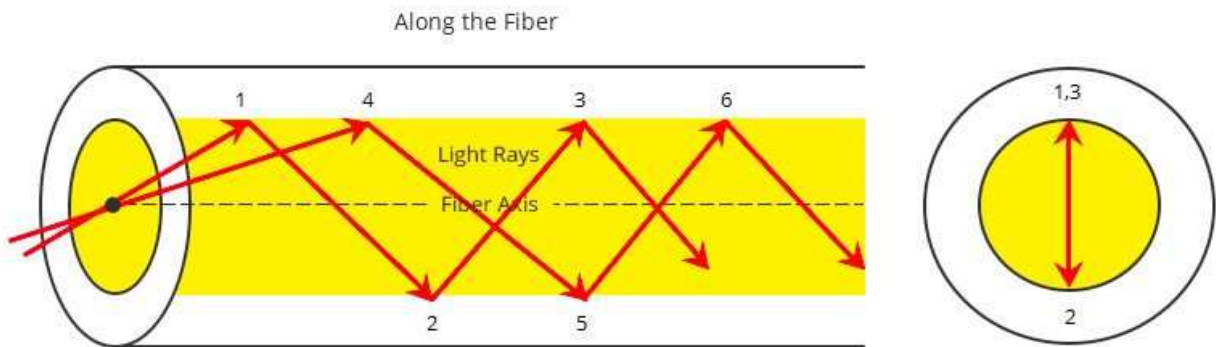


Figura 2.3: Propagazione dei raggi in una fibra

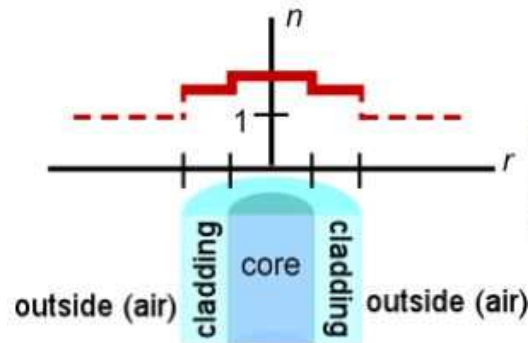


Figura 2.4: Variazione dell'indice di rifrazione

A causa dell'alta dispersione e delle perdite di potenza introdotte alla radiazione, questo tipo di fibra non trova grande applicazione: l'attenuazione si attesta intorno ai 5dB/km con larghezze di banda di 500MHz*km alla lunghezza d'onda di 820nm.

Poiché le comunicazioni digitali utilizzano impulsi di luce per trasmettere segnali lungo la fibra, la dispersione modale fa sì che gli impulsi si allarghino notevolmente e si disperdano quando viaggiano lungo la fibra.

Nei sistemi digitali in fibra ottica, quando la dispersione è elevata, gli impulsi si sovrappongono l'uno all'altro, causando interferenze intersimbolo (ISI) e aumentando il tasso di errore di bit (BER); la dispersione della fibra non solo influisce sulla capacità di trasmissione, ma limita anche la distanza di trasmissione dei sistemi di comunicazione in fibra ottica. A causa di questa limitazione, la fibra multimodale step-index viene normalmente utilizzata nei sistemi di comunicazione a breve distanza (entro pochi chilometri) e a bassa velocità (8 Mb/s o meno) con un costo relativamente limitato. Tuttavia, le cose cambiano nelle fibre monomodali step-index, in quanto la dispersione modale risulta molto ridotta, con un impatto minore sulla distanza di trasmissione.

Nella foto una fibra step-index con diametro del nucleo di $62\ \mu\text{m}$, è rivestita da un altro strato trasparente di spessore di $125\ \mu\text{m}$; il successivo è un rivestimento protettivo bianco di materiale plastico che aumenta la robustezza meccanica; l'ultimo rivestimento, di colore arancione, protegge la fibra dagli effetti ambientali ed è di materiale atossico e ignifugo.

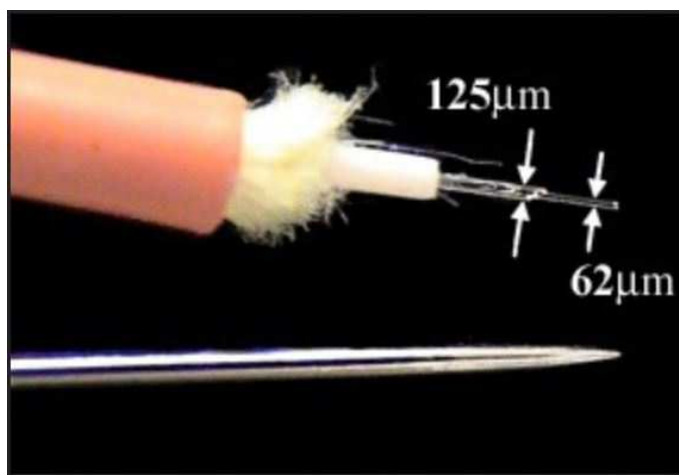


Figura 2.5: Fibra ottica a confronto con un ago da cucito

2.5.3 Fibre Graded-Index

A differenza delle fibre precedenti il *core* delle *Graded-Index*, pur mantenendosi largo, possiede un indice di rifrazione che, partendo dal valore del *cladding* n_2 varia gradualmente fino ad un valore massimo n_1 come illustrato nella figura sotto.

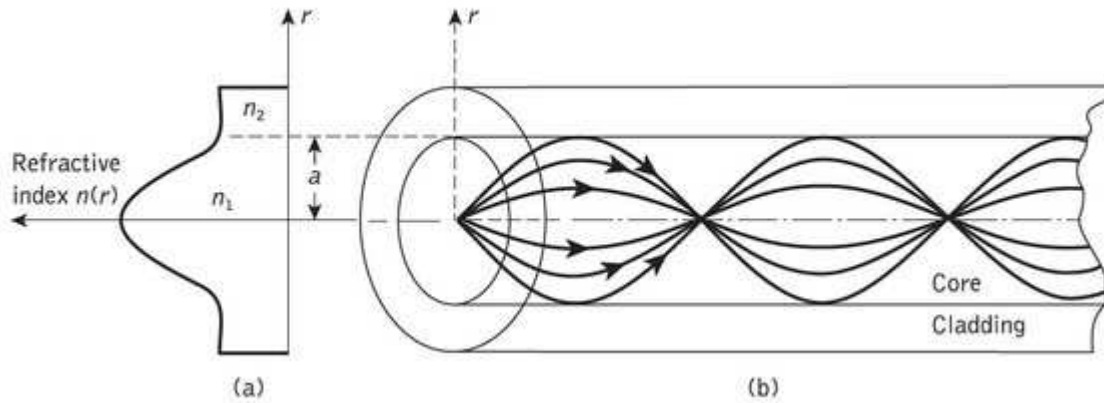


Figura 2.6: Propagazione dei raggi in una fibra multimodo

I raggi non subiscono nette riflessioni, ma vengono incurvati dalla variazione dell'indice n_1 ed è possibile esprimere il profilo dell'indice di rifrazione che si esplicita con una espressione matematica approssimata, in funzione del raggio ρ della fibra, che parte dal centro del cilindro fino al rivestimento esterno.

Si ha:

$$n(\rho) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{\rho}{a}\right)^\alpha} \text{ per } \rho \leq a \text{ e } n(\rho) = n_2 \text{ per } \rho > a \quad (2.17)$$

dove a è il raggio del nucleo e α è un parametro definito in sede di lavorazione.

Si può dimostrare che le fibre a profilo α presentano un ritardo differenziale minimo pari a:

$$\Delta t = \frac{n_1^2 L}{8c} \text{ per } \alpha = 2(1 - \Delta) \cong 2, \text{ motivo per cui si sceglie il profilo parabolico} \quad (2.18)$$

mentre la capacità di trasmissione risulta essere:

$$\delta = \frac{8c}{n_1\Delta} \text{ con valori tipici intorno ai } 4 \text{ GBit/s/km} \quad (2.19)$$

Considerando fibre multimodali, la variazione graduale dell'indice di rifrazione permette di risolvere il problema della dispersione modale e controllare la velocità dei raggi luminosi in modo da ottenere lo stesso ritardo per tutti i raggi e farli giungere all'uscita nello stesso momento.

L'effetto che si ottiene è che tutti i modi di propagazione assumono percorsi elicoidali, non più rettilinei: i raggi si riflettono allontanandosi dall'asse del core, passando da un mezzo più denso ad uno meno denso, così i raggi che compiono percorsi più lunghi passano in un mezzo con indice di rifrazione minore e quindi con velocità più alta, mentre quelli che si avvicinano maggiormente all'asse viaggiano in un mezzo con indice di rifrazione maggiore e quindi con velocità più bassa. I percorsi più lunghi vengono compensati da velocità di propagazione maggiori, mentre i percorsi più brevi saranno compensati da velocità minori e l'effetto risultante è l'arrivo contemporaneo di tutti i modi.

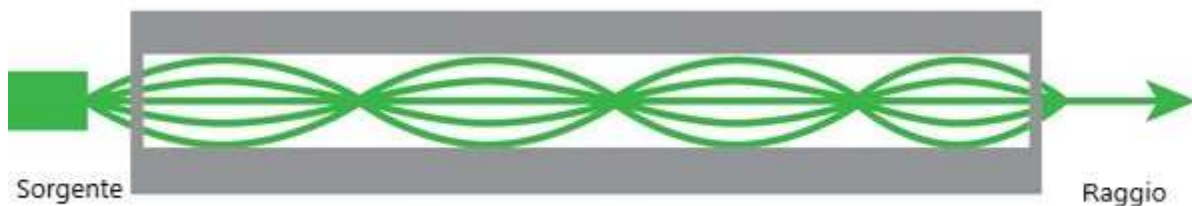


Figura 2.13: Schema di propagazione nella fibra multimodale graded-index

Sebbene la fibra multimodale abbia limiti di distanza, presenta comunque diversi vantaggi: può supportare più protocolli di trasferimento dati, inclusi i protocolli Ethernet, Infiniband e Internet, la potenza totale dei segnali non comporta quasi nessuna perdita e, per questo, la fibra multimodale risulta economica e più facile da utilizzare con altri componenti ottici come adattatori per fibra ottica o vari connettori, senza tralasciare che i cavi patch multimodali sono meno costosi da utilizzare, installare e mantenere.

Caratteristica	Step-index	Graded-index
<i>Diametro del core</i>	50-200 μ m	50 μ m
<i>Larghezza di banda</i>	Bassa	Alta
<i>Applicazioni</i>	Corte distanze e sistemi a bassa velocità (8Mb/s)	Medie distanze e sistemi ad alta velocità (34-140Mb/s)
<i>Modulo trasmissione dati</i>	La luce si propaga a “zig-zag” lungo l’asse del core	La luce percorre la fibra sotto forma di oscillazione elicoidale
<i>Dispersione modale</i>	Influenza la capacità di trasmissione e limita la distanza di trasmissione	Dispersione notevolmente ridotta con maggiore larghezza di banda
<i>Costo</i>	Moderato	Elevato

Tabella 2.1: Confronto tra fibre multimodo Step-index e Graded-index

2.5.4 Fibre Monomodali

I cavi in fibra ottica monomodale hanno un nucleo dalle ridotte dimensioni, tipicamente 8 μ m - 11 μ m, comparabili con le lunghezze d’onda.

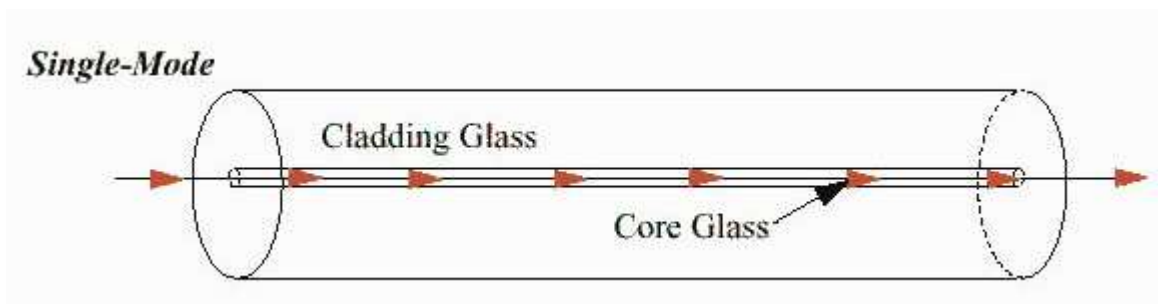


Figura 2.7: Propagazione del raggio in una fibra monomodale

La fibra monomodale viene utilizzata per collegamenti di rete a lungo raggio con elevate larghezza di banda (supporta mediamente distanze di circa 80km senza necessità di amplificatori) realizzati sia in ambito metropolitano sia su reti di *backbone* per collegamenti nazionali o trans-nazionali.

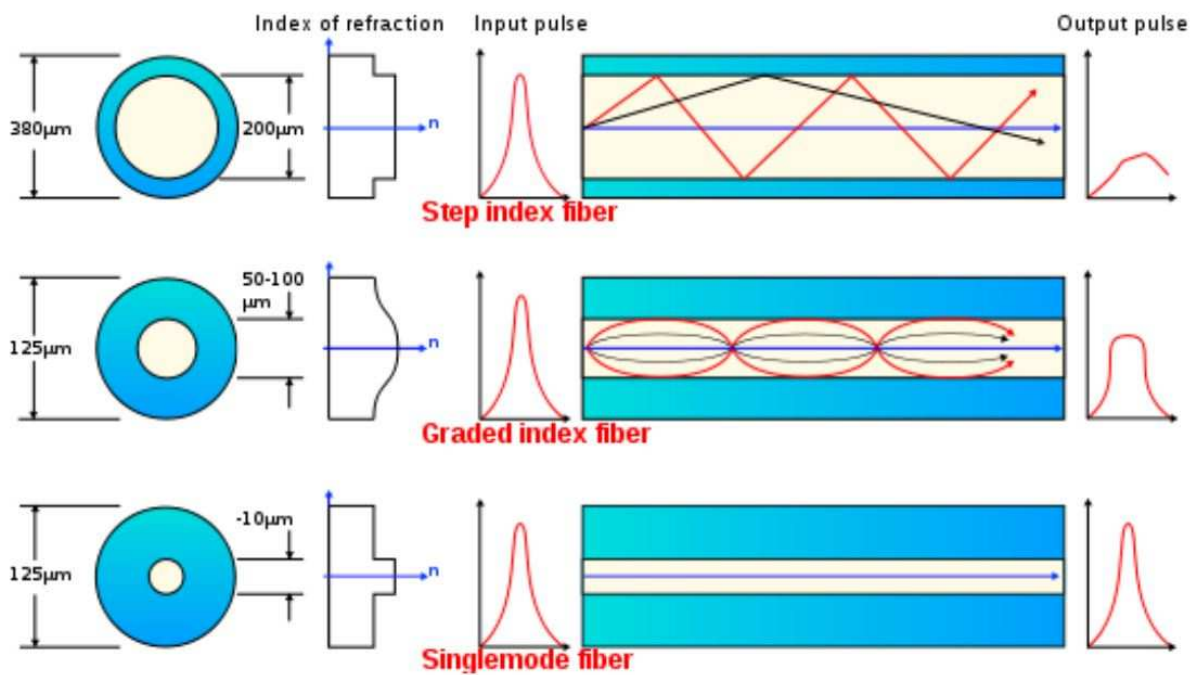


Figura 2.8: Confronto tra fibre monomodali e multimodali

CAPITOLO 3: LE FIBRE OTTICHE PLASTICHE

La POF (Polymer Optical Fiber) o fibra ottica plastica, è una struttura adatta alla trasmissione dei segnali luminosi, avente core e cladding di materiale polimerico, tradizionalmente PMMA (Polimetilmetacrilato), introdotto a partire dagli anni '60 del Novecento dalla multinazionale della chimica DuPont.

Relegate per anni all'impiego in poche applicazioni a basse velocità di trasmissione e su distanze molto brevi, negli ultimi anni lo sviluppo di nuove tecnologie di produzione, avvenuto in particolare in Giappone, ha portato le POF alla ribalta come buona alternativa, a basso costo, alla tradizionale fibra di vetro o ai collegamenti metallici di rame, spingendosi fino alla distanza di qualche chilometro e, per il momento solo in ambito sperimentale, a raggiungere velocità fino a 40Gbps a 200 metri.

Lo sviluppo tecnologico degli emettitori, dei connettori e della composizione delle stesse fibre hanno permesso il miglioramento complessivo delle prestazioni in termini di attenuazione lineare e di larghezza di banda disponibile, rendendo la posa della fibra plastica interessante in alcuni ambiti di installazione unitamente alla crescita dei collegamenti ottici ad alta velocità per reti LAN di piccola estensione.

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, e per questo vengono denominate PMMA oppure GI-POF, detta anche PFVBE, termini che verranno spiegati in seguito, mentre la guaina utilizzata per la protezione è più sottile di quella di vetro; il principio che sta alla base del funzionamento è analogo a quello delle fibre ottiche in vetro, ma presentano alcune differenze: il diametro del nucleo della fibra plastica è compreso tra 125 e 1880 μm , quindi molto maggiore rispetto a quello di una fibra ottica di vetro mentre il suo mantello ha un diametro compreso tra 1250 e 2000 μm .

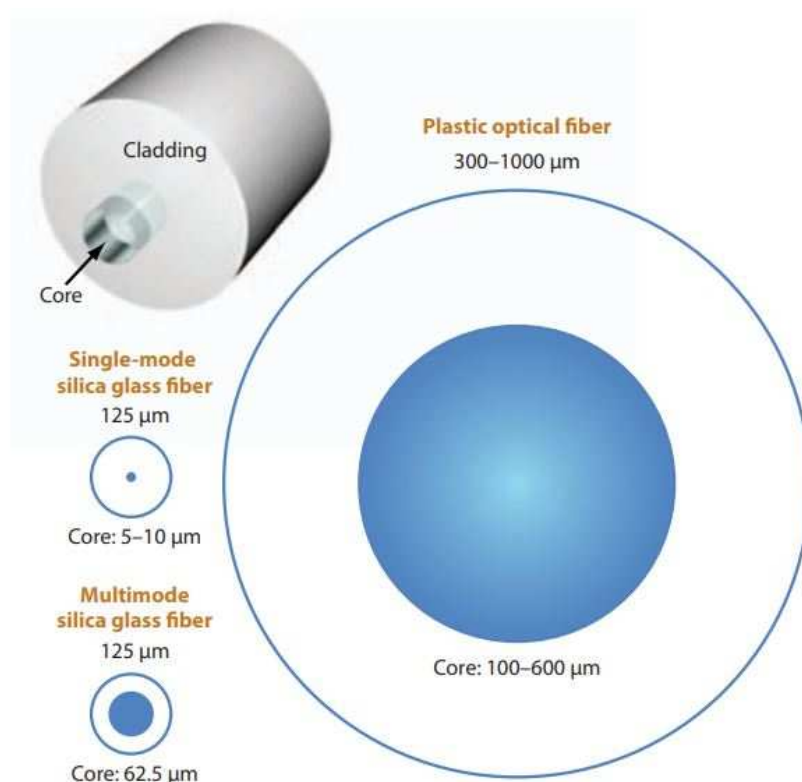


Figura 3.1: Confronto dimensionale tra fibre in vetro e fibre plastiche

I motivi di tale differenza, prescindendo per un momento dal processo produttivo, si intuiscono considerando un requisito fondamentale della fibra ottica che è la flessibilità, indispensabile per poterne permettere la posa nel terreno e negli edifici; infatti 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 μm 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.

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 (verde e rossa), attenuazione che nelle POF è molto elevata, arrivando anche a 1000dB/km per una lunghezza d'onda di 0,65 μm.

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 necessarie soluzioni 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.

Segue una panoramica sui tipi di fibre ottiche plastiche e sui metodi di produzione, per poi analizzare le caratteristiche fondamentali.

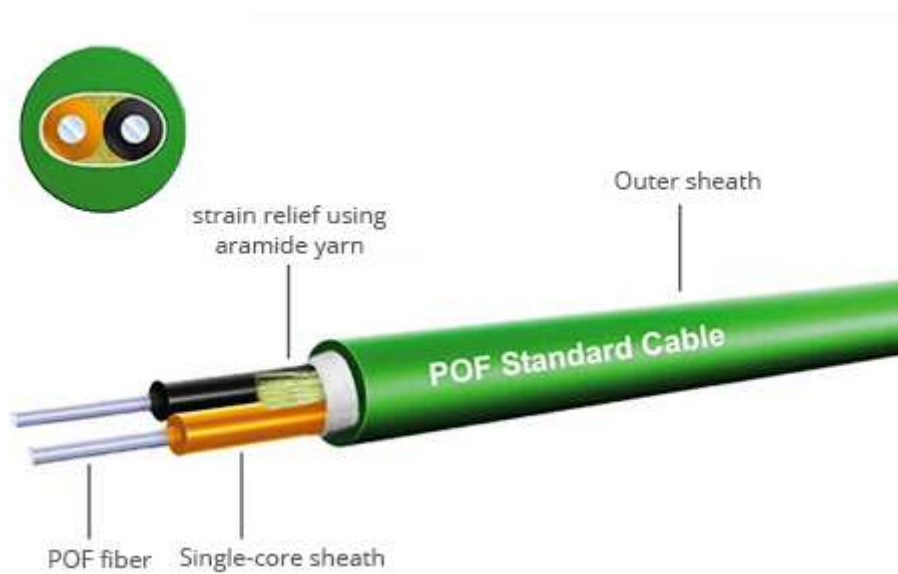


Figura 3.2: Esempio di cavo in fibra ottica plastica

3.1 TIPOLOGIE DI FIBRE OTTICHE POLIMERICHE

3.1.1 Step-index PMMA

La prima fibra ottica plastica ad indice a “gradino” fu inventata nel 1966 dalla DuPont ha un diametro che arriva a 980 μ m, senza perdere flessibilità o la facilità di allineamento e presenta notevoli vantaggi di produzione e modellazione: la fibra SI POF (*Step-index plastic optical fiber*) venne introdotta nel 1975 dalla Mitsubishi Rayon, seguita dalla Asahi Chemical e dalla Toray, ma non era abbastanza trasparente per trovare largo impiego.

Per migliorarne le prestazioni, furono condotti diversi studi su: design della struttura molecolare per avere una maggiore stabilità termica, l'utilizzo di copolimeri, l'uso di polimeri reticolati; tuttavia, sono ancora presenti delle limitazioni come la dispersione modale causata dal largo diametro, che comporta un drastico calo della larghezza di banda.

Le fibre POF sono normalmente realizzate in PMMA, Polimetil metacrilato, un polimero sintetico del metilmetacrilato, spesso definito con il marchio commerciale Plexiglas e costituisce il *core* che, in questo tipo di fibre, rappresenta il 96% della sezione trasversale, mentre il materiale impiegato per il *cladding* è composto da polimeri fluorurati o miscele di copolimeri come il vinilidene fluoruro esafluoropropene o trifluoroetilene che introducono indici di rifrazione variabili.

Sono caratterizzate da una elevata dispersione modale e funzionamento con emettitori ottici a 530nm o 650nm, operano quindi nello spettro della luce visibile, poiché alle tipiche lunghezze d'onda dell'infrarosso, 850nm o 1300nm, presentano un'elevata attenuazione tale da non giustificarne l'impiego; per questi motivi sono impiegate per applicazioni a basse prestazioni con velocità inferiori a 100Mbps su distanze molto brevi e comunque inferiori ai 100metri.

Caratteristiche principali:

1. Perdita di attenuazione di circa 250dB/km@650nm;
2. Indice di rifrazione del *core* compreso tra 1,490 e 1,590;
3. Indice di rifrazione del *cladding* in resina siliconica di circa 1,460;
4. Apertura numerica di circa 0,50;
5. Elevata flessibilità meccanica
6. La POF *step-index* standard IEC 60793-2-40 A4a.2 ha diametro di 1mm;
7. La larghezza di banda è di circa 5MHz·km @650nm;

3.1.2 GI-POF

Sul finire degli anni '90 ha fatto la sua comparsa nel mercato delle fibre plastiche una fibra *graded-index* denominata GI-POF, realizzata con perfluorati amorfi, quindi trasparenti, seguendo un metodo costruttivo ad estrusione simile a quello impiegato per la produzione delle fibre di vetro; queste combinano una maggiore velocità di trasmissione ed una bassa attenuazione, impiegando i comuni trasmettitori a 850nm e 1300nm.

L'avvento dei polimeri perfluorati amorfi, come il poliperfluoro-butenilvinilietere, commercialmente noto come CYTOP, ha ridotto sensibilmente i limiti delle POF PMMA *step-index*, soprattutto riguardo l'attenuazione, che ha raggiunto circa 10dB/km @850nm e la velocità di trasmissione, che arriva a 10Gbps su una distanza massima di 100metri.

La disponibilità di un indice graduato permette alla GI-POF di supportare larghezze di banda 100 volte maggiori di quelle fornite dalle PMMA convenzionali, grazie all'interazione tra accoppiamento ottico in modalità alta, alla bassa dispersione del materiale e all'attenuazione differenziale.

La produzione delle GI-POF si basa sul metodo di polimerizzazione interfacciale, dove i monomeri, permeati attraverso la fase polimerica, vengono polimerizzati sequenzialmente, partendo dal legame polimero-monomero, causando l'effetto gel.

Per prima cosa viene fabbricato un tubo polimerico a partire da un monomero con indice di rifrazione n_1 , vengono aggiunti monomeri M_1 e M_2 , con rispettivi indici, in questo modo la polimerizzazione inizia attorno allo strato più interno del tubo (polimerizzazione gel-interfacciale): quando il rapporto di reattività r_{12} e r_{21} tra M_1 ed M_2 è $r_{12} > 1$ e $r_{21} < 1$, allora M_1 è polimerizzato correttamente e a mano a mano che la polimerizzazione procede attraverso il nucleo, progredisce anche M_2 , pertanto l'indice di rifrazione vicino al centro del nucleo è maggiore di quello vicino al mantello.

Le caratteristiche tipiche sono:

1. attenuazione inferiore a 60dB/km @850nm e 1300nm;
2. larghezza di banda maggiore di 300MHz*km @850nm;
3. apertura numerica 0,18-0,19;
4. perdite per macrocurvatura inferiore a 0,60dB.

Attualmente la norma IEC 60793-2-40 definisce 4 sottogruppi di fibre plastiche POF denominate A4a, A4f, A4g e A4h per supporti completamente plastici (sia *core* che *cladding*) che possono presentare profili *step-index*, *multi-step index* o *graded-index*, adatte all'impiego in tutte le apparecchiature di trasmissione ottica: grazie a quanto definito sopra, le fibre GI-POF hanno quasi

del tutto soppiantato le tradizionali PMMA, soprattutto nelle installazioni su larga scala, come reti LAN SOHO destinate ad abitazioni e piccoli uffici, esibendo una larghezza di banda paragonabile alle fibre silicee multimodali.

Tabella 3.1: Classificazione fibre ottiche plastiche secondo IEC 60793-2-40

Gruppo	A4e	A4f	A4g	A4h
Tipo	PMMA		GI-POF	
Applicazione fisica	Elettronica di consumo	di Industriali, automotive	Piccole reti LAN	Link fino a 1Gbps
Diametro esterno [mm]	750±45	490±10	490±10	250±5
Diametro core [mm]	500±30	200±10	120±10	62,5±5
Attenuazione @650nm [dB/km]	<180	<100	<100	NA
Attenuazione @850/1300nm [dB/km]	NA	<40	<33	<33
Larghezza di banda minima @650nm [MHz*km]	20	80	80	NA
Larghezza di banda minima @850-1300nm [MHz*km]	NA	150-400	188-500	188-500

Queste fibre sono state sviluppate per ridurre l'effetto della dispersione modale, senza perderne la flessibilità ed è possibile definire l'indice di rifrazione come:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{\left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R}\right)^g\right]} & 0 \leq r \leq R \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} & R < r \end{cases} \quad (3.1)$$

Dove $n(r)$ è l'indice di rifrazione in funzione del raggio della fibra, n_1 è l'indice di rifrazione del *core*, R è il diametro del *core*, g è il coefficiente dell'indice di rifrazione, che definisce il profilo d'indice e Δ la variazione percentuale dell'indice di rifrazione.

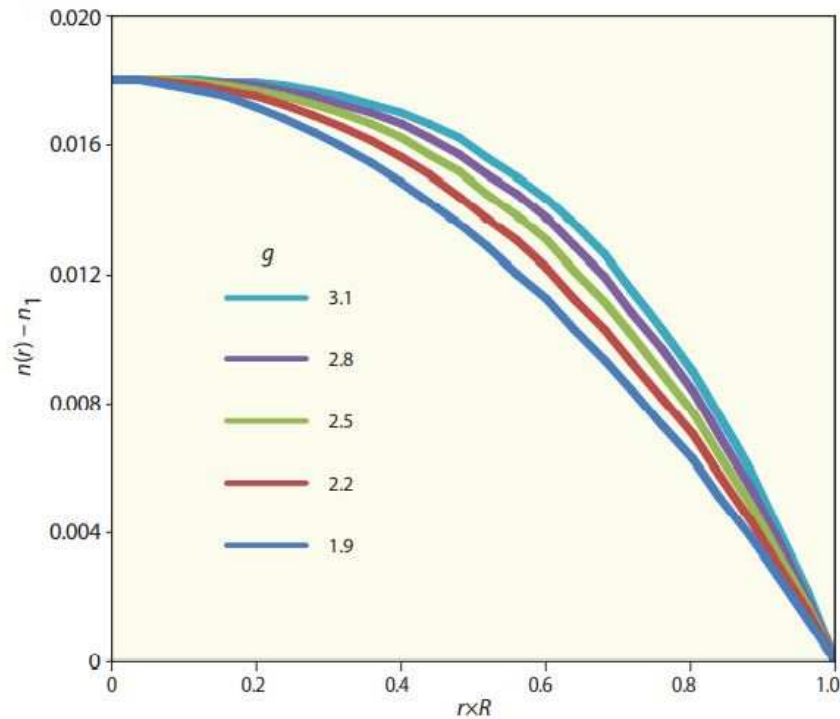


Figura 3.3: Indice di rifrazione in una GI-POF

Le proprietà della larghezza di banda delle GI POF con indice di rifrazione rappresentato dalla formula 3.1, sono state analizzate attraverso il metodo Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB). Generalmente la larghezza di banda che eccita diversi modi è influenzata dalla dispersione modale, tuttavia, una volta ridotta quest'ultima, l'influenza della dispersione del materiale non può essere ignorata, in quanto causata dalla dipendenza dell'indice di rifrazione con la lunghezza d'onda del segnale.

In linea con il metodo WKB la dispersione modale σ_{inter} , la dispersione del materiale σ_{intra} e la dispersione totale σ_{total} sono rappresentate come segue:

$$\sigma_{inter} = \frac{Ln\Delta}{2c} \frac{g}{g+1} \left(\frac{g+2}{3g+2} \right)^{1/2} \left[S_1^2 + \frac{4S_1S_2\Delta(g+1)}{2g+1} + \frac{4S_2^2\Delta^2(2g+2)^2}{(5g+2)(3g+2)} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Dove:

$$S_1 = \frac{g-2-\varepsilon}{g+2}, S_2 = \frac{3g-2-2\varepsilon}{2(g+2)}, \varepsilon = \frac{-2n_1}{n} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda}, n = n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{intra} = \frac{L\sigma_s}{\lambda} \left[\left(-\lambda^2 \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} \right)^2 - 2\lambda \frac{d^2n_1}{d\lambda^2} (n\Delta) S_1 \left(\frac{2g}{2g+2} \right) + (n\Delta)^2 \left(\frac{g-2-\varepsilon}{g+2} \right)^2 \frac{2g}{3g+2} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{inter}^2 + \sigma_{intra}^2} \quad (3.5)$$

dove σ_s è la dispersione alla lunghezza d'onda del segnale in ingresso, c è la velocità della luce, λ è la lunghezza d'onda e L la distanza. Generalmente σ_{intra} è più piccolo di σ_{inter} e quindi viene ignorato, ma quando la larghezza di banda aumenta, entrambi i fattori entrano in gioco e raggiungono i minimi assoluti rispettivamente a $g = 2.1$ e $g = 2.5$.

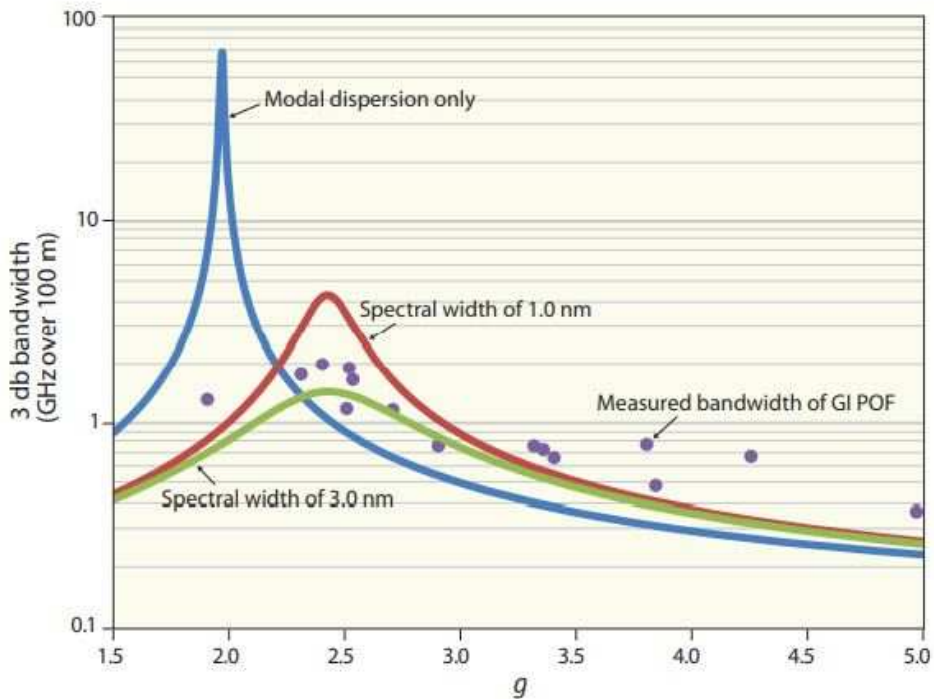


Figura 3.4: Relazione tra il coefficiente g e larghezza di banda di -3dB per una PMMA GI-POF alla lunghezza d'onda di 650nm

La figura sopra mostra la relazione tra la larghezza di banda teorica e g in una PMMA GI-POF operante alla lunghezza d'onda di 650nm. La larghezza di banda teorica è stata calcolata considerando la dispersione della sorgente luminosa a $\sigma_s = 1 \text{ nm}$ e 3 nm ed è possibile notare che questa aumenta quando si presenza un coefficiente di indice di rifrazione ottimale, arrivando ad un limite teorico attorno ai 3 GHz su 100m; d'altro canto, la larghezza di banda è molto bassa quando g non è al valore ottimale; il controllo del profilo d'indice è fondamentale per massimizzare la larghezza di banda delle GI-POF.

3.1.3 Fibre plastiche composite PCF

Le fibre PCF, *Polymer Clad Fiber*, denominate anche HCS, *Hand clad silica*, sono delle particolari fibre ottiche ibride, nelle quali è presente un nucleo di silice del diametro tipico di 200 μm ed un rivestimento in plastica con un diametro di 230 μm .

Rispetto alle fibre PMMA ed alle GI-POF, le fibre PCF offrono maggiore larghezza di banda a distanze maggiori, ma comunque inferiori ai 100Mbps a 2 chilometri, e, grazie all'alta resistenza al calore, l'elevata immunità ai disturbi elettromagnetici e alla flessibilità meccanica, sono impiegate nell'automazione industriale, nella robotica e nell'*automotive* per la comunicazione dei sistemi elettronici di bordo, nelle apparecchiature scientifiche e medicali e nelle telecomunicazioni.

Il nucleo, che arriva ad avere un diametro fino a 1000 μm , permette un'ottima efficienza di accoppiamento e semplicità nelle connessioni, rendendo possibile l'utilizzo di trasmettitori ottici con lunghezze d'onda di 650nm e 850nm; il *cladding* polimerico fornisce una maggiore resistenza meccanica e protezione dall'umidità rispetto alle fibre tradizionali mentre il rivestimento superficiale, *coating*, è tipicamente di ETFE (polimero parzialmente fluorato) oppure di acrilato.

Tabella 3.2: Confronto tra fibre POF e GOF

	POF			GOF	
<i>Tipo Core/Cladding</i>	Plastica/plastica		Vetro/Plastica	Vetro/vetro	
<i>Materiale</i>	PMMA	PERFLUORATO			
<i>Denominazione commerciale</i>	POF(A4a.2)	GI-POF(A4g)	PCF(HCS/HPCF)	OM1-5	OS1-OS2
<i>Caratteristica</i>	Step-Index	Graded-index		Graded-index	
<i>Larghezza di Banda [MHz*km]</i>	3	300-500	20	300-1500	Infinita
<i>Diametro Core [µm]</i>	250	50,62.5,120	125	62.5,50	9
<i>Diametro fibra [µm]</i>	750-100	500	600	125	125
<i>Distanza trasmissione [km]</i>	0.1	1	2	2	>200
<i>Capacità di banda [Mbps]</i>	<100	100	100	1 Gbps	>100 Gbps
<i>Attenuazione tipica [dB/km]</i>	250@650nm	<50	6	3-4	0.35-0.50
<i>Apertura numerica [NA]</i>	0.50	0.19-0.18	0.37	0.30	0.30
<i>Lunghezza d'onda [nm]</i>	530,650	650,850,1300	650,850	850,1300	1300-1650
<i>Spettro emissione</i>	Luce visibile/infrarosso			Luce infrarosso	

3.2 PROCESSI DI PRODUZIONE

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*).

3.2.1 Extruding process

Gran parte del volume di fibre ottiche plastiche prodotte nel mondo è dato da fibre multimodali 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 3.5, i materiali di partenza (monomeri, 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 ad una quota di 80% polimero e 20% monomero, viene introdotto in un estrusore a vite, dal quale la soluzione viene spinta attraverso un ugello dove 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 tramite 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.

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, una scelta che potrebbe sembrare controproducente ma, esaminando il processo a estrusione continua, il sistema risulta 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.

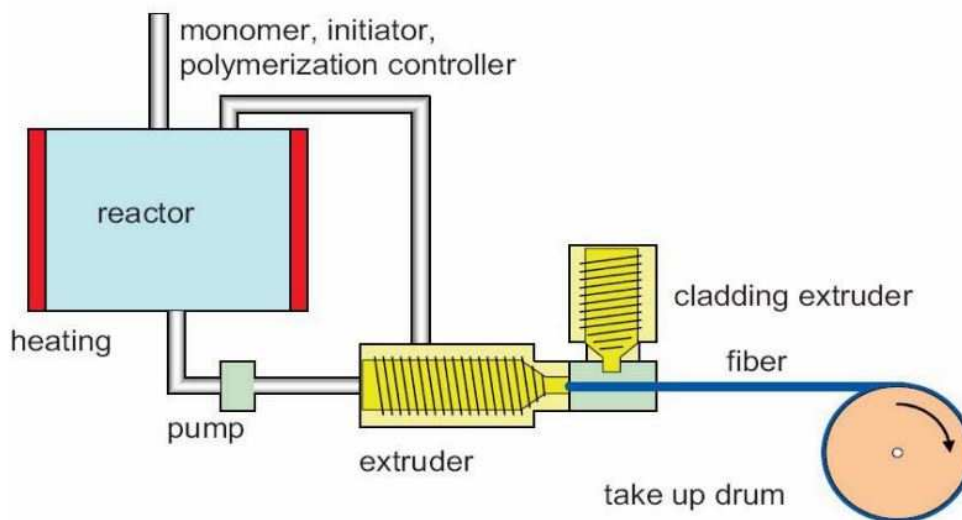


Figura 3.5: Extruding process

3.2.2 Preform drawing process

Un'altra possibilità per la produzione delle POF è il processo *preform drawing*: 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 filato 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. 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. Il 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 decine di metri al secondo) ma viene utilizzato anche per la filatura di fibra ottica plastica, anche se con minore velocità (inferiore a 0,5 m/s).

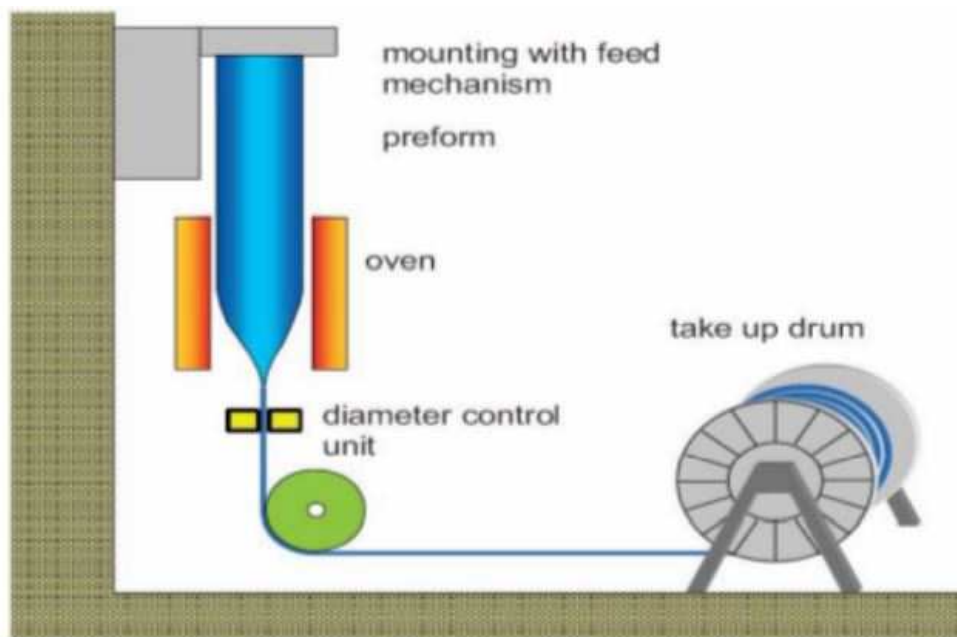


Figura 3.6: Preform drawing

3.2.3 Stampante 3D

La tecnica più utilizzata per produrre le fibre ottiche plastiche di ridotta lunghezza con la stampante 3D è la modellazione a deposizione fusa (*Fused Deposition Modeling*, FDM). La tecnica prevede che un polimero venga fatto passare attraverso un ugello riscaldato, che agisce come un estrusore, con posizione programmabile in base alle esigenze della lavorazione, per personalizzare componenti e strutture, solitamente realizzate con un materiale trasparente chiamato VeroClear, con proprietà ottiche simili al PMMA e indice di rifrazione di 1,47 alla lunghezza d'onda di 650nm.

Le prime fibre ottiche sono state realizzate con la stampante 3D grazie ad una struttura simile a quella di Figura 3.7: la preforma si forma sfruttando i fori del cilindro e per creare 10cm di preforma, la stampante 3D impiega 6 ore.

Le altre due tecniche sono: la fotopolimerizzazione che utilizza diodi emettitori di luce UV o laser per garantire maggiore qualità e flessibilità e la sintetizzazione con laser selezionato, tecnica in cui un potente laser viene utilizzato per sintetizzare le particelle o le polveri di polimero, vetro, metallo o ceramica all'interno di oggetti 3D; con queste tecniche è possibile creare POF con strutture e materiali unici, che con altri metodi risulterebbe troppo difficile e costoso costruire.

Rispetto alla fabbricazione convenzionale delle fibre ottiche, la stampa 3D consente di costruire le fibre ottiche sulla base di una progettazione basata su software con geometrie arbitrarie e materiali

selezionati: semplicemente modificando i parametri del software, è possibile progettare e fabbricare preforme ottiche con la stampa 3D e questa tecnica può essere sfruttata anche per la progettazione e la fabbricazione di circuiti ottici.

Al contrario, la produzione convenzionale richiede uno sforzo considerevole per assemblare meccanicamente i singoli filamenti di fibra ottica, fonderli e deformarli con il calore o legarli chimicamente, con conseguente aumento dei costi e delle tempistiche di realizzazione.

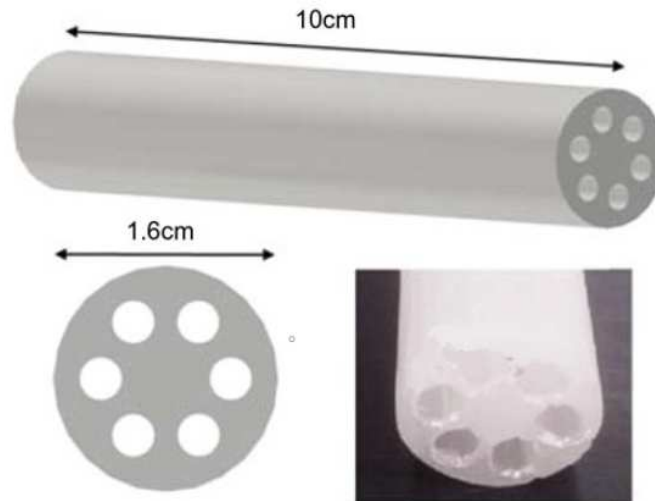


Figura 3.7: Modello 3D e stampa della preforma

3.3 DISPERSIONE DELLA LUCE NEI POLIMERI

Nonostante la possibilità di fabbricare GI-POF, il raggiungimento di una copolimerizzazione completa in un sistema contenente monomeri con diverse reattività rimane critica: monomeri non polimerizzati e strutture eterogenee causano una polimerizzazione incompleta, con conseguente influenza sulla dispersione del copolimero.

L'influenza di ogni monomero sul copolimero può essere calcolata tramite l'equazione di Mayo-Lewis:

$$y = \frac{(r_1 - w)\chi^2 + w\chi}{[w(r_2 - 1) + r_1 - 1]\chi^2 - (2r_2w - w - 1)\chi + r_2w} \quad (3.6)$$

dove y rappresenta il fattore di peso istantaneo di M_1 nel copolimero, r_1 e r_2 sono le reattività dei monomeri M_1 e M_2 : se r_2 è minore di 0.5, il monomero MMA viene consumato durante la polimerizzazione e solo M_2 compone la forma finale; in questo sistema, la struttura eterogenea con grande indice di rifrazione genera una perdita per dispersione e quindi attenuazione nelle GI-POF, che tuttavia non è così elevata.

Per analizzare il fenomeno, è possibile ricorrere al metodo di dispersione della luce di Debye, che permette di quantificare le eterogeneità di un polimero. Assumendo che la perdita per dispersione in un polimero amorfo sia:

$$V_V = V_{V^{iso}_1} + V_{V^{iso}_2} + \frac{4}{3} H_V \quad (3.7)$$

dove V_V è la dispersione della luce polarizzata, $V_{V^{iso}_1}$ denota la dispersione di fondo isotropa indipendente dall'angolo di dispersione, $V_{V^{iso}_2}$ è la dispersione isotropa che dipende dall'angolo di dispersione a causa di eterogeneità di grandi dimensioni e H_V è l'intensità di diffusione della luce depolarizzata, $V_{V^{iso}_1}$ è causata dalle fluttuazioni della densità dovute al calore ed è rappresentata dalla formula seguente:

$$V_{V^{iso}_1} = \pi^2(n^2 + 2)^2(n^2 - 1)^2 k_B T \beta(T) / (9\lambda_0^4) \quad (3.8)$$

dove n è l'indice di rifrazione, k_B la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta, λ_0 la lunghezza d'onda della sorgente luminosa nel vuoto e $\beta(T)$ la compressibilità isoterma.

È possibile scrivere la formula di Debye come:

$$V_{V^{iso}_2} = \frac{4\langle\eta^2\rangle\pi^3}{\lambda_0^4} \int_0^\infty \frac{\sin(vsr)}{vsr} r^2 \gamma(r) dr \quad (3.9)$$

con

$$v = \frac{2\pi n}{\lambda_0},$$

dove $\langle\eta^2\rangle$ rappresenta la media quadratica delle fluttuazioni di tutte le costanti dielettriche e $\gamma(r)$ rappresenta la funzione di correlazione definita da $\eta_i \eta_j / \langle\eta^2\rangle$, dove η_i e η_j sono le fluttuazioni delle costanti dielettriche alle posizioni i e j separate dalla distanza r ; $\gamma(r)$ può essere approssimata con:

$$\gamma(r) = \exp(-r/a) \quad (3.10)$$

dove a è la lunghezza di correlazione che esprime l'entità delle eterogeneità della costante dielettrica all'interno del polimero. Sostituendo la formula appena descritta nella equazione sopra e integrando si ottiene:

$$V_{V_{iso_2}} = \frac{8\pi^3 \langle \eta^2 \rangle a^3}{\lambda^4_0 (1 + v^2 s^2 a^2)^2} \text{ che descrive } (V_{V_{iso_2}})^{-1/2} \text{ in funzione di } s \quad (3.11)$$

In un sistema MMA- M_2 la lunghezza di correlazione a raggiunge 350-600 μ m e $\langle \eta^2 \rangle$ va da 6×10^{-9} a 1.5×10^{-8} per la formula di Debye, risultato che contraddice la formula di Mayo-Lewis, secondo la quale risulta essere cinque ordini di grandezza superiore a quella precedente: dopo questo risultato si intuisce che i due monomeri sono mescolati ad una densità troppo alta a causa della natura specifica della reazione di polimerizzazione nella polimerizzazione gel interfacciale. La comune diffusione dei due monomeri influenza la polimerizzazione e quindi, per formare l'indice di rifrazione desiderato senza aumentare la dispersione della luce, il metodo più efficace è quello di diffondere le molecole inattive a basso peso molecolare nel centro del nucleo attraverso il metodo di polimerizzazione gel interfacciale.

3.4 POLIMERO COMPLETAMENTE PERFLUORATO

Il materiale più usato nella fabbricazione delle POF, PMMA, è composto da diversi atomi di idrogeno: questi atomi hanno un peso atomico ridotto e il picco di assorbimento del legame C-H si può trovare nella regione della luce visibile e, per ridurre l'attenuazione, è necessario ridurre le perdite di assorbimento causate dalle vibrazioni atomiche.

Il livello di energia dell'assorbimento di una lunghezza d'onda, che mostra l'assorbimento della luce ad ogni lunghezza è espresso dalla formula seguente:

$$G(v) = v_0 \left(v + \frac{1}{2} \right) - v_0 \chi \left(v + \frac{1}{2} \right)^2 \quad (3.12)$$

dove v è un numero intero, χ la costante anarmonica e v_0 la frequenza fondamentale.

Il primo termine dell'equazione rappresenta la vibrazione armonica, mentre il secondo la vibrazione anarmonica ed è possibile esprimere la frequenza armonica come:

$$\nu_v = G(v) - G(0) = \nu_0 v - \chi \nu_0 v(v + 1) \quad (3.13)$$

con $v = 1$ abbiamo $\nu_0 = \frac{\nu_1}{1-2\chi}$.

Sostituendo l'attuale espressione di ν_0 nell'equazione 3.13 abbiamo:

$$\nu_v = \frac{\nu_1 v - \nu_1 \chi v(v + 1)}{1 - 2\chi} \quad (3.14)$$

ed è possibile stimare l'assorbimento della vibrazione armonica dei legami C-H e C-X come:

$$L[\text{dB/km}] = [3.2 \times 10^8] \frac{\rho N_{CX}}{M} \left(\frac{E_v^{CX}}{E_0^{CH}} \right) \quad (3.15)$$

dove ρ la densità del polimero, M è il peso molecolare del monomero, N_{CX} il numero di legame C-X presenti nel monomero e E_v^{CX}/E_0^{CH} il rapporto di energia di vibrazione di ogni legame rispetto alla frequenza fondamentale del legame C-H: da questo si ricava che, costituendo gli atomi X con cloro o fluoro, si riduce notevolmente l'assorbimento per vibrazione.

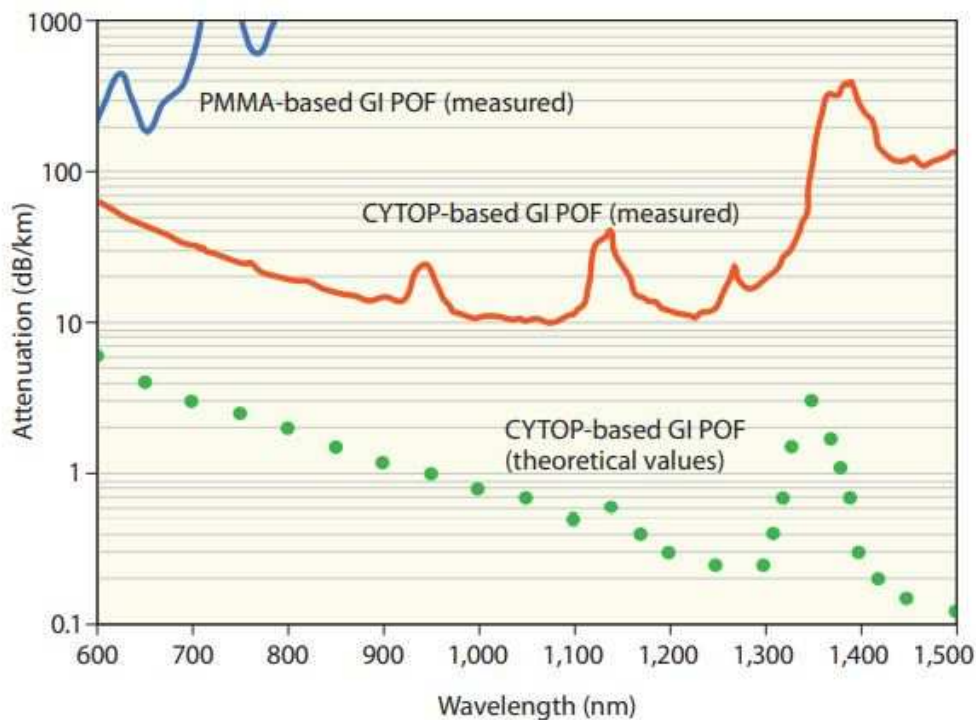


Figura 3.7: Confronto dell'attenuazione di fibre GI-POF in PMMA e CYTOP

Il CYTOP, sviluppato dalla Asahi Glass, è un polimero completamente fluorato, in cui gli atomi di idrogeno sono stati sostituiti con atomi di fluoro, garantendo un'ottima stabilità termica e una bassa dispersione del materiale. Dai grafici si può notare la bassa perdita per assorbimento rispetto alle altre GI-POF, l'attenuazione ad $1\mu\text{m}$ è di 10dB/Km e il limite teorico è intorno ai 0.7dB/km , ma l'attenuazione potrebbe essere ulteriormente diminuita eliminando le contaminazioni dovute al processo di produzione; inoltre, le fibre in CYTOP hanno minore dispersione del materiale paragonabile a quella delle fibre silicee per lunghezze d'onda superiori ai 1200nm , come mostra il grafico sotto.

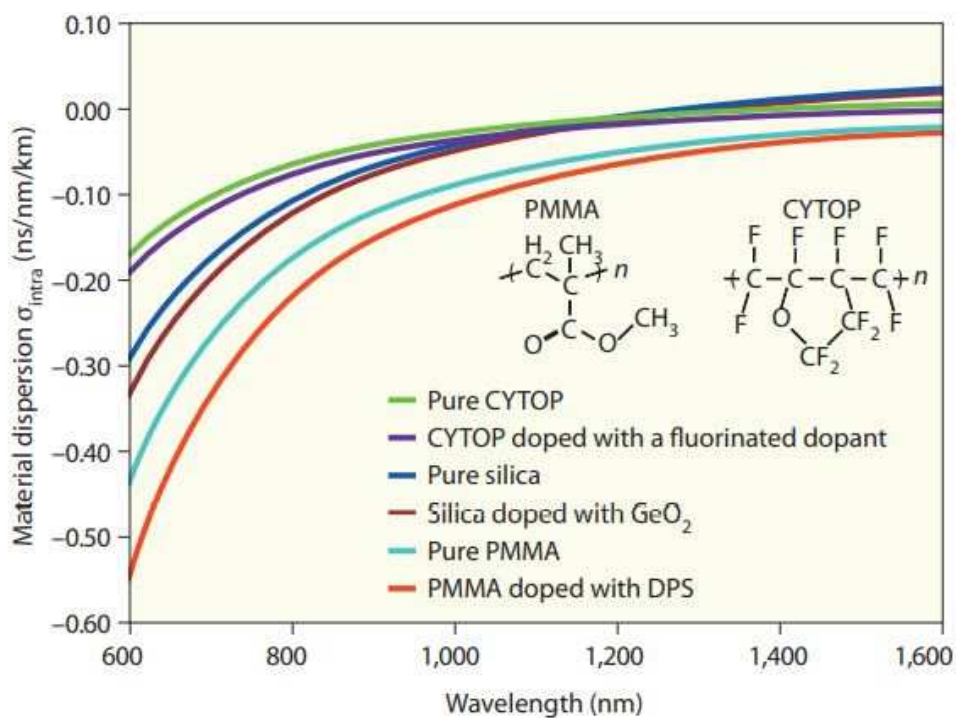


Figura 3.8: Confronto della dispersione in fibre polimeriche e silicee

3.5 IMPIEGO DELLA POF

Sistemi di trasmissione con fibre di plastica sono tipicamente a costo limitato, in quanto cavo e connettori sono poco costosi e le procedure di installazione associate, risultano molto pratiche ed economiche rispetto alla fibra di silice. Nell'ambito delle telecomunicazioni, la POF al momento è regolamentata solo dalla EN-60793-2, anche se altri organismi stanno sviluppando standard di comunicazione Gigabit per POF per applicazioni nelle reti domestiche e anche la IEEE ha definito uno standard di trasmissione full duplex fino a 1Gbps chiamata 1000BASE-RH su GI-POF mediante LED rosso.

3.5.1 Giunzioni

La giunzione di fibre ottiche polimeriche è di tipo meccanico; ponendo le due teste in posizione allineata tramite crimpatura, incollaggio od innesto rapido; si usa un manicotto in alluminio lungo qualche centimetro e dimensionato in base al diametro esterno della POF da giuntare, trattenuta in posizione allineata mediante crimpatura o incollaggio.



Figura 3.9: Giunto ottico a freddo che può sostituire una giunzione a caldo eseguita con la giuntatrice

Nel caso della crimpatura, può essere richiesto anche l'impiego di speciali gel da applicare sulla sezione delle fibre da giuntare al fine di migliorare l'efficienza dell'accoppiamento. Dopo l'esecuzione del taglio, la giunzione delle POF richiede specifiche lavorazioni di preparazione e lucidatura delle superfici da giuntare, necessarie alla riduzione delle perdite, diverse da quelle che sono eseguite sulle ferule dei connettori destinati alle GOF.

3.5.2 Connettori

Esistono quattro tipi di connettore destinati alla terminazione delle fibre ottiche plastiche in base alla modalità di trasmissione dei segnali, simplex e duplex, entrambi disponibili con e senza dispositivo di innesto a scatto per i componenti cui sono destinati: i connettori sono marcati attraverso codici specifici per facilitare l'identificazione dei collegamenti simplex (trasmettitore e ricevitore), mentre i connettori duplex sono costruiti in modo da garantire il corretto verso di inserimento, prevedendo inoltre l'impiego di speciali adesivi per rinforzarli quando utilizzati in ambienti con temperature operative estreme o soggetti ad ampie escursioni termiche.

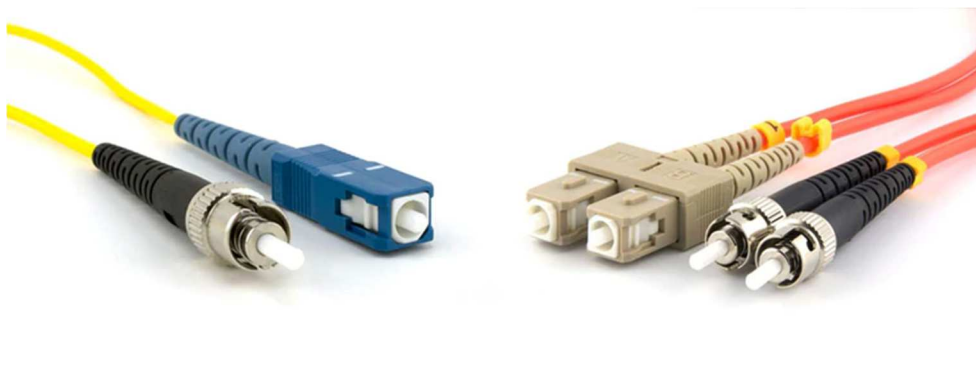


Figura 3.9: Connettori Simplex e Duplex

La procedura di installazione dei connettori è diversa per quelli destinati alla fibra PMMA e GI-POF rispetto alle fibre miste PFC; Per le prime si tratta di una procedura è semplice e veloce:

1. dopo aver tagliato il cavo alla lunghezza desiderata, è sufficiente rimuovere circa 7-10mm della guaina esterna con una spellafilo di calibro adeguato;
2. posizionare l'anello di crimpatura e il connettore sull'estremità della fibra lasciando che questa sporga di circa 3mm (o come previsto dal costruttore) dall'estremità del connettore;

3. montare con attenzione l'anello di crimpatura in modo che sia completamente calettato sul connettore, ricordando che gli anelli da crimpare per connettori simplex non possono essere utilizzati sui duplex e viceversa;
4. crimpare l'anello in posizione con l'utensile adeguato per connettore e POF utilizzata;
5. tagliare la fibra in eccesso che sporge dall'estremità del connettore (alcuni costruttori suggeriscono di lasciare 1.5mm di fibra dell'estremità del connettore);
6. inserire completamente il connettore nel dispositivo di lucidatura e ultimare la procedura;
7. pulire il connettore con un panno pulito senza impiegare solventi;
8. procedere alla lappatura e pulizia del connettore;
9. Il connettore PMMA/GI-POF è pronto.

Di contro l'attestazione mediante connettore delle fibre PFC, in ragione della presenza di un core di silice è certamente più complessa e delicata, simile alle fibre ottiche di vetro; tuttavia, sono disponibili diversi sistemi di terminazione del connettore mediante crimpatura. Le perdite dovute ai connettori hanno un valor medio intorno a 1.5dB in un intervallo che dipende dal costruttore e dal modello che oscilla tra 0.7 e 2.8dB per singolo connettore.

CAPITOLO 4: LE PRINCIPALI APPLICAZIONI DELLE POF

La grande quantità di ricerche e sperimentazioni realizzate in questi anni e certamente nei prossimi, fanno prevedere che le fibre ottiche polimeriche ad indice graduato GI-POF possano essere un mezzo di trasmissione per collegamenti LAN a basso costo in ambito residenziale, negli uffici e nelle fabbriche. È stata più volte dimostrata la capacità di trasmissione disponibile, almeno 30 volte maggiore, delle GI-POF rispetto alle fibre polimeriche convenzionali con indice a gradino, fino a raggiungere velocità di 2,5Gbps a 100m con laser a diodi da 647nm.

Sin da allora i progressi nello sviluppo di fibre ottiche polimeriche ad indice graduato e dei trasmettitori ottici sia laser che LED hanno notevolmente migliorato le prestazioni, soprattutto in termini di bit rate, basti pensare che già nel 1999, i Bell Laboratories e Lucent Technology sono riusciti a realizzare una trasmissione di dati a 11Gbps a 100m con una GI-POF alla lunghezza d'onda di 1300nm. Tuttavia, queste fibre soffrono, come le equivalenti multimodali di vetro, il fenomeno della dispersione modale che limita la larghezza di banda disponibile e quindi la capacità di banda trasferibile, problema parzialmente risolto ottimizzando il profilo dell'indice di rifrazione del *core* della fibra che, nelle GI-POF, non solo riduce la dispersione modale, ma anche la dispersione del materiale.

Nelle telecomunicazioni, l'impiego corrente della POF è attualmente indirizzato a piccole reti LAN dove il vantaggio economico potrebbe essere maggiormente apprezzato a fronte di esperienze desktop non particolarmente rilevanti. Questi collegamenti, caratterizzati da distanze di trasmissione relativamente brevi e di norma inferiori ai 100m, possono presentare un numero molto elevato di connessioni terminali per PC ed altri dispositivi, dove la connessione tramite il cavo di rame resta dominante. Tuttavia, per le reti domestiche, la fibra ottica plastica è diventata un'ottima candidata, soprattutto in virtù della semplicità della terminazione. Attualmente sul mercato diversi produttori hanno sviluppato apparecchi Ethernet IEEE 802.3 tipo 100Base-FX a 100Mbps per POF con connettori ad innesto rapido opto-lock (switch, schede di rete, media-converter e adattatori USB).

Le fibre ottiche plastiche vedono largo impiego nei settori dell'*automotive* e dei controlli industriali: la ragione principale dell'utilizzo delle POF nel settore del controllo industriale è data dalla necessità di garantire collegamenti di dati resistenti alle interferenze elettromagnetiche (EMI, *electromagnetic interference*), causate dai dispositivi ad alta corrente, come saldatrici ad arco, e ad alta tensione, come apparecchiature a raggi X; oggi il settore più interessato alle POF è quello delle aziende automobilistiche.

4.1 AUTOMOTIVE

L'incremento dei dispositivi digitali, la vulnerabilità alle interferenze elettromagnetiche e la complessità dei cablaggi, hanno spinto i produttori di automobili a creare uno standard per i cablaggi delle auto, chiamato MOST (Media Orientated Systems Transport), in modo da ridurre i costi di sviluppo e uniformare il mercato, utilizzando come mezzo di trasmissione per le automobili la fibra ottica plastica. Il sistema MOST originale arrivava fino a 25Mb/s e interessava regioni non-critiche del veicolo, come apertura/chiusura specchietti e bagagliaio, mentre oggi il sistema arriva a velocità di circa 150Mb/s, monitora i sensori per l'airbag e sostituisce il collegamento meccanico tra il pedale del freno e i freni stessi, convertendo la forza risultante dalla frenata in un segnale luminoso trasmesso ad un attuatore, il quale va ad applicare la giusta frenata alle ruote.

La combinazione di uno standard consolidato e l'accordo tra un gruppo considerevole di produttori di automobili, hanno creato le economie di scala necessarie all'industria dell'auto. Un trasmettitore per il sistema MOST che opera a 25Mb/s costava inizialmente alle case automobilistiche 4,50\$, ma è sceso fino a 3\$ con velocità di 150Mb/s. Negli Stati Uniti e in Giappone, le case automobilistiche stanno progettando un sistema più avanzato, sempre compatibile con MOST, che funzionerebbe a 400Mb/s utilizzando lo standard IBD-1394, confermando che l'evoluzione dei cablaggi in fibra ottica plastica non si è ancora conclusa.

Un'altra applicazione per l'*automotive* riguarda l'intrattenimento. Tutte le nuove auto prodotte sono equipaggiate per avere un collegamento Internet e la domanda di servizi e applicazioni per questo settore è aumentata notevolmente negli ultimi anni, con conseguente aumento della richiesta delle POF per la trasmissione e l'elaborazione dei dati di comunicazione ottica compatibile con Internet e per rimpiazzare i cavi in rame nei sistemi IVI (*In-Vehicle Infotainment*).



Figura 4.1: Sistema IVI ad anello con singola linea di cavo in fibra ottica

4.2 CONFRONTO TRA LE FIBRE DI VETRO E DI PLASTICA PER LA CASA

I cambiamenti tecnologici e le innovazioni nelle telecomunicazioni hanno determinato una domanda sempre più frequente di servizi multimediali all'interno delle abitazioni e, per poter garantire la velocità di trasmissione dati e la larghezza di banda desiderate, sono state introdotte varie tecnologie, con vantaggi e svantaggi: tra di esse emerge la *Fiber-To-The-Home* (FTTH), che potrebbe consentire la fornitura ottimale di banda larga fino agli utenti finali, con una maggiore larghezza di banda e una velocità di trasmissione maggiore, caratteristiche essenziali per le moderne forniture *triple-play* in cui viene fornito l'accesso a servizi video, dati e di telefonia.

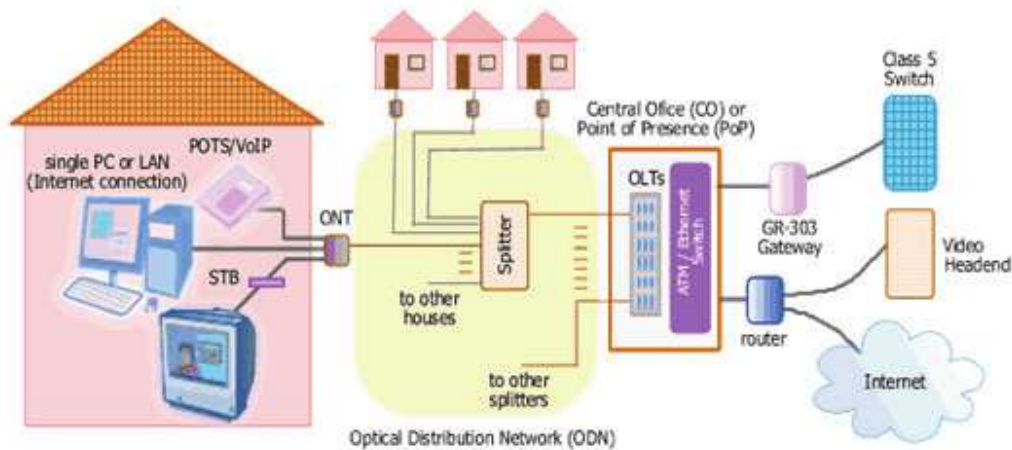


Figura 4.2: Tipico schema di una rete di distribuzione ottica

Inizialmente, la prima opzione per avere la banda larga in casa fu il modem cablato, ma poche persone avevano accesso ad Internet; nel 1999 arrivò la DSL, *digital subscriber line*, ma rimase un servizio limitato, mentre i servizi satellitari, ancora oggi, sono lontani dal settore della banda larga casalinga. La domanda di maggiore larghezza di banda, velocità ed affidabilità spinse verso l'installazione di fibre ottiche di vetro o di plastica. Le POF vengono impiegate generalmente per la trasmissione audio e video, di dati di gestione di un edificio, controlli, sistemi di bus, allarmi ed illuminazione. Dalla sorgente, i segnali elettrici vengono convertiti in impulsi ottici prima di essere trasmessi attraverso la rete di distribuzione ottica (ODN, *Optical Distribution Network*), dove un apposito strumento, detto *Customer Premises Equipment (CPE)*, riconverte gli impulsi ottici in segnali elettrici.

Nonostante i numerosi vantaggi rispetto ai normali cavi elettrici, non è semplice scegliere le fibre più idonee per la rete domestica; le fibre ottiche in vetro sono quelle più usate, ma anche quelle plastiche presentano buone prestazioni.

4.3 POF PER I SENSORI

L'uso di POF in applicazioni sensoristiche ha trovato largo spazio nella produzione industriale, nell'ingegneria civile, nella tecnologia militare, nella protezione dell'ambiente, nella rilevazione geofisica, nell'esplorazione petrolifera, nelle tecnologie mediche e biologiche, ecc. I più diffusi sensori a fibra ottica misurano rotazione, temperatura, deformazione, stress, vibrazione, onde acustiche e pressione. Grazie alle caratteristiche chiave delle POF, quali l'elevata flessibilità e la

sicurezza di manipolazione, le POF sono utilizzate in un'ampia gamma di settori, tra cui i dispositivi medici, farmaceutiche e chimiche, ma anche in ambienti industriali difficili.

Ad esempio, per un sensore ottico legato alla deformazione come l'idrofono a fibra, le fibre polimeriche sono molto più sensibili alle onde acustiche rispetto alle fibre di vetro; inoltre, la fibra polimerica risulta vantaggiosa per il rilevamento in ambienti liquidi o con materiali non ancora allo stato solido.

Seguono delle descrizioni su alcune applicazioni elencate precedentemente.

4.3.1 Rilevamento delle radiazioni

Le fibre ottiche polimeriche scintillanti (drogate con materiali fluorescenti) sono state usate con successo per monitorare le radiazioni e i percorsi delle particelle cariche in numerosi esperimenti di fisica nucleare per diversi anni. Un programma sperimentale sullo studio dell'oscillazione dei neutrini in relazione ai raggi cosmici, conosciuto come K2K-KEK to Super-K sviluppato in Giappone, vede l'utilizzo di diversi rilevatori in fibra ottica scintillante ad alta efficienza di tracciamento per la ricostruzione delle particelle cariche e della posizione dei vertici quando si formano due o più particelle nella interazione con i neutrini. Le fibre utilizzate hanno un diametro di 0,7mm e rilevano la posizione della particella considerando entrambi gli assi, orizzontale e verticale. Un sistema tipico di rilevamento è composto da un foglio di fibra spesso 1,3mm che, a sua volta, è composto da due strati sfalsati di fibre scintillanti, i fogli verticali e orizzontali sono separati da un pannello a nido d'ape di 1,6cm di spessore, per un totale di 20 strati di fibre scintillanti mentre gli strati adiacenti sono distanziati da 9cm lungo la direzione del fascio di neutrini.

4.3.2 Fibra ottica plastica integrata con uno smartphone per il monitoraggio fisiologico umano

Il sistema è stato creato per misurare il battito cardiaco e la respirazione, integrando un sensore in fibra ottica plastica, migliorato sfruttando diverse zone di monitoraggio, collegato ad uno smartphone con velocità di scatto ottimizzata, per migliorarne le prestazioni; movimenti e battito cardiaco e respirazioni vengono monitorati con continuità.

Sotto è possibile vedere uno schema del sistema completo ed è possibile dividerlo in tre parti principali: il generatore di luce e ricevitore (smartphone), il sensore in POF e l'elaborazione dei dati.

La prima parte è composta dalla torcia del cellulare, dalla fotocamera e dal connettore, le prime due sono integrate nello smartphone, mentre il connettore è realizzato con una stampante 3D e il sensore è avvolto in tre cerchi attorno al petto dell'utente, in modo che la zona di rilevamento sia allineata al petto sinistro, dove il battito cardiaco è più forte. La respirazione e il battito cardiaco fanno in modo che il sensore si pieghi leggermente, regolando la quantità di luce nella zona di sensibilità e determinando i valori misurati, che vengono registrati con la telecamera e successivamente estratti tramite un algoritmo.

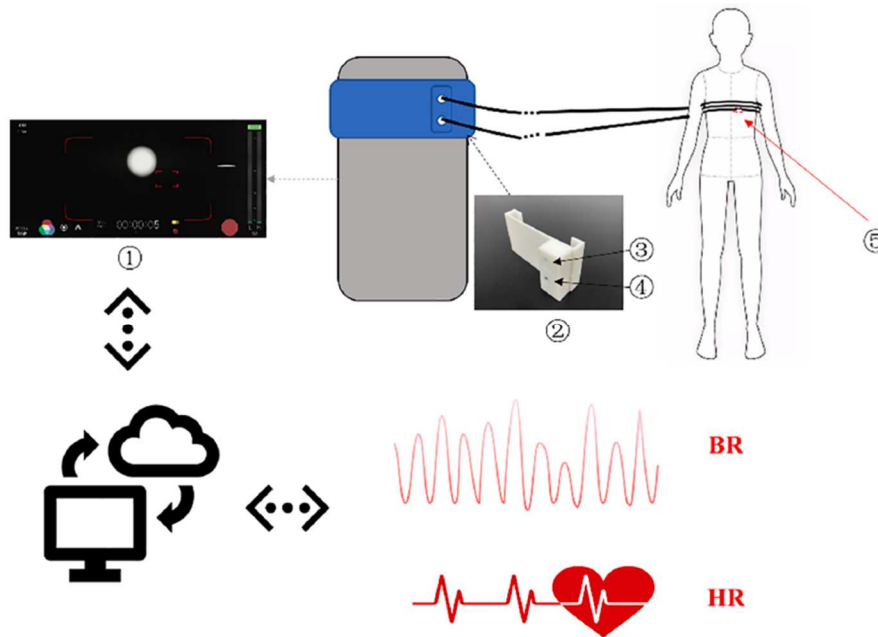


Figura 4.7: Schema del sistema

Il connettore stampato in 3D viene collegato alla torcia e alla fotocamera dello smartphone, allineate con la posizione della POF, per evitare il disturbo della luce diffusa, utilizzando il PLA come materiale di stampa e l'80% di riempimento, presenta una profondità di 15mm rispetto alla posizione di ricezione della luce per tenere la POF più lontano possibile dalla telecamera, al fine di percepire le variazioni di potenza del segnale ottico.

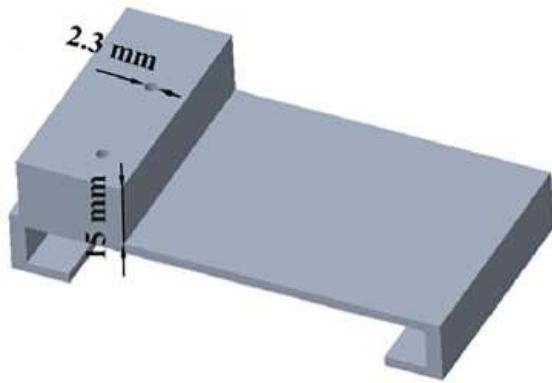


Figura 4.8: Modello 3D e Modello stampato del sensore

La POF viene parzialmente tagliata nella zona di rilevamento, con conseguente perdita di radiazione ottica: questo perché, a causa della respirazione e del battito cardiaco, si sviluppa una certa pressione sulla POF, la quale si piega leggermente, con conseguente aumento della perdita ottica nella zona di sensibilità e la variazione di potenza del segnale permette di rilevare i movimenti indotti dei due fenomeni.

Per misurare l'attenuazione nella zona di rilevamento, si prende in considerazione la sezione longitudinale della POF ed è possibile utilizzare la geometria ottica per definire il rapporto tra la potenza del segnale in uscita (P_o) e quello in ingresso (P_i), definendo la perdita relativa L_R :

$$L_R = \frac{P_i - P_o}{P_i} = \frac{2I_i\theta - I_o\beta}{2I_i\theta} \quad (4.1)$$

dove β è l'angolo di apertura dell'area di ricevimento del segnale, I è una costante ($I_o = I_i$), θ è l'angolo critico, che soddisfa la relazione $\sin \theta = \frac{NA}{n_c}$: dove l'apertura numerica NA è pari a 0,47 nelle POF, e l'indice di rifrazione del core (n_c) è 1,49. Dato che la perdita di potenza del segnale aumenta con l'aumentare della profondità del taglio, che comporta anche una maggiore fragilità del sensore, la profondità del taglio perpendicolare viene effettuata fino a $2/3$ del diametro del core, come indicato nella figura sotto, dove D è il diametro del core, α è l'angolo di apertura della zona di rilevamento; quando è a 0, non c'è dispersione e il valore di α è determinato dalla respirazione.

Considerando il teorema del coseno, è possibile ottenere la seguente relazione:

$$\cos(\alpha + \gamma) = \frac{(\frac{2}{3}D)^2 + d^2 - x^2}{\frac{4}{3}Dd} \quad (4.2)$$

dato che $\cos \gamma = \frac{D}{6a}$, $c = \frac{D}{2 \tan \theta}$, $d^2 = c^2 + (\frac{1}{6}D)^2$, ed è possibile ottenere x dal teorema del seno:

$$\frac{2D}{3x} = \frac{\sin(\beta - \theta_1)}{\sin(\alpha + \gamma)} \quad \text{dove } \theta_1 = \theta - \frac{\pi}{2} + \gamma \quad (4.3)$$

Considerando le equazioni appena descritte, è possibile disegnare il grafico sotto, che mostra la relazione tra le perdite relative e l'angolo di apertura e permette di verificare che il principio di rilevamento è basato sulla variazione dell'angolo di apertura all'interno della sezione di rilevamento.

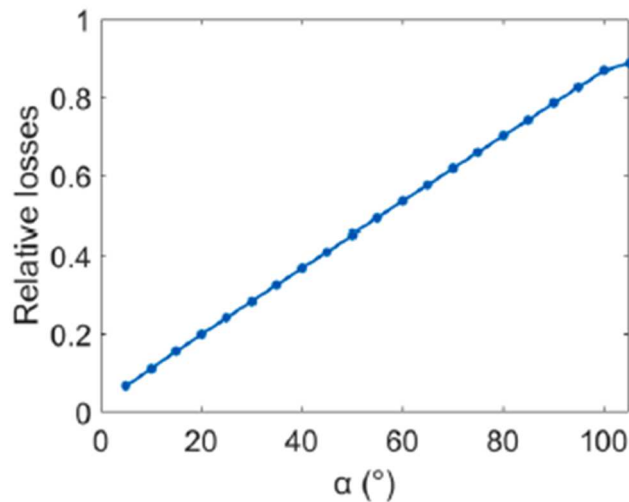


Figura 4.9: Variazione delle perdite in relazione all'angolo di apertura

Una parte critica di tutto il processo sta nella scelta del giusto metodo per tagliare la fibra; come indicato in precedenza, la scelta migliore è quella di tagliare con una lama il mantello perpendicolarmente ed incidere di 2/3 il core, che in questo caso, ha un diametro interno di 1mm ed esterno di 2,2mm.

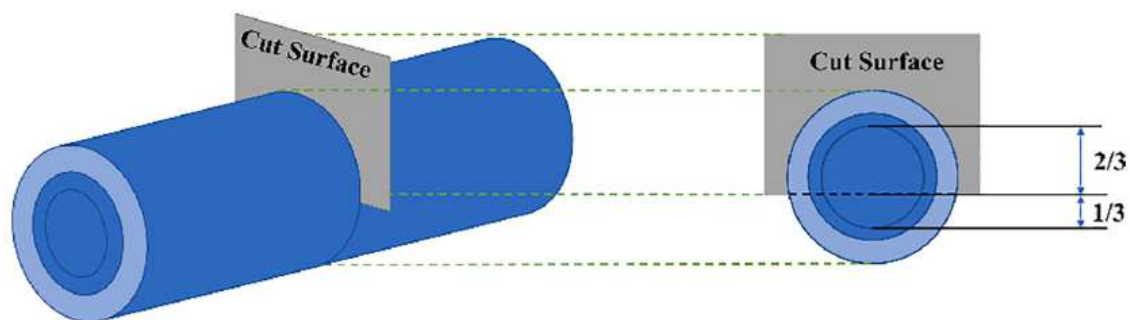


Figura 4.10: Taglio applicato alla fibra ottica plastica

Per assicurare un taglio ripetibile e preciso, è stato realizzato uno stampo con la stampante 3D con il 100% di riempimento, per assicurare stabilità al taglio: presenta un canale con lo stesso diametro della fibra, per facilitarne l'inserimento, e presenta una sottile apertura per far passare la lama ed eseguire il taglio.

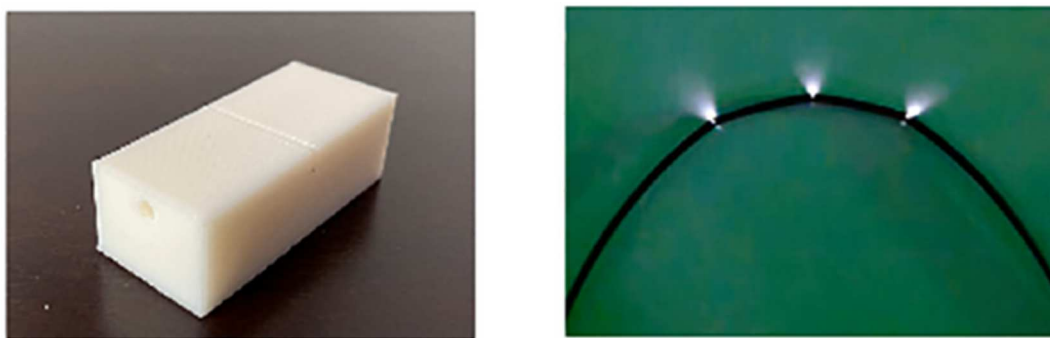


Figura 4.11: Stampo per il taglio e risultato

Dopo aver eseguito i test per verificare che le variazioni di potenza della fibra plastica fossero sufficientemente sensibili per tracciate in modo da elaborare le immagini fotogramma per fotogramma, è stato possibile ottenere la relazione tra il numero di zone di rilevamento e la risoluzione dei segnali di respirazione e battito cardiaco, ottenuti grazie a tre zone di rilevamento e ed è possibile ottimizzare la velocità di scatto del dispositivo, grazie alla relazione tra velocità e interferenza della luce diffusa ottenuta dalle analisi svolte. Il sensore permette di monitorare i due valori in diverse posizioni del corpo, durante una corsa, una camminata o sdraiati, ed esiste una diretta corrispondenza tra potenza ottica media misurata dal dispositivo di rilevamento e l'intensità del movimento; questo consente di conoscere la postura dinamica in base all'analisi dell'energia spettrale e della frequenza, risultato importante per applicazioni sul campo dei sensori indossabili.

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI

Alla luce degli argomenti trattati sopra, possiamo fissare i seguenti vantaggi delle POF:

- elevata capacità trasmissiva: ogni fibra può trasportare molti canali indipendenti, che utilizzano, ciascuno, una diversa lunghezza d'onda della luce, tramite la tecnica di divisione in lunghezza d'onda;
- peso e ingombro molto contenuti;
- immunità alle interferenze elettromagnetiche in quanto le fibre ottiche plastiche sono realizzate con polimeri particolari; ne risulta che le stesse non sono soggette ad accoppiamenti elettromagnetici permettendo quindi di evitare problemi di diafonia o cross talk;
- tasso di errore molto contenuto;
- elevata flessibilità, caratteristica che permette alle fibre plastiche di essere presenti in applicazioni particolari, quali i sensori indossabili, per i quali le fibre silicee sono inutilizzabili;
- basso costo della materia prima.

Di contro, le fibre polimeriche presentano degli svantaggi:

- perdite elevate intrinseche, problema parzialmente risolto con l'uso di nuovi materiali polimerici perfluorati;
- numero ridotto di produttori di POF, localizzati principalmente in Giappone;
- mancanza di uno standard che definisca norme per la trasmissione dati, il tipo di fibra da utilizzare e il tipo di cablaggio da fornire in base all'applicazione specifica;
- scarsa competenza da parte degli utenti finali sull'installazione e la progettazione di cablaggi in POF.

Per le applicazioni di telecomunicazioni a banda ultra-larga e su distanze di chilometri la fibra ottica in silice è la soluzione ottimale; tuttavia, le fibre ottiche plastiche possono essere una scelta vincente in applicazioni su breve distanza e nei casi i cui serva un cablaggio semplice.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA:

1. P. Polishuk, "Plastic Optical Fibers Branch Out", ResearchGate, 2006.
2. Y. Koike, M. Asai, "The future of plastic optical fiber", Keio University Japan, 2009.
3. A. Acakpovi, "Comparative analysis of plastic optical fiber and glass optical fiber for home networks", ResearchGate, 2012.
4. M. syuhaimi Ab-Rahman, H. Guana, N. Arsad, "Optimization of WDM-POF Network for In-Car Entertainment System", IntechOpen, 2015.
5. P. Carlizza, "Comunicazioni del presente e dell'immediato future: le fibre ottiche", ElectroYou, 2015.
6. C.G. Someda, M. Santagiustina, "Le fibre ottiche nelle telecomunicazioni: le ragioni e i tempi di un successo", Il Nuovo Saggiatore, 2016.
7. P.Zotto, S. Lo Russo, P.Sartori, "Fisica generale, Elettromagnetismo e Ottica", La Dotta, 2019.
8. G. Leone, "La fibra ottica", Univerest, 2020.
9. R. Kuang, Y. Ye, Z. Chen, R. He, "Low-cost plastic optical fiber integrated with smartphone for human physiological monitoring", Elsevier, 2022.
10. A. Nordio, "Le Fibre Ottiche", Consultato ad Aprile 2022, http://www.iet.unipi.it/m.luise/com_ottiche/cap1Frm.html.
11. "Step-Index Multimode Fiber vs Graded-Index Multimode Fiber", Consultato a Maggio 2022, <https://community.fs.com/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html>.
12. KPOF, "Fiber Optics", Consultato a Maggio 2022, <https://www.kdpof.com/fiber-optics/>.
13. The FOA (Fiber Optic Association): associazione internazionale no-profit che promuove la professionalità nell'ambito della costruzione di reti in fibra ottica attraverso corsi d'istruzione ed esami di certificazione riconosciuti sia per la progettazione che la costruzione e la gestione di queste reti, <https://www.foa.org>.