

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Attenuazione nelle fibre ottiche: descrizione e metodi di misura

Relatore

Prof. Galtarossa Andrea

Laureando

Pasqualin Mattia

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Data di laurea 21/07/2025

Alla mia famiglia e ai miei amici che mi hanno supportato durante questo percorso di crescita

Sommario

La tesi affronta lo studio dell'attenuazione nelle fibre ottiche. Dopo una descrizione introduttiva delle caratteristiche e del funzionamento della fibra ottica, viene analizzato il fenomeno dell'attenuazione, con particolare attenzione ai metodi utilizzati per misurarla.

Indice

1	Introduzione	1
2	Fondamenti delle Fibre Ottiche	3
2.1	Cenni storici	3
2.2	Struttura della fibra ottica	5
2.3	Tipologie di fibre ottiche	6
2.4	Propagazione della luce	7
3	Attenuazione del segnale ottico	13
3.1	Cos'è l'attenuazione	13
3.2	Assorbimento ottico	14
3.3	Scattering	15
3.4	Perdite per curvatura nelle fibre ottiche	16
3.5	Perdite di propagazione del nucleo e del mantello	18
3.6	Connessione tra fibre ottiche e relative perdite	18
3.7	Problemi nelle giunzioni (<i>Splices</i>)	19
4	Tecniche di misura dell'attenuazione	21
4.1	Introduzione alla misura dell'attenuazione	21
4.2	Tecnica del cut-back	21
4.3	Metodo dell'inserzione	23
4.4	Misura con OTDR	24
4.5	Confronto tra i metodi	26
5	Conclusioni	27
	Bibliografia	29

Elenco delle figure

2.1	Esperimento di Colladon.	3
2.2	Struttura di una fibra ottica.	5
2.3	Rappresentazione incidenza obliqua onda elettromagnetica	8
2.4	Riflessione interna in una fibra ottica.	10
3.1	Andamento tipico dell'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda in una fibra di silice. Sono evidenziati i picchi di assorbimento dovuti agli ioni OH^- e le principali finestre di trasmissione (O-band, C-band, E-band).	16
3.2	Rappresentazione fenomeno microbends all'interno delle fibre ottiche	17
4.1	Schema per misurare l'attenuazione mediante la tecnica cut-back	21
4.2	a) Underfilling; b) Overfilling	23
4.3	a) Misura di riferimento; b) Misura con il cavo da testare	24
4.4	Principio operativo di un OTDR con circolatore ottico	25

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi decenni, le fibre ottiche si sono affermate come una tecnologia fondamentale per la trasmissione dei dati, grazie a caratteristiche come la possibilità di coprire lunghe distanze con perdite ridotte, elevata larghezza di banda e immunità alle interferenze elettromagnetiche. Per questo motivo, il loro utilizzo è aumentato in diversi settori, in particolare nelle telecomunicazioni, in ambito medico e nella realizzazione di sensori. Un fenomeno importante da considerare nella progettazione delle fibre ottiche è l'attenuazione, ovvero la riduzione del segnale luminoso lungo il percorso nella fibra. Questa tesi ha l'obiettivo di descrivere inizialmente l'origine e la struttura delle fibre ottiche, per poi concentrarsi sul fenomeno dell'attenuazione e sulle principali tecniche utilizzate per misurarla: il metodo dell'inserzione, il metodo Cut-back e l'OTDR.

Capitolo 2

Fondamenti delle Fibre Ottiche

2.1 Cenni storici

Nel 1841, durante una dimostrazione pubblica a Ginevra, il fisico svizzero Jean-Daniel Colladon osservò il comportamento di un getto d'acqua che fuoriusciva da un piccolo foro in un serbatoio. La stanza era scarsamente illuminata, così Colladon puntò un fascio luminoso verso il flusso d'acqua: con grande sorpresa notò che la luce, una volta entrata nel getto, rimaneva “intrappolata” al suo interno, guidata dalle pareti del fluido grazie al fenomeno della riflessione interna totale.

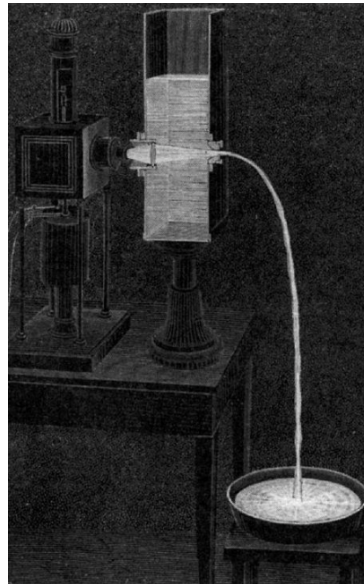


Figura 2.1: Esperimento di Colladon.

Pochi anni dopo, il fisico francese Jacques Babinet intuì che quel principio ottico avrebbe potuto trovare un'applicazione pratica in medicina. Propose un tubo di vetro curvo capace di

trasmettere luce all'interno della cavità orale durante gli interventi odontoiatrici. Tuttavia, l'idea rimase confinata agli schizzi progettuali e non trovò realizzazione concreta fino a molti decenni più tardi.

Solo a metà Novecento, un gruppo di ricercatori dell'Università del Michigan riuscì a costruire il primo prototipo di endoscopio basato su fibre ottiche. Quel dispositivo sperimentale dimostrò che il concetto di "tubo di vetro" di Babinet poteva essere tradotto in un fascio flessibile di filamenti ottici, sebbene le perdite di potenza lungo la fibra fossero ancora estremamente elevate.

Nel primo dopoguerra il principale problema era l'elevata attenuazione del vetro utilizzato: si misuravano valori superiori a 1000 dB/km, che rendevano le fibre inutilizzabili per le telecomunicazioni su qualsiasi distanza significativa. Fino agli anni Sessanta si ritenne che questo fosse un limite intrinseco alla guida della luce nei materiali trasparenti.

La vera "rivoluzione" arrivò nel 1966, quando Charles Kao e George Hockham pubblicarono il loro celebre studio: dimostrarono che l'alta attenuazione non era un vincolo fisico, ma dipendeva dalle impurità e dalle imperfezioni del vetro. Teorizzarono che, eliminando i difetti a livello atomico, si sarebbe potuto ridurre il coefficiente di perdita fino a circa 20 dB/km.

Pochi anni dopo, nel 1970, la Corning Glass Company sfruttò quei risultati e sviluppò la prima fibra ottica con attenuazione inferiore a 20 dB/km (circa 17 dB/km). Quel traguardo aprì la strada alle prime applicazioni commerciali nelle reti di comunicazione su lunga distanza.

Nel 2009, Charles Kao ricevette il Premio Nobel per i suoi studi pionieristici sulle fibre ottiche. Da allora, grazie all'evoluzione continua dei processi di produzione e al perfezionamento dei materiali, l'attenuazione è crollata fino a valori trascurabili, rendendo la fibra ottica la spina dorsale delle moderne infrastrutture di comunicazione.

2.2 Struttura della fibra ottica

La fibra ottica è una guida d'onda che opera a frequenze ottiche ed è composta generalmente da quattro elementi concentrici: il nucleo (core), il mantello (cladding), il buffer e il rivestimento esterno, chiamato *outer jacket*.

Il nucleo è solitamente realizzato in vetro di silice altamente puro (SiO_2) o in plastica (polimetilmetacrilato) ed è la parte che trasporta la luce. Il mantello avvolge il nucleo ed è costituito dallo stesso materiale, ma con un indice di rifrazione n_2 leggermente inferiore rispetto a quello del nucleo n_1 . Questa differenza di indici provoca, al confine core-cladding, fenomeni di riflessione interna totale lungo tutta la lunghezza della fibra, impedendo alla luce di uscire lateralmente.

Il buffer è un rivestimento plastico elastico che ammortizza urti e micro-flessioni, mentre l'outer jacket è lo strato più esterno, costituito da materiale polimerico più rigido che protegge la fibra da sollecitazioni meccaniche e interferenze ambientali.

Lo spessore del nucleo varia in base al tipo di fibra: il core ha un diametro compreso tra $8\ \mu\text{m}$ e $62,5\ \mu\text{m}$, mentre il mantello ha un diametro standard di $125\ \mu\text{m}$. Il buffer e l'outer jacket, a seconda del tipo di cavo, hanno diametri tipici di $250\ \mu\text{m}$ e $900\ \mu\text{m}$, rispettivamente.

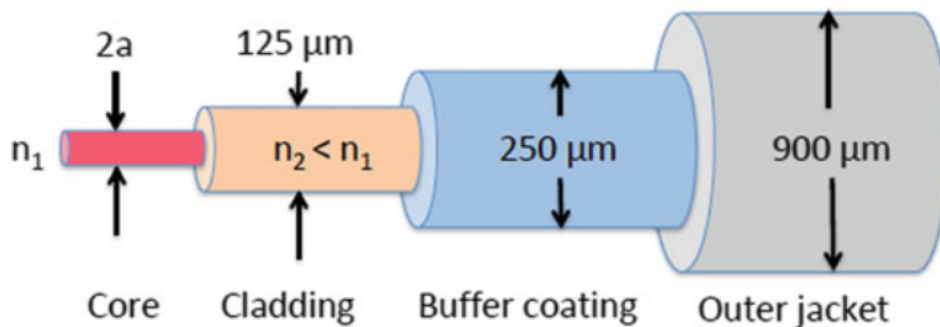


Figura 2.2: Struttura di una fibra ottica.

2.3 Tipologie di fibre ottiche

Le fibre ottiche possono essere classificate secondo tre criteri principali:

In base al materiale

- **Silice (vetro)**: presenta un'attenuazione tipica $< 0,2$ dB/km e un'ampia banda di trasmissione; rappresenta lo standard nelle telecomunicazioni.
- **Polimeriche (POF)**: economiche e flessibili, ma caratterizzate da un'attenuazione elevata (50 dB/km-200 dB/km) e banda limitata; utilizzate principalmente su brevi distanze (es. automazione domestica).

In base al numero di modi

- **Single-mode Fiber (SMF)**: il core ha un diametro di $8\ \mu\text{m}$ - $10\ \mu\text{m}$, supporta un solo modo di propagazione e presenta una dispersione modale trascurabile; ideale per collegamenti superiori a 10 km.
- **Multi-mode Fiber (MMF)**: il core ha un diametro di $50\ \mu\text{m}$ o $62,5\ \mu\text{m}$, supporta più modi con diverse velocità di gruppo (dispersione modale); utilizzata per collegamenti inferiori a 2 km.

In base al profilo d'indice

- **Step-index**: l'indice di rifrazione n_1 è uniforme nel core e presenta un brusco salto a n_2 nel cladding; semplice da realizzare, ma con dispersione modale elevata nelle MMF. Può essere sia SMF che MMF.
- **Graded-index**: il profilo $n(r)$ decresce gradualmente dal centro al bordo del core secondo una legge parabolica; questo livella i ritardi modali e riduce la dispersione modale, risultando adatto solo per MMF.

2.4 Propagazione della luce

Onde Elettromagnetiche

Come tipologia di onda elettromagnetica considereremo l'onda piana, che costituisce una semplificazione fondamentale per comprendere il concetto di propagazione della luce all'interno delle fibre ottiche. I materiali che utilizzeremo, e quindi la spiegazione fornita è per materiali non magnetici e non conduttivi. L'onda piana ha la caratteristica di presentare componenti uniformi e non nulle del campo elettrico e magnetico sul fronte d'onda rappresentato da un piano, mentre nulle lungo la direzione di propagazione.

Per comodità, assumiamo \vec{z} come direzione di propagazione.

Dalle equazioni di Helmholtz si ottiene che le espressioni dei campi elettrico e magnetico sono del tipo:

$$\mathcal{E}_x(z, t) = |E_x^+| \cos(\omega t + kz) + |E_x^-| \cos(\omega t - kz), \quad \mathcal{H}_y(z, t) = |H_y^+| \cos(\omega t + kz) + |H_y^-| \cos(\omega t - kz) \quad (2.1)$$

Dove k rappresenta la costante di propagazione dell'onda $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$.

Espressioni analoghe valgono per le componenti dei campi elettrico e magnetico lungo la direzione \vec{y} .

Per semplificare i calcoli, utilizzeremo i fasori complessi associati, in modo da eliminare la dipendenza temporale: il fasore complesso si basa sulla relazione

$$f(t) = \Re [F(\omega)e^{j\omega t}],$$

dove $F(\omega)$ rappresenta il **fasore**.

Applicando questa identità, otteniamo:

$$E_x(z) = E_x^+ e^{-jkz} + E_x^- e^{+jkz}, \quad H_y(z) = H_y^+ e^{-jkz} + H_y^- e^{+jkz}, \quad (2.2)$$

dove $E_x^+, E_x^-, H_x^+, H_x^-$ rappresentano le ampiezze complesse dei campi elettrici e magnetici.

Utilizzando queste espressioni semplificate possiamo ora descrivere il legame tra il campo elettrico e quello magnetico. Essendo strettamente correlati, è possibile ottenere l'espressione dell'uno a partire dall'altro tramite la seguente relazione, derivante dall'applicazione delle equazioni di Maxwell ai rotori:

$$\vec{H} = \frac{\hat{z}}{\eta} \times \vec{E}, \quad (2.3)$$

dove il termine η rappresenta l'impedenza caratteristica del mezzo attraversato. Quest'ultima è

definita come:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (2.4)$$

con μ pari alla permeabilità magnetica del mezzo (che nel nostro caso, trattandosi di materiali non magnetici come le fibre ottiche, coincide con la permeabilità del vuoto $\mu = \mu_0$), mentre ϵ è la permittività dielettrica, espressa come $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, dove ϵ_r è la costante dielettrica relativa del materiale attraversato.

Legge di Snell e riflessione

Consideriamo la seguente immagine che rappresenta l'incidenza obliqua di un'onda piana su un'interfaccia tra due mezzi. Come possiamo notare, sono presenti tre angoli: θ_i , θ_r , θ_t , che rappresentano rispettivamente l'angolo di incidenza, l'angolo di riflessione e l'angolo di trasmissione (rifrazione).

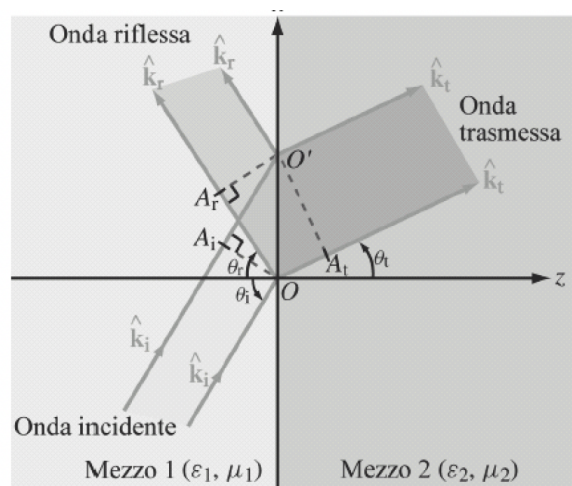


Figura 2.3: Rappresentazione incidenza obliqua onda elettromagnetica

La luce, nel tempo t , compie tre percorsi distinti. Sulla base delle relazioni tra le velocità nei due mezzi, deve valere la seguente condizione:

$$\frac{\overline{A_i O'}}{v_1} = \frac{\overline{A_r O}}{v_1} = \frac{\overline{A_t O}}{v_2}, \quad (2.5)$$

dove v_1 e v_2 sono rispettivamente le velocità nei due mezzi.

Analizzando le relazioni geometriche nei triangoli rettangoli, otteniamo:

$$\theta_i = \theta_r \quad \text{(Legge della riflessione),} \quad (2.6)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad \text{(Legge di Snell).} \quad (2.7)$$

Riflessione totale

Un'importante conseguenza della legge di Snell (2.7) riguarda il comportamento della luce quando passa da un mezzo a un altro con differente indice di rifrazione. Sappiamo che la direzione del raggio trasmesso cambia:

- quando la luce passa da un mezzo **meno denso** (indice n_1) a uno **più denso** ($n_2 > n_1$), l'angolo di trasmissione θ_t risulta **più piccolo** dell'angolo di incidenza θ_i ; in altre parole, il secondo mezzo “opponne maggiore resistenza” e il raggio si avvicina alla normale.
- viceversa, quando la luce passa da un mezzo **più denso** ($n_1 > n_2$) a uno **meno denso**, l'angolo di trasmissione risulta **maggiore** dell'angolo di incidenza.

Dalla seconda osservazione, passaggio da più denso a meno denso, emerge un fenomeno particolare: se l'angolo di incidenza cresce fino a un valore tale che l'angolo di trasmissione tenda a $\theta_t \rightarrow \pi/2$, il raggio trasmesso viaggia lungo l'interfaccia. L'angolo di incidenza corrispondente è detto **angolo critico** θ_c . Per angoli di incidenza $\theta_i > \theta_c$, non si ha più trasmissione nel secondo mezzo, ma tutta l'energia viene **riflessa**: si verifica il fenomeno della **riflessione totale interna**.

Infatti, a partire dalla legge di Snell (2.7), ponendo l'angolo di trasmissione $\theta_t = \pi/2$, otteniamo la condizione per l'**angolo critico**:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \quad \Rightarrow \quad \theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right), \quad (2.8)$$

dove θ_c è l'angolo di incidenza oltre il quale si verifica il fenomeno della **riflessione totale interna**.

Questo fenomeno è la base per la trasmissione guidata del segnale all'interno della fibra ottica.

Angolo di accettazione

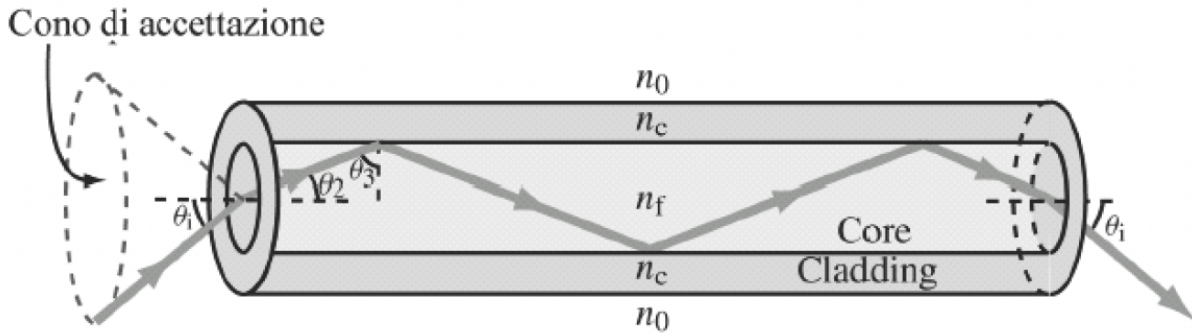


Figura 2.4: Riflessione interna in una fibra ottica.

Dalla relazione ottenuta in precedenza, per garantire la riflessione totale è necessario che $n_c < n_f$. In queste condizioni, l'angolo critico interno alla fibra è dato da:

$$\theta_{cr} = \arcsin\left(\frac{n_c}{n_f}\right). \quad (2.9)$$

Tuttavia, anche per angoli maggiori di quello critico, come illustrato in figura ($\theta_3 > \theta_{cr}$), la riflessione totale continua a verificarsi.

Cerchiamo ora di stabilire la relazione tra l'angolo di ingresso nella fibra e l'angolo critico che garantisce la riflessione totale, sfruttando la complementarità interna degli angoli. Dalla figura possiamo scrivere:

$$\cos \theta_2 = \sin \theta_3 \geq \frac{n_c}{n_f}.$$

Sulla superficie di ingresso vale la legge di Snell:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_0}{n_f} \sin \theta_i,$$

dove n_0 è l'indice di rifrazione del mezzo esterno (es. aria).

Dopo opportuni passaggi algebrici, utilizzando la relazione trigonometrica tra seno e coseno per θ_2 , si ottiene:

$$\sin \theta_a = \sin \theta_i = \arcsin\left(\frac{\sqrt{n_f^2 - n_c^2}}{n_0}\right)$$

che nel nostro caso, avendo angoli molto piccoli $\theta_a \ll 1$ otteniamo la seguente semplificazione:

$$\sin \theta_a \approx \theta_a = \arcsin \left(\frac{\sqrt{n_f^2 - n_c^2}}{n_0} \right) \quad (2.10)$$

dove θ_a rappresenta l'**angolo di accettazione** della fibra ottica.

In particolare, l'angolo di accettazione è definito come l'angolo massimo di ingresso grazie alla quale è presente una riflessione totale interna.

Capitolo 3

Attenuazione del segnale ottico

3.1 Cos'è l'attenuazione

L'attenuazione è la riduzione della potenza di un segnale mentre si propaga all'interno di una fibra ottica. Si tratta di un parametro fondamentale nella progettazione dei sistemi di comunicazione ottica, poiché determina la massima distanza di trasmissione possibile tra un trasmettitore e un ricevitore oppure un amplificatore intermedio.

I principali meccanismi responsabili della perdita di potenza in una fibra sono l'assorbimento, la diffusione (*scattering*) e le perdite radiative.

L'assorbimento è legato alle proprietà intrinseche del materiale della fibra, mentre la diffusione dipende sia dal materiale stesso sia da imperfezioni strutturali nella guida d'onda ottica. Le perdite radiative, invece, sono causate da perturbazioni geometriche della fibra, di natura microscopica o macroscopica.

In questa sezione vengono descritte le unità di misura utilizzate per quantificare le perdite e analizzati i fenomeni fisici che concorrono all'attenuazione.

Unità attenuazione

L'attenuazione nelle fibre ottiche viene comunemente espressa in decibel per chilometro (dB/km), un parametro che indica la perdita di potenza ottica per unità di lunghezza.

La potenza ottica lungo la fibra decresce esponenzialmente con la distanza secondo la relazione

$$P(z) = P(0) e^{-\alpha_p z} \quad (3.1)$$

dove α_p rappresenta il coefficiente di attenuazione in km^{-1} .

Per semplicità, l'attenuazione viene riportata in dB/km utilizzando la formula

$$\alpha_{\text{dB/km}} = \frac{10}{z} \log_{10} \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right] \quad (3.2)$$

che è direttamente correlata a α_p tramite la conversione $\alpha_{\text{dB/km}} = 4.343 \cdot \alpha_p$.

Priva di perdite, l'attenuazione sarebbe nulla (0 dB/km), mentre nelle fibre reali a bassa perdita i valori tipici sono compresi tra 0.2 e 0.35 dB/km alle lunghezze d'onda utilizzate per la trasmissione dati (1310 nm e 1550 nm) [1].

3.2 Assorbimento ottico

L'assorbimento della potenza ottica durante la propagazione in una fibra rappresenta uno dei principali meccanismi di attenuazione e può essere attribuito a tre cause fondamentali:

1. **Assorbimento da difetti atomici**, dovuto a imperfezioni nella rete vetrosa, lacune reticolari, cluster ad alta densità di atomi e difetti di ossigeno. Tali perdite risultano generalmente trascurabili rispetto agli altri meccanismi.
2. **Assorbimento estrinseco**, causato dalla presenza di impurità incorporate nel materiale della fibra. Tra queste rivestono particolare importanza gli ioni OH^- e i metalli di transizione come ferro, rame, cromo e vanadio. Negli anni '70, livelli di impurità dell'ordine di 1 parte per milione (ppm) provocavano attenuazioni significative, comprese tra 1 e 4 dB/km. Queste impurità generano bande di assorbimento dovute a transizioni elettroniche interne e a processi di scambio di carica tra ioni. Le moderne tecniche di purificazione e deposizione, come la deposizione chimica da vapore (CVD), hanno ridotto la concentrazione di queste impurità di diversi ordini di grandezza, permettendo la realizzazione di fibre a bassissima perdita.
3. **Assorbimento intrinseco**, associato agli atomi costitutivi del materiale vetroso. A lunghezze d'onda inferiori al visibile, l'assorbimento è dominato dalle bande elettroniche nell'ultravioletto, mentre a lunghezze d'onda maggiori (infrarosso) intervengono i moti vibrazionali delle molecole della rete vetrosa.

La presenza di ioni OH^- nelle preforme di fibra è legata principalmente ai processi chimici utilizzati durante la fabbricazione, come la reazione di idrolisi con fiamma ossidrica degli alogenuri (SiCl_4 , GeCl_4 , POCl_3). Inizialmente, le fibre presentavano picchi di assorbimento a 725, 950, 1240 e 1380 nm a causa di queste impurità. Per ridurre le perdite, è necessario limitare la concentrazione di OH^- a poche parti per miliardo (ppb), così da ottenere attenuazioni inferiori

a 0.2–0.4 dB/km nelle bande di interesse per le telecomunicazioni. Con questi miglioramenti, le fibre monomodali standard presentano attenuazioni inferiori a 0.4 dB/km a 1310 nm (O-band) e inferiori a 0.25 dB/km a 1550 nm (C-band). Inoltre, l’eliminazione quasi totale degli ioni OH⁻ ha permesso di estendere l’uso anche alla **E-band** (1360–1460 nm), grazie allo sviluppo delle cosiddette fibre *low-water-peak* o *full-spectrum* [1].

3.3 Scattering

Lo *scattering* rappresenta un importante meccanismo di attenuazione nelle fibre ottiche, derivante da variazioni microscopiche dell’indice di rifrazione all’interno del materiale vetroso. Tali variazioni possono essere causate da fluttuazioni della densità, eterogeneità composizionali e difetti strutturali introdotti durante la produzione della fibra. Il vetro, essendo costituito da una rete disordinata di molecole, presenta naturalmente regioni in cui la densità molecolare è superiore o inferiore alla media. Inoltre, la presenza di diversi ossidi (es. SiO₂, GeO₂, P₂O₅) può dare origine a fluttuazioni composizionali che inducono variazioni dell’indice di rifrazione su scala inferiore alla lunghezza d’onda. Queste disomogeneità generano lo **scattering di Rayleigh**, fenomeno che diffonde la luce in tutte le direzioni e segue una caratteristica dipendenza inversa dalla quarta potenza della lunghezza d’onda (λ^{-4}).

L’attenuazione per scattering in una fibra può essere espressa con la relazione:

$$\alpha_{\text{scat}} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 k_B T_f \beta_T \quad (3.3)$$

dove n è l’indice di rifrazione, p è il coefficiente fotoelastico, k_B è la costante di Boltzmann, β_T la comprimibilità isoterma del materiale e T_f la temperatura fittizia alla quale le fluttuazioni di densità vengono “congelate” nella fibra durante il raffreddamento.

Poiché lo *scattering* di Rayleigh dipende da λ^{-4} , la perdita per scattering diminuisce rapidamente all’aumentare della lunghezza d’onda. Per questo motivo, nelle fibre ottiche moderne destinate alle telecomunicazioni, il dominio del vicino infrarosso (es. 1310 nm e 1550 nm) è preferito, in quanto le perdite per scattering sono significativamente ridotte. Tuttavia, a lunghezze d’onda superiori a 1.2 μm , le perdite sono dominate dall’assorbimento infrarosso intrinseco, mentre a lunghezze inferiori prevale lo scattering.

Le moderne tecniche di fabbricazione hanno minimizzato gli effetti dello scattering estrinseco, dovuto a bolle di gas intrappolate, materiali di partenza non reagiti e regioni cristallizzate. Questi contributi sono oggi trascurabili rispetto allo scattering intrinseco di Rayleigh.

La figura (3.1) sottostante mostra l’andamento tipico dell’assorbimento in funzione della lunghezza d’onda in un fibra ottica in silice

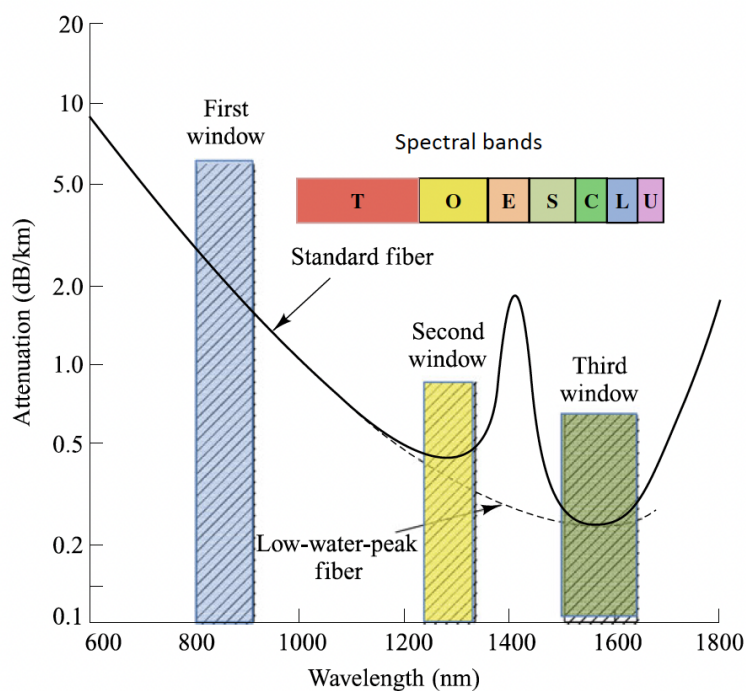


Figura 3.1: Andamento tipico dell'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda in una fibra di silice. Sono evidenziati i picchi di assorbimento dovuti agli ioni OH^- e le principali finestre di trasmissione (O-band, C-band, E-band).

3.4 Perdite per curvatura nelle fibre ottiche

Le perdite radiative da curvatura si verificano quando una fibra ottica subisce una curvatura con raggio finito.

Queste possono essere classificate in due categorie:

- **Macrobending losses:** associate a curvature macroscopiche con raggi di curvatura grandi rispetto al diametro della fibra (ad esempio, quando un cavo di fibra ottica svolta un angolo). Per pieghe lievi, la perdita aggiuntiva è trascurabile; tuttavia, al diminuire del raggio di curvatura, le perdite crescono fino a diventare significative una volta raggiunto un raggio critico.
- **Microbending losses:** dovute a piccole fluttuazioni locali del raggio di curvatura, spesso causate da irregolarità microscopiche nel rivestimento o da pressioni meccaniche sul cavo. Queste micro-pieghe possono indurre il disaccoppiamento di potenza dai modi di ordine inferiore verso modi di ordine superiore, aumentando la radiazione all'esterno del core.

La quantità di radiazione ottica dispersa da una fibra piegata dipende dall'intensità del campo fuori dal core e dal raggio di curvatura R . Nelle fibre multimodo, i modi di ordine superiore

risultano meno confinati e tendono ad accoppiarsi più facilmente nel cladding quando la fibra è piegata, perdendo energia per irraggiamento. Di conseguenza, il numero effettivo di modi M_{eff} supportati da una fibra curva è inferiore rispetto a quello di una fibra rettilinea:

$$M_{\text{eff}} = M_{\infty} \left\{ 1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2kR} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\}, \quad (3.4)$$

dove α rappresenta il profilo di indice graduale (descrive quanto velocemente varia l'indice di rifrazione), Δ la differenza di indice core-cladding, n_2 l'indice di rifrazione del cladding, e $k = 2\pi/\lambda$ la costante di propagazione dell'onda.

Il numero totale di modi in una fibra rettilinea è invece:

$$M_{\infty} \approx \frac{\alpha}{\alpha + 2} (n_1ka)^2 \Delta. \quad (3.5)$$

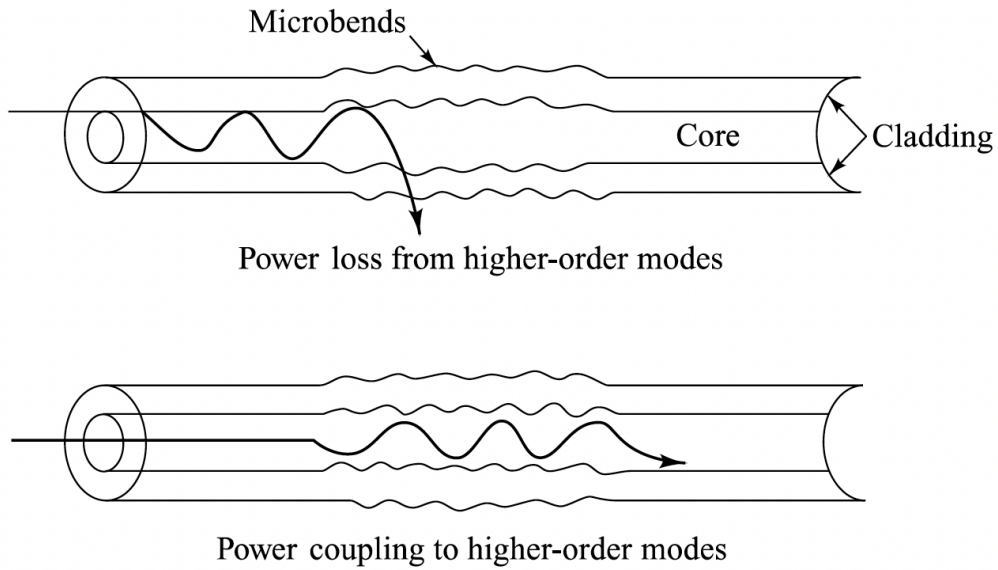


Figura 3.2: Rappresentazione fenomeno microbends all'interno delle fibre ottiche

Le **micro-pieghe (microbends)**, mostrate in figura (3.2), sono invece piccole deformazioni che generano variazioni su scala microscopica nel raggio di curvatura dell'asse della fibra, portando a perdite per disaccoppiamento dei modi. La perdita di potenza è descritta da:

$$F(\alpha_M) = \left[1 + \pi\Delta^2 \left(\frac{b}{a} \right)^4 \frac{E_f}{E_j} \right]^{-2}, \quad (3.6)$$

dove E_j ed E_f sono rispettivamente i moduli di Young del rivestimento esterno (*jacket*) e della fibra (*fiber*). Il modulo di Young per la silice fusa è circa 65 GPa, mentre per i materiali

plastici del rivestimento varia tipicamente da 20 MPa a 500 MPa.

Nota: Il modulo di Young (o modulo di elasticità longitudinale) è una proprietà meccanica dei materiali che misura la rigidità o la resistenza alla deformazione elastica lungo una direzione.

3.5 Perdite di propagazione del nucleo e del mantello

Nelle fibre ottiche reali, le perdite di propagazione derivano sia da effetti dissipativi che da scattering, e risultano differenti tra core e cladding a causa dei diversi indici di rifrazione e delle composizioni materiali. I coefficienti di attenuazione α_1 (core) e α_2 (cladding) contribuiscono alla perdita totale, che per un singolo modo di ordine (v, m) in una guida d'onda a indice a gradino è espressa come:

$$\alpha_{vm} = \alpha_1 \frac{P_{\text{core}}}{P} + \alpha_2 \frac{P_{\text{clad}}}{P} \quad (3.7)$$

dove P è la potenza totale nel modo considerato, mentre P_{core} e P_{clad} rappresentano le potenze frazionarie nel core e nel cladding. Poiché $P = P_{\text{core}} + P_{\text{clad}}$, la relazione può essere riscritta:

$$\alpha_{vm} = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{P_{\text{clad}}}{P} \quad (3.8)$$

Per fibre a indice graduale, la situazione è più complessa: i coefficienti di attenuazione e la distribuzione di potenza modale dipendono dalla coordinata radiale r . A distanza r dall'asse del core, la perdita locale è:

$$\alpha(r) = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{n^2(0) - n^2(r)}{n^2(0) - n_2^2} \quad (3.9)$$

La perdita media per un dato modo si ottiene come:

$$\alpha_{gi} = \frac{\int_0^\infty \alpha(r) p(r) r dr}{\int_0^\infty p(r) r dr} \quad (3.10)$$

dove $p(r)$ è la densità di potenza radiale del modo. In generale, nelle fibre multimodali, si osserva che l'aumento del numero di modi comporta un incremento della perdita complessiva.

3.6 Connessione tra fibre ottiche e relative perdite

Nei sistemi a fibra ottica è necessario connettere due fibre o collegarle a un dispositivo. Questo può avvenire tramite **giunzioni** (*splicing*) o **connettori** (*connectors*). In entrambi i casi, l'obiet-

tivo principale è mantenere la continuità tra i core delle fibre. La qualità della connessione è caratterizzata principalmente da due parametri:

- **Perdita di inserzione** (*Insertion loss*): rappresenta la potenza persa attraversando la giunzione o il connettore. È espressa in dB come la differenza tra la potenza in ingresso e quella in uscita:

$$L_{\text{ins}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \right)$$

Un'ottima giunzione può introdurre una perdita di circa 0.01 dB, mentre un buon connettore può avere una perdita di circa 0.1 dB.

- **Perdita di ritorno** (*Return loss*): misura la quantità di potenza riflessa dalla giunzione/connettore. È importante perché le riflessioni possono interferire con dispositivi attivi come laser e amplificatori. È definita come:

$$R_L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{incident}}}{P_{\text{reflected}}} \right) \quad (3.11)$$

Nelle giunzioni realizzate bene, la perdita di ritorno può variare tra 30 e 60 dB.

3.7 Problemi nelle giunzioni (*Splices*)

Le giunzioni possono causare attenuazione per diversi motivi:

- **Riflessione**: discontinuità dell'indice di rifrazione (ad esempio per la presenza di un vuoto d'aria) possono riflettere una frazione del segnale.

Questa frazione può essere stimata tramite il coefficiente di Fresnel:

$$|\Gamma|^2 \approx \left| \frac{n_{\text{SiO}_2} - n_{\text{aria}}}{n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{aria}}} \right|^2$$

$$|\Gamma|^2 \approx \left| \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right|^2 = 0.04$$

- **Disallineamento modale**: non tutta la radiazione del modo guidato di una fibra viene trasferita nel modo guidato della seconda fibra; una parte può propagarsi nel cladding e andare persa.

Tipologie di giunzioni

Le giunzioni possono essere:

- **Meccaniche:** il corretto allineamento è mantenuto da un dispositivo meccanico; queste giunzioni sono tipicamente semi-permanenti.
- **A fusione** (*Fusion splicing*): realizzate con uno *splicer* che allinea le fibre e le fonde mediante un arco elettrico controllato. Queste giunzioni sono permanenti e offrono migliori prestazioni in termini di perdita di inserzione, durabilità e resistenza alle variazioni di temperatura.

Cause di attenuazione nelle giunzioni

Le perdite possono derivare da:

- **Problemi meccanici:** cattiva preparazione dei terminali, disallineamento angolare o presenza di spazi d'aria.
- **Problemi di compatibilità:** accoppiamento tra fibre di diverso tipo o dimensioni.

Capitolo 4

Tecniche di misura dell'attenuazione

4.1 Introduzione alla misura dell'attenuazione

L'attenuazione rappresenta un parametro fondamentale nella progettazione delle fibre ottiche; è quindi essenziale disporre di tecniche adeguate per la sua misurazione. In questo capitolo verranno presentati e confrontati tre metodi classici: il metodo dell'inserzione, la tecnica del cut-back e la caratterizzazione mediante OTDR.

4.2 Tecnica del cut-back

La tecnica del cut-back richiede l'accesso a entrambe le estremità della fibra e risulta distruttiva poiché un tratto di fibra viene tagliato per effettuare la misurazione.

Per utilizzare questa tecnica è necessario disporre di una sorgente ottica, insieme a un *mode stripper*, che ha la funzione di eliminare i modi che si propagano nel cladding (evitando così di sovrastimare l'attenuazione del core), e un *photodetector* per la misura della potenza ottica.

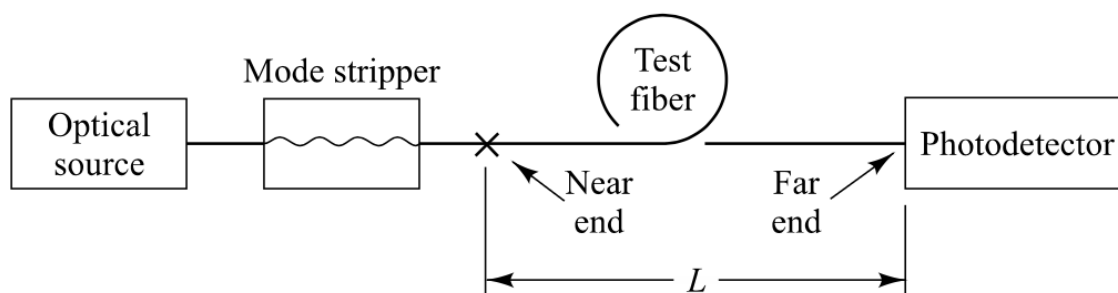


Figura 4.1: Schema per misurare l'attenuazione mediante la tecnica cut-back

Lo schema sperimentale si articola nelle seguenti fasi:

1. Si collega la sorgente ottica al *near end* della fibra e, dopo il passaggio attraverso un *mode stripper*, si misura la potenza P_F all'estremità opposta (*far end*) alla lunghezza d'onda di interesse.
2. Senza modificare l'accoppiamento iniziale, si taglia la fibra a pochi metri dalla lunghezza originaria e si misura la nuova potenza P_N al *near end*.

Eseguendo questi passaggi si ottiene la relazione per la stima della perdita:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_N}{P_F} \right), \quad (4.1)$$

dove α (in dB/km) rappresenta l'attenuazione media in decibel per chilometro, L (in km) è la lunghezza originaria della fibra.

Condizioni di lancio Quando si applica questa tecnica, occorre valutare come l'energia ottica viene lanciata nella fibra.

Nel caso di fibre multimodali, diverse condizioni di lancio possono produrre valori di perdita differenti.

Possiamo distinguere due casi principali:

- *Underfilling*: quando la dimensione dello spot è inferiore al diametro del core e la sua apertura numerica (NA) è più piccola di quella del core, la potenza si concentra al centro del core. La perdita dovuta ai modi di ordine superiore può essere trascurata.
- *Overfilling*: quando la dimensione dello spot (diametro del fascio ottico) è maggiore del diametro del core e la NA supera quella della fibra, una parte del fascio incidente viene persa nel cladding e la perdita di potenza dovuta ai modi di ordine superiore diventa significativa.

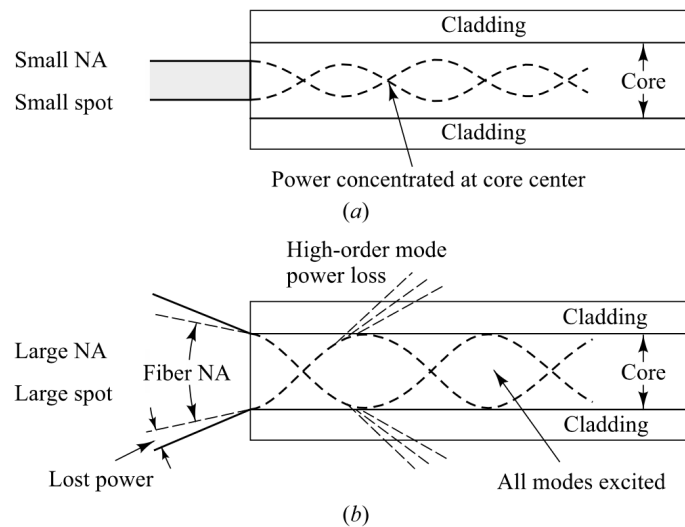


Figura 4.2: a) Underfilling; b) Overfilling

Per stabilizzare la distribuzione modale, si applica la tecnica del *mandrel wrap*: la fibra viene avvolta attorno a un mandrino (diametro 1,0 cm–1,5 cm) per filtrare i modi di cladding prima della misura.

4.3 Metodo dell'inserzione

Quando si deve misurare l'attenuazione di dispositivi con connettori, il metodo cut-back non risulta il più adatto. Una possibile alternativa è rappresentata dal metodo dell'inserzione. La tecnica consiste nel misurare la potenza trasmessa, prima senza il dispositivo e successivamente con il dispositivo collegato, confrontando le due misurazioni di potenza ottica.

La misura si articola in due fasi:

1. **Misura di riferimento.** Si collegano direttamente i connettori del trasmettitore e del ricevitore, ottenendo la potenza di riferimento $P_1(\lambda)$ alla lunghezza d'onda di interesse, rappresentato in figura (4.3 (a)).
2. **Misura con fibra in prova.** Si inserisce il cavo in fibra ottica tra i connettori, senza modificare le condizioni di accoppiamento né la potenza in ingresso. Si misura quindi la nuova potenza $P_2(\lambda)$, rappresentato in figura (4.3 (b)).

Un esempio pratico si ha quando c'è da testare un nuovo cavo: si procede dapprima con la misura di riferimento e successivamente con quella ottenuta interponendo il cavo da testare tra la sorgente e il rivelatore.

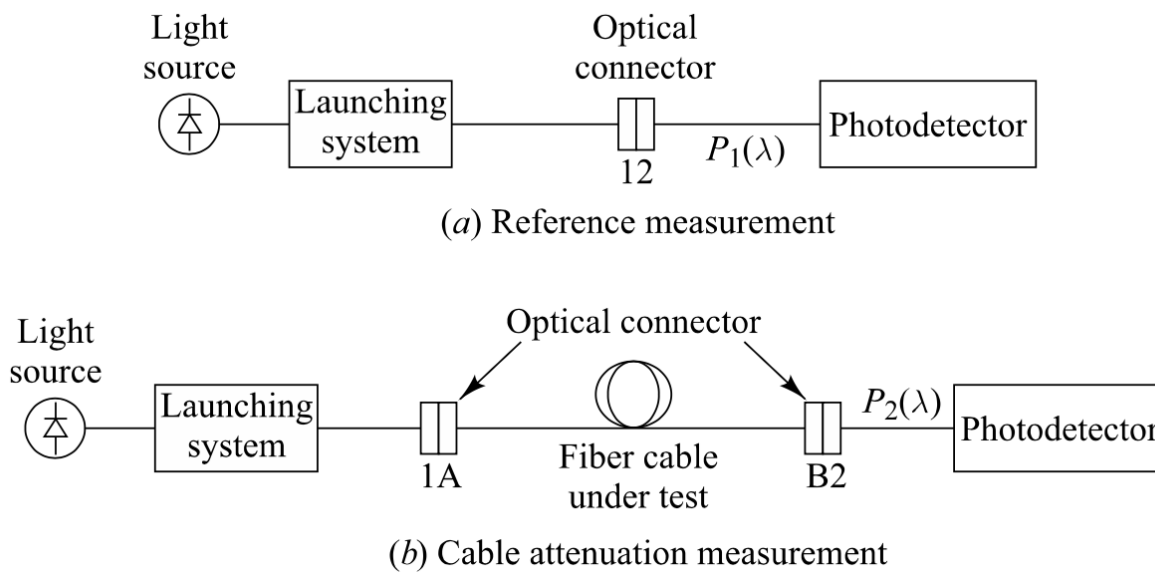


Figura 4.3: a) Misura di riferimento; b) Misura con il cavo da testare

L'attenuazione totale $A(\lambda)$, espressa in dB, si calcola come:

$$A_{dB}(\lambda) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \right) \quad (4.2)$$

Un limite di questa metodologia è rappresentato dal fatto che non vi è garanzia che le condizioni di misura rimangano invariate tra le due rilevazioni. In particolare, l'uso di connettori può introdurre ulteriori perdite non note che, erroneamente, potrebbero essere attribuite al dispositivo in esame.

4.4 Misura con OTDR

L' **Optical Time-Domain Reflectometer** (OTDR) è uno strumento utilizzato per valutare i parametri di una fibra ottica installata, tra cui l'attenuazione.

L'OTDR è, in pratica, un radar ottico: invia periodicamente impulsi laser in un'estremità della fibra utilizzando un circolatore o un accoppiatore direzionale. Le proprietà della fibra sotto test vengono analizzate tramite l'ampiezza e le caratteristiche temporali della forma d'onda della luce riflessa e retro-diffusa. Questo strumento è composto da una sorgente, un ricevitore, un modulo di acquisizione ed elaborazione dati e un display.

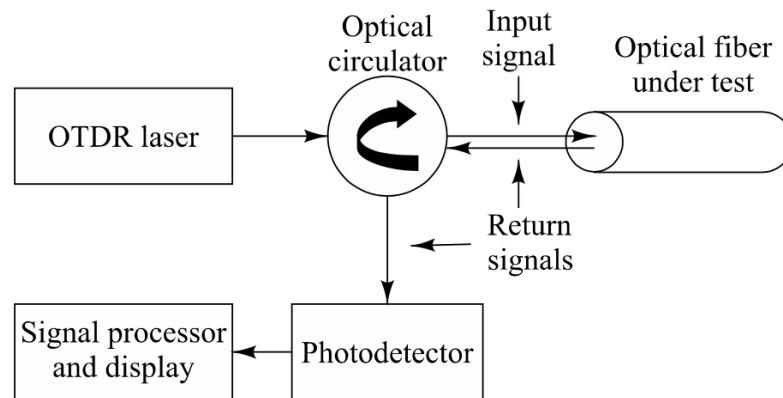


Figura 4.4: Principio operativo di un OTDR con circolatore ottico

Lo **scattering di Rayleigh** è la principale causa di perdita di potenza nelle fibre ottiche di alta qualità. La potenza ottica diffusa all'indietro da questo fenomeno può essere utilizzata per calcolare l'attenuazione. L'OTDR invia un impulso e misura la potenza retro-diffusa in funzione della distanza lungo la fibra.

In particolare, questo strumento rileva le potenze interne alla fibra in esame e stima il coefficiente di attenuazione medio tramite la seguente relazione:

$$\bar{\alpha} = -\frac{10 [\log P_D(x_2) - \log P_D(x_1)]}{2(x_2 - x_1)} \quad (4.3)$$

dove $\bar{\alpha}$ rappresenta il **coefficiente medio di attenuazione**, mentre $P_D(x)$ è la potenza retro-diffusa misurata dall'OTDR in due punti distinti della fibra x_1, x_2 . Il fattore moltiplicativo 2 al denominatore tiene conto del percorso di andata e ritorno della luce all'interno della fibra.

Un'ulteriore caratteristica di questo dispositivo sono le **zone morte**, nella quale il fotorivelatore risulta saturato momentaneamente, dopo una forte riflessione.

Questo fenomeno è suddiviso in due categorie:

- **Event dead zone:** rappresenta la distanza minima nella fibra entro la quale un secondo evento riflettente non può essere risolto, poiché il ricevitore è momentaneamente saturo.
- **Attenuation dead zone:** indica la distanza minima necessaria affinché l'OTDR possa misurare correttamente l'attenuazione dopo un evento riflettente.

Queste zone morte sono importanti perché influenzano la capacità dell'OTDR di individuare difetti o caratteristiche vicine tra loro.

4.5 Confronto tra i metodi

Ogni metodo presenta vantaggi e svantaggi specifici.

Il metodo **cut-back** consente di ottenere una misura dell'attenuazione molto accurata e insieme all'utilizzo di un buon *mode-stripper*, garantisce una bassa sensibilità alle condizioni di lancio. Tuttavia, è un metodo distruttivo, in quanto richiede il taglio della fibra. Il suo impiego è principalmente in ambito laboratoristico.

Il metodo **insertion-loss**, al contrario, è non distruttivo e costituisce una procedura rapida, adatta a collegamenti già assemblati ed economicamente vantaggiosa. Di contro, offre una precisione inferiore nella stima dell'attenuazione ed è sensibile a variazioni di accoppiamento e condizioni di lancio durante le misure. Trova applicazione principalmente in campo, su cavi già assemblati.

L'**OTDR** è un metodo non distruttivo e *single-ended* (richiede l'accesso a un solo capo della fibra). Permette di localizzare con precisione giunzioni, connettori e difetti, fornendo inoltre un profilo spaziale con risoluzione. Tra gli svantaggi si annoverano una precisione inferiore nella stima dell'attenuazione media, la necessità di calibrazioni periodiche e l'interpretazione del tracciato che richiede esperienza tecnica. Il suo utilizzo è tipico in campo, per il collaudo di collegamenti già cablati con accesso a un solo capo.

Tabella 4.1: Confronto tra i metodi di misura dell'attenuazione nelle fibre ottiche

Metodo	Vantaggi	Svantaggi
Cut-back	Elevata accuratezza nella misura dell'attenuazione; bassa sensibilità alle condizioni di lancio con un buon <i>mode-stripper</i> .	Metodo distruttivo (richiede il taglio della fibra).
Insertion-loss	Non distruttivo; procedura rapida; adatto a collegamenti già assemblati; economicamente vantaggioso.	Precisione inferiore rispetto al cut-back; sensibile a variazioni di accoppiamento e condizioni di lancio.
OTDR	Non distruttivo e <i>single-ended</i> ; localizza giunzioni, connettori e difetti; fornisce un profilo spaziale con risoluzione metri-decimetri.	Precisione inferiore nella stima dell'attenuazione media; richiede calibrazioni periodiche e esperienza per l'interpretazione del tracciato.

Capitolo 5

Conclusioni

In questa tesi è stata condotta un'analisi approfondita del fenomeno dell'attenuazione, supportata da una ricerca bibliografica accurata. Sono stati ripresi i concetti fondamentali relativi alle fibre ottiche, come la loro struttura, il principio di funzionamento e i fondamenti di ottica geometrica necessari per comprendere il fenomeno della riflessione totale interna, che ne governa il comportamento. Successivamente sono state illustrate le diverse tipologie di fibre attualmente disponibili sul mercato, suddividendole per categoria.

Nella parte applicativa, è stato esaminato in dettaglio il fenomeno dell'attenuazione, analizzando i principali metodi di misura oggi utilizzati e mettendone in evidenza peculiarità e criticità.

Considerazioni finali

Comprendere a fondo il fenomeno dell'attenuazione e padroneggiare le tecniche di misura rappresenta un presupposto fondamentale per progettare reti in fibra ottica sempre più performanti. La fibra ottica costituisce la spina dorsale di una comunicazione sempre più globale, efficiente e sostenibile.

Bibliografia

- [1] G. Keiser, *Fiber Optic Communications*, 5th. Springer Nature Singapore, 2021, isbn: 978-981-33-4665-9. doi: 10.1007/978-981-33-4665-9. indirizzo: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9>.
- [2] L. Palmieri e M. Santagiustina, *Impairments in Optical Fibers*, Lecture notes, A.A. 2023/2024, 2024.
- [3] P. Zotto, S. L. Russo e P. Sartori, *Fisica generale. Elettromagnetismo e ottica*, 2^a ed. La Dotta, 2017, isbn: 978-88-98648-36-8.