

Analisi delle caratteristiche delle fibre ottiche: aspetti teorici, aspetti tecnologici e criteri di progetto

G. Ferri, G. Galasso (*)

L'articolo si propone di evidenziare le caratteristiche principali delle fibre ottiche per telecomunicazioni attualmente installate in Italia e nel mondo. L'enfasi è posta, piuttosto che sull'analisi teorica, sulle caratteristiche reali delle fibre; particolare attenzione è dedicata anche alla giustificazione delle differenze, sia in termini di profilo d'indice di rifrazione che di prestazioni, tra la situazione reale e quella teorica. Tutti questi argomenti sono trattati per le fibre singolo modo, standard (SMR) e a dispersione spostata (SMDS).

1. Introduzione

Le fibre ottiche per Telecomunicazioni sono al giorno d'oggi ampiamente adottate sia nelle trasmissioni terrestri che sottomarine su brevi e lunghe distanze.

Le loro caratteristiche, a vari livelli, sono state oggetto di numerose pubblicazioni negli ultimi 20 anni, ma in ogni caso facendo ampio riferimento alle leggi teoriche che governano la propagazione di segnali ottici all'interno di strutture cilindriche guidanti. La complicazione della trattazione matematica è particolarmente evidente quando ci si riferisce alle fibre singolo modo, quelle per le quali la luce si propaga seguendo una "singola direzione", coincidente con l'asse della fibra. Tali fibre per loro natura hanno una dimensione degli ostacoli che si oppongono alla propagazione dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce che si trasmette (qualche micron); tale circostanza rende non applicabili alcuni principi dell'ottica geometrica che permettono una descrizione intuitiva del modo di propagarsi della luce.

Nel presente lavoro si è cercato di illustrare le fibre ottiche da un punto di vista più "applicativo"; la via che si è seguita per raggiungere il suddetto scopo è di limitare gli aspetti teorici al minimo indispensabile, facendo ampio ricorso ad espressioni approssimate dei parametri ottici che permettono di legare le caratteristiche fondamentali delle fibre in modo più elementare. Si

sono potuti presentare i criteri di progetto di una fibra evitando ogni complicazione matematica.

Alcune considerazioni sono state dedicate al raffronto tra la struttura ideale delle fibre, alla quale si fa riferimento nei criteri di progetto, e quella reale, che si differenzia dalla prima per ragioni connesse al processo di fabbricazione. Le differenze saranno presentate principalmente in funzione delle prestazioni delle fibre.

Gli aspetti tecnologici saranno limitati ad alcune considerazioni sui materiali di base comunemente adottati per la fabbricazione delle fibre, necessaria premessa per introdurre alcuni concetti sull'attenuazione. Inoltre, sempre a livello di considerazioni generali, si accennerà brevemente alle ragioni tecnologiche che caratterizzano la forma reale del profilo d'indice di rifrazione.

2. Tecnologia

Le fibre di vetro sono essenzialmente composte di silice vetrosa SiO_2 . Tale componente di base presenta dal punto di vista tecnologico notevoli vantaggi ed inoltre, come vedremo nel seguito, permette il raggiungimento di caratteristiche ottiche decisamente soddisfacenti. Poiché le fibre ottiche per funzionare necessitano di una parte interna (nucleo) ad indice di rifrazione più alto della parte circostante (mantello), si ricorre ad altri materiali (droganti) che provvedono al suddetto scopo. Per ragioni la cui trattazione esula dallo scopo del presente lavoro si utilizza essenzialmente GeO_2 ; tale composto incrementa l'indice di rifrazione

(*) Ing. Giuseppe Ferri, ing. Giuseppe Galasso -F.O.S. Fibre Ottiche Sud- Battipaglia

della quantità desiderata, introducendo una perturbazione minima sul composto di base. La fibra in sostanza si presenta come un cilindro di silice del diametro di un centinaio di micron con una parte interna, composta da silice debolmente drogata con germanio, il cui diametro è inferiore a quello dell'intera fibra di più di un ordine di grandezza.

Dal punto di vista tecnologico per ottenere questa struttura si ricorre a materie prime sotto forma di composti alogenati (SiCl_4 , GeCl_4) in quanto essi sono disponibili in commercio in quantità discrete e si trasformano nella forma desiderata mediante reazioni chimiche facilmente e stabilmente ottenibili. Inoltre, per ragioni che saranno chiare al paragrafo successivo, si richiede a questi materiali di base di possedere elevata purezza (basso contenuto di ioni metallici). Per ottenere le prestazioni attuali delle fibre il contenuto massimo di ioni metallici è al di sotto di $50 \mu\text{g}$ per ogni Kg di SiCl_4 o GeCl_4 .

I composti SiO_2 e GeO_2 vengono ottenuti dai composti alogenati mediante semplice reazione di combustione; gli altri prodotti di reazione (principalmente HCl e Cl_2) sono sotto forma gassosa ed, inoltre, possono essere facilmente ridotti in forma di sostanze non tossiche (soluzioni acquose di NaCl).

Le prestazioni ottenibili dal punto di vista ottico allo stato attuale della tecnologia saranno oggetto dei paragrafi successivi.

3. Attenuazione

Consideriamo un elemento infinitesimo di materiale trasparente attraversato da un flusso di potenza elettromagnetica.

Applicando a tale elemento il principio di conservazione dell'energia, nell'ipotesi di materiale omogeneo ed escludendo fenomeni non lineari la variazione della potenza P , lungo l'asse di propagazione x , può essere espressa nel seguente modo:

$$\partial P = -\alpha P \partial x, \quad (1)$$

dove il coefficiente di attenuazione α , è la misura dell'opacità del materiale ed è espresso in decibel per unità di lunghezza (dB/km).

Se ipotizziamo che l'attenuazione non dipenda dalla coordinata spaziale (o dipenda debolmente), possiamo risolvere facilmente la (1) ricavando:

$$P(x) = P(0)\exp(-\alpha x). \quad (2)$$

Quindi, se il mezzo attraversato dal flusso di potenza ha una lunghezza pari ad L :

$$\alpha L = 10 \log \left(\frac{P(0)}{P(L)} \right). \quad (3)$$

L'attenuazione è, allora, una misura della progressiva diminuzione della potenza trasmessa e pertanto assume un'importanza fondamentale nello studio dei sistemi di telecomunicazione.

Allo scopo di analizzare in modo più approfondito questo importante fenomeno conviene considerare separatamente i due contributi fondamentali, l'intrinseco, che appartiene al materiale stesso che costituisce la fibra, l'estrinseco, che è una caratteristica del processo di fabbricazione.

3.1 Attenuazione intrinseca

Le cause intrinseche dell'attenuazione sono considerate impossibili da eliminare poiché dovute alla interazione tra l'energia elettromagnetica e la materia in cui essa si propaga.

Se analizziamo il campo elettromagnetico che viaggia all'interno della fibra, si può osservare che parte della sua energia viene ceduta agli atomi causando transizioni elettroniche. Questo fenomeno si manifesta principalmente nella regione a basse lunghezze d'onda (ultravioletto) ed ha un effetto limitato oltre $0.7 \mu\text{m}$. Infatti a lunghezze d'onda superiori contribuisce per meno di 1 dB/km. Per il grosso effetto che ha alle basse lunghezze d'onda esso viene comunemente denominato *assorbimento ultravioletto*.

D'altra parte nella regione ad alte lunghezze d'onda ($>1.7 \mu\text{m}$) compare un altro fenomeno che trae la sua origine dalla energia assorbita dalla matrice silicica e trasformata in vibrazione molecolare. Per la sua caratteristica spettrale si adotta comunemente la denominazione di *assorbimento infrarosso*.

L'insieme di questi due contributi genera, nei vetri a base silicica, una finestra ottica di bassa attenuazione ($<1 \text{ dB/km}$) che va da $0.7 \mu\text{m}$ a $1.7 \mu\text{m}$. In tale finestra ha un contributo non trascurabile un terzo fenomeno di attenuazione intrinseca che si chiama *scattering di Rayleigh* ed è dovuto alla diffusione della luce causata principalmente dalla non omogeneità di natura puramente casuale nella composizione del vetro. L'andamento della componente di attenuazione dovuta a tale fenomeno in funzione della lunghezza d'onda λ è del tipo λ^{-4} e, quindi nell'ambito della finestra definita precedentemente tenderebbe a far prediligere la zona a lunghezza d'onda maggiore.

3.2 Attenuazione estrinseca

Il processo tecnologico, benché attualmente abbia raggiunto un notevole livello di evoluzione, contribuisce in maniera non trascurabile al valore di attenuazione della fibra. L'insieme dei contributi costituisce l'attenuazione estrinseca.

I più comuni ioni metallici come accennato in precedenza, originano fenomeni di assorbimento che incrementano drasticamente l'attenuazione della fibra. Tuttavia il livello tecnologico raggiunto permette di considerare un evento accidentale la presenza di tracce di questi elementi.

Il fenomeno estrinseco che attualmente condiziona maggiormente l'attenuazione della fibra è l'assorbimento dovuto alla presenza di ioni OH^- . Tale assorbimento ha una caratteristica risonante con picchi a $0.95 \mu\text{m}$ e $1.38 \mu\text{m}$ nel campo di valori della lunghezza d'onda di interesse. La presenza di questi due picchi divide la finestra siccitata in tre parti la prima finestra intorno a $0.85 \mu\text{m}$, la seconda finestra intorno a $1.3 \mu\text{m}$, la terza finestra intorno a $1.55 \mu\text{m}$.

I valori tipici di attenuazione consentiti dalla tecnologia attuale nell'ambito delle tre finestre valgono 0.6 dB/km per la prima, 0.35 dB/km per la seconda e 0.2 dB/km per la terza.

Come si vede la prima finestra presenta i valori più alti ed attualmente non è utilizzata per la trasmissione. Le altre due sono quelle di reale interesse nelle comunicazioni attuali ed i criteri che inducono a privilegiare l'una o l'altra saranno ampiamente trattati nel seguito.

4. Progetto di una fibra singolo modo con profilo a gradino

Come detto al paragrafo precedente, i fenomeni di attenuazione intrinseci ed estrinseci che intervengono nella silice suggeriscono l'utilizzo delle fibre ottiche a singolo modo con valori della lunghezza d'onda nelle regioni intorno a $1.3 \mu\text{m}$ ed a $1.55 \mu\text{m}$. Anche se i valori di attenuazione spingerebbero ad utilizzare le fibre in terza finestra, storicamente, per ragioni connesse alla disponibilità di componenti ci si è orientati alla seconda finestra. Per tale motivo rivolgeremo la nostra attenzione alla fibra ottimizzata al funzionamento intorno a $1.3 \mu\text{m}$, che rappresenta la quasi totalità delle installazioni terrestri attuali; in un paragrafo successivo dedicheremo la nostra attenzione anche alle fibre ottimizzate intorno a $1.55 \mu\text{m}$ che probabilmente rappresentano il futuro delle trasmissioni ottiche e che sono già ampiamente utilizzate nei collegamenti sottomarini.

Il problema che ci poniamo è, quindi, come progettare una fibra per ottimizzare le caratteristiche geometriche e trasmissive nella seconda finestra.

Partiamo dal presupposto di voler utilizzare una fibra con il profilo a gradino (fig. 1) che dal punto di vista tecnologico presenta diversi vantaggi legati soprattutto alla estrema semplicità della struttura. Per ottenerla, infatti basta drogare la silice che costituisce il vetro

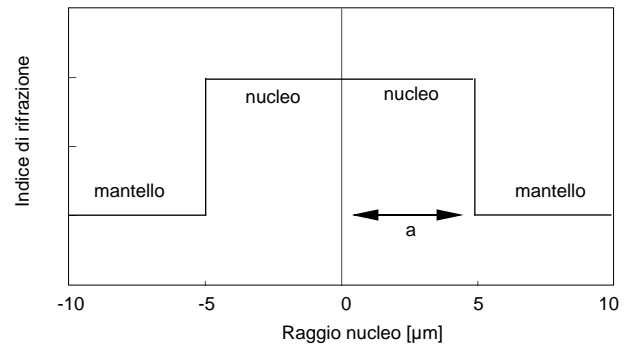


Figura 1 Profilo d'indice di rifrazione di una fibra a salto d'indice

(SiO_2) con una quantità opportuna ed uniforme di drogante (GeO_2) per elevare il profilo d'indice di rifrazione della regione centrale (nucleo).

Progettare questa fibra sostanzialmente significa determinare l'altezza e la larghezza del profilo più opportune per ottenere le migliori prestazioni in termini di dispersione, perdite per micro e macrocurvatura, perdite in fase di giuntaggio [1].

Cominciamo con il fissare alcuni concetti che verranno usati spesso nel seguito di questo lavoro.

L'indice di rifrazione del vetro in silice drogata con biossido di germanio (GeO_2) dipende sia dalla lunghezza d'onda λ che dalla percentuale molare di drogaggio⁽¹⁾ X secondo la relazione [2]:

$$n^2(\lambda, X) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{[A_i + X(B_i - A_i)]\lambda^2}{\lambda^2 - [C_i + X(D_i - C_i)]^2}, \quad (4)$$

dove i valori delle costanti sono riportati nella tab. 1, nell'ipotesi che λ sia espressa in μm . Si noti infatti che le costanti C e D sono dimensionali e hanno le stesse dimensioni della lunghezza d'onda, mentre le costanti A e B sono adimensionali. Valori tipici di X per fibre a salto d'indice sono dell'ordine di qualche unità percentuale.

Nel seguito indicheremo con n_1 ed a l'indice di rifrazione ed il raggio del nucleo, mentre con n_0 l'indice di rifrazione del mantello che, per quanto detto, coincide con quello della silice pura (quindi $n_0 = n(\lambda, 0)$, cfr. (4)).

La dipendenza dalla lunghezza d'onda dell'indice di rifrazione è una delle cause dell'allargamento che un impulso di luce subisce quando si propaga all'interno

	1	2	3
A	0.696166	0.407943	0.897479
B	0.806866	0.718158	0.854168
C	0.068404	0.116241	9.896161
D	0.068973	0.153966	11.84193

Tabella 1 Valori delle costanti che compaiono nella (4)

(1) La percentuale molare di drogaggio è definita come $100 \times (\text{numero moli di drogante per mole di silice})$.

della fibra. Tale fenomeno è denominato "dispersione materiale" (D_m) e vale [3]:

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}, \quad (5)$$

con c =velocità della luce nel vuoto.

Il secondo contributo alla dispersione viene dal fatto che parte della luce si propaga nel mantello e, quindi, a velocità differente visto il differente indice di rifrazione presente in questa zona della fibra. Questo contributo che è chiamato "dispersione di guida" (D_g) ha un'espressione analitica abbastanza complicata [3], ma per i nostri scopi può essere approssimato nel seguente modo [4] facendo comparire esplicitamente le variabili interessate al nostro progetto:

$$D_g = \begin{cases} -V(4.358 - 3.055V + 0.548V^2), & V \in [1.3, 2.5] \\ -V(0.167 - 2.72V^{-1} + 6.628V^{-2}), & V \in [2.5, 5.0] \end{cases} \quad (6)$$

con

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \approx \frac{2\pi a}{\lambda} n_0 \sqrt{2\Delta} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_0}{n_0} \quad (8)$$

La V definita nella (7) è spesso indicata come *frequenza normalizzata*, mentre la Δ come salto d'indice ed è sovente espresso in percentuale.

A questi due contributi andrebbero aggiunti la "dispersione modale", che trascuriamo perché limitiamo il nostro studio alle fibre a singolo modo, e la "dispersione di profilo" [3] che pesa poco soprattutto nel caso di fibre per telecomunicazioni che, avendo differenza di indice di rifrazione tra nucleo e mantello poco accentuata, possono essere considerate "debolmente guidanti".

Alla luce di queste considerazioni si ricava che la dispersione totale di una fibra a singolo modo è la somma di due contributi (D_m e D_g) e, quindi, come si può ricavare dalle definizioni, dipende dalla lunghezza d'onda, dal drogaggio del nucleo (attraverso l'indice di rifrazione) e dalla larghezza del nucleo (attraverso V). In fig. 2 è presentato l'andamento dei singoli contributi e della dispersione totale in funzione della lunghezza d'onda per una fissata struttura del nucleo ($a=4.35 \mu\text{m}$ e $\Delta=0.4\%$)⁽²⁾. Come si può osservare le caratteristiche del nucleo sono state scelte opportunamente, in modo da avere l'annullamento della dispersione totale nella zona intorno a $1.3 \mu\text{m}$. Per un'altra scelta del profilo (fig. 3) si può

(2) Si noti che, in base alle (4) e (8), una volta fissata una lunghezza d'onda, dal valore di Δ si può univocamente determinare il valore di X . Qui e nel seguito il drogaggio verrà quindi specificato attraverso i valori Δ piuttosto che di X , anche considerando che il valore di X varia molto lentamente al variare di λ per un fissato valore di Δ .

ottenere una dispersione totale nulla nella zona intorno a $1.55 \mu\text{m}$. Come già accennato le fibre ottimizzate per il funzionamento in questa regione saranno oggetto di un successivo paragrafo; quello che ci preme evidenziare ora è che per spostare la lunghezza d'onda di dispersione nulla occorre sostanzialmente agire sulla dispersione di guida, come si ricava dal confronto tra le figg. 2 e 3. Dalle (5) e (6) si ricava, quindi, che bisogna agire principalmente sulla larghezza del nucleo.

Passiamo ora al dimensionamento del profilo d'indice per ottenere una fibra *singolo modo, ottimizzata per il funzionamento in 2^a finestra*.

L'ipotesi che la fibra sia singolo modo si traduce, dal punto di vista del progetto, nel fatto che la lunghezza d'onda di taglio del secondo modo eventualmente propagantesi in fibra sia inferiore a $1.3 \mu\text{m}$. Traducendo in formule questo vincolo otteniamo:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} n_0 \sqrt{2\Delta} \leq 1.3 \mu\text{m} \quad (9)$$

Osserviamo che la (9) attraverso la (8) evidenzia la dipendenza della lunghezza d'onda di taglio dall'altezza del profilo d'indice (attraverso Δ) e dalla sua larghezza (a).

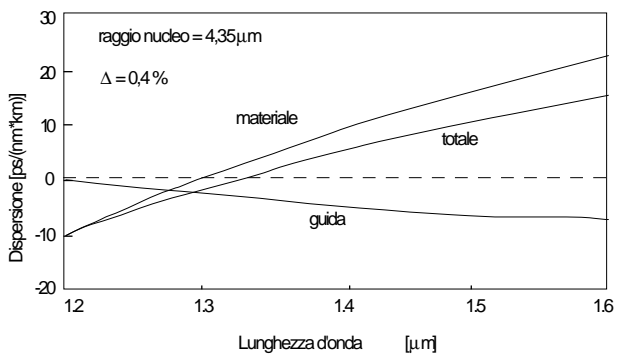


Figura 2 Andamento della dispersione materiale, di guida e totale per una fibra a salto d'indice al variare della lunghezza d'onda. La dispersione totale si annulla intorno a $1.3 \mu\text{m}$

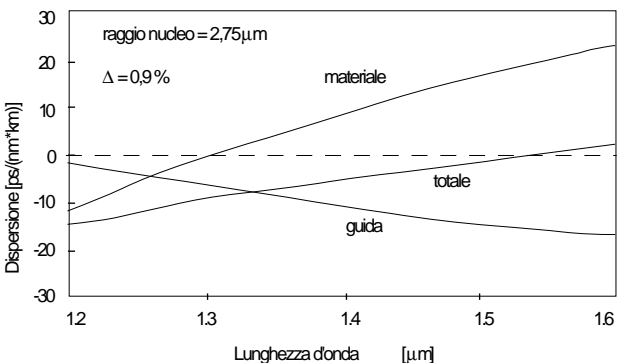


Figura 3 Andamento della dispersione materiale, di guida e totale per una fibra a salto d'indice al variare della lunghezza d'onda. La dispersione totale si annulla intorno a $1.55 \mu\text{m}$

In fig. 4 è rappresentato l'andamento della lunghezza d'onda di taglio al variare del raggio del nucleo per tre diversi valori di drogaggio. Si osserva immediatamente che volendo che la fibra funzioni in regime monomodale a 1.3 μm, una volta fissato il drogaggio, si determina un raggio massimo del nucleo.

Per continuare il nostro progetto abbiamo bisogno di qualche altro vincolo sulle caratteristiche del profilo. Precedentemente abbiamo mostrato come, manovrando la dispersione di guida, sia possibile annullare la dispersione totale ad una qualsiasi delle lunghezze d'onda di nostro interesse. Si può, pertanto, costruire un grafico che corredi la lunghezza d'onda di dispersione nulla (λ₀) con la dimensione del nucleo per determinate concentrazioni di drogaggio, analogamente a quanto fatto per la lunghezza d'onda di taglio. Il risultato è in fig. 5 e, per le stesse concentrazioni di drogaggio di fig. 4, mostra come per ottenere dispersione nulla nella zona di interesse (intorno a 1.3 μm) la dimensione del nucleo debba essere superiore ad un certo valore. Allora considerando contemporaneamente il vincolo su λ_c e su λ₀ si ottiene, per ogni valore di drogaggio, un intervallo abbastanza contenuto di possibili dimensioni del nucleo. Ad esempio per i valori di drogaggio considerati (Δ=0.3%, Δ=0.4% e Δ=0.5%), si ottiene che valori

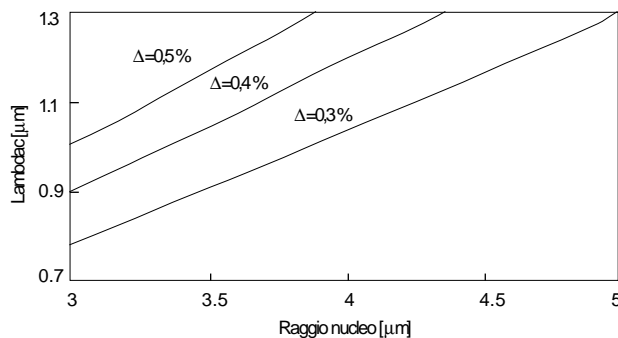


Figura 4 Andamento della lunghezza d'onda di taglio al variare del raggio del nucleo per diverse percentuali di drogaggio

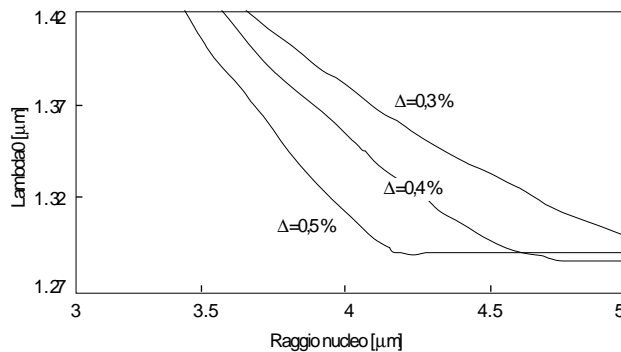


Figura 5 Andamento della lunghezza d'onda di dispersione nulla al variare del raggio del nucleo per diverse percentuali di drogaggio

opportuni del raggio del nucleo sono rispettivamente 5 μm, 4.5 μm e 4 μm. Si osservi anche che per valori di drogaggio superiori a 0.5% è impossibile soddisfare contemporaneamente i due vincoli, mentre per valori inferiori a 0.3% di drogaggio la luce che si propaga non è sufficientemente confinata nel nucleo.

Per approfondire quest'ultimo aspetto, conviene analizzare l'andamento del raggio del campo modale per le diverse configurazioni del profilo d'indice di rifrazione. Ancora una volta facciamo riferimento ad una formula approssimata che facilita la nostra analisi; questa formula, dovuta a Marcuse [5], mette in relazione il raggio del campo modale (w), il raggio del nucleo (a) e la lunghezza d'onda di taglio nel seguente modo:

$$w = a \left[0.65 + 0.434 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{1.5} + 0.01488 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \right] \quad (10)$$

Partendo dalla (10), in fig. 6 è rappresentato un grafico analogo ai precedenti per il raggio del campo modale a 1.31 μm. Si noti che per le tre strutture precedentemente individuate (0.3% - 5 μm, 0.4% - 4.5 μm e 0.5% - 4 μm) il raggio del campo modale vale 5 μm, 4.5 μm e 4 μm rispettivamente. Come si vede, negli esempi riportati il raggio del campo coincide con il raggio fisico del nucleo: ciò non significa che il campo è tutto contenuto nel nucleo, in quanto, dalla definizione di raggio modale [1] si desume che essa coincide con la larghezza di una gaussiana, ovvero con la distanza tra le due ascisse, giacenti da parte opposte rispetto al valore medio, in corrispondenza delle quali il valore della curva gaussiana è diminuito di un fattore prestabilito rispetto al valore massimo (per esempio, ad una distanza pari ad una deviazione standard σ dal valore medio il valore della gaussiana si riduce a circa il 60% del valore massimo, assunto in corrispondenza del valore medio). In altre parole abbiamo che, se il campo ha una intensità gaussiana, la sua larghezza (misurata ad un σ) coincide con la larghezza del nucleo e, quindi, comunque esiste una coda del campo non trascurabile che si propaga nel mantello.

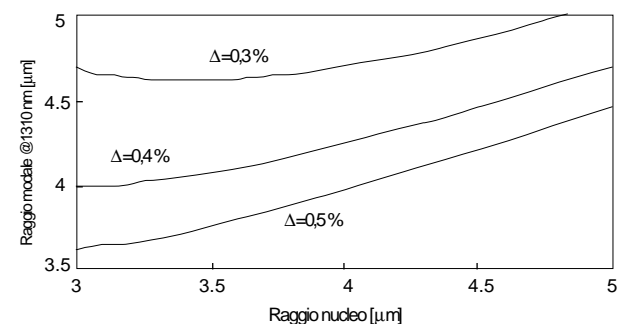


Figura 6 Andamento del raggio del campo modale a 1.31 μm al variare del raggio del nucleo per diverse percentuali di drogaggio

A questo punto del progetto abbiamo a disposizione 3 diverse configurazioni del profilo che dal punto di vista trasmissivo ci garantiscono grosso modo le stesse prestazioni; dobbiamo perciò far intervenire alcune considerazioni sul raggio modale per decidere qual è la soluzione migliore.

Il raggio modale ha molteplici effetti sulle caratteristiche delle fibre ottiche ed è estremamente complicato far intervenire, dal punto di vista matematico, tutti i vincoli che essi comportano. Per gli scopi di questo lavoro è sufficiente dividerli in due classi: nella prima si possono elencare gli effetti che spingerebbero a restringere il raggio modale quanto più possibile, nella seconda quelli che spingerebbero ad allargarlo. Dal punto di vista del progetto della fibra questa situazione porta a scegliere una soluzione di compromesso e, quindi, si predilige la struttura del profilo d'indice che assicura un raggio modale di circa $4.5 \mu\text{m}$.

Tornando agli effetti del raggio modale sulle caratteristiche trasmissive, possiamo dire che i motivi che spingono a ridurre il raggio modale sono:

- a) perdite per macrocurvatura;
- b) perdite per microcurvatura;
- c) perdite di giunzione per disallineamento angolare; mentre quelli che inducono ad aumentarlo:
- d) perdite di giunzione per disassamento laterale;
- e) perdite di accoppiamento con altri componenti.

Come accennato in precedenza l'insieme di questi fattori spinge a prediligere, nelle tre possibili configurazioni del profilo d'indice precedentemente individuate, la soluzione intermedia e cioè un raggio del mantello di $4.5 \mu\text{m}$ con un $\Delta=0.4\%$.

5. Profilo ideale e profilo reale

Il progetto del paragrafo precedente è stato sviluppato nell'ipotesi che il profilo d'indice sia del tipo a salto d'indice. Dal punto di vista tecnologico esistono dei limiti che impediscono di ottenere un tale tipo di profilo.

Il primo problema deriva dal fatto che, per come è strutturato il profilo a salto d'indice, dovrebbe esistere una transizione repentina tra la silice pura e la silice drogata. In generale è impossibile ottenere questa transizione in quanto il germanio tende a diffondere dalla zona a maggiore concentrazione in quella a minore. Il risultato di questo processo è che il profilo nella realtà presenta delle "code" di diffusione laddove dovrebbe esserci un salto. Il secondo problema, invece, è connesso direttamente al processo di fabbricazione delle fibre ottiche e, quindi, richiederebbe una spiegazione che si addentri in argomenti che esulano dallo scopo di questo lavoro. Ci limitiamo pertanto ad una spiegazione sommaria che, sebbene non sia rigorosa dal punto di vista tecnologico, ha il pregio della semplicità. In ogni caso per maggiori dettagli si può far riferimento alla letteratura specifica.

Ritornando al nostro secondo problema possiamo dire che il fenomeno della diffusione citato a proposito del salto d'indice si presenta anche lungo l'asse del profilo, in quanto, in prima battuta possiamo immaginare che la fibra in una prima fase di lavorazione per ragioni tecnologiche sia vuota nella zona centrale. In altri termini la fibra presenta al proprio interno un canale vuoto. Sempre per ragioni tecnologiche è importante che la quantità di drogaggio nella parte affacciata a questo vuoto sia molto limitata e praticamente coincida con la diffusione dalle zone circostanti. In una fase successiva questo vuoto viene eliminato, ma comunque l'indice di rifrazione presenta un buco ("dip") esattamente nella zona centrale ed una zona di diffusione nelle vicinanze. In conclusione un profilo nella realtà si presenta come in fig. 7 dove sono ben evidenziati sia il dip centrale che le zone di diffusione intorno al dip e nella zona del salto.

La presenza di disuniformità nel drogaggio e, quindi, nell'indice di rifrazione comporta che in generale nella relazione (4) compaia anche una dipendenza dalla coordinata radiale r (attraverso X); pertanto nel seguito quando vogliamo evidenziare questa dipendenza indicheremo l'indice di rifrazione del nucleo come $n_1(r)$.

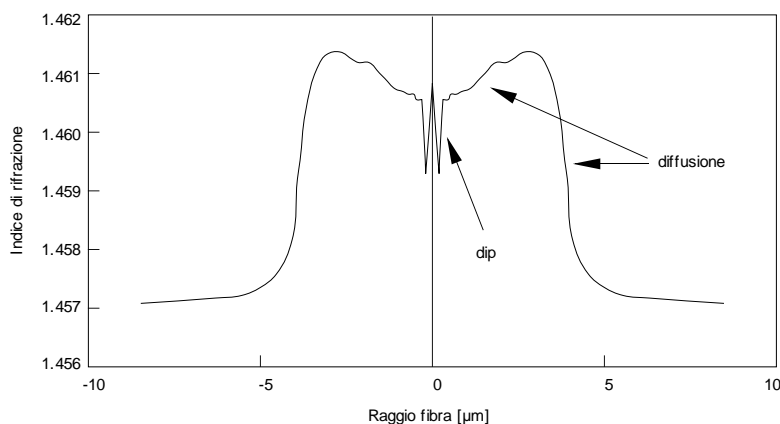


Figura 7 Profilo d'indice di rifrazione reale di una fibra a salto d'indice

Il problema che ci poniamo ora è capire quanto dei discorsi sviluppati al paragrafo precedente sia estendibile ad un profilo reale. Per affrontare questo problema ricordiamo che un possibile approccio (comunemente adottato) consiste nel definire un profilo a gradino equivalente; a titolo di esempio presentiamo l'approccio più immediato che consiste nell'approssimare il profilo reale con un rettangolo, in modo che i due profili abbiano i momenti di ordine zero e di ordine 2 (rispettivamente assimilabili ad area e larghezza) coincidenti. In formule, se indichiamo con $\Delta(r)$ la differenza d'indice relativa del profilo (cfr. eq. 8) otteniamo:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta(r) n_0 dr = 2a\Delta_s \quad (11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta(r) n_0 r^2 dr = \frac{2}{3} a^3 \Delta_s \quad (12)$$

Risolvendo il sistema si ottengono Δ_s e a che sono l'altezza e la larghezza del profilo a salto d'indice equivalente. Tali parametri si definiscono anche caratteristiche ESI (Equivalent Step Index) del profilo.

Viene naturale a questo punto estendere tutte le considerazioni sviluppate al paragrafo precedente al profilo reale approssimato nella forma ESI. Per verificare la affidabilità di questa procedura riportiamo nella tab. 2 i risultati, in termini di parametri ottici fondamentali, ottenuti mediante la simulazione di un profilo reale e del profilo ESI corrispondente. Per completezza riportiamo anche i valori misurati sulla fibra avente il profilo in questione.

Alcune osservazioni sono importanti:

- 1) i dati reali (misurati) sono molto vicini ai dati simulati del profilo reale. Questo risultato evidenzia la affidabilità della tecnica di simulazione adottata.
- 2) la descrizione ESI tende a far sottostimare la λ_0 e sovrastimare il raggio del campo modale. Entrambe queste caratteristiche derivano dal fatto che il momento del 2° ordine utilizzato per derivare i parametri ESI (eq. 12), tende a trascurare la zona del dip e ad esaltare le code di diffusione all'altezza del salto.

	valori simulati		valori misurati
	profilo reale	profilo ESI	
λ_c [μm]	1.27	1.29	1.25
λ_0 [μm]	1.316	1.305	1.314
w [μm]	4.72	4.87	4.72

Tabella 2 Confronto tra i valori del raggio del campo modale, delle lunghezze d'onda di taglio e di dispersione nulla ottenuti mediante simulazione del profilo reale e di quello approssimato ESI e mediante misure

- 3) la lunghezza d'onda di taglio è ben approssimata dalla descrizione ESI del profilo. Questo risultato deriva dal fatto che la λ_c è direttamente correlata all'area del profilo e, quindi, al momento di ordine 0. Avendo imposto la uguaglianza di tale momento per ottenere i parametri ESI, ne consegue la buona approssimazione della λ_c .

6. Fibra a dispersione spostata

Come visto in precedenza la zona intorno a 1.55 μm dal punto di vista dell'attenuazione appare più promettente, in quanto lo scattering di Rayleigh è circa la metà di quello presente in seconda finestra. E' naturale, quindi, che quando la tecnologia ha messo a disposizione sorgenti e rivelatori efficienti intorno a questa lunghezza d'onda, l'attenzione dei costruttori si sia concentrata su fibre ottimizzate per dispersione all'utilizzo in terza finestra (fibre a dispersione spostata).

In fig. 3 si è mostrato come, agendo sulla dispersione di guida, con un profilo a salto d'indice sia possibile annullare la dispersione totale intorno a 1.55 μm . Anche dal punto di vista storico questo tipo di profilo ha rappresentato il primo tentativo di produrre una fibra a dispersione spostata. Purtroppo i risultati dal punto di vista dell'attenuazione sono stati estremamente modesti in quanto i valori effettivi erano di circa 0.6 dB/km rispetto a 0.15 dB/km previsti dallo scattering di Rayleigh [6]. In altri termini si sono trovati oltre 0.4 dB/km di perdite indotte dal processo di fabbricazione rispetto ai soli 0.04 dB/km trovati a 1.3 μm .

Ovviamente una soluzione del genere non destava nessun interesse dal punto di vista industriale. La causa di questo eccesso di attenuazione risiede negli sforzi residui che presenta la fibra dopo la fase di filatura a causa del diverso coefficiente di espansione termica che hanno la silice non drogata e quella drogata. Il fenomeno non si manifesta nelle fibre ottimizzate per l'utilizzo in seconda finestra perché esse richiedono una percentuale di drogaggio men che dimezzata rispetto a quelle a dispersione spostata (cfr. figg. 2 e 3).

La soluzione che si è adottata per ridurre gli sforzi residui consiste nell'evitare che la transizione tra le due zone (quella drogata e quella non drogata) avvenga in modo brusco; è intuitivo che la intensità di detti sforzi segua la variazione dell'indice di rifrazione e, quindi rendendo graduale la transizione se ne riduce drasticamente l'effetto. Questa considerazione ha suggerito l'uso di un profilo triangolare. La situazione dal punto di vista dell'attenuazione è migliorata drasticamente, infatti sono stati raggiunti valori intorno a 0.21 dB/km a 1.55 μm .

La situazione non può essere migliorata ulteriormente (fino a raggiungere 0.19 dB/km delle fibre a salto d'indice) a causa della maggiore concentrazione di

germanio in ogni caso richiesta. Un problema comunque persisteva a causa delle elevate perdite per curvatura che il profilo triangolare presenta, in quanto ha valori di λ_c al di sotto di $1.0 \mu\text{m}$ e w di circa $5.0 \mu\text{m}$.

La soluzione ottimale è stata infine raggiunta aggiungendo due piccoli triangoli al lato del triangolo centrale, con il solo scopo di portare la λ_c intorno a $1.2 \mu\text{m}$ e w a circa $4.0 \mu\text{m}$.

In fig. 8 è mostrato il profilo reale delle fibre a dispersione spostata. Il dip nella zona centrale è ancora presente (la sua origine è stata discussa al paragrafo precedente), mentre le code di diffusione ai lati sono mascherate dalla forma triangolare del profilo.

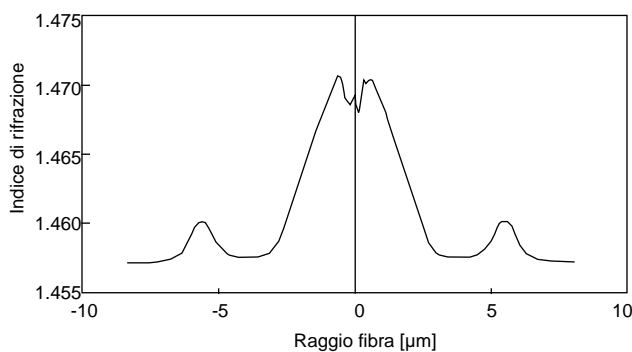


Figura 8 Profilo d'indice di rifrazione reale di una fibra a dispersione spostata

7. Conclusioni

Partendo da brevi considerazioni di carattere teorico e qualche accenno ai problemi tecnologici sono state presentate le caratteristiche fondamentali delle fibre ottiche a singolo modo standard (SMR) ed a dispersione spostata (SMDS). Sono state, inoltre, introdotte alcune formule approssimate che legano in maniera elementare i parametri caratteristici del profilo d'indice ai parametri funzionali delle fibre SMR. A partire da esse si è potuto discutere in modo approfondito il dimensionamento di una fibra ottica. L'influenza del processo tecnologico sulla forma del profilo d'indice è stata altresì discussa, insieme con l'effetto sulle prestazioni della fibra. Si è infine presentato il profilo reale di una fibra SMDS e sono stati brevemente discussi i criteri che hanno portato alla sua sintesi.

Bibliografia

- [1] Di Vita, P. et al.: *Fibre ottiche per Telecomunicazioni: fibre monomodali*. «Notiziario Tecnico SIP», Vol. 2, n. 3, Dicembre 1993.
- [2] Fleming, J.W.: *Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses*. «Applied Optics», Vol. 23, n. 24, 15 December 1984.
- [3] Di Vita, P. et al.: *Fibre ottiche per Telecomunicazioni: propagazione*. «Notiziario Tecnico SIP», Vol. 2, n. 2, Agosto 1993.
- [4] Ohashi, M. et al.: *Simple Approximations for Chromatic Dispersion In Single-Mode Fibers With Various Index Profiles*. «J.O.L.T.», Vol. LT-3, n. 1, February 1985.
- [5] Marcuse, D.: *Gaussian approximation of the fundamental modes of graded-index fibers*. «J. Opt. Soc. Amer.», Vol. 68, 1978, pp. 103-109.
- [6] Aisle, B.J. et al.: *A Review Of Single-Mode Fibers With Modified Dispersion Characteristics*. «J.O.L.T.», Vol. LT-4, n. 8, August 1986.