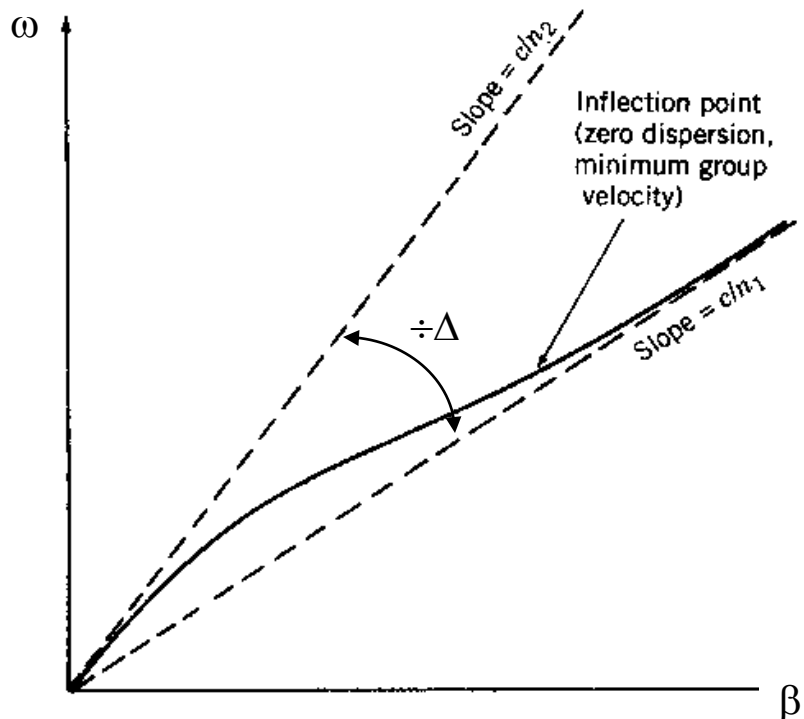


► Fibre ottiche per compensazione di dispersione cromatica

La dispersione cromatica

La velocità di propagazione degli impulsi in un mezzo con costante di propagazione $\beta(\omega)$ è la velocità di gruppo $v_g = 1/d\beta/d\omega$. Nelle fibre ottiche v_g non è costante a causa di:

- 1) Effetti di materiale (dipendenza di n_{co} e n_{cl} da λ)
- 2) Effetti di guida d'onda (dipendenza del confinamento del modo da λ)



Il ritardo di gruppo di un impulso a freq. centrale ω che si propaga per una distanza z è:

$$\tau_g = z \cdot \frac{d\beta}{d\omega} \quad \text{e} \quad t_g = \frac{\tau_g}{z} = \frac{d\beta}{d\omega}$$

è il ritardo per unità di lunghezza (Km). Si definisce dispersione cromatica:

$$D(\lambda) = \frac{dt_g}{d\lambda} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}$$

Quindi D è la curvatura della funzione $\beta(\omega)$

▶ La compensazione di dispersione cromatica

Le fibre per trasmissione presentano dispersione cromatica $D \neq 0$, tranne che ad un'unica lunghezza d'onda λ_0 . L'ottimizzazione della trasmissione degli impulsi richiede una periodica compensazione della dispersione lungo la linea di trasmissione. In generale per sistemi WDM si richiede che la compensazione avvenga su larghe bande di lunghezza d'onda.

E' possibile realizzare fibre con forte dispersione cromatica negativa tale da compensare la dispersione positiva della linea. Le condizioni per ottenere la compensazione sono:

$$D_l L_l = D_c L_c \quad \text{compensazione a centro banda}$$

$$S_l L_l = S_c L_c \quad \text{compensazione a centro banda}$$

D_l, D_c = Dispersione della fibra di linea e della fibra di compensazione

S_l, S_c = Pendenza della curva di dispersione della fibra di linea e della fibra di compensazione

Fiber type	Dispersion [ps/nm · km]	Dispersion slope [ps/nm ² · km]	RDS [nm ⁻¹]
Nonshifted	17	0.058	0.0034
TrueWave-RS	4.5	0.045	0.010
LEAF	4.2	0.09	0.021

► Caratteristiche dei moduli per compensazione di dispersione cromatica

- Compensazione della dispersione cromatica a centro banda (1550 nm)
- Compensazione pendenza della curva della dispersione cromatica su un intervallo definito di lunghezze d'onda (1530 -1560 nm)
- Bassa attenuazione
- Bassa non-linearità
- Bassa dispersione di polarizzazione
- Compattezza
- Affidabilità
- Basso costo



► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della derivata prima $d\beta/d\omega$

Ip. Fibra step index

Esprimendo la costante di propagazione β in funzione dei parametri normalizzati

$$b = \frac{W^2}{V^2} = 1 - \frac{U^2}{V^2} \quad V = R_{co} \cdot \sqrt{n_{co}^2 \cdot k_0^2 - n_{cl}^2 \cdot k_0^2} \quad W = R_{co} \cdot \sqrt{n_{co}^2 \cdot k_0^2 - \beta^2} \quad U = R_{co} \cdot \sqrt{\beta^2 - n_{cl}^2 \cdot k_0^2}$$

si ottiene $\beta = n_{cl} \cdot k_0 \cdot \sqrt{(1 + 2 \cdot \Delta \cdot b)}$ con $\Delta = \frac{n_{co} - n_{cl}}{n_{cl}}$

da cui $t_g = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{1}{c} \left\{ \overbrace{N_{co} \cdot A(V)}^{\boxed{1}} + \overbrace{N_{cl} \cdot (1 - A(V))}^{\boxed{2}} + \overbrace{N_{cl} \cdot \Delta \cdot [A(V) - b]}^{\boxed{3}} \right\}$ con

1 Indice di gruppo del core pesato sulla potenza nel core

$$N_{co} = n_{co} - \lambda \cdot \frac{dn_{co}}{d\lambda}$$

2 Indice di gruppo del cladding pesato sulla potenza nel cladding

$$N_{cl} = n_{cl} - \lambda \cdot \frac{dn_{cl}}{d\lambda}$$

3 Δ piccolo (10^{-3}) \Rightarrow termine ≈ 0

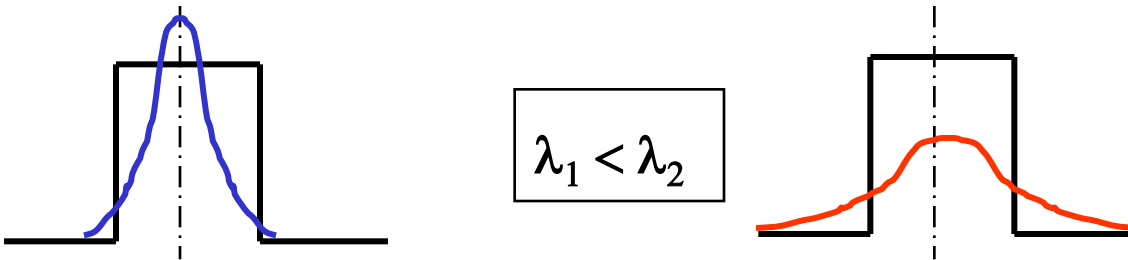
$$A(V) = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{d(b \cdot V)}{dV} + b \right] = P_{core}$$

► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della derivata prima $d\beta/d\omega$

$$t_g = \frac{d\beta}{d\omega} \cong \frac{1}{c} \{N_{co} \cdot P_{core} + N_{cl} \cdot P_{cladding}\}$$

Dipendenza della velocità di gruppo dalla lunghezza d'onda



Dipendenza della velocità di gruppo dai parametri della fibra



► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della derivata seconda $d^2\beta/d\omega^2$

$$D = -\frac{2\pi c}{d\omega^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \cong D_m(\lambda) + D_w(\lambda) + D_p(\lambda)$$

dove D_m, D_w, D_p = Dispersione di materiale, di guida e di profilo

$$D_m = \frac{1}{c} \left[\frac{dN_{co}}{d\lambda} \cdot A(V) + \frac{dN_{cl}}{d\lambda} \cdot [1 - A(V)] \right]$$

Somma della dispersione del materiale del core e del cladding pesata sulle potenze nel core e nel clad

$$D_w = -\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \cdot V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2}$$

Non dipende dalle derivate $dn/d\lambda$ (materiale) ne dalle derivate del salto d'indice $d\Delta/d\lambda$ (profilo)

$$D_p = -\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{y}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{y}{8}\right) \cdot \left\{ V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} + \frac{d(b \cdot V)}{dV} - b \right\}$$

Dipende dalla derivata del salto d'indice $d\Delta/d\lambda$ (profilo) tramite y

con
$$y = -\frac{n_{cl}}{N_{cl}} \cdot \frac{\lambda}{\Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}$$

► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

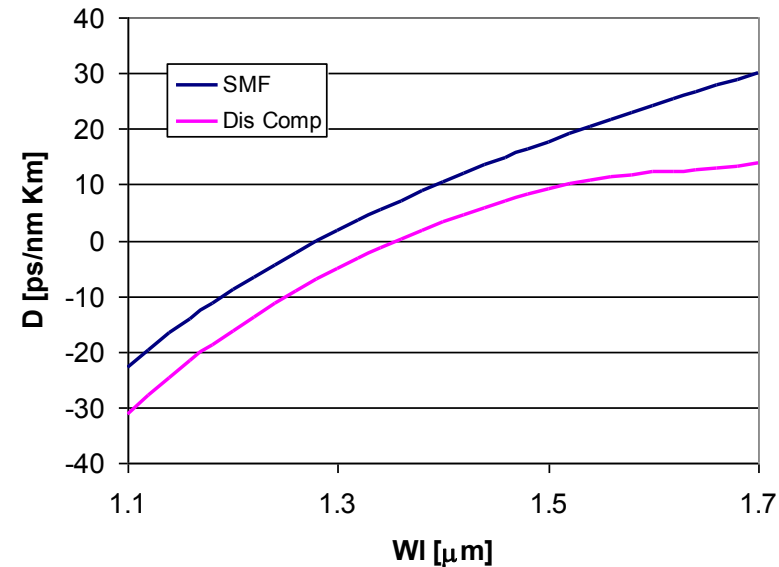
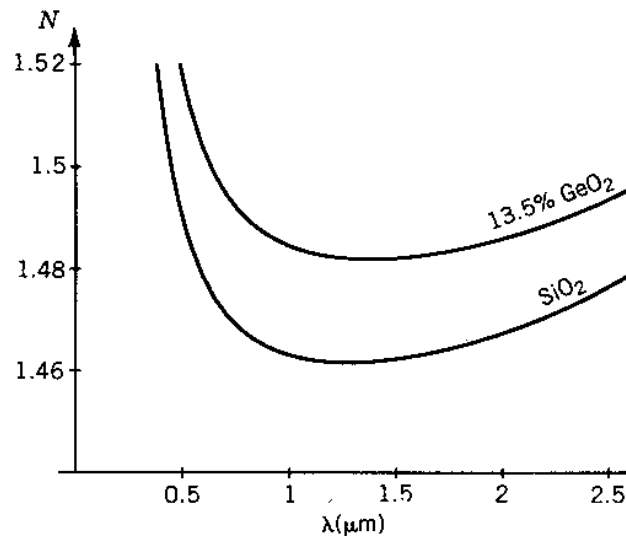
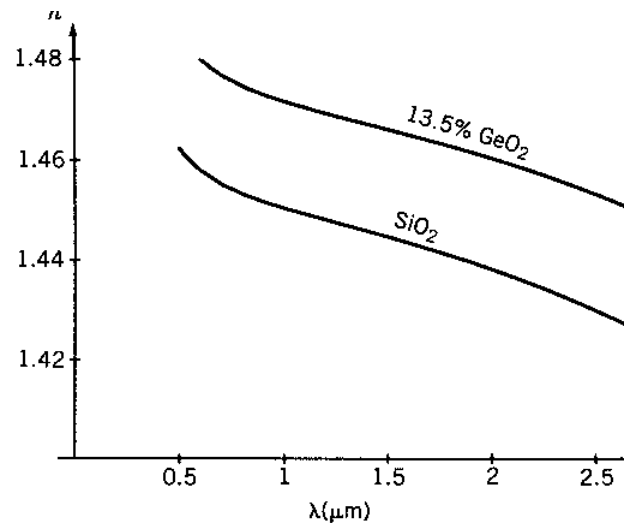
Calcolo della dispersione di materiale

$$D_m = \frac{1}{c} \left[\frac{dN_{co}}{d\lambda} \cdot A(V) + \frac{dN_{cl}}{d\lambda} \cdot [1 - A(V)] \right]$$

- $dN_{co}/d\lambda$ sono calcolati tramite le relazioni di Sellmeier $n^2 - 1 = \sum_{j=1}^3 \frac{A_j \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2}$

I coefficiente A_j e λ_j sono ricavati sperimentalmente per la $\text{SiO}_2 + X \text{ [mol] GeO}_2$

- $A(V)$ viene calcolato in funzione dei parametri della fibra Δ, R_{co} e di λ .
 $A(V) \rightarrow 1$ per $\lambda \rightarrow 0$ e $A(V) \rightarrow 0$ per $\lambda \rightarrow \text{inf.}$

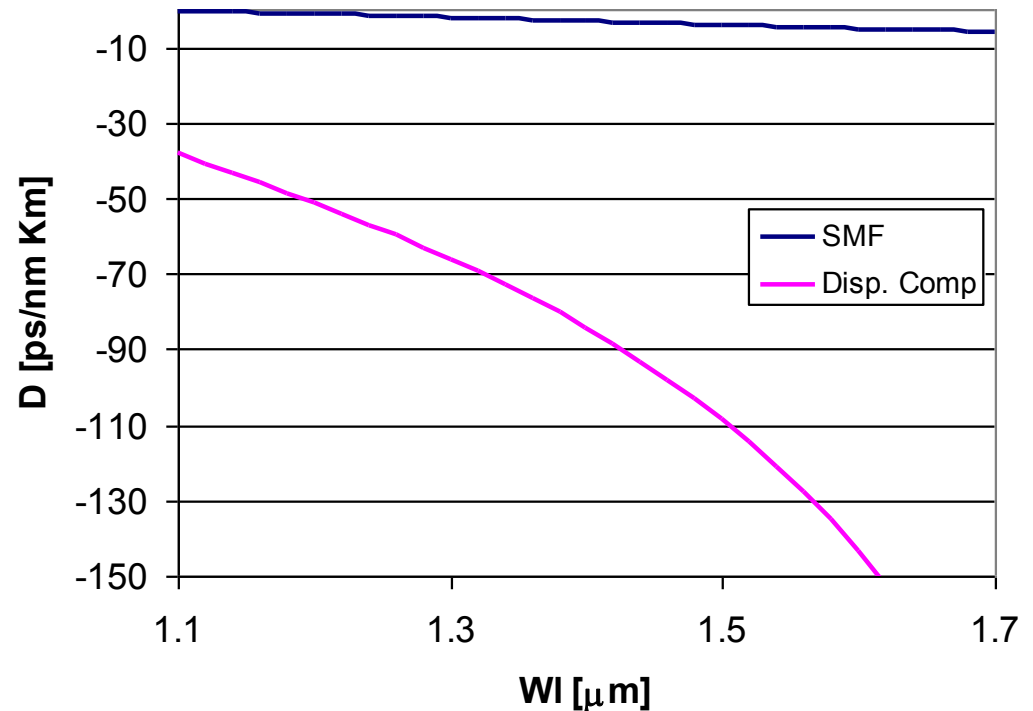
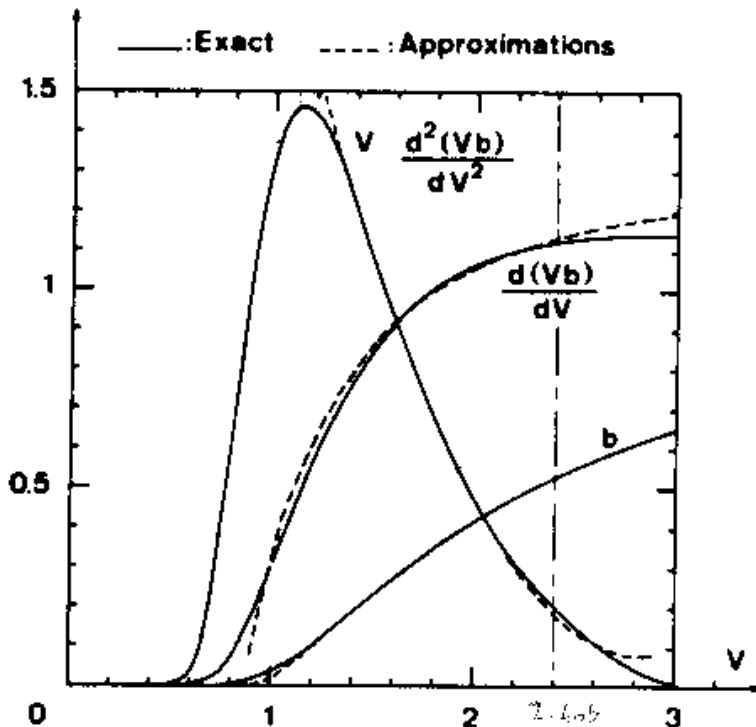


► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della dispersione di guida

$$D_w = -\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \cdot V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2}$$

- poiché $V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} > 0$ la dispersione di guida è sempre negativa
- $D_w(V)$ cresce in valore assoluto con Δ e $V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2}$. Δ grande comporta una crescita dell'angolo fra gli asintoti e quindi una maggiore curvatura (derivata II)



► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della dispersione di profilo

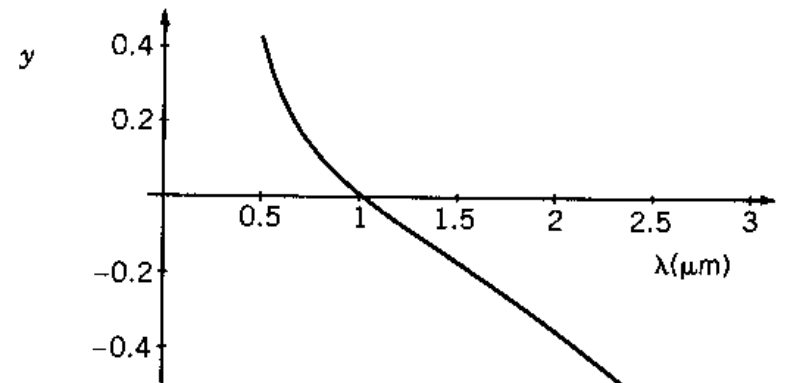
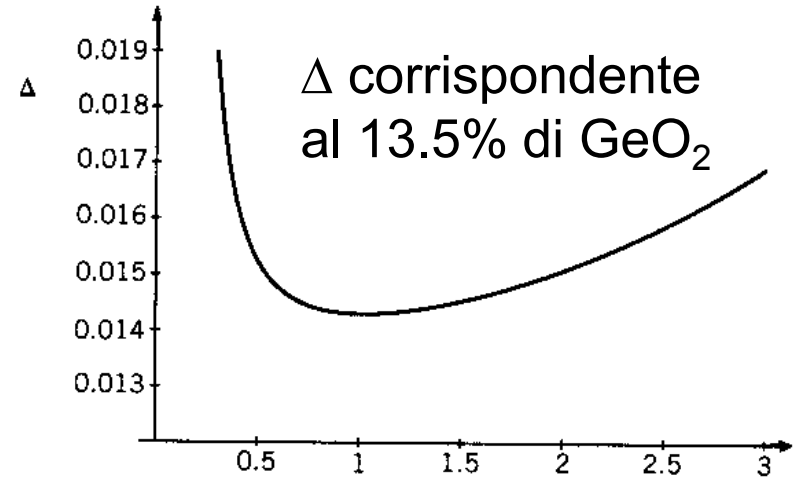
$$y = -\frac{n_{cl}}{N_{cl}} \cdot \frac{\lambda}{\Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}$$

$$D_w = \left(\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \right)^{\textcircled{A}} \cdot V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2}$$

$$D_p = \left(\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{y}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{y}{8} \right) \right)^{\textcircled{B}}$$

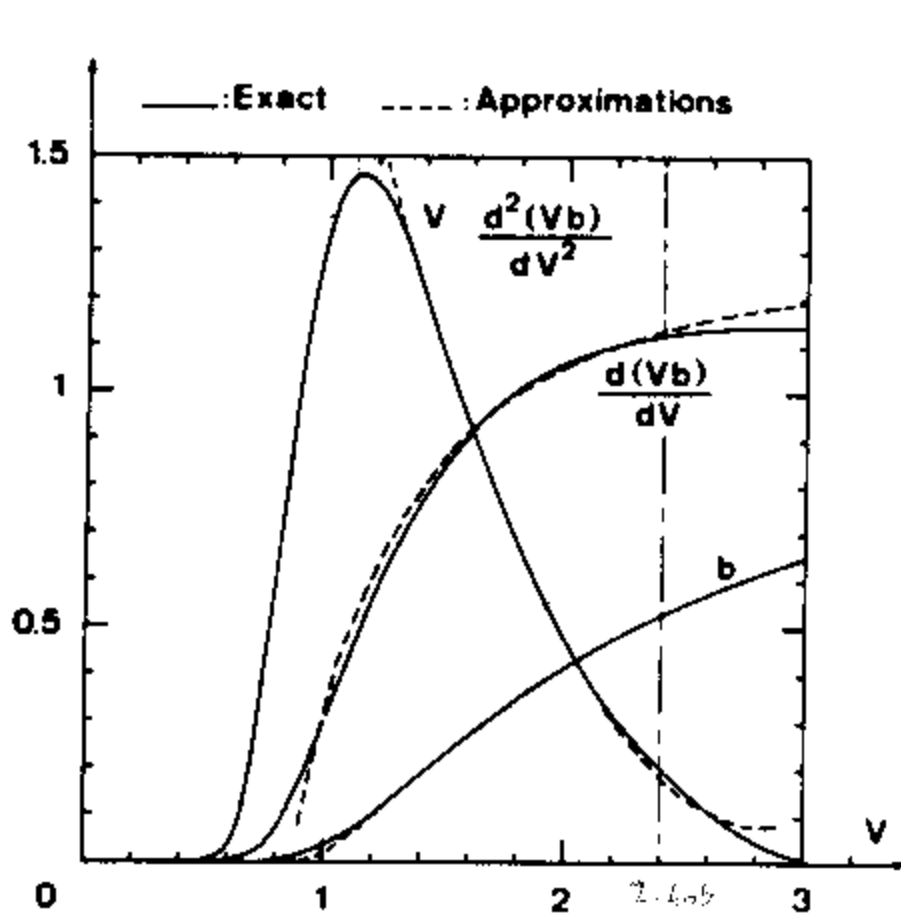
$$\left\{ V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} + \frac{d(b \cdot V)}{dV} - b \right\}$$

Per $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ $y \sim -0.2 \Rightarrow A \sim 10$ volte B



► Parametri della fibra per compensazione di dispersione cromatica

Calcolo della dispersione di profilo



$$D_w = -\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \left[V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} \right] \textcircled{C}$$

$$D_p = -\frac{N_{cl}^2 \cdot \Delta}{n_{cl} \cdot c \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{y}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{y}{8} \right)$$

$$\textcircled{C} \left\{ V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} + \left[\frac{d(b \cdot V)}{dV} - b \right] \right\} \textcircled{D}$$

$D < \sim 0.5$ e diventa dominante rispetto a C solo per $V > 2.405$ cioè in regime non monomodale $\Rightarrow D_p \ll D_w$

► Ottimizzazione dei parametri

Per ottenere una forte dispersione negativa occorre massimizzare:

$$1) \quad V \cdot \frac{d^2(b \cdot V)}{dV^2} \qquad 2) \quad \Delta$$

A) Trade-off: attenuazione del segnale

- Δ alto
 - perdite per scattering elevate
 - perdite per stress di interfaccia elevate
- Δ alto $\Rightarrow R_{co} = V / (k_0 n_{cl} \sqrt{2} \Delta)$ piccolo
 - perdite per bending
- Δ alto e R_{co} piccolo $\Rightarrow A_{eff}$ piccola
 - perdite di giunzione con fibra standard elevate

B) Trade-off: effetti non lineari

- Δ alto e R_{co} piccolo $\Rightarrow A_{eff}$ piccola e coeff di non linearità n_2 grande
 - forti effetti non lineari ($\gamma = k_0 n_2 / A_{eff}$ grande)

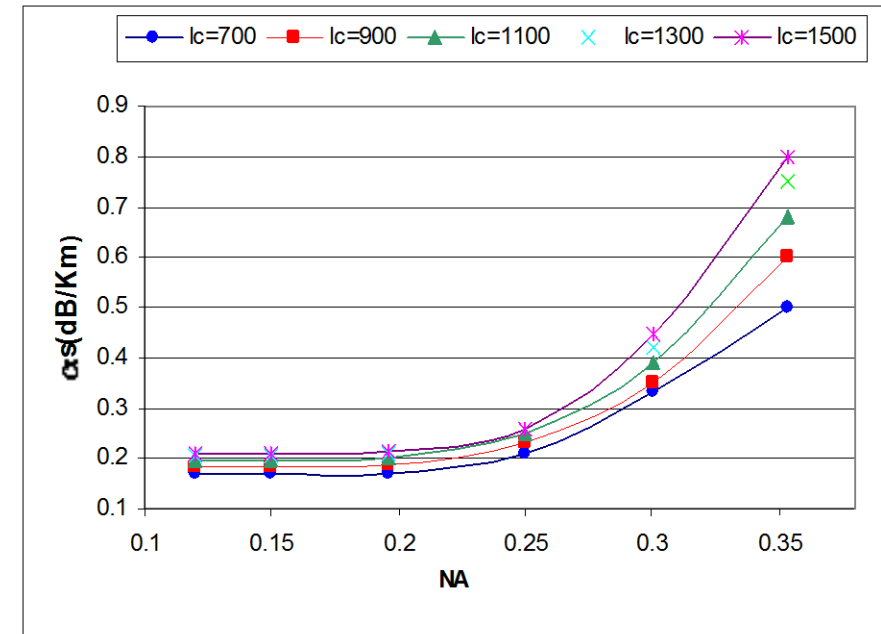
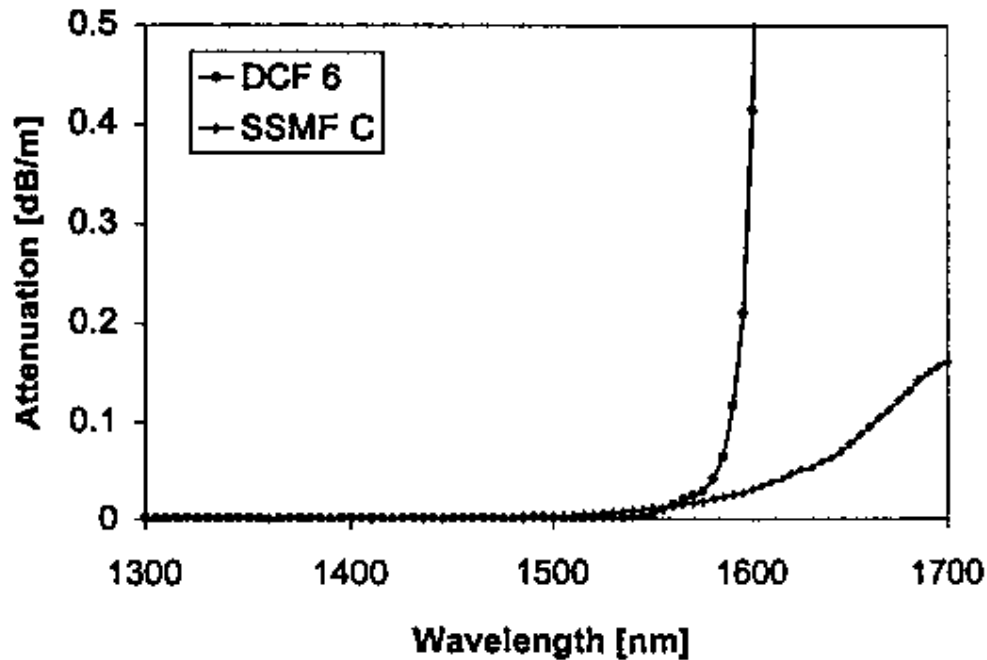
Si evidenzia il trade-off dispersione-attenuazione tramite la figura di merito :

$$FOM = D \text{ [ps/nm Km]} / \alpha \text{ [dB/Km]} = \text{[ps/nm dB]}$$

► Ottimizzazione dei parametri

1) Δ alto

- perdite per scattering elevate
- perdite per stress di interfaccia elevate



- ## 2) Δ alto e $V \approx 1 \Rightarrow R_{co}$ piccolo ($\approx 1.1 \mu\text{m}$)
- perdite per bending

$$\alpha_B \div \exp \left[- \frac{2 R_B \cdot W^3 \cdot \Delta}{3 \cdot 3 \cdot R_{co} \cdot V^2} \right]$$

► Ottimizzazione dei parametri

3) Δ alto e R_{co} piccolo \Rightarrow A_{eff} piccola

– perdite di giunzione con fibra standard elevate

I valori di area efficace tipiche delle fibre per compensazione di dispersione è di 16 -18 μm^2 ; l'area efficace delle fibre SMF è di 80 μm^2 . La differenza comporta perdite di giunzione >1.3 dB (equivalenti all'attenuazione di 7-8 Km di fibra).

Rimedi:

- Ottimizzazione del processo di giunzione
- Inserimento di una fibra con area efficace intermedia di “adattamento”

4) Δ alto e R_{co} piccolo \Rightarrow A_{eff} piccola e coeff di nonlinearietà n_2 grande

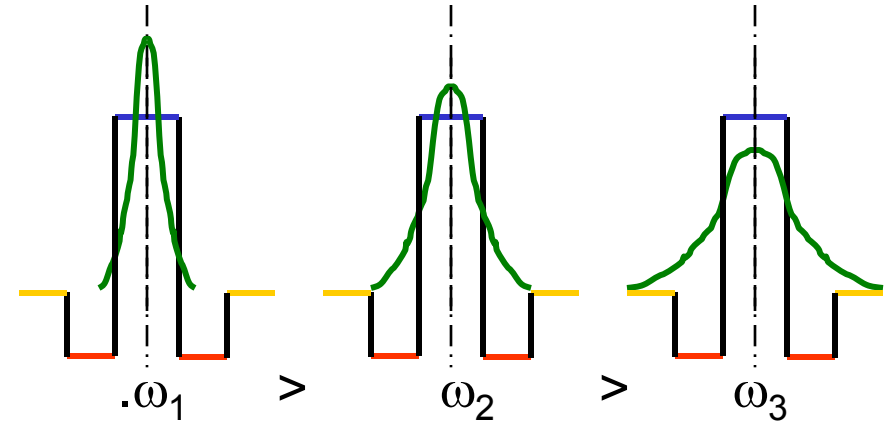
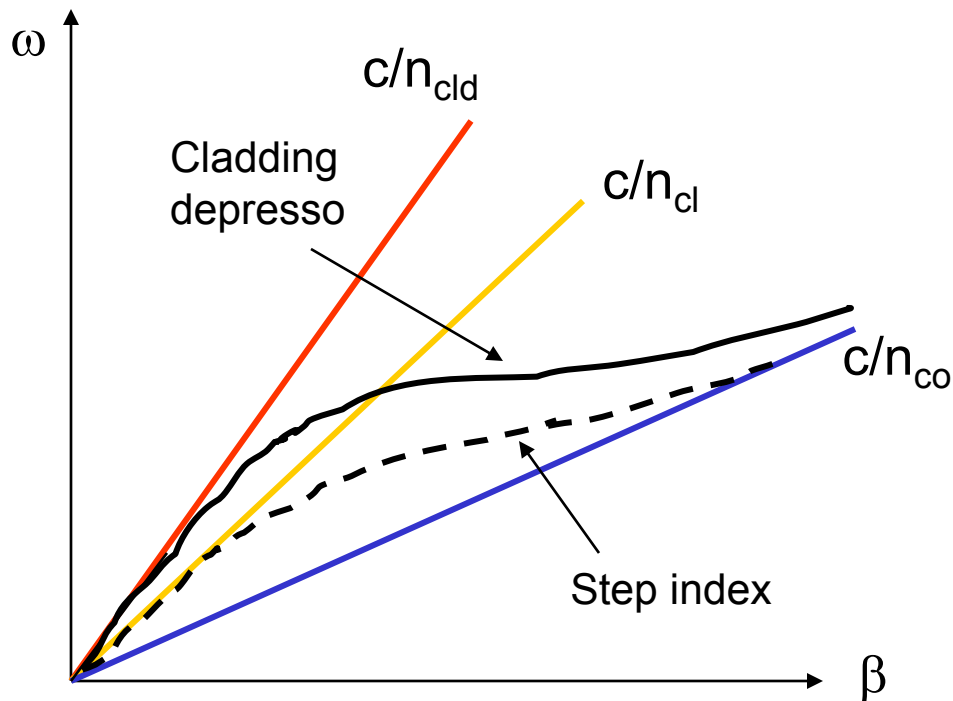
– forti effetti non lineari ($\gamma = k_0 n_2 / A_{eff}$ grande)

- I valori del coefficiente non lineare γ , in corrispondenza dei parametri ottimizzati in termini di dispersione e perdita per bending, sono di 5-6 [1/W Km] almeno 5 volte superiori a quelli di una fibra SMF.
- La generazione di FWM è mitigata dall'elevata dispersione cromatica

► Ottimizzazione dei parametri

Compensazione della pendenza della curva di dispersione

- Le fibre con profilo step presentano pendenze sempre positive della curva di dispersione e quindi sono inadatte a compensare la dispersione delle fibre di trasmissione su bande larghe.
- E' possibile invertire la pendenza introducendo nel RIP una regione a indice di rifrazione inferiore al cladding in prossimità del nucleo (profilo a W).



Al crescere di λ (decrescere di ω) la curvatura è maggiore e negativa nella regione delle lunghezze d'onda operative

► Ottimizzazione dei parametri

Compensazione della pendenza della curva di dispersione : criticità del profilo a W

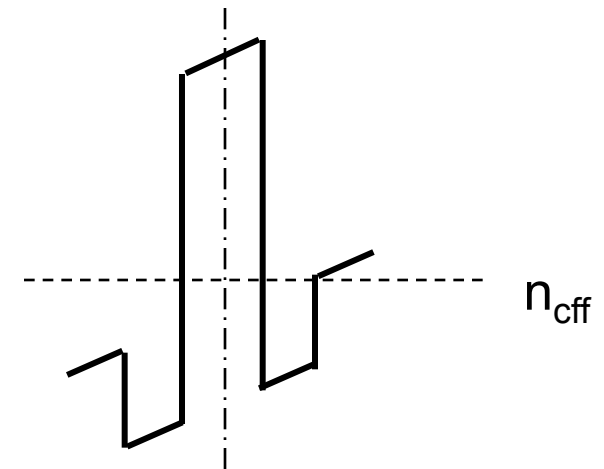
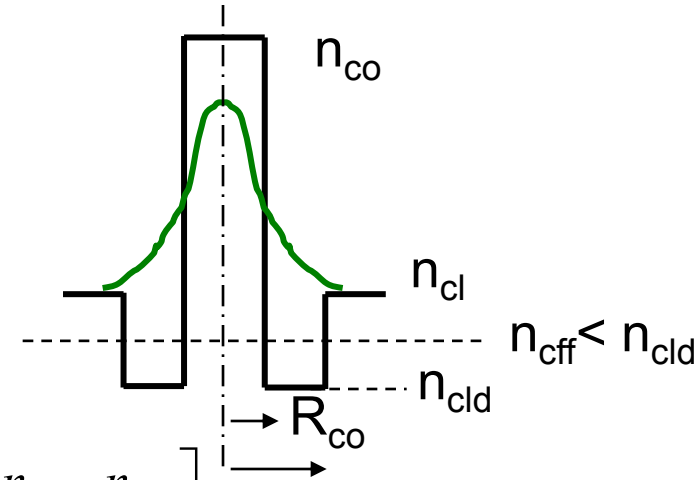
1) Il modo fondamentale ha $\lambda_c \neq +\text{inf}$. Per $\lambda \rightarrow \text{inf}$ n_{eff} è approssimativamente la media degli indici di rifrazione pesati sulle aree.

$$n_{\text{eff}} = \frac{1}{R_{\text{cld}}^2} \left[n_{\text{co}} \cdot R_{\text{co}}^2 - n_{\text{cld}} (R_{\text{cld}}^2 - R_{\text{co}}^2) \right]$$

La condizione di cutoff si verifica per $n_{\text{eff}} = n_{\text{cl}}$. $\frac{R_{\text{cld}}^2}{R_{\text{co}}^2} = 1 + \left[\frac{n_{\text{co}} - n_{\text{cld}}}{n_{\text{cl}} - n_{\text{cld}}} \right]$

2) la presenza del cladding depresso aumenta la sensibilità al macro-bending

Tale effetto viene mitigato con l'introduzione di un ulteriore salto d'indice positivo esterno al cladding depresso, che aumenta il confinamento del modo per λ elevate.



► Ottimizzazione dei parametri

Ulteriori criticità

- PMD

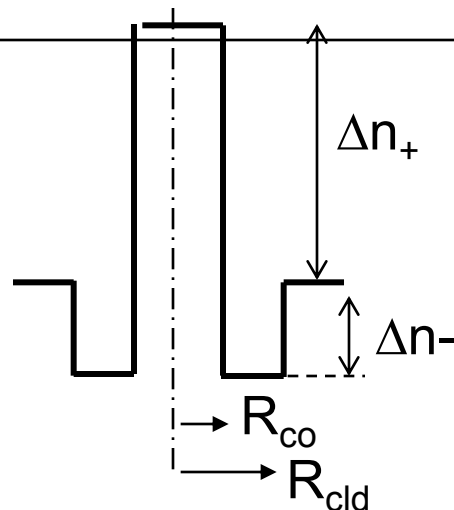
Le dimensioni molto ridotte del core rendono più critico mantenere un'elevata circolarità. L'ovalità del core è causa di birifrangenza e conseguentemente di dispersione di polarizzazione ($0.2 - 0.3 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$). Con la tecnica dello spinning della fibra durante la filatura in valore di PMD viene ridotto a circa $0.08 \text{ ps}/\sqrt{\text{Km}}$.

- Perdite di giunzione

Le perdite di giunzione con fibre SMF possono essere ridotte a $0.7 - 0.8 \text{ dB}$ applicando archi di fusione di lunga durata che favoriscono la diffusione di Ge dal core verso il cladding, con riduzione del salto d'indice, allargamento del core e conseguente allargamento del MFD. Per diminuire ulteriormente le perdite (0.4 dB) è necessario introdurre una fibra con MFD intermedio.

▶ Data sheet

Corning® PureForm™
SMF DCM® Modules



$\Delta n_+ = 0.024$
 $\Delta n_- = -0.005$
 $R_{co} = 1.2 \mu\text{m}$
 $R_{cld} / R_{co} = 3.5$

	Wavelength Range	Measured Dispersion @ 1544.5 nm	Slope Compensation Efficiency †	Insertion Loss*	Average PMD	Figure of Merit @ 1545 nm**
SMF DCM-20	1525-1565 nm	-328 ± 10 ps/nm	>60%	3.4 dB	0.6 ps	98 ps/nm/dB
SMF DCM-40	1525-1565 nm	-657 ± 20 ps/nm	>60%	5.3 dB	0.8 ps	129 ps/nm/dB
SMF DCM-60	1525-1565 nm	-985 ± 20 ps/nm	>60%	7.2 dB	... ps	144 ps/nm/dB
SMF DCM-80	1525-1565 nm	-1314 ± 26 ps/nm	>60%	9.2 dB	1.1 ps	148 ps/nm/dB
SMF DCM-100	1525-1565 nm	-1642 ± 26 ps/nm	>60%	11.5 dB	1.2 ps	149 ps/nm/dB

† Dispersion over dispersion slope for single-mode fiber divided by dispersion over dispersion slope for dispersion compensating fiber @ 1545 nm

* Beginning of life, including two connectors, over wavelength range

** Figure of merit calculated using minimum dispersion value at 1544.5 nm divided by maximum insertion loss at 1545 nm