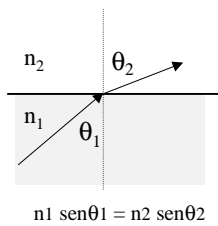


Elementos de Redes Ópticas

Fibras Ópticas

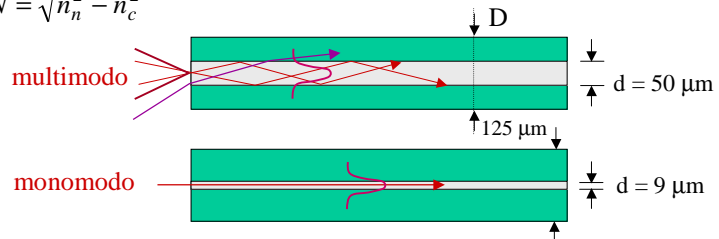


Fibra Óptica



Abertura numérica

$$AN = \sqrt{n_n^2 - n_c^2}$$



Fibras Óticas

Guia de Onda

Modos de propagação

☒ Graf.: índice propag. $b(V)$ x freq. norm.

(soluções da eq. de onda $\nabla^2\psi=0$ para propagação em guia de onda cilíndrico)

No. Modos: $N \approx V^2/2$ (N inteiro)

$$V = [\pi d / \lambda] \sqrt{n_n^2 - n_c^2}$$

monomodo $V \leq 2,4 \Leftrightarrow$ um único modo

multimodo $V=12 \Rightarrow$ dezenas modos

V freqüência normalizada de propagação

d diâmetro do núcleo

b const. propag. normaliz.

$$b = (\tilde{n} - n_c) / (n_n - n_c)$$

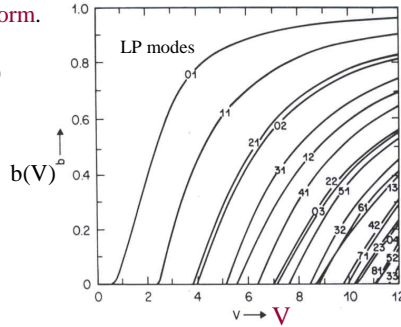


Fig. 3.3 Normalized propagation constants of a number of LP modes as functions of V.

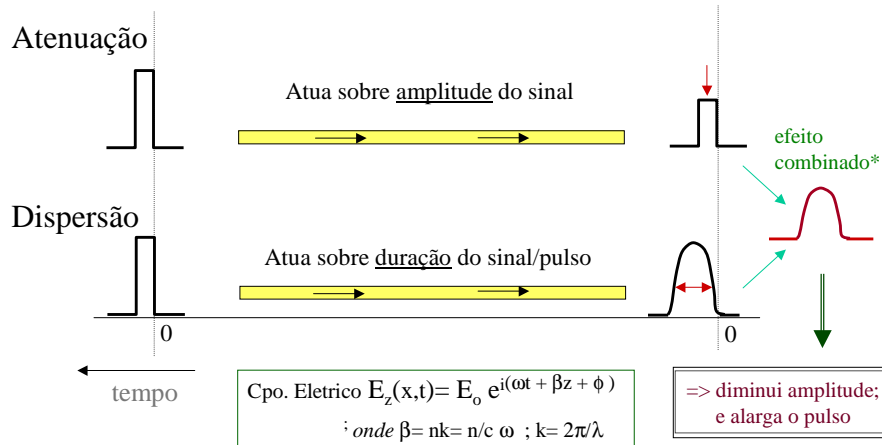
=> modos LP significam linearly polarized; p/ex., LP01 contem dois modos (x e y)



Fonte: D.Gloge, "Weakly Guiding Fibers", Appl.Opt 10, 2252 (1971)

Fibras Óticas

Atenuação e Dispersão



Fibra Óptica

Equações

- **Atenuação**

$$P(z) = P(0) e^{-\alpha z} \iff \alpha(z) = 1/z \ln P(z)/P(0)$$

sendo, α (dB) = $10 \log P(z)/P(0)$, tem-se

$$\alpha \text{ (dB/km)} = 4,3 \alpha \text{ (km}^{-1}\text{)}, \text{ e}$$

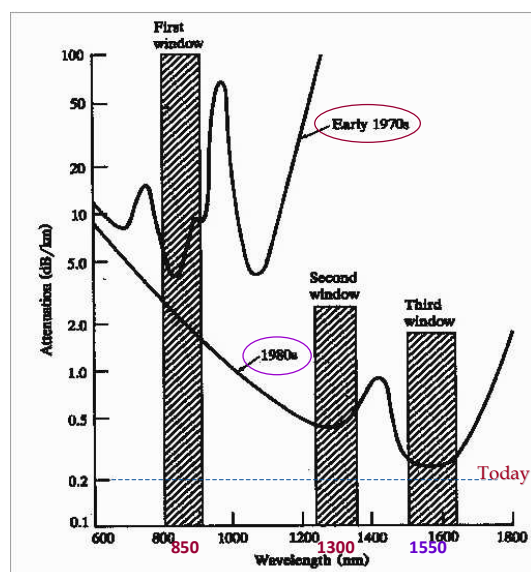
$$\Rightarrow \alpha \text{ (dB/km)} = 10/L \log P(L)/P(0), \text{ com } L = [\text{km}]$$

Atenuação é devida a três fatores:

- banda passante do guia,
- espalhamento da luz no material, e
- absorção da luz no material e nas impurezas.



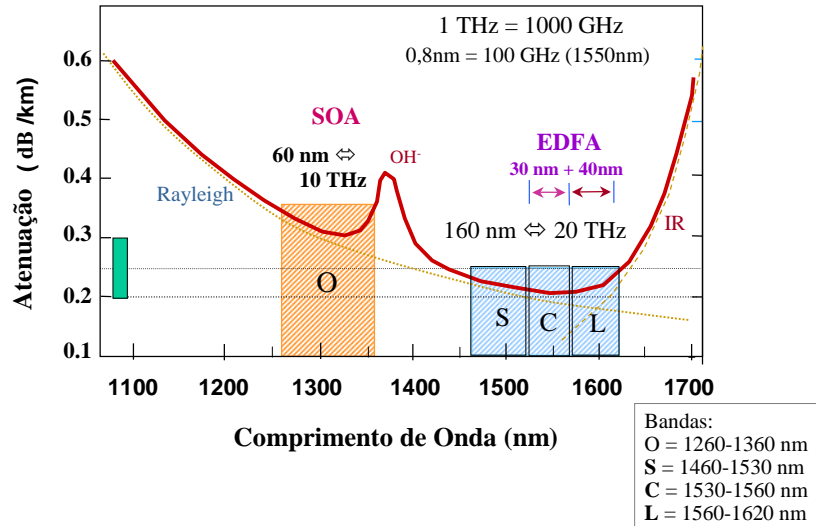
Fibras Ópticas



Fonte: Keiser bk.



Atenuação em Fibras Ópticas



Fibra Óptica

Comentários adicionais:

☉ Atenuação (*limites*)

Regime linear

April 13, 2017 Lightwave Staff

- ☐ Sumitomo Electric Industries, Ltd. reported during a post-deadline paper at OFC 2017 last month that it has achieved optical fiber loss of 0.142 dB/km, which it says is a new world record. Company technicians measured the loss at 1560 nm.
- ☐ Nevertheless commercial fibers remain typically at 0.20-0.22, available down to 0.18 dB/km; at a special cost.

Fibra Óptica

Comentários adicionais:

⊙ Atenuação (*limites*)

Regime linear

- ❑ Rayleigh: limite fundamental espalhamento linear da radiação propagante meio material (nível atômico, molecular, ou matriz de rede, dependendo do meio)
- ❑ Absorção IR: absorção molecular na matriz de rede do vidro -- (no caso da fibra SiO₂-GeO₂)
- ❑ Absorção: impurezas

Regime não-linear

- ❑ Mistura quatro-ondas, SPM, XPM: roubam potência óptica do canal, e jogam em outros canais como ruído.
- ❑ Espalhamento Raman e Brillouin estimulados: roubam potencia e criam bandas de sinal (de fato, ruído) no espectro de propagação



Fibra Óptica

Dispersão (1a. ordem)

Ao se propagar num meio material confinado, as *componentes espectrais* de um pulso luminoso terão *diferentes velocidades de propagação*; causando distorção e atraso do pulso; isso se chama *dispersão* temporal do pulso.

Temos vários tipos de dispersão, que se compoem, resultando na dispersão total da fibra::

- dispersão modal (**fibra MM**; esta é sempre a maior); D_{mod}
- dispersão material (todas fibras); D_{mat}
- dispersão guia-onda (**fibra SM**); D_{go}
- dispersão de polarização (todas); esta é sempre a menor); D_{pmd}

Fibra Multimodo (MM) : $D_T = D_{\text{mod}} + (D_{\text{mat}} + D_{\text{go}})$

Fibra Monomodo (SM) : $D_C = (D_{\text{mat}} + D_{\text{go}})$ *cromática*

Equações >>>



Fibra Óptica

Equações

Aplic.: Lasers multimodo e Leds
...Laser monomodo (next slide)

© Dispersão (1a. ordem)

$$\text{atraso } \Delta\tau = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad [\text{ps}] ; \text{ ou } \Delta\tau = \beta_2 \cdot \Delta\omega \cdot L$$

onde, $\Delta\lambda$, $\Delta\omega$, largura espectral da fonte (FWHM) ; e $\omega = 2\pi\nu = 2\pi c/\lambda$;

Atrasos na propagação são devidos a *dispersão cromática* e *dispersão modal* ; e
(menos) *dispersão de polarização PMD*, devido *birefringência* da fibra. (+adiante)

Fibra Multimodo : $D = (D_{\text{mat}} + D_{\text{go}}) + D_{\text{mod}}$ *cromática + modal*

Fibra Monomodo : $D = D_{\text{mat}} + D_{\text{go}}$ *só cromática*

sendo $D_{\text{mat}} = 1/c \, dn/d\lambda$; $D_{\text{go}} = -1/2\pi c \, V^2 \, d^2\beta/dV^2$; *olha o sinal !*

dimensao $D = [\text{ps/nm.km}]$;

Definição : $D = -\lambda/c \, d^2n/d\lambda^2 \Rightarrow D = -(2\pi c/\lambda^2) \beta_2$; (disp.veloc.grp.: GVD)

onde, parametro $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$, dimensao $\beta_2 = [\text{ps}^2/\text{km}]$

e velocidade de grupo $v_g = 1/(\delta\beta/\delta\omega)$; sendo $\beta = nk = 2\pi n/\lambda$;



Mais detalhes: Agrawal, *Fiber-Optic Comm.Syst.*, 3rd., 2002; pg. 38-42

Dispersão em Fibras Ópticas

Atraso devido a dispersão cromática:

a) Fontes com largura espectral larga ($\Delta\lambda > 2\text{nm}$), (*mod. direta*)::

$$\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda$$

- para fibras padrão SMF, $D=16-18 \text{ ps/nm.km}$ @ 1550;
- para fibras NZD (+/-), $D=2-5 \text{ ps/nm.km}$ (*ou pouco mais*).
- para fibra DS @ 1550 ou fibra SMF @ 1300, adota-se $D \approx 0,5 \text{ ps/nm.km}$;

b) Fontes com largura espectral estreita ($\Delta\lambda < 0,1\text{nm}$), (*modulação externa*)

$$\Delta\tau = (|\beta_2| \cdot L)^{1/2}$$

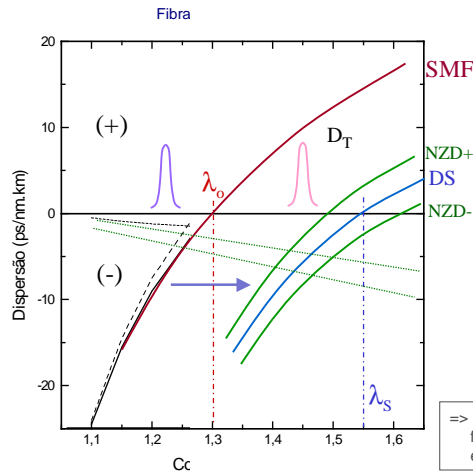
- onde, $\beta_2 = -D \cdot \lambda^2 / 2\pi v_c$ [ps^2/km]; $v_c = c/n$, sendo n o índice efetivo de propagação (grosseiramente, $\tilde{n} \approx 1,5$ nos vidros; em casos mais exatos, deve-se usar $n_m(\lambda_c)$);

=> em ambos os casos, pode-se usar atrasos permitidos de $\Delta\tau = T_b/4$ ou $T_b/2$, conforme a tolerância do sistema seja 1 ou 3 dB de margem, sendo as distancias máximas permitidas calculadas de acordo.



Dispersão em Fibras Ópticas

SiO₂/GeO₂



=> dispersão modal das
fibras multimodo sai da
escala (D=60-80ps/nm.km)

- ⇒ fibras de dispersão deslocada são obtidas aumentando DGO : DS, NZD+/-
- ⇒ regime de dispersão **normal** ou **anômala** vai depender de qual λ_0 e λ_c ; e qual fibra em que está se propagando! -- (mais adiante) >>

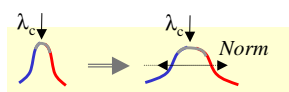


Dispersão em Fibras Ópticas

Comentário:

❖ Dispersão

- a dispersão em meios materiais atrasa a propagação de sinais (lineares e não-lineares);
- as **componentes cromáticas** do pulso de luz viajam a diferentes velocidades, pois o índice de refração n efetivo varia com λ ; e dispersão material pode ser zero e tb. **mudar de sinal** (depende da região do espectro!)
- ❖ **dispersão normal** ($\lambda_c < \lambda_0$): λ_c comprim. de onda central do pulso;
 - ⇒ trecho espectro abaixo de lambda dispersão zero (da fibra *específica*);
 - ⇒ compon. λ_+ (+longas): enxergam n_I menor => v_g mais rápida → vai pra *frente*;
 - ⇒ compon. λ_- (+curtas): enxergam n_I maior => v_g mais lenta → vai pra *trás*;

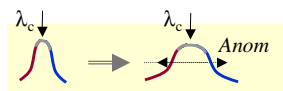


Dispersão em Fibras Ópticas

Comentário:

⚙ Dispersão

- ❖ anômala ($\lambda_c > \lambda_0$): inverte-se situação,... devido a inversão do sinal da derivada; ou seja,
 - ⇒ λ_c é o comprim. de onda central do pulso;
 - ⇒ compon. λ_- (+curtas): enxergam n_I menor ⇒ v_g mais rápida → vai pra frente;
 - ⇒ compon. λ_+ (+longas): enxergam n_I maior ⇒ v_g mais lenta → vai pra trás;



⇒ temos que pensar nos domínios do tempo e da frequencia (ou de lambda)

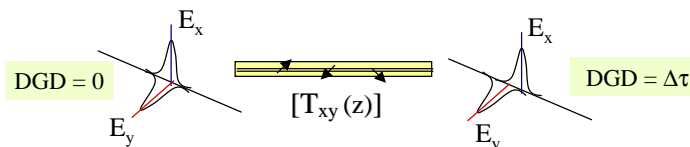


Dispersão em Fibras Ópticas

• PMD

⊙ Dispersão dos modos de polarização

- ⇒ devido a efeitos de tensão mecânica na estrutura do vidro da fibra, o sinal propagante experimenta diferentes índices efetivos nas componentes de polarização do campo E_x e E_y ; [birefringencia]
- ⇒ daí pode se acumular atraso apreciável entre as componentes, resultando em alargamento temporal do pulso, e atraso diferencial de grupo (DGD);
- ⇒ PMD de 1a. ordem é $\Delta\tau = \beta \sqrt{L}$, onde β (ps/km^{1/2}); $\beta = 0,1-0,5$ ps/km^{1/2}



DGD (differential group delay): is the maximum difference in arrival times of the two orthogonal polarization modes at a particular wavelength and time. Given a specific PMD coefficient, the DGD of the link varies randomly with time and wavelength .



Dispersão em Fibras Ópticas

Compensação de Dispersão (cromática e PMD) ::

- **Fibra Standard (SMF)**
 - ❑ pode-se compensar a dispersão cromática acumulada ao longo de um enlace **utilizando-se fibras NZD-**, com elevado coeficiente D, de modo que alguns km de NZD compensam vários km de SMF; [modo "passivo"]
- **Fibra DS**
 - ❑ não há necessidade de compensar dispersão cromática em fibras DS;
- **Fibra NZD**
 - ❑ pode-se compensar dispersão cromática em fibras NZD alternando NZD+ e NZD-;
- **PMD**
 - ❑ pode-se compensar dispersão PMD utilizando *compensadores de dispersão de modos de polarização* (PMDC);
 - ❑ pode ser em linha L-PMDC, *sem* conversão O-E-O; [modo ativo ótico]
 - ❑ e/ou na recepção PMDC-Rx, *com* conversão O-E; [modo ativo OE]



Fonte: ITU-T Rec. G.655-NZD, Mar.2003; Rec.G.666-PMD, Mar.2008;

Fibras Ópticas

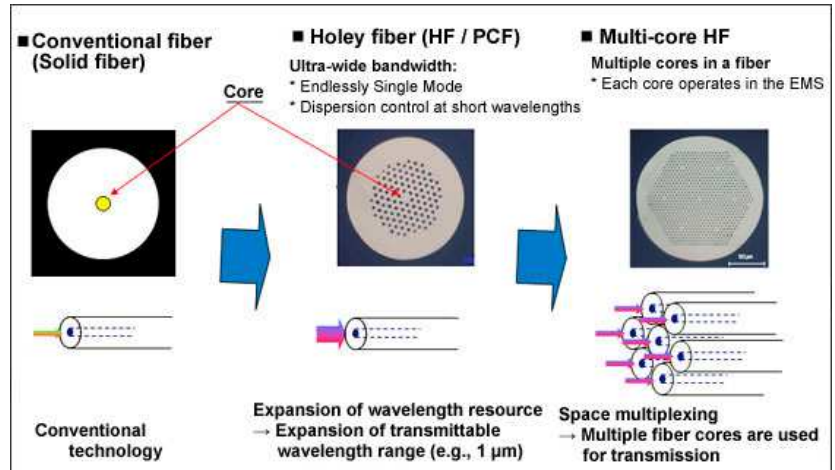
Outras Fibras:

- Como dito no início desta seção, existem muitos tipos de **fibras ópticas** para aplicações em
 - ❑ Bio-imaging
 - ❑ Metrologia
 - ❑ Sensoriamento (local e remoto)
 - ❑ Testes e medidas
 - ❑ Processamento materiais (*lasers a fibra*, e/ou fibras entregando altíssimas potências)
- Entre essas estão as *fibras de plástico* (POF), e as *fibras fônicas* (conhecidas como PCF-- *photonic crystal fiber*)
- **Não** analizaremos essas fibras porque nosso foco é **Redes Ópticas e Telecom**, e elas são pouco (ou nada) utilizadas nessa aplicação! (embora representem um significativo mercado emergente)...



Fibras Ópticas

* Photonic Fibers... *just a taste...*



Fibras Ópticas & Lasers

Resumo Geral -- geração e propagação

❖ **Lasers (modos longitudinais):**

- **Multimodo:** surgiram primeiro devido a limitações tecnológicas; apresentam múltiplos comprimentos de onda compactados dentro do envelope de ganho do material; hoje são utilizados em redes locais, prédios e interconexão de equipamentos; aceitam transmissão **WDM** mas não são otimizados pra isso;
- **Monomodo:** surgiram bem depois com aprimoramento das tecnologias de fabricação; emitem um único comprimento de onda; -- os mais utilizados em Telecom são DFB e DBR (ambos baseados em grades de Bragg); são por excelência as fontes **WDM**.

⊙ **Fibras (modos transversos):**

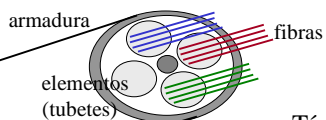
- **Multimodo:** núcleo maior; propaga muitos modos do guia de onda; surgiram primeiro devido a limitações tecnológicas; hoje são utilizadas em redes locais e prédios; banda passante limitada pela dispersão modal; aceitam muitos compr.onda (transmissão **WDM**), mas não são otimizadas pra isso;
- **Monomodo:** núcleo menor; propaga só o modo fundam. do guia de onda; surgiram bem depois com aprimoramento das tecnologias de fabricação; são o meio de transmissão com maior banda passante que existe; são também as mais adequadas p/ sistemas **WDM**.(muitos compr.onda).



Fibras Ópticas Cabos de Fibras

Necessário:

- manuseio fibras;
- proteção contra ambiente;
- proteção contra rupturas;
- proteção instalação.



Típicos
12, 16, 36, 72, 144 fibras



Fim deste Capítulo