

**Fibras ópticas:
fundamentos e aplicações
em sensoriamento**

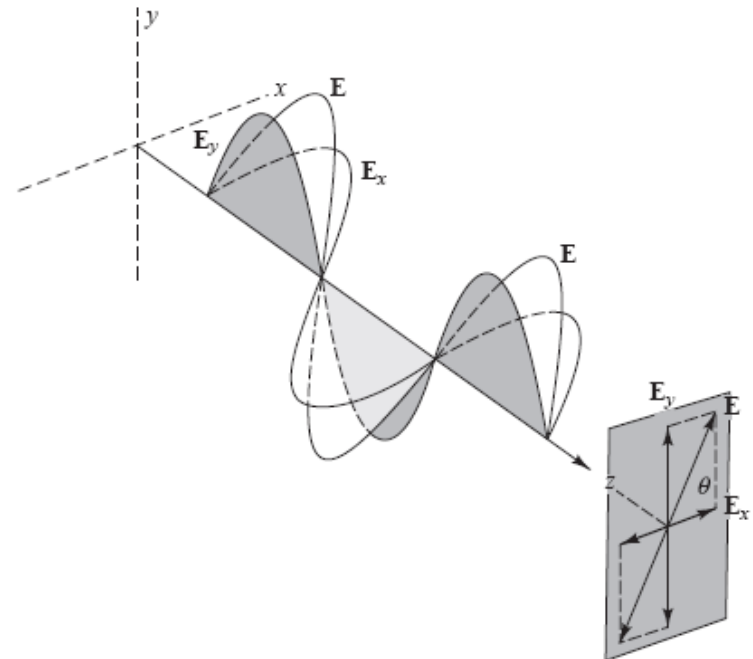
A natureza da luz

O campo elétrico ou magnético de uma onda linearmente polarizada na direção \mathbf{k} ($k = 2\pi/\lambda$ é a constante de propagação):

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{e}_i A_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$$

O campo elétrico linearmente polarizado na direção \mathbf{e}_y é:

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \mathbf{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) = \mathbf{e}_y E_y$$



Lei de Snell

A razão entre a velocidade da luz no vácuo c e a correspondente velocidade em um material s é o *índice de refração* n of the material: $n = c/s \geq 1.0$

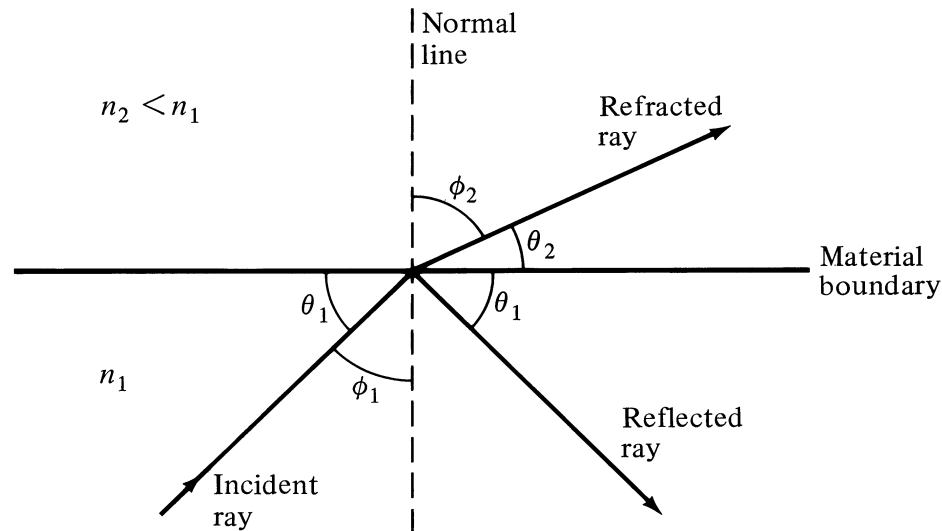
Table 2.1 *Indices of refraction for various substances*

<i>Material</i>	<i>Refractive index</i>
Acetone	1.356
Air	1.000
Diamond	2.419
Ethyl alcohol	1.361
Fused quartz (SiO ₂): varies with wavelength	1.453 @ 850 nm
Gallium arsenide (GaAs)	3.299 (infrared region)
Glass, crown	1.52–1.62
Glycerin	1.473
Polymethylmethacrylate (PMMA)	1.489
Silicon (varies with wavelength)	3.650 @ 850 nm
Water	1.333

Lei de Snell

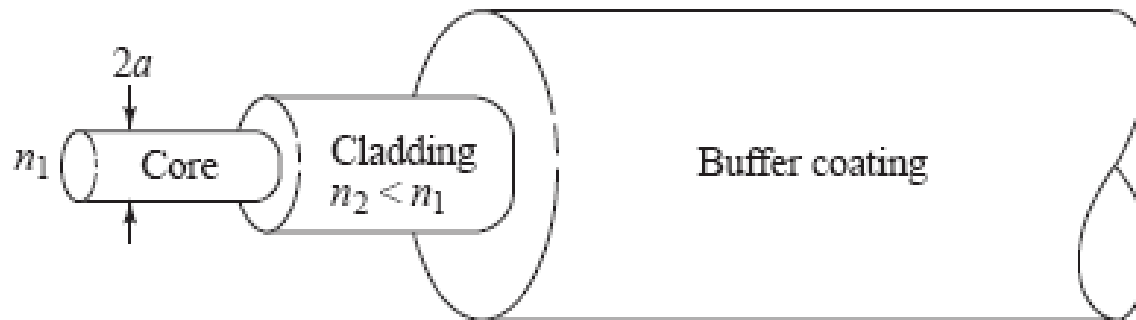
- Na interface entre dois meios, parte do raio incidente é refletido e parte é transmitido para o outro meio.
- **Lei de Snell** define como ocorre a transmissão de luz entre dois meios distintos.

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$



Modos eletromagnéticos em uma fibra óptica

- Em fibras de índice degrau, o core de raio a tem índice de refração n_1 . Ele é rodeado por uma casca (cladding) de índice levemente menor $n_2 = n_1(1 - \Delta)$.
- Δ é o *core-cladding index difference*. Típicos valores de Δ variam de 1 a 3 % para fibras multimodos e de 0.2 a 1.0 % para fibras monomodos.



Comparações entre tipos de fibras ópticas

- Os índices são uniformes em uma fibra de índice degrau.
- O índice varia com o raio do core em uma fibra de índice gradual

Diâmetros típicos

SM core: 8-10 μm

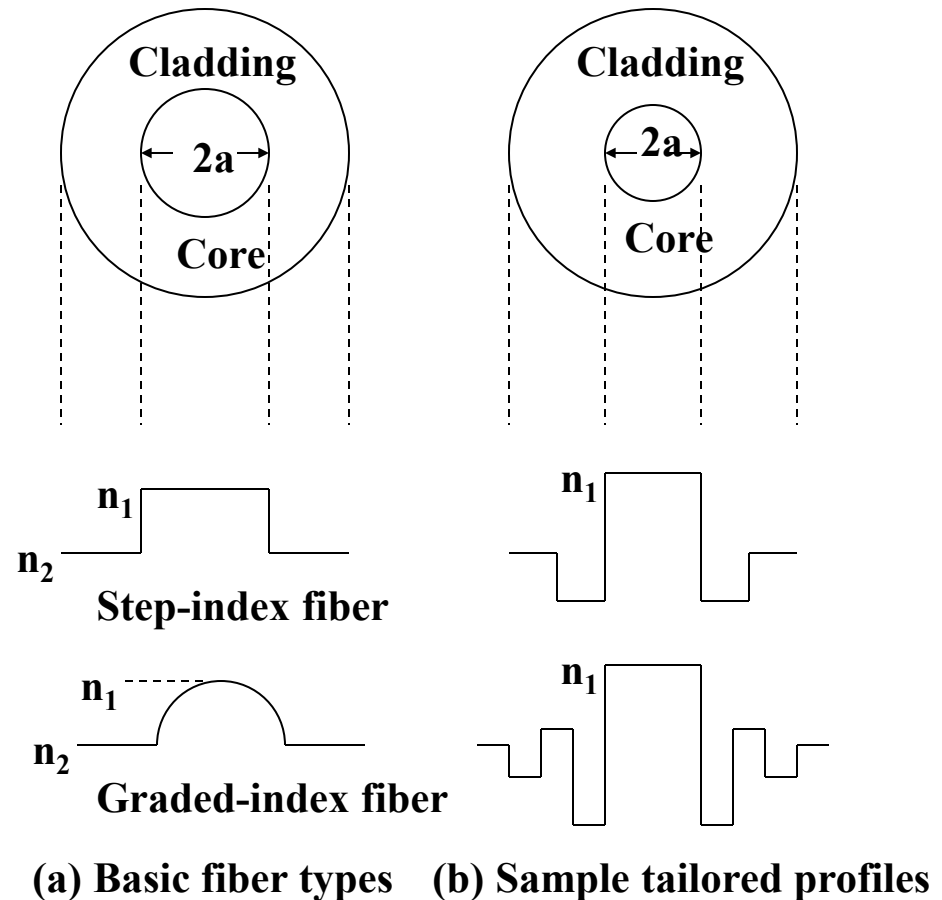
SM cladding: 125 μm

MM core: 50 or 62.5 μm

MM cladding: 125 μm

(SM = single mode)

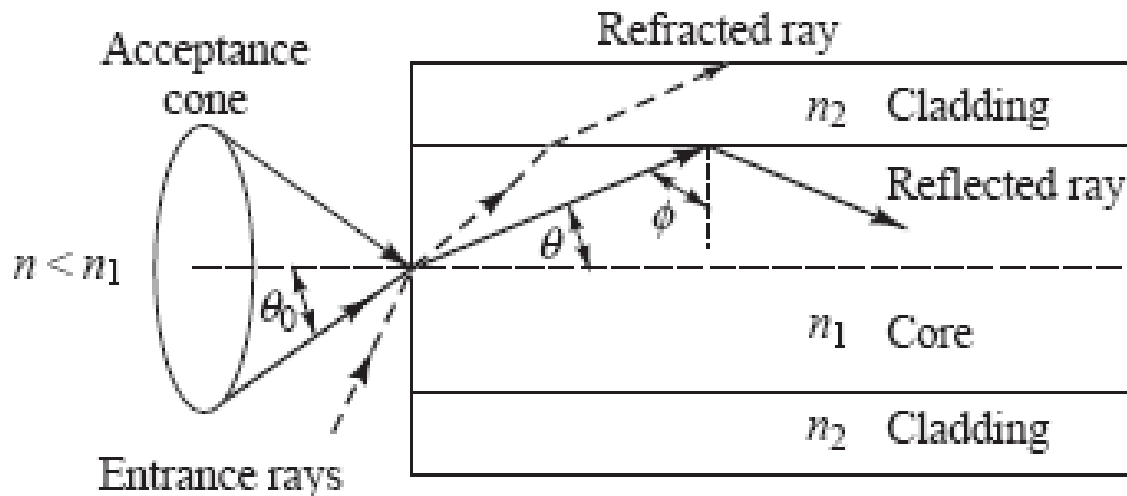
(MM = multimode)



Óptica de raios para fibras

Mecanismo de propagação:

- A luz incide no core em um ângulo θ_0 a partir do meio externo;
- Os raios propagantes são aqueles que sofrem reflexão interna total na interface core-cladding;
- Os raios seguem um caminho de zig-zag ao longo da fibra;
- A Lei de Snell determina o ângulo mínimo para reflexão interna total.



Abertura numérica

- Ângulo mínimo (também chamado ângulo crítico) para reflexão interna total $\sin \varphi_{\min} = \sin \varphi_c = n_2/n_1$
- Essa condição está relacionada ao máximo ângulo de entrada $\theta_{0,\max} = \theta_A$ (ângulo de aceitação) por:

$$n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

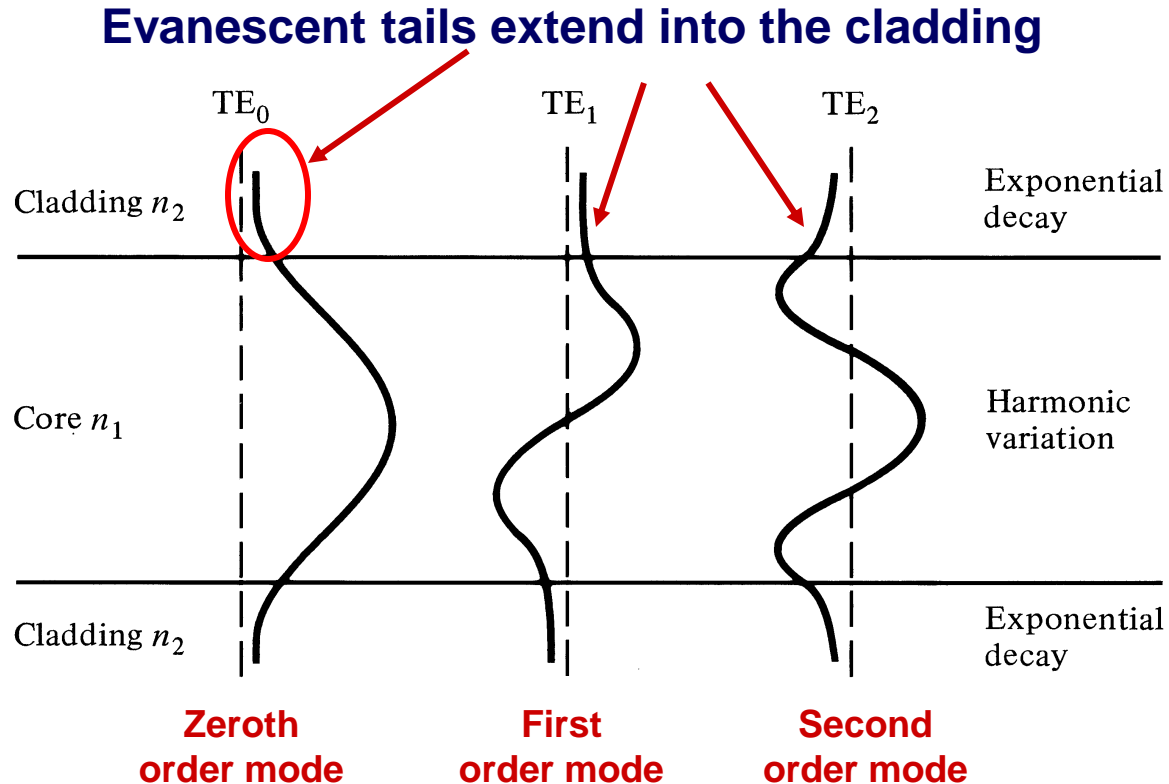
onde $\theta_c = \pi/2 - \varphi_c$ [lembre-se que $\sin x = (1 - \cos^2 x)^{1/2}$]

Abertura numérica:

$$NA = n \sin \theta_A = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 (2\Delta)^{1/2}$$

Padrões modais de campo

Distribuições de campo elétrico dos modos guiados em uma fibra:



Modo de ordem 0 = modo fundamental

Uma fibra monomodo transporta somente o modo fundamental

O número V

- É um parâmetro associado com a condição de corte (cutoff condition):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{NA}$$

Example 2.6 A step-index fiber has a normalized frequency $V=26.6$ at a 1300-nm wavelength. If the core radius is $25 \mu\text{m}$, what is the numerical aperture?

Solution: From Eq. (2.27) the NA is

$$\text{NA} = V \frac{\lambda}{2\pi a} = 26.6 \frac{1.30 \mu\text{m}}{2\pi \times 25 \mu\text{m}} = 0.22$$

Número de modos em uma fibra

V pode ser usado para expressar o número de modos M em uma fibra de índice degrau multimodo quando V é grande

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

Fibras monomodos

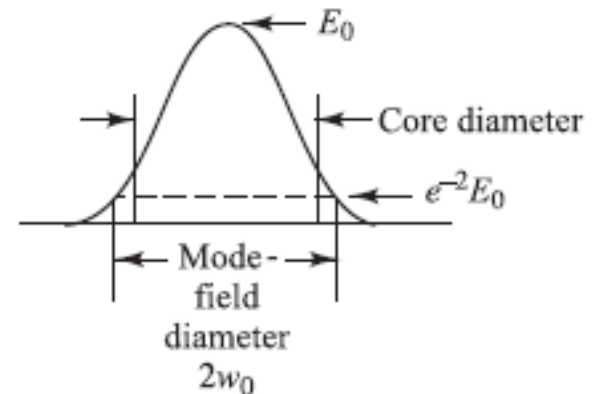
Características de fibras monomodo:

- O diâmetro do núcleo mede apenas alguns comprimentos de onda (usualmente 8–12)
- A diferença entre os índices do núcleo e casca é pequena (0.2 a 1.0 %)
- $V < 2.405$

Diâmetro do campo modal

- Mode-field diameter (MFD): pode ser determinado a partir da distribuição de campo do modo fundamental.

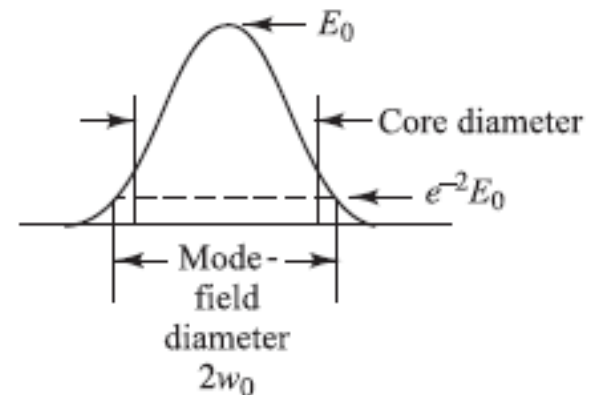
$$\text{MFD} = 2w_0 = 2 \left[\frac{2 \int_0^{\infty} E^2(r) r^3 dr}{\int_0^{\infty} E^2(r) r dr} \right]^{1/2}$$



Fibras como sensores ópticos

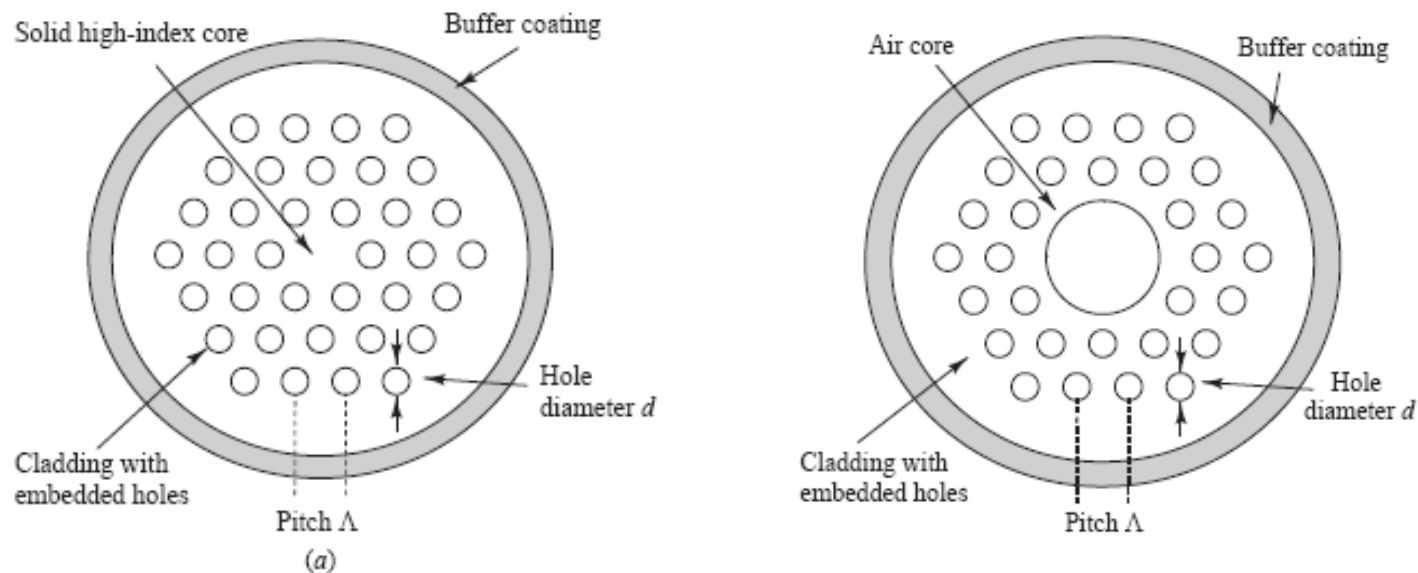
- Mode-field diameter (MFD): pode ser determinado a partir da distribuição de campo do modo fundamental.

$$\text{MFD} = 2w_0 = 2 \left[\frac{2 \int_0^{\infty} E^2(r) r^3 dr}{\int_0^{\infty} E^2(r) r dr} \right]^{1/2}$$



Fibras de cristal fotônico (PCF)

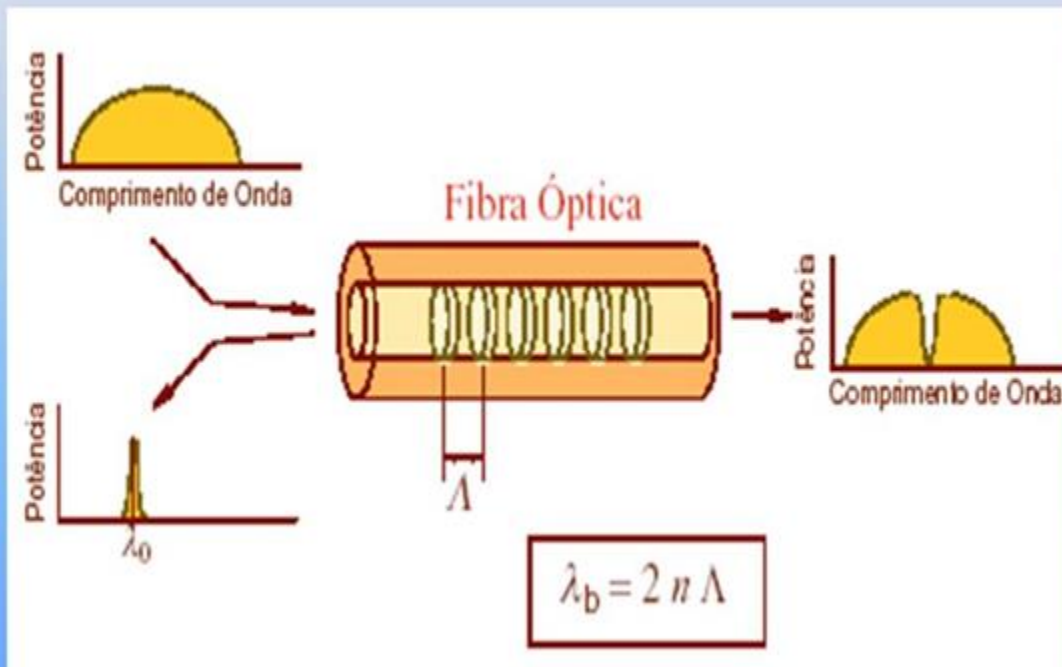
- Uma PCF contém furos de ar ao longo de todo o comprimento da fibra.
- São importantes para: controlar dispersão, não-linearidades e birefringência.
- PCFs podem ser “**index-guiding fibers**” (esquerda) ou **photonic bandgap fibers** (direita)



Fibras de grade de Bragg

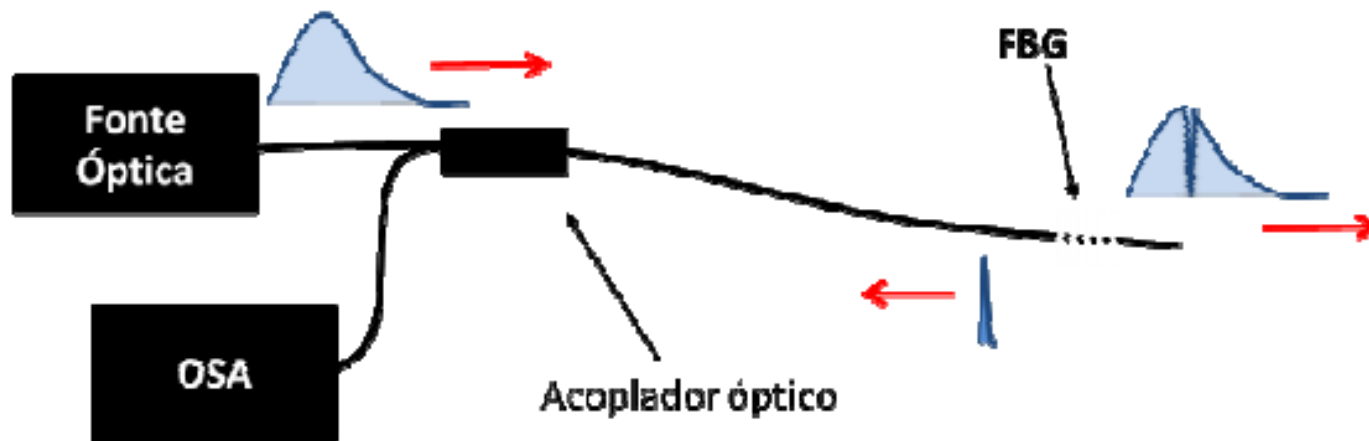
- É uma fibra que apresenta uma região de variação periódica do índice de refração do núcleo.

O que é uma Rede de Bragg?



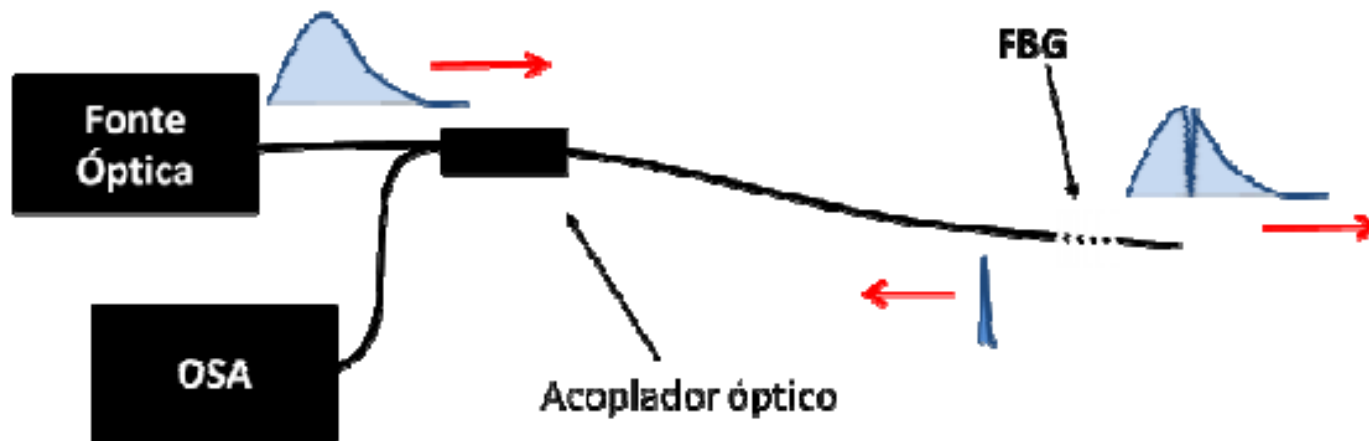
Fibras de grade de Bragg

- Deformações mecânicas da fibra afetam o período da grade de Bragg, levando à variação do comprimento de onda de Bragg
- Variações de temperatura alteram o índice de refração do núcleo, o que também leva à variação do comprimento de onda de Bragg



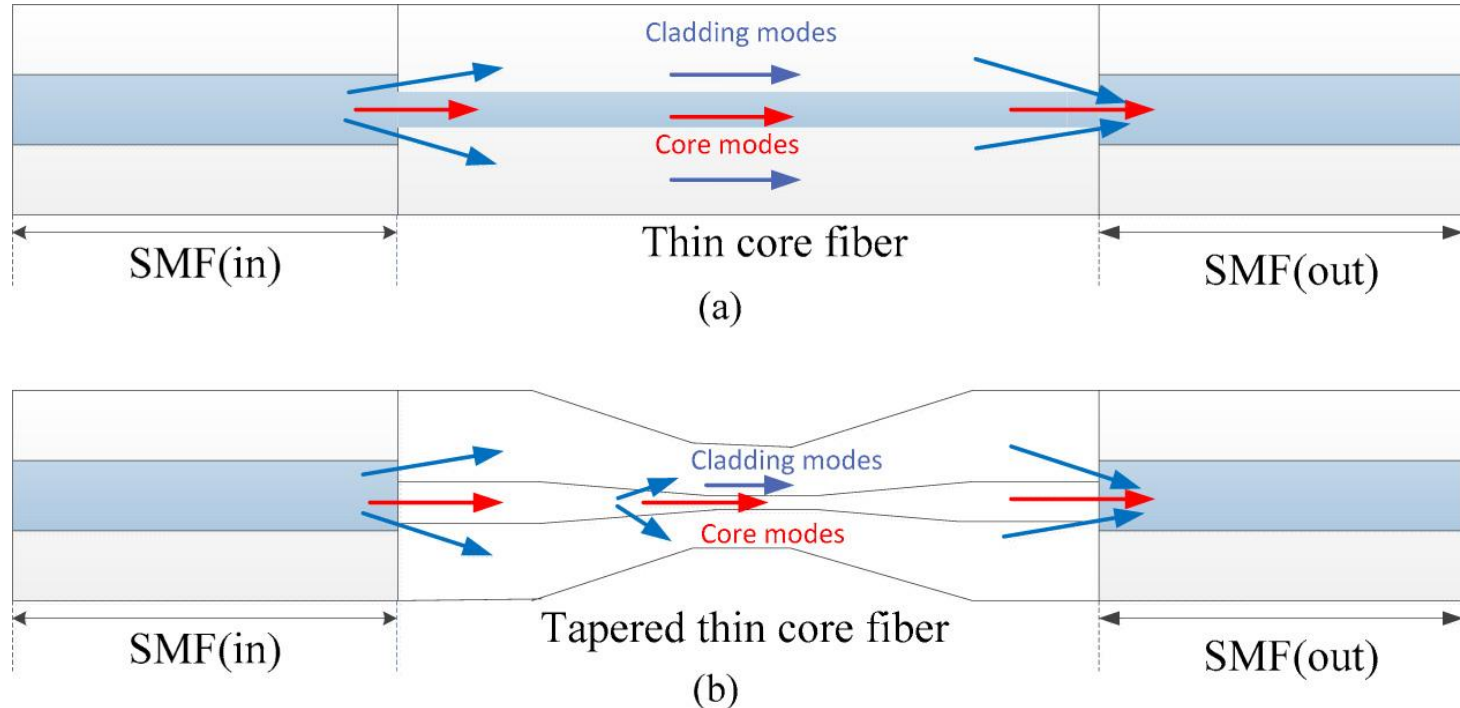
Fibras de grade de Bragg

- Deformações mecânicas da fibra afetam o período da grade de Bragg, levando à variação do comprimento de onda de Bragg
- Variações de temperatura alteram o índice de refração do núcleo, o que também leva à variação do comprimento de onda de Bragg



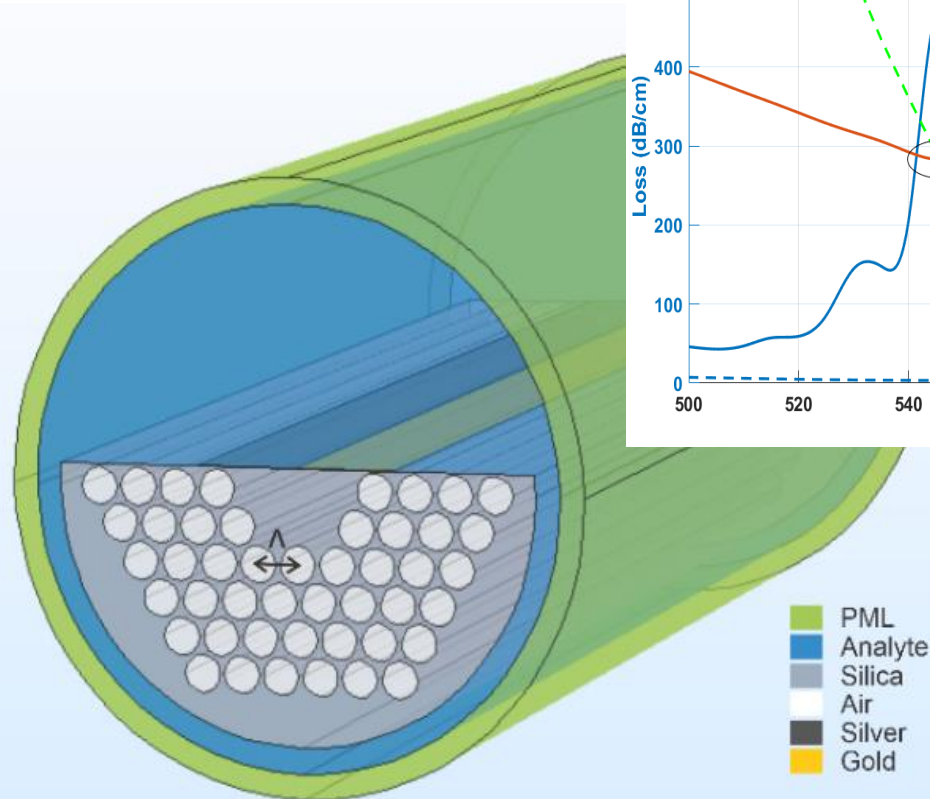
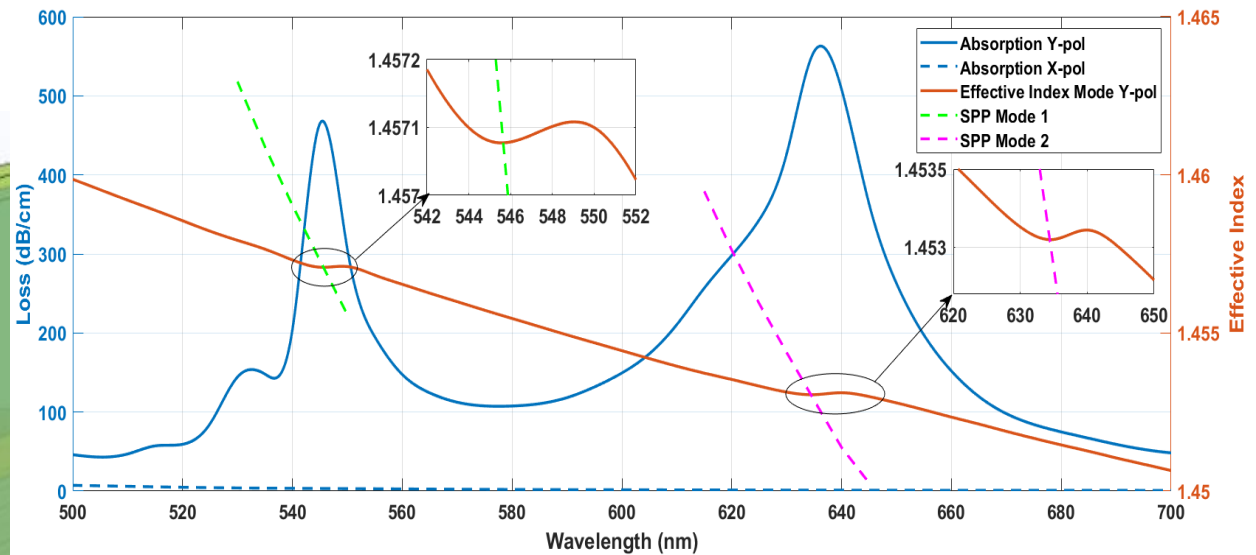
Interferômetros a fibra óptica

- Podem ser obtidos a partir da interconexão de fibras de diferentes diâmetros (do núcleo e/ou da casca)

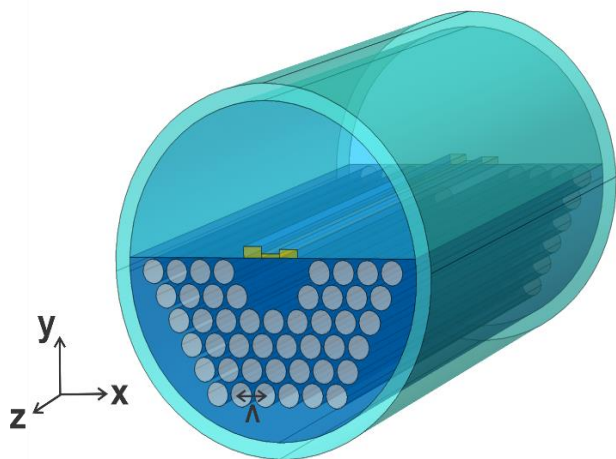


Sensores Plasmônicos

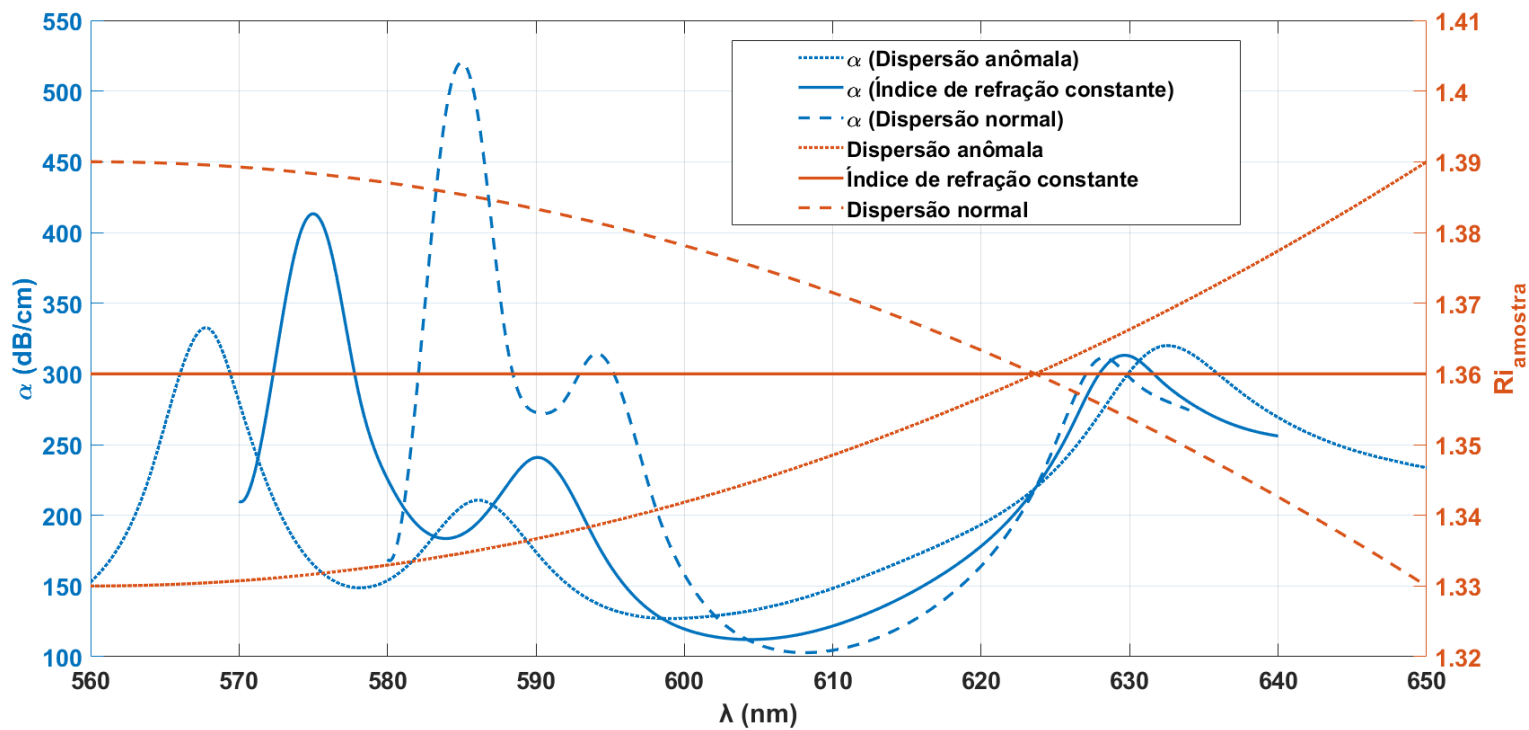
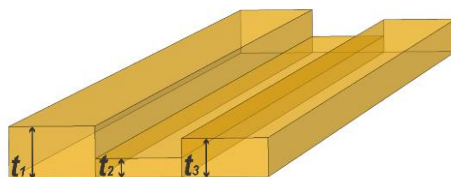
- Modos plasmônicos: modos eletromagnéticos confinados à interface condutor/dielétrico.
- Podem ser excitados a partir dos modos guiados em uma fibra óptica.



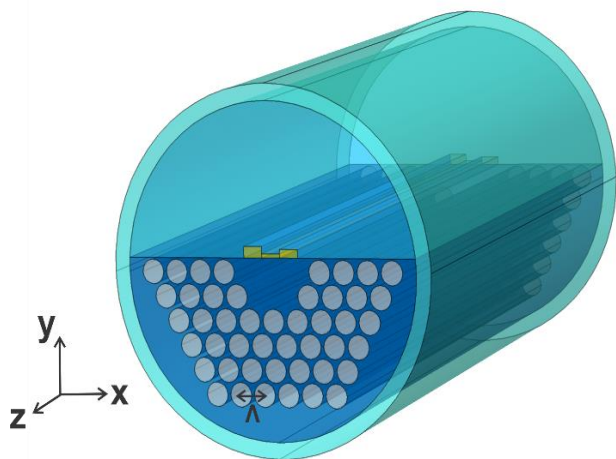
Sensor multiplasmônico para detecção de regimes de dispersão



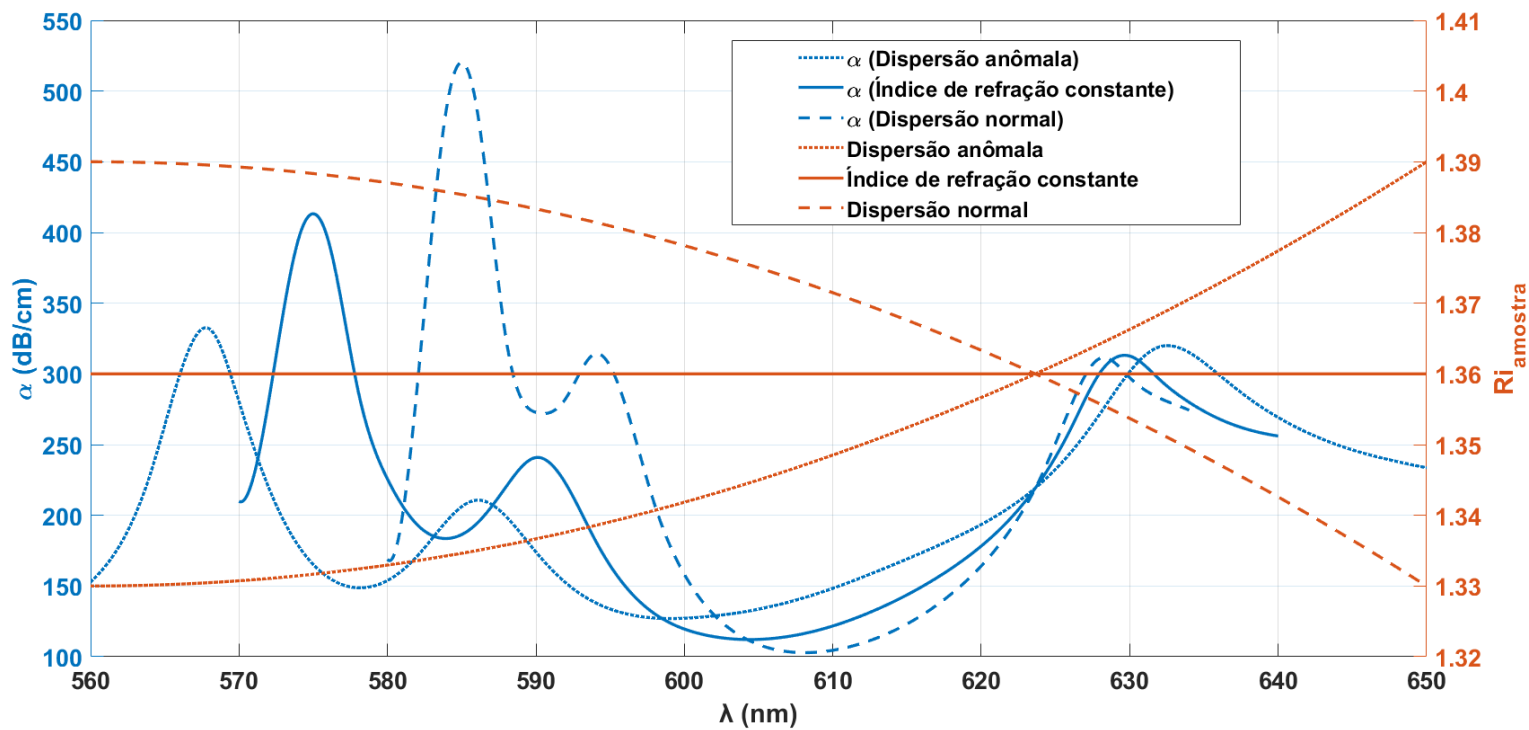
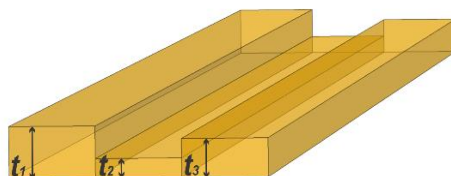
- PML
- AMOSTRA
- SÍLICA
- AR
- OURO



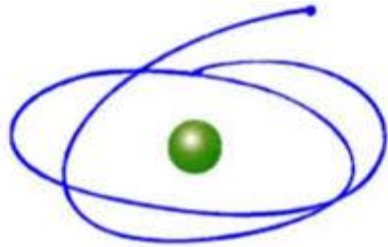
Sensor multiplasmônico para detecção de regimes de dispersão



- PML
- AMOSTRA
- SÍLICA
- AR
- OURO



AGRADECIMENTOS



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico



INESCPORTO[®]
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS
E COMPUTADORES DO PORTO

