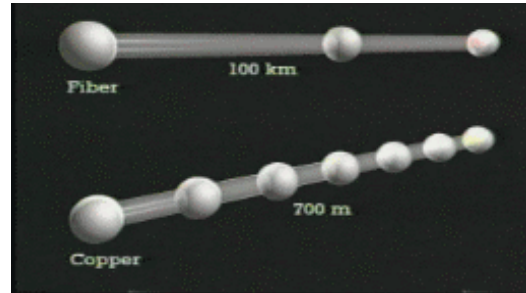

TEÓRICA 2

FIBRA ÓTICA – PARTE 1

Sumário

- Introdução
- Estrutura
- Fabricação

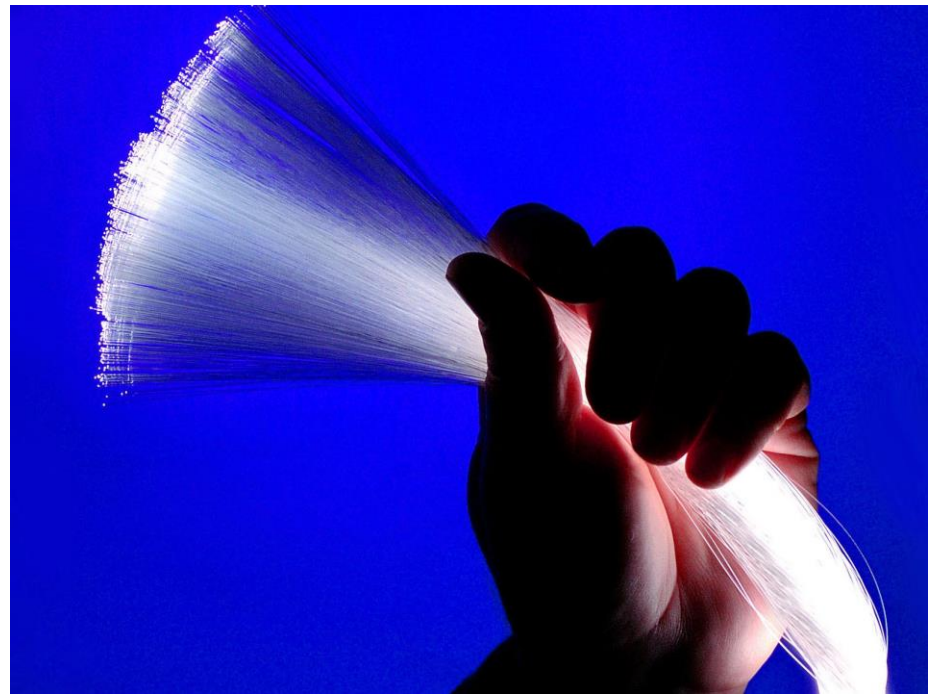
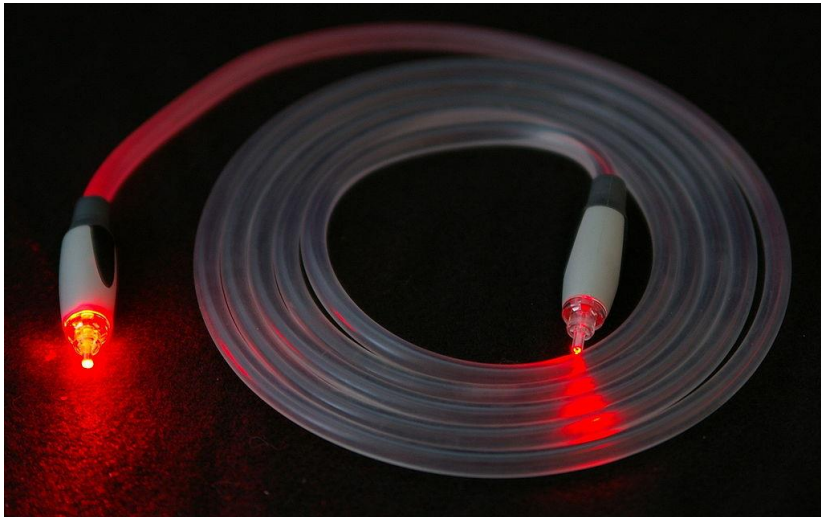
Introdução



- A fibra ótica é um guia de luz
- É um dos componentes fundamentais de qualquer sistema de comunicações óticas
- Permite a transmissão de informação luminosa com baixas perdas e a grandes distâncias
 - já foram alcançados 400 km sem regeneração
 - Tipicamente utilizam-se distâncias de 70 km a 100 km

Introdução

- A fibra ótica é um guia de luz

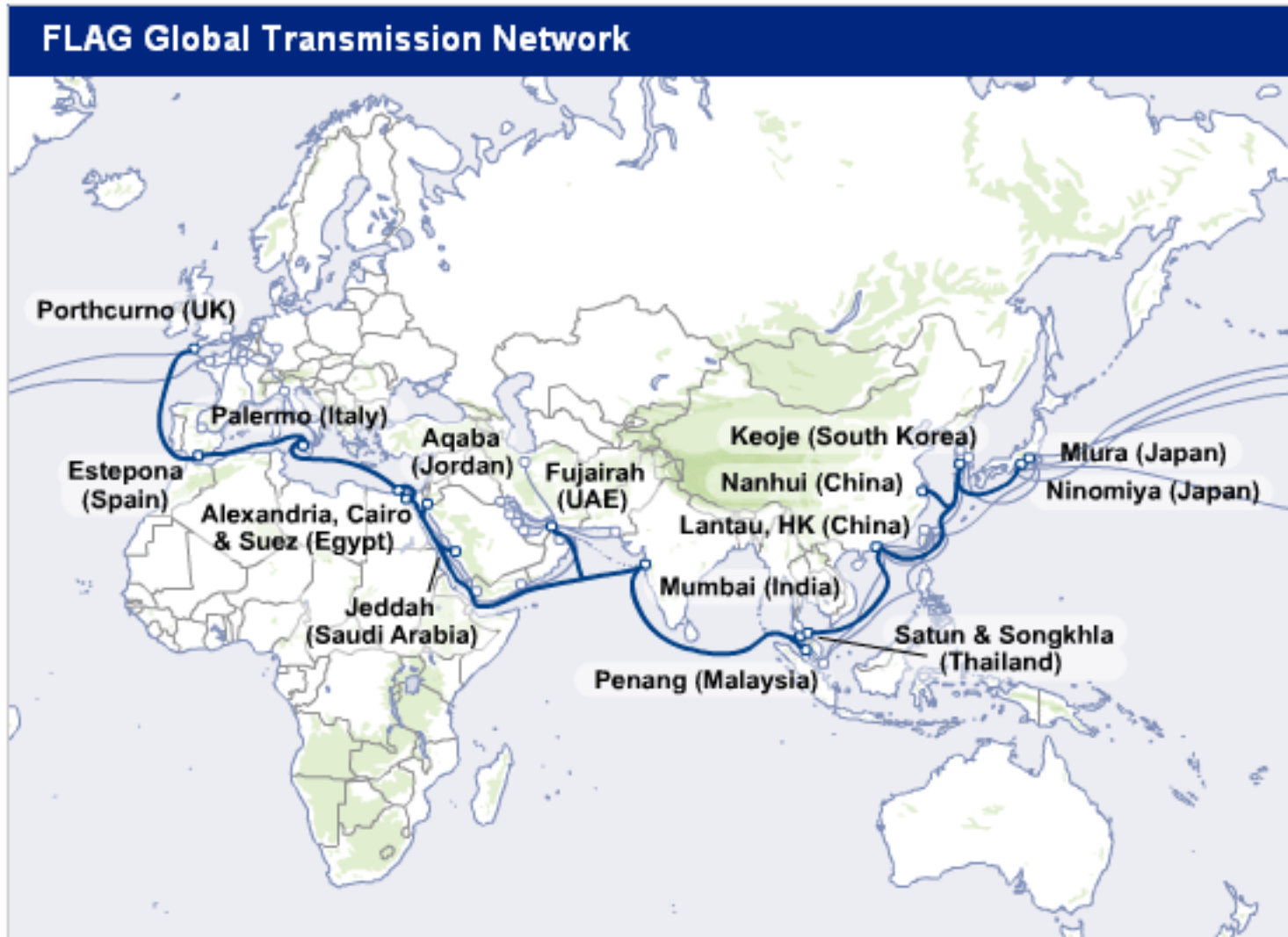


Introdução



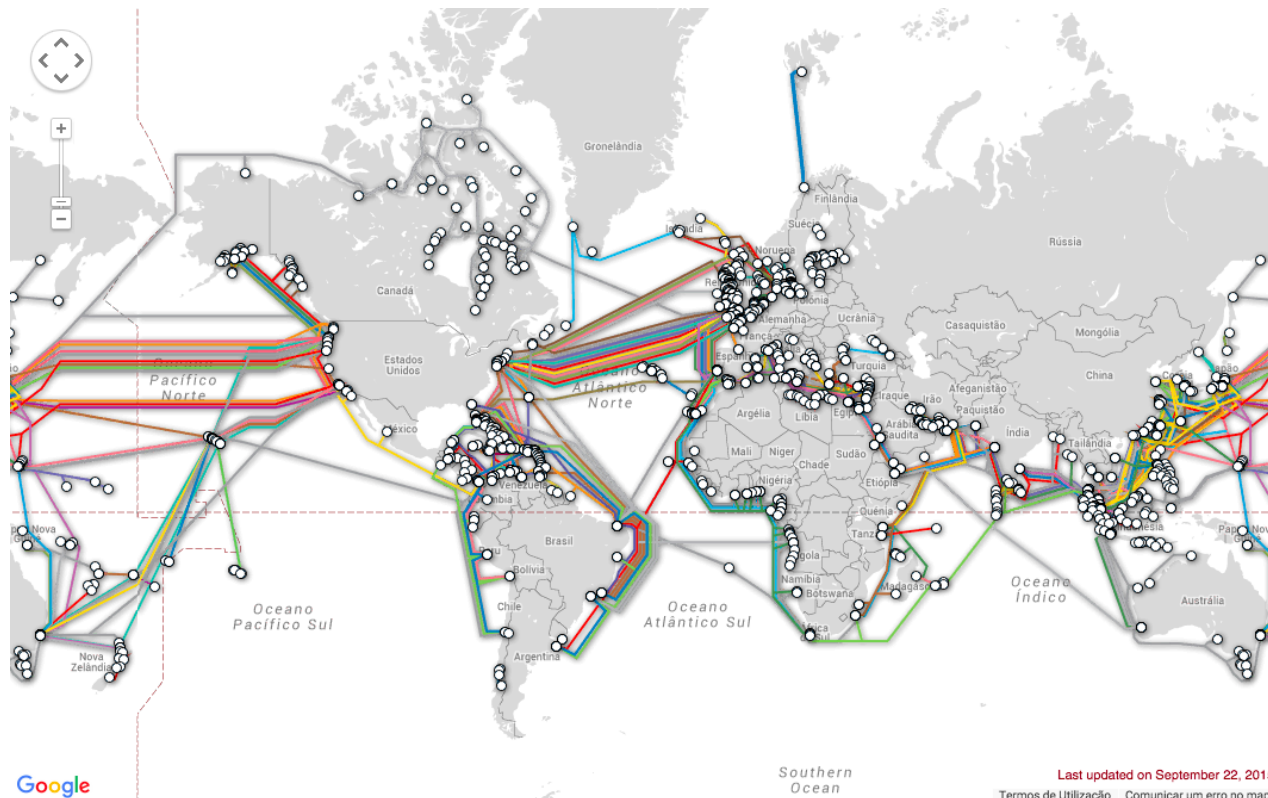
- A Global Cloud Xchange é um operador de telecomunicações por fibra ótica à escala global
- Fundada em 1988 e sediada em Hong-Kong
- Criou em 1999 o FLAG
 - Fiber-Optic Link Around the Globe
- Possui 5 cabos submarinos pelos principais oceanos e mares
- Detentora da ligação de fibra ótica com 28.000 km de distância
 - Liga o Reino Unido ao Japão com algumas paragens pelo caminho

Introdução



Introdução

- Rede ótica submarina global
 - <http://www.submarinecablemap.com/>



TeleGeography Submarine Cable Map

The [Submarine Cable Map](#) is a free resource from TeleGeography. Data contained in this map is drawn from the [Global Bandwidth Research Service](#) and is updated on a regular basis.

To learn more about TeleGeography or this map please click [here](#).



Sponsored in part by Huawei Marine

Feedback [f](#) [t](#) [github](#)

Submarine Cables

[ACS Alaska-Oregon Network \(AKORN\)](#)

[Aden-Djibouti](#)

[Adria-1](#)

[AEConnect \(AEC\)](#)

[Africa Coast to Europe \(ACE\)](#)

[ALASIA](#)

[Alaska United East](#)

[Alaska United Southeast](#)

[Alaska United Turnagain Arm \(AUTA\)](#)

[Alaska United West](#)

[ALBA-1](#)

[Aletar](#)

[Alonso de Ojeda](#)

[ALPAL-2](#)

[America Movil Submarine Cable System-1 \(AMX-1\)](#)

All content © 2015 PriMetrica, Inc.

Last updated on September 22, 2015

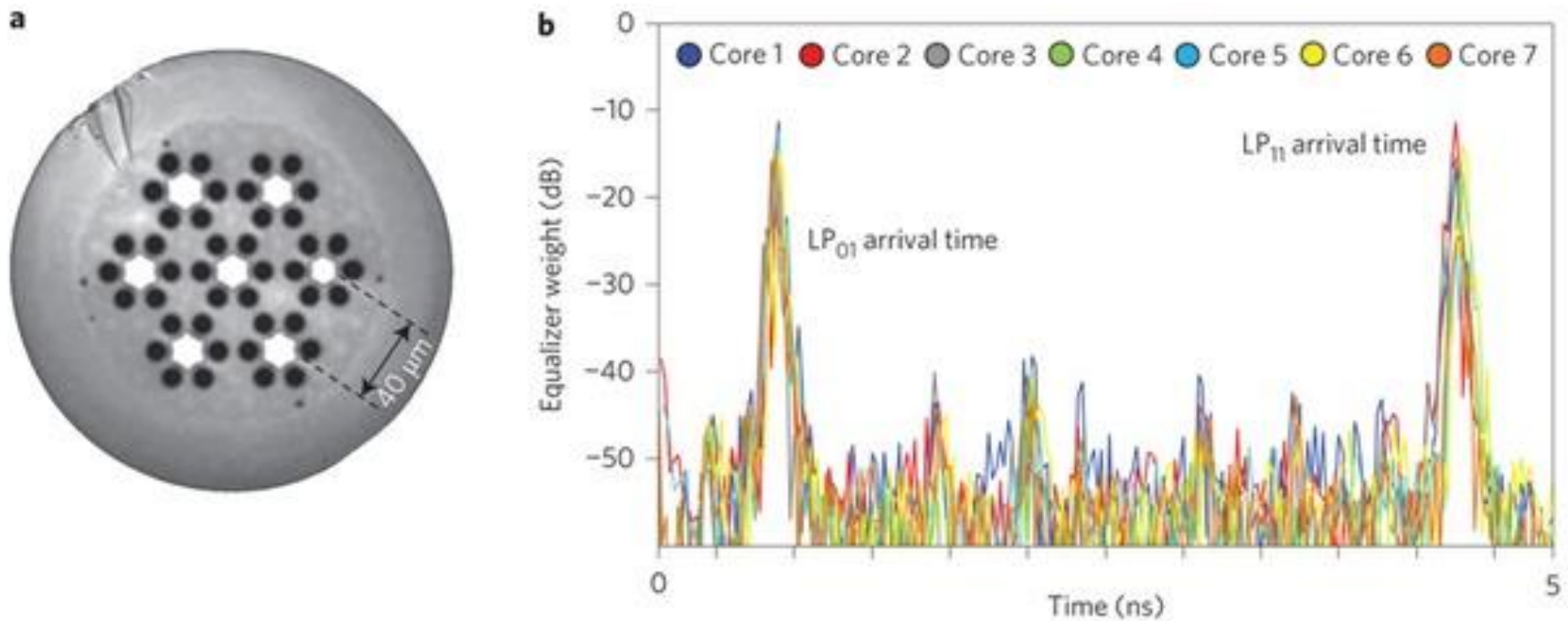
[Termos de Utilização](#) [Comunicar um erro no mapa](#)

Introdução

- Recordes de largura de banda
 - 2014
 - 1 TB em apenas 31 milissegundos
 - 2011 (NEC)
 - 101 Tbps em fibra monomodo (165 km)
 - 2012 (NEC e Corning)
 - 1,05 Pbps em fibra multimodo e multinuclear (52,4 km)
 - 2009 (Bell Labs)
 - Quebrada a barreira dos 100 Pbps por quilómetro
 - Atingiu-se os 15,5 Tbps em 7000 km de fibra

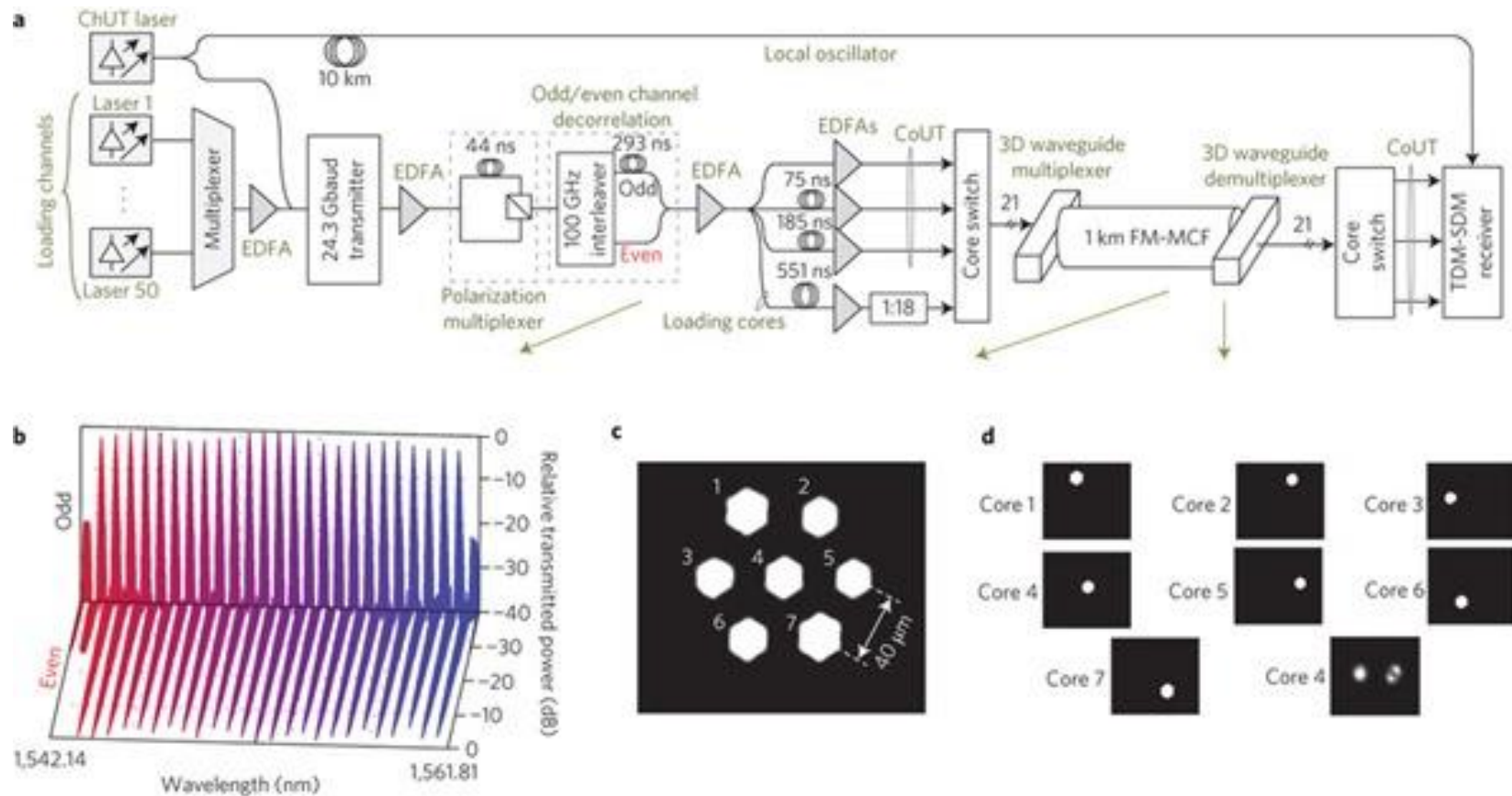
Introdução

- 1 TB em apenas 31 milissegundos



Introdução

- 1 TB em apenas 31 milissegundos



Introdução

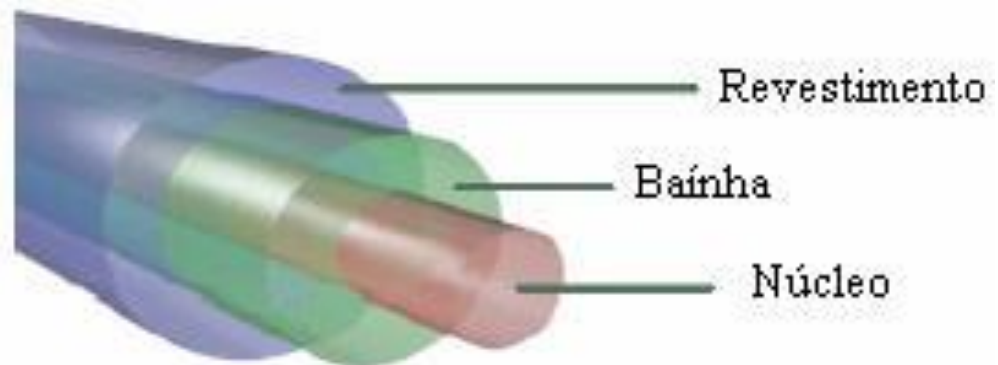
MEDIDA USUAL	Nº DE CARACTERES	BASE 2
Byte	1	2^0
Kylobyte (KB)	1.024	2^{10}
Megabyte (MB)	1.048.576	2^{20}
Gigabyte (GB)	1.073.741.824	2^{30}
Terabyte (TB)	1.099.511.627.776	2^{40}
Petabyte (PB)	1.125.899.906.842.624	2^{50}
Hexabyte (HG)	1.152.921.504.606.846.976	2^{60}

Introdução

Year	Organization	Effective speed	WDM channels	Per channel speed	Distance
2009	Alcatel-Lucent ^[9]	15 Tbit/s	155	100 Gbit/s	90 km
2010	NTT ^[10]	69.1 Tbit/s	432	171 Gbit/s	240 km
2011	KIT ^[11]	26 Tbit/s	1	26 Tbit/s	50 km
2011	NEC ^[12]	101 Tbit/s	370	273 Gbit/s	165 km
2012	NEC, Corning ^[13]	1.05 Petabit/s	12 core fiber		52.4 km

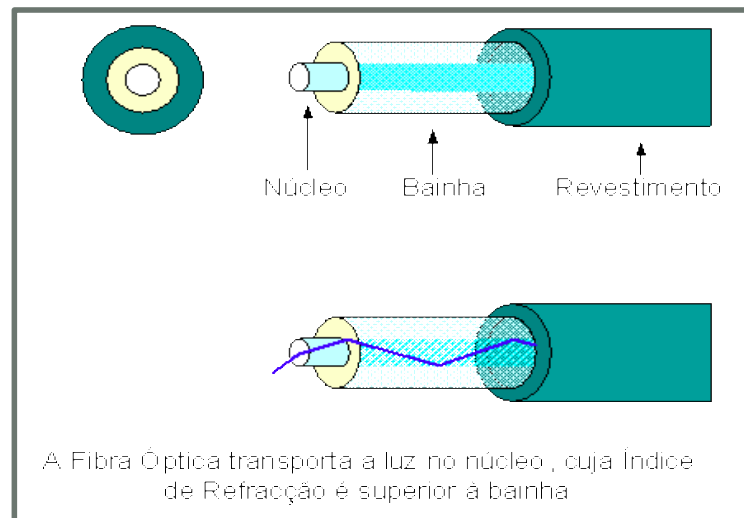
Estrutura

- Uma fibra ótica é composta basicamente por dois tipos de materiais
 - Núcleo e a bainha
- Aproveita o fenómeno da reflexão total interna



Estrutura

- O núcleo e bainha podem ser essencialmente de vidro ou plástico
- Possuem índices de refração diferentes
 - $n_{\text{núcleo}} > n_{\text{bainha}}$

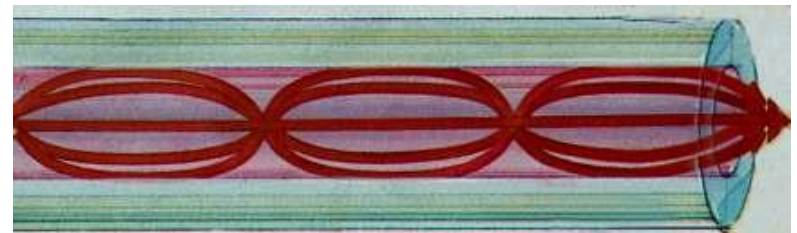
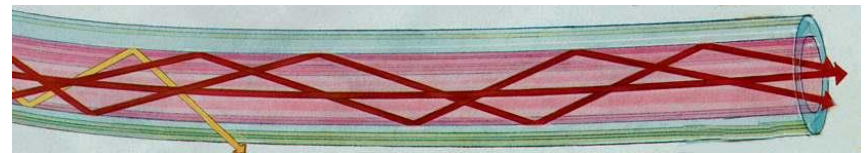


Estrutura

- No caso do vidro, tipicamente utiliza-se a sílica
 - SiO_2
- Para alterar o índice de refração utilizam-se dopantes
 - GeO_2 (Germânio) ↑
 - P_2O_5 (Fósforo) ↑
 - B_2O_3 (Boro) ↓

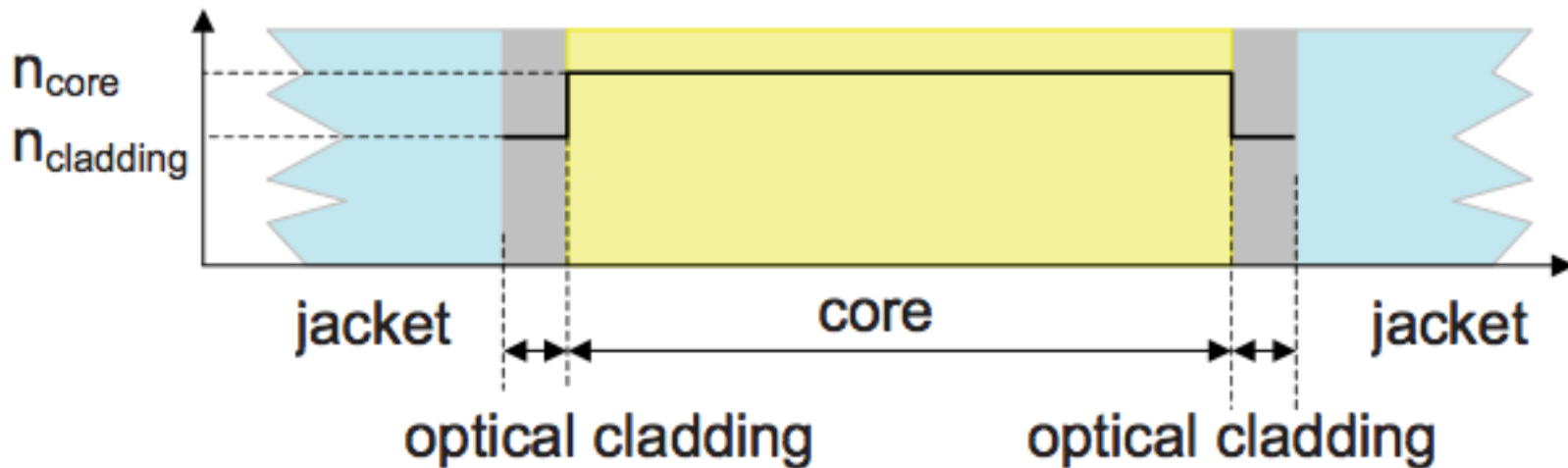
Estrutura

- Variação do índice de refração entre o núcleo e a bainha
 - Brusca
 - Fibra de índice em degrau
 - Step-index fiber
 - Gradual
 - Fibra de índice de variação gradual
 - Graded-index fiber



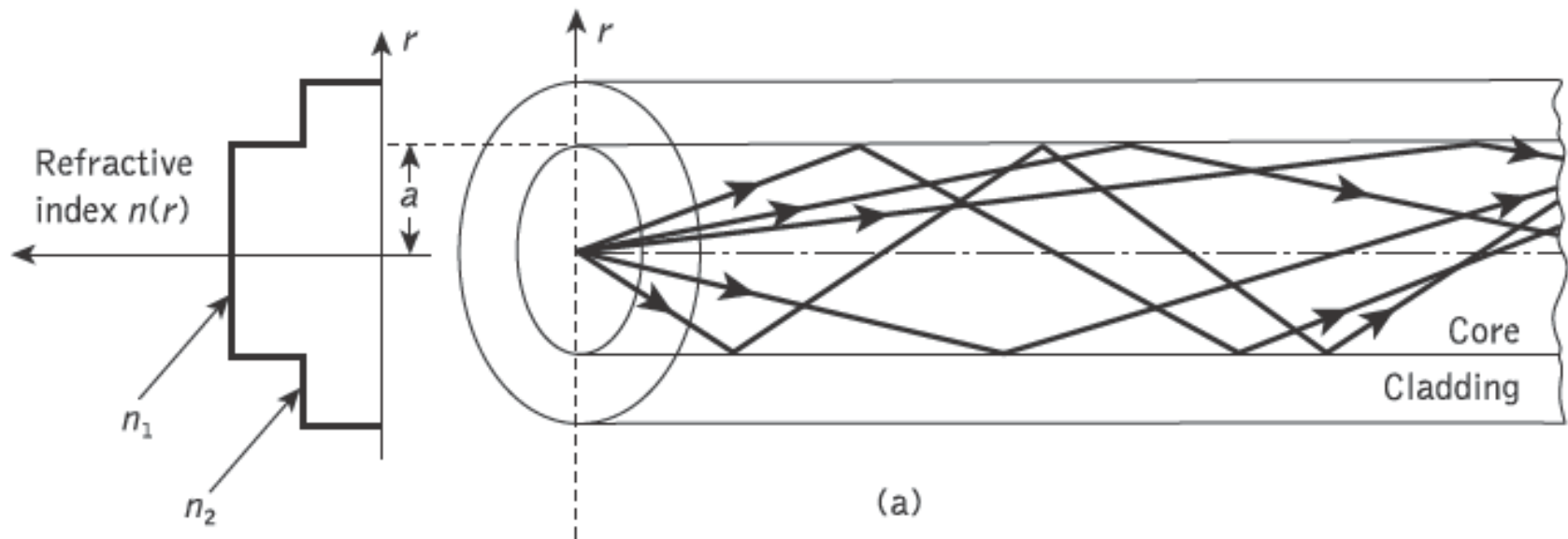
Estrutura

- Fibra de índice em degrau
 - A fibra possui um índice de refração maior no núcleo e menor na bainha



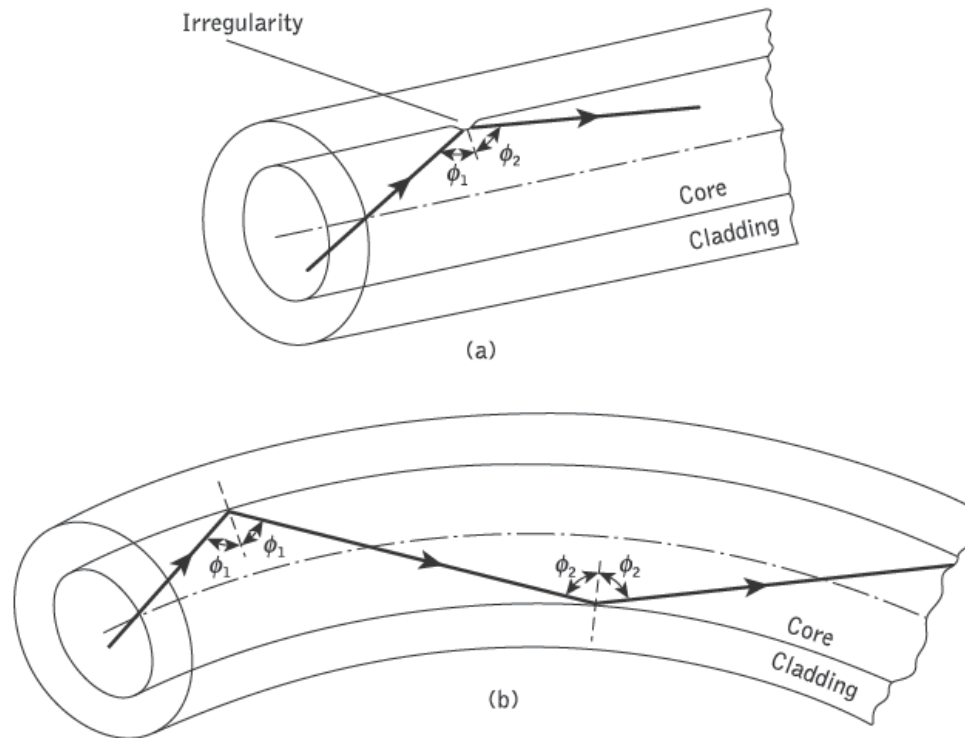
Estrutura

- Fibra de índice em degrau
 - Transmissão dos raios no núcleo



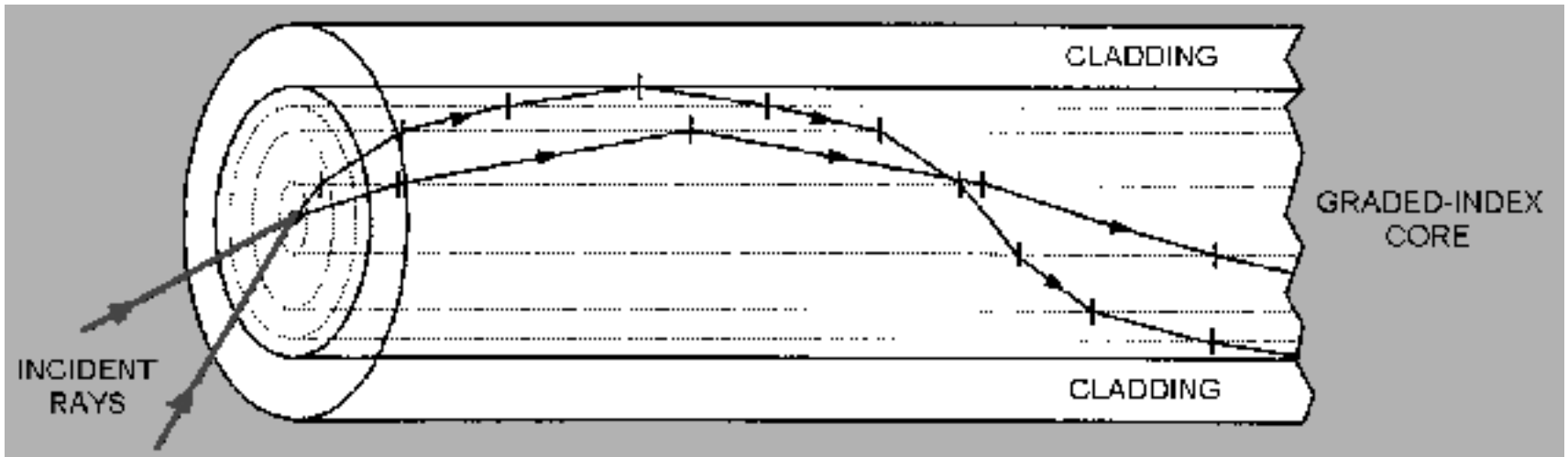
Estrutura

- Fibra de índice em degrau
 - Transmissão dos raios no núcleo



Estrutura

- Fibra de índice de variação gradual
 - A fibra possui um índice de refração que diminui com o aumento do raio
 - Dependendo do ângulo de incidência a reflexão pode dar-se antes da bainha



Estrutura

- Fibra de índice de variação gradual
 - A variação do índice é representada por:

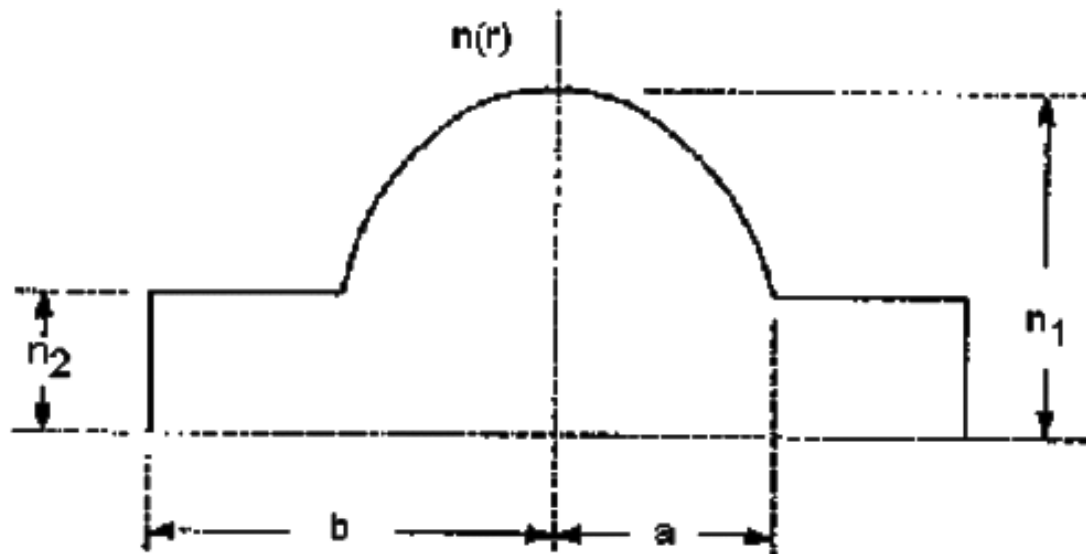
$$n(r) = \begin{cases} n_1(1 - 2\Delta(r/a)^\alpha)^{\frac{1}{2}} & r < a \quad \text{Núcleo} \\ n_1(1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2 & r \geq a \quad \text{Bainha} \end{cases}$$

- Parâmetro de perfil (α)
 - Também conhecido como Expoente do Perfil
- Diferença relativa do índice de refração (Δ)

$$\Delta = \frac{(n_1^2 - n_2^2)}{2n_1^2}$$

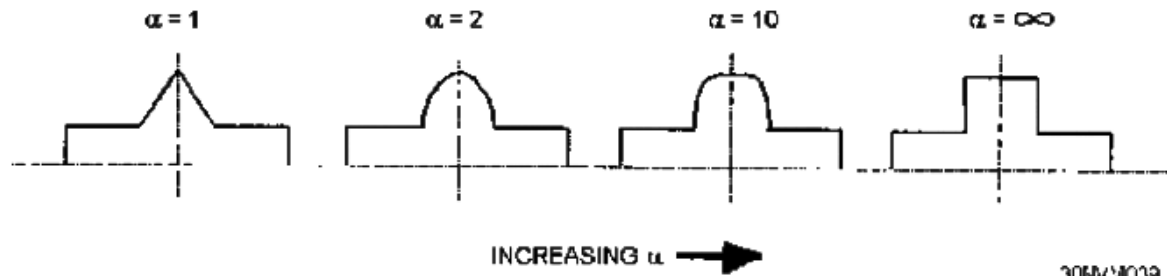
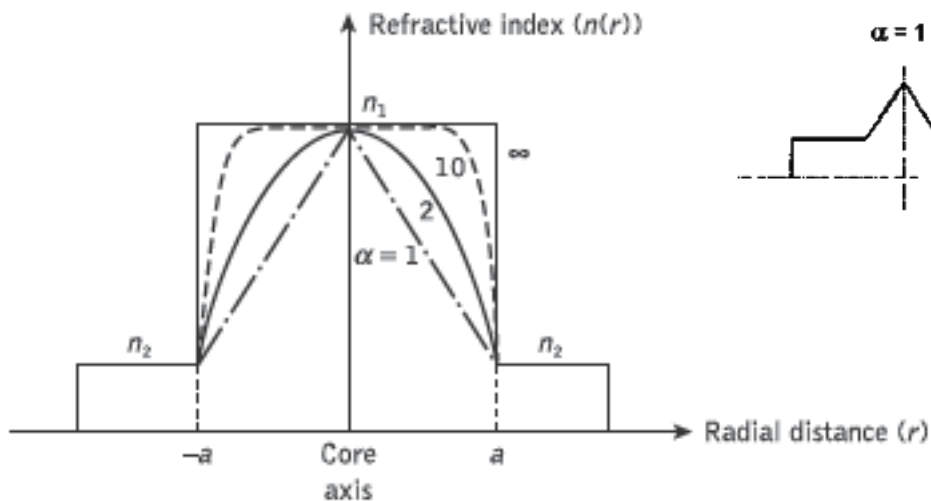
Estrutura

- Fibra de índice de variação gradual
 - Parâmetro de perfil (α)
 - Perfil com índice de refração parabólico
 - Possui a melhor performance dentro dos vários perfis



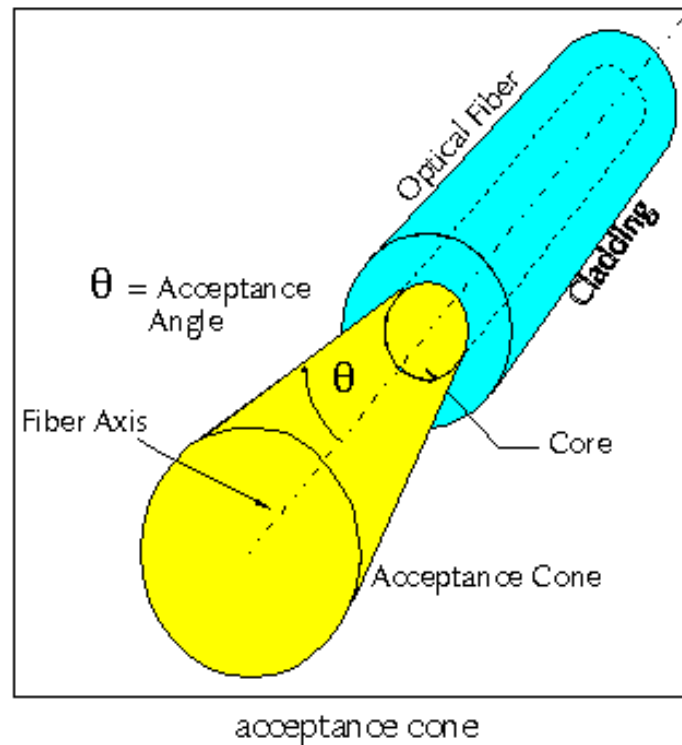
Estrutura

- Fibra de índice de variação gradual
 - Perfil da variação (α)
 - Outros valores de perfil



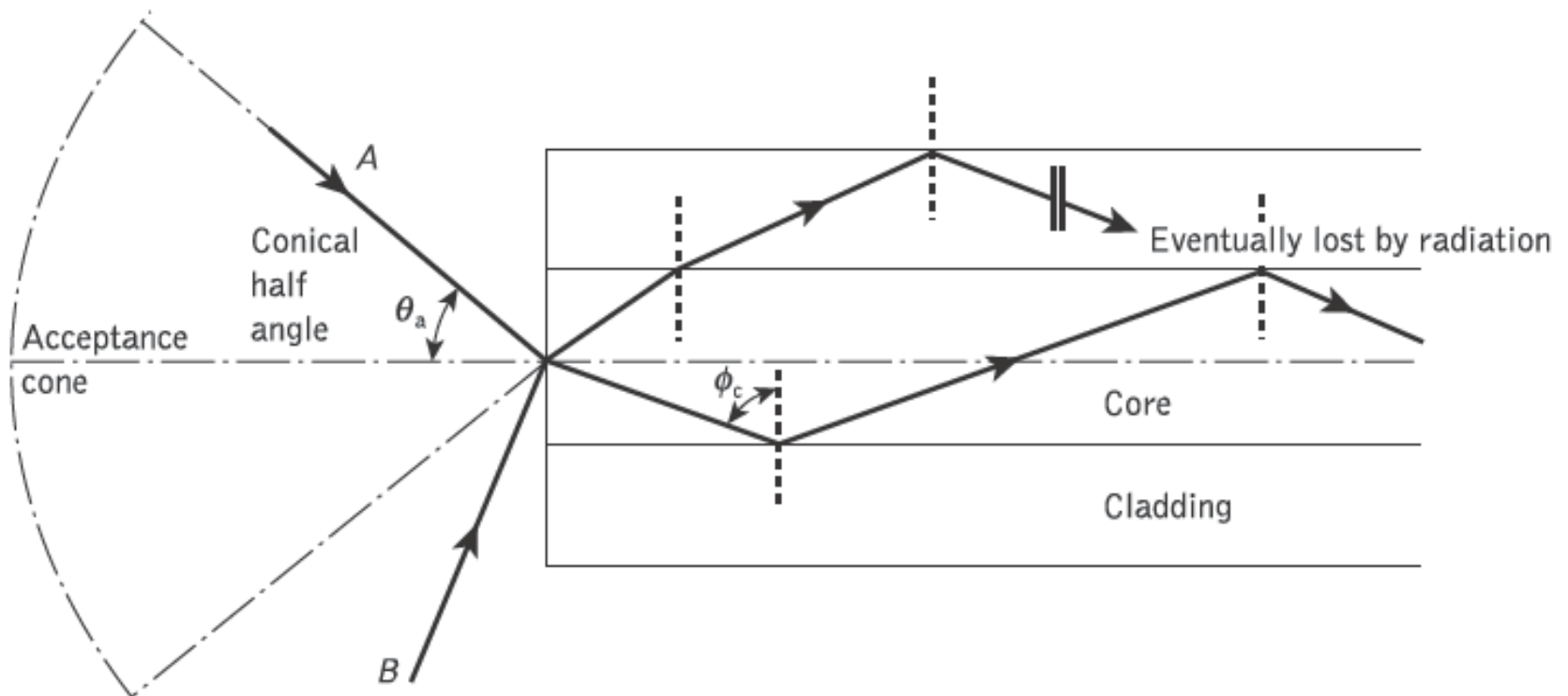
Estrutura

- Cone ou ângulo de aceitação
 - Ângulo máximo de entrada dos raios de luz



Estrutura

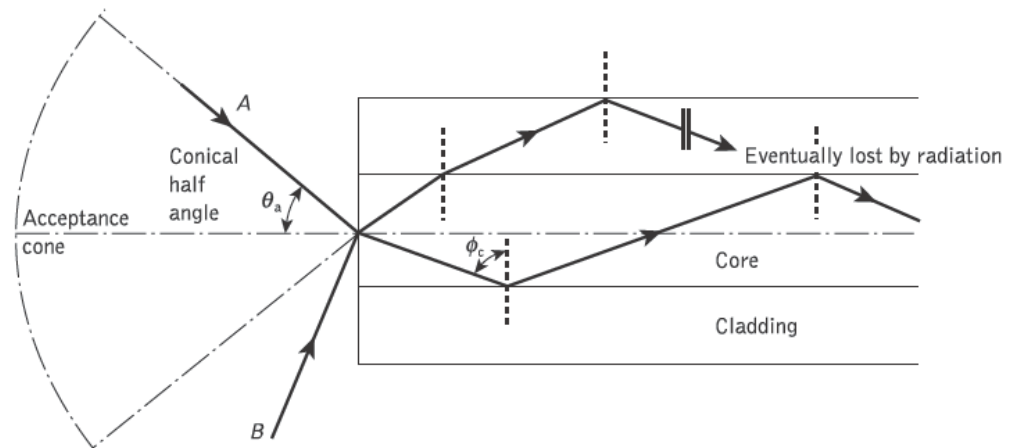
- Cone ou ângulo de aceitação



Estrutura

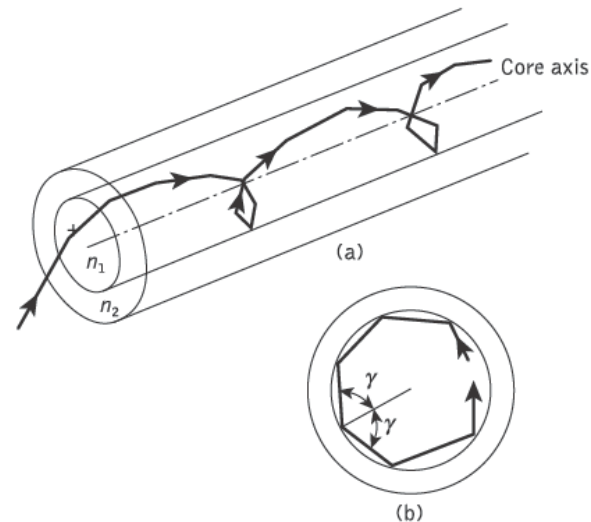
- Abertura numérica (AN)
 - Caracteriza o intervalo de ângulos sobre os quais o sistema pode receber ou emitir luz
 - Possui valores típicos de 0.15 a 0.5
 - Para fibras de índice em degrau, AN pode ser representado por:

$$AN = \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$



Estrutura

- Raios com percurso helicoidal
 - Também conhecidos como *Skew Rays*
 - Não se propagam sobre um plano mas antes possuem um percurso helicoidal
 - Dada a complexidade de análise deste percurso, tipicamente utiliza-se a análise de raios meridionais.



Estrutura

- Modos de propagação
 - São soluções espaço-temporais das equações de Maxwell para cada fibra
 - Caracteriza as configurações dos campos elétricos e magnéticos que se repetem ao longo da fibra
 - Na prática, representam as diferentes possibilidades de propagação da luz pela fibra

Estrutura

- Modos de propagação
 - A aproximação geométrica é útil para visualizar a propagação da luz na fibra
 - Para se obter um modelo preciso para a propagação da luz na fibra, a teoria eletromagnética deve ser utilizada
 - A base da análise eletromagnética são as equações de Maxwell e condições fronteira adequadas ao caso da fibra ótica

Estrutura

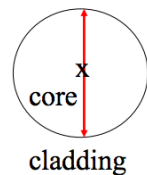
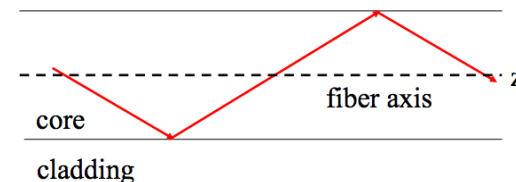
- Modos de propagação
 - Equações de Maxwell
 - E – é o campo elétrico
 - H – é o campo magnético
 - D – densidade do fluxo elétrico
 - B – densidade do fluxo magnético
 - E_z e H_z – Componentes dos campos elétrico e magnético no eixo de propagação z
 - raios meridionais

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$



Estrutura

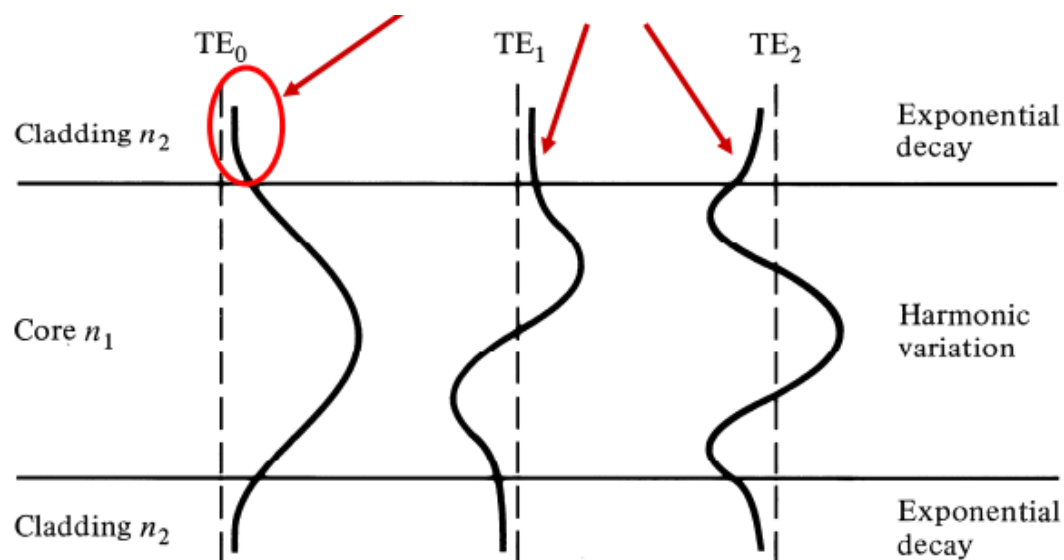
- Modos de propagação
 - Transversos elétricos (modos TE)
 - Quando $E_z = 0$
 - Transversos magnéticos (modos TM)
 - Quando $H_z = 0$
 - Modos híbridos (HE ou EH)
 - E_z ou $H_z \neq 0$

Estrutura

- Modos de propagação
 - Numa fibra o plano transversal é de duas dimensões
 - Dois números inteiros são então necessários para especificar os modos
 - Dessa forma, TE e TM são representados por modos TE_{lm} e TM_{lm}

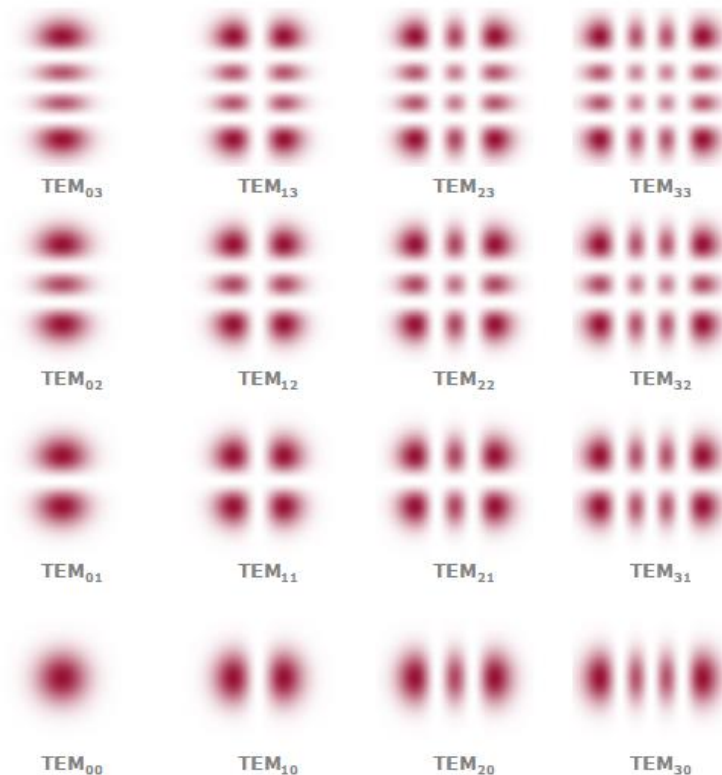
Estrutura

- Modos de propagação
 - Distribuição do campo elétrico no plano transversal
 - Vários modos no guia de onda planar



Estrutura

- Modos de propagação
 - Modos no espaço livre com ambas as componentes E e M



Estrutura

- Modos de propagação
 - Abordagem do guiamento fraco
 - É uma análise simplificada da propagação da onda para o caso concreto das fibras óticas utilizadas nas telecomunicações.
 - Estas fibras possuem tipicamente uma diferença de índice de refração relativa abaixo de 1 (1%).

$$\Delta \ll 1 \quad (\Delta = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}})/n_{\text{core}})$$

Estrutura

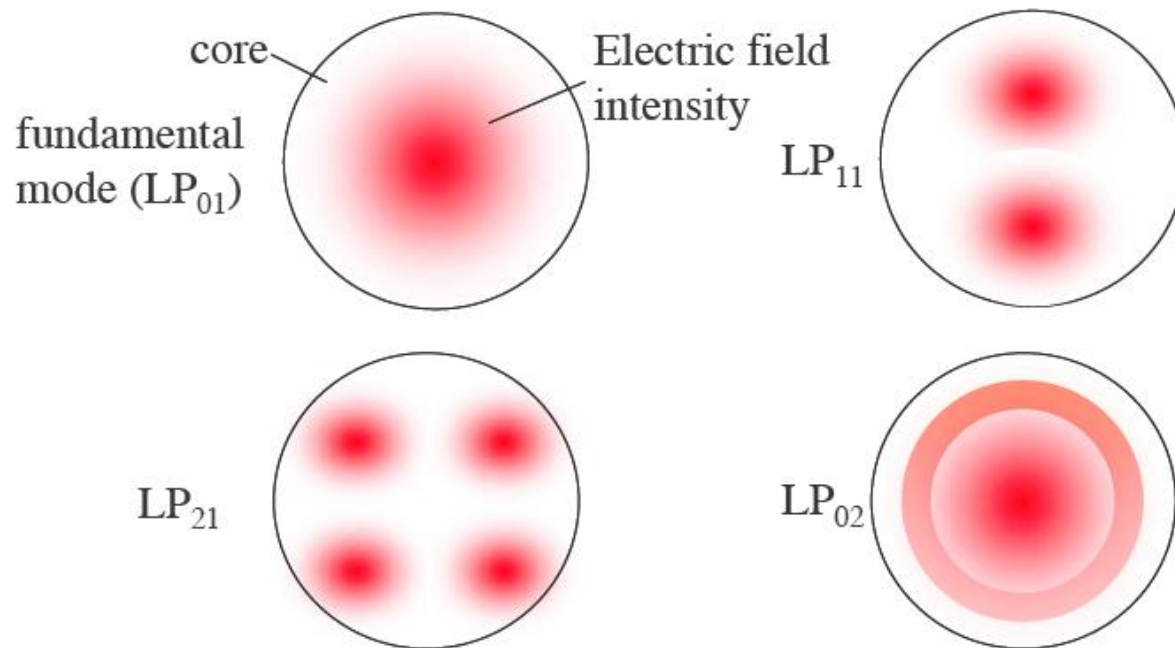
- Modos de propagação
 - Abordagem do guiamento fraco
 - A propagação é preferencialmente ao longo do eixo da fibra o que torna o campo predominantemente transverso
 - Os modos são aproximados a duas componentes linearmente polarizadas (LP)
 - E_z e H_z próximos de zero.
 - Estes modos LP_{lm} são excelentes abordagens para o estudo dos modos TE, TM, HE e EH.

Estrutura

- Modos de propagação
 - Abordagem do guiamento fraco
 - Os subscritores do modo l e m descrevem o perfil da intensidade do campo elétrico
 - Existe um valor máximo de campo de $2l$ à volta da circunferência do núcleo
 - Existe um valor máximo de campo de m ao longo da direção radial do núcleo da fibra

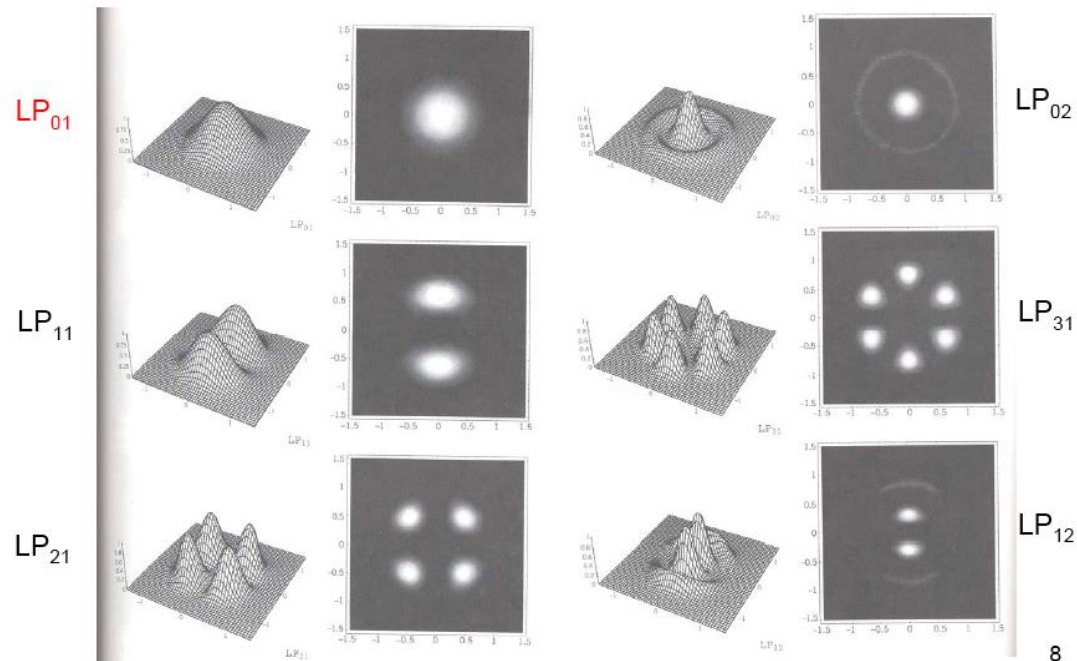
Estrutura

- Modos de propagação
 - Abordagem do guiamento fraco



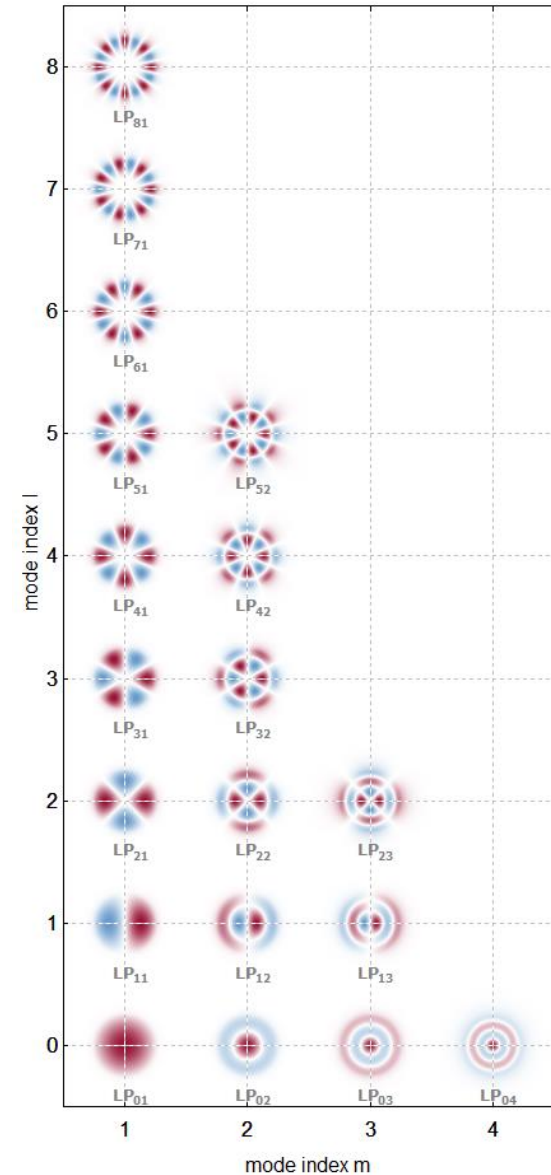
Estrutura

- Modos de propagação
 - Gráfico de intensidades dos primeiros 6 modos de LP



Estrutura

- Modos de propagação
 - Modos num guia de onda
 - LP_{01} – modo fundamental



Estrutura

- Modos de propagação
 - Frequência Normalizada (V)
 - Número de modos suportáveis numa fibra
 - É calculada a partir das características da fibra

$$V = \frac{(2 \cdot \pi \cdot a) \cdot AN}{\lambda_o}$$

- a – raio do núcleo
- AN – Abertura Numérica
- λ_o - Comprimento de onda da luz que está a ser introduzida na fibra

Estrutura

- Modos de propagação
 - Número total de modos (M)
 - Número total de modos guiados pode ser representado pela expressão

$$M \approx V^2 / 2$$

Estrutura

- Modos de propagação
 - Exemplo
 - Fibra ótica com $80 \mu m$ de diâmetro de núcleo
 - Diferença de índice relativa de 1,5%
 - Opera com uma onda de comprimento $0,85 \mu m$
 - Possui um índice de refração do núcleo de 1,48

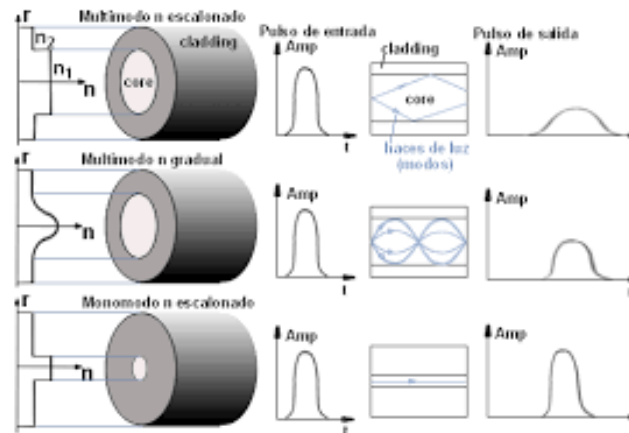
$$V = (2\pi/\lambda) a n_1 (2\Delta)^{1/2} = 75.8$$

- Significa que pode conter cerca de 3000 modos guiados

$$M \approx V^2 / 2 = 2873$$

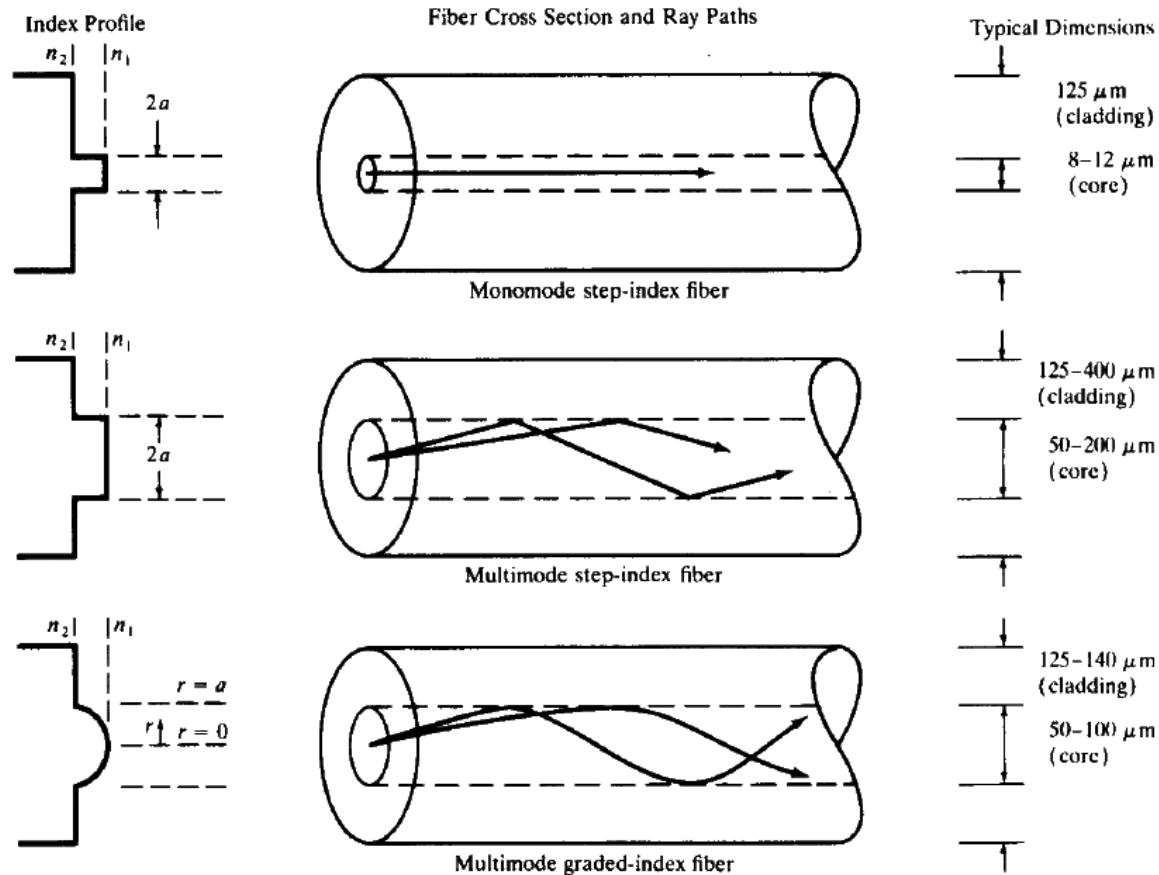
Estrutura

- Tipos de fibra ótica (modos)
 - Monomodo ou monomodal
 - Aceita apenas um modo
 - Multimodo ou multimodal
 - Aceita múltiplos modos



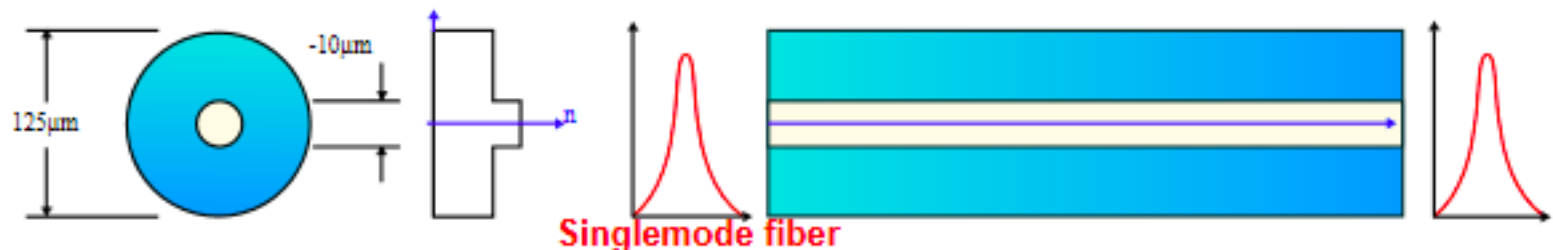
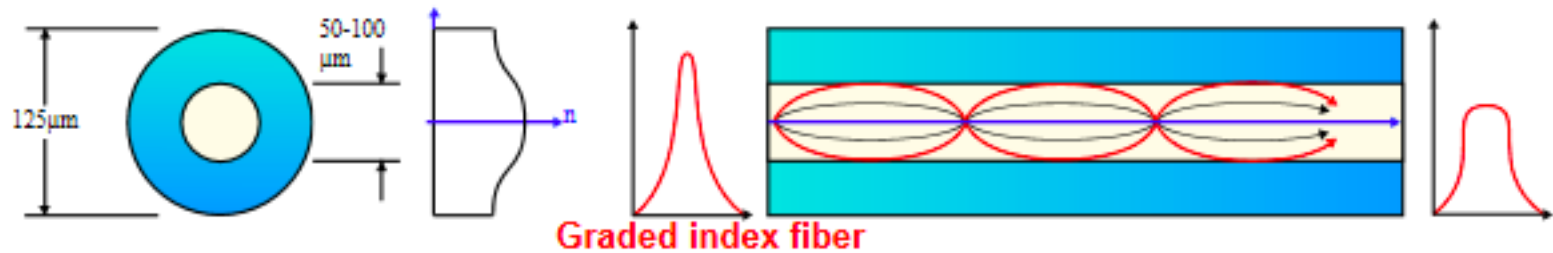
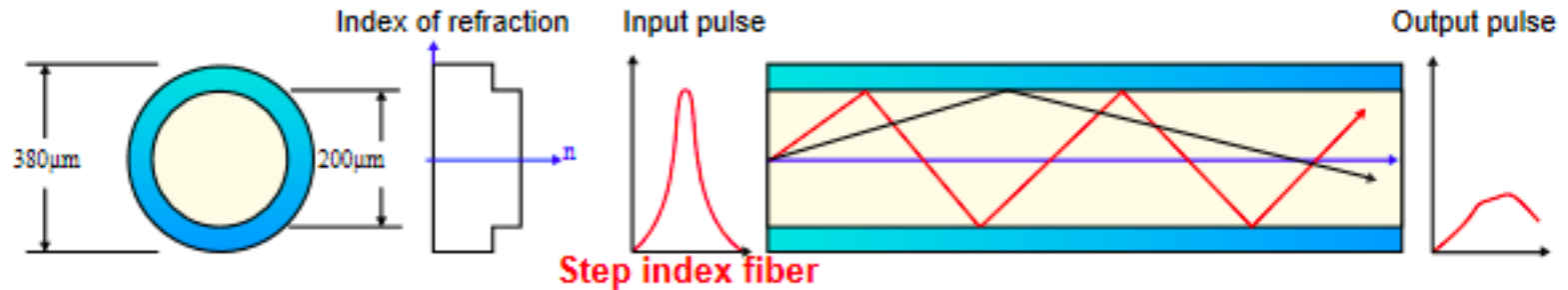
Estrutura

- Tipos de fibra ótica (modos)



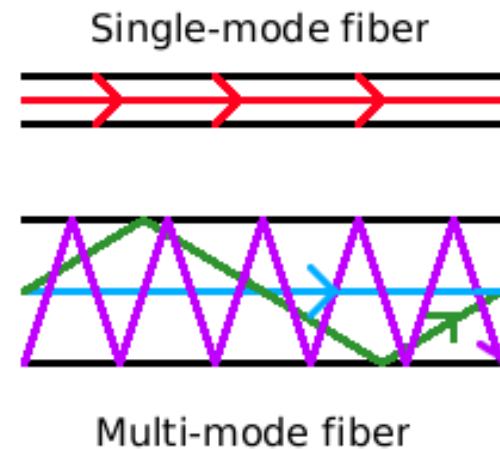
Estrutura

- Tipos de fibra ótica (modos)



Estrutura

- Fibra monomodo
 - Não há atrasos na propagação da luz
 - Não há reflexões internas
 - Não há atrasos entre modos
 - Só tem um modo
 - Núcleo de menor raio



Estrutura

- Fibra monomodo
 - Tem menores perdas
 - A luz pode ser transportada em distâncias superiores com baixa perda
 - São por isso as escolhidas para cobrir longas distâncias
 - A frequência normalizada (V) tem que ser inferior a 2,405
 - A diferença do índice de refração entre núcleo e bainha é baixa (0,2 a 1%)

Estrutura

- Fibra monomodo
 - Comprimento de onda de corte
 - É o comprimento de onda inferior possível para ser transmitido numa fibra monomodo
 - É calculado pela expressão

$$\lambda_c = 2\pi \cdot a / V_c \cdot \text{sqrt}(n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)$$

a	is the fiber core radius
n_{core}	is the index of refraction of the core
n_{clad}	is the index of refraction of the cladding
λ_c	is the cutoff wavelength
V_c	is the cutoff V number, equals 2.405

Estrutura

- Fibra monomodo
 - Comprimento de onda de corte
 - Neste tipo de fibras apenas o modo fundamental é possível
 - Exemplo
 - Fibra com índice de refração no núcleo de 1,46
 - Núcleo de raio 4,5um
 - Diferença de índice relativa de 0,25%
 - A fibra é monomodo para $\lambda > 1214 \text{ nm}$

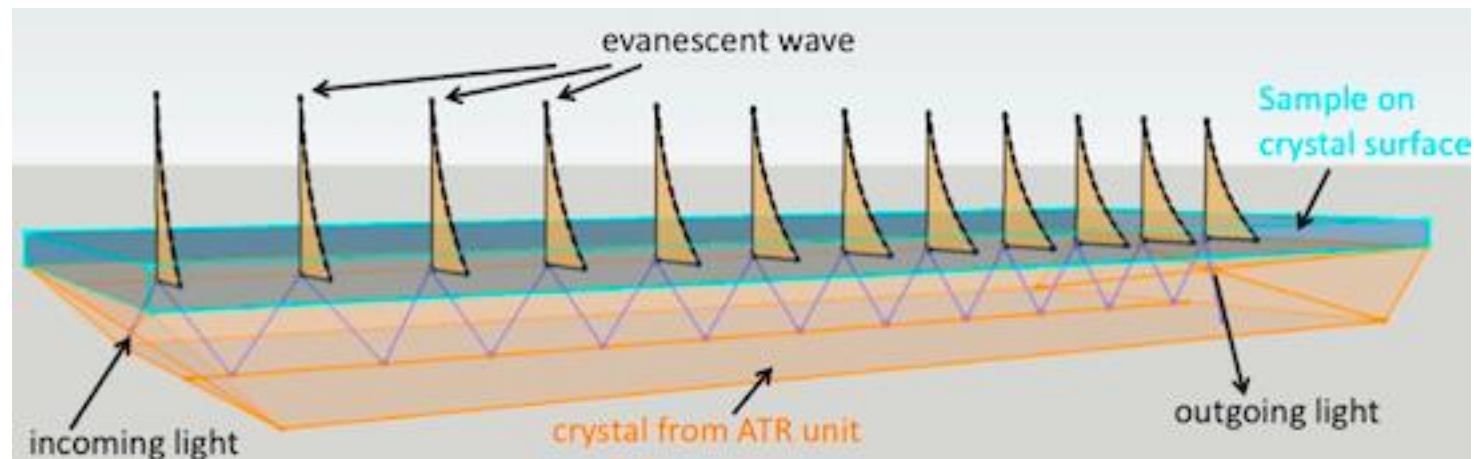
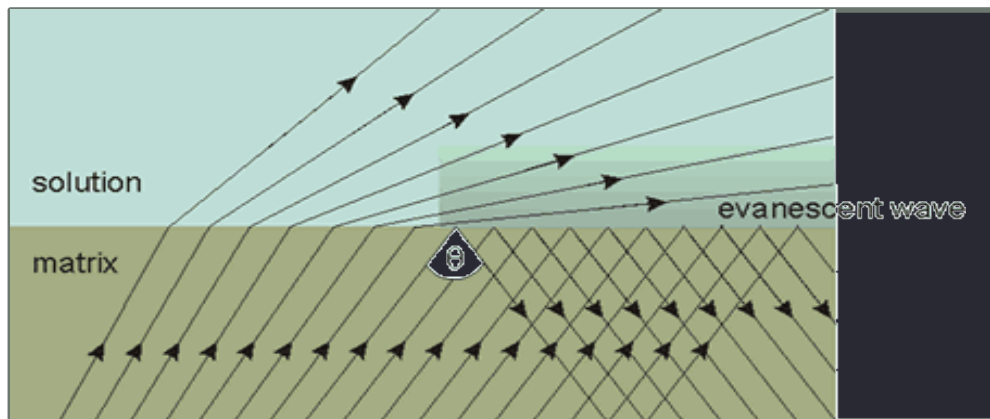
$$\lambda_c = (2\pi a n_1 / 2.405) (2\Delta)^{1/2} = 1214 \text{ nm.}$$

Estrutura

- Campos evanescentes
 - Numa situação de reflexão total interna, o campo elétrico da onda não se anula na interface
núcleo – bainha
 - Apesar de não haver propagação de raio refratado
 - A amplitude da onda deve tender para zero segundo a direção perpendicular de propagação
 - Eixo dos y
 - Se a amplitude decair exponencialmente com a distância y trata-se de uma onda evanescente

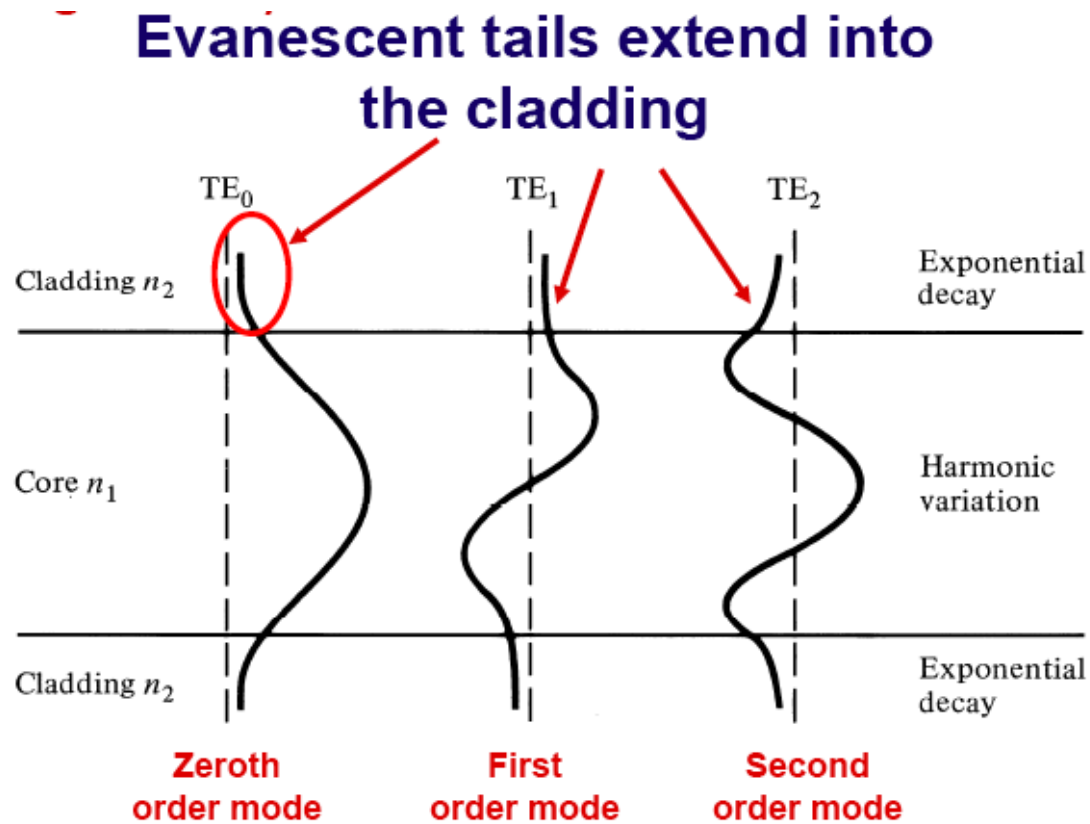
Estrutura

- Campos evanescentes



Estrutura

- Campos evanescentes



Fabricação

- Uma fibra ótica passa por dois processos de fabrico
 - Produção do vidro puro e a sua conversão num bastão ou tubo
 - Preforma
 - Uma técnica de estiramento ou de extrusão para criar a fibra a partir da preforma

Fabricação

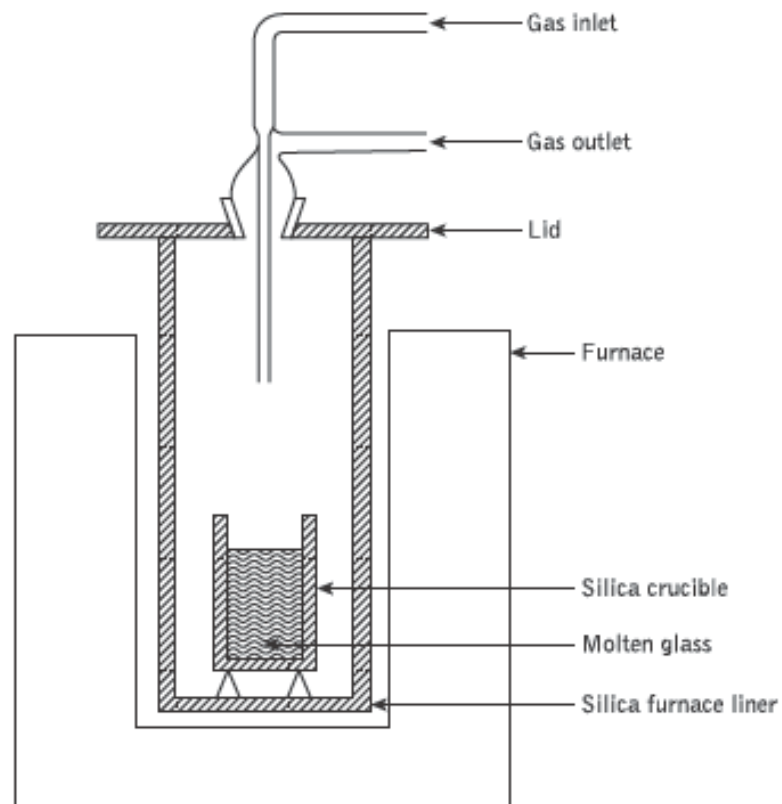
- Criação da preforma com vidro puro por dois possíveis métodos
 - Produção de vidro convencional através da fusão térmica dos componentes a partir do estado sólido
 - Deposição por vapor químico modificado
 - Ex.: MCVD - Modified Chemical Vapor Deposition
 - Processo mais utilizado atualmente para a produção de fibras óticas com baixa atenuação
 - Os produtos acrescentados obrigariam a um processo de fusão com temperaturas muito superiores às utilizados convencionalmente

Fabricação

- Técnica de fusão
 - Preparam-se os materiais ultra-puros em pó
 - Óxidos e carbonetos
 - Utiliza-se de seguida um forno entre os 900 e os 1300°C para a fusão dos materiais
 - O material é derretido dentro de um cadinho
 - Recipiente que suporta as altas temperaturas sem se fundir

Fabricação

- Técnica de fusão

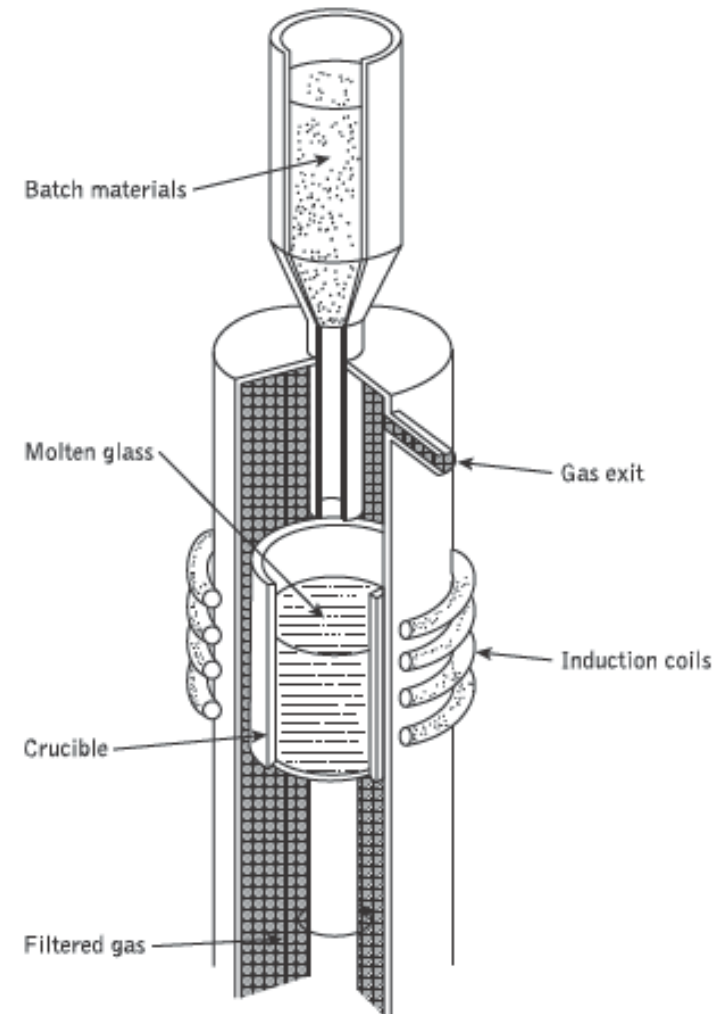


Fabricação

- Técnica de fusão
 - Se o cadinho utilizado for de platina, com o uso irá começar a contaminar o vidro
 - Se for de sílica criam-se dissoluções que provocam falta de homogeneidade no vidro
 - Especialmente a altas temperaturas
 - Nestes casos utilizam-se fornalhas por indução com rádio-frequência em torno dos 5 MHz

Fabricação

- Técnica de fusão
 - Fusão por indução
 - Arrefecimento a gás ou fluxo de água
 - Os materiais são pré-aquecidos a 1000°C
 - Não se verificam impurezas do cadinho nos materiais fundidos

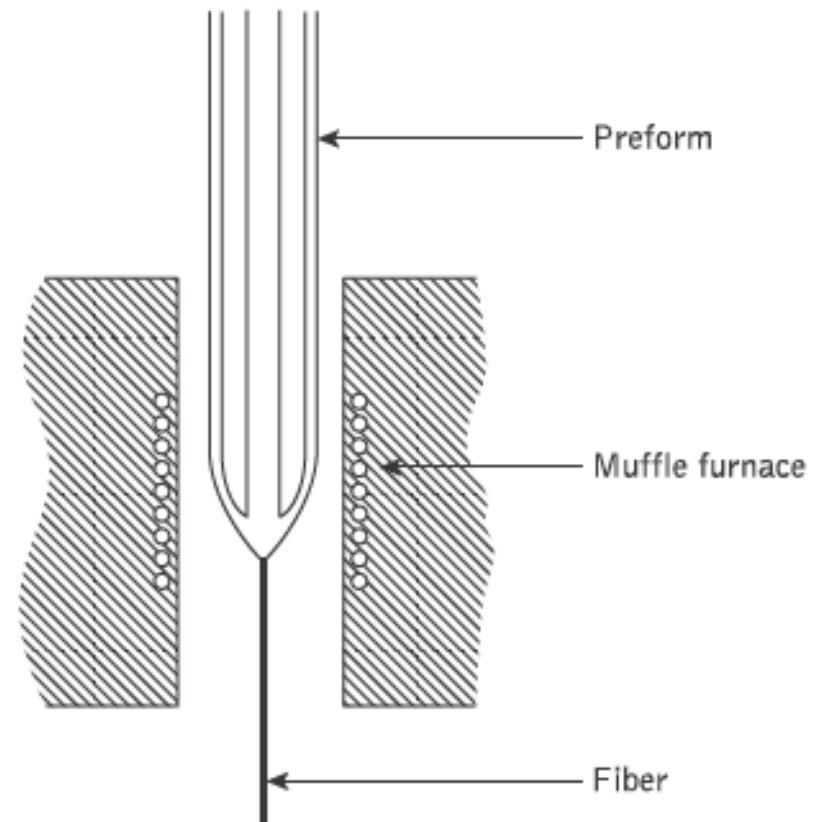


Fabricação

- Técnica de fusão - estiramento da fibra
 - Após a criação da preforma (bastão ou tubo de vidro), cria-se a fibra por fusão e consecutivo estiramento
 - Para esta fusão utiliza-se um processo de duplo cadinho
 - O núcleo e bainha fundem-se vindos de duas preformas diferentes
 - Utilizam-se dois cadinhos concêntricos de platina

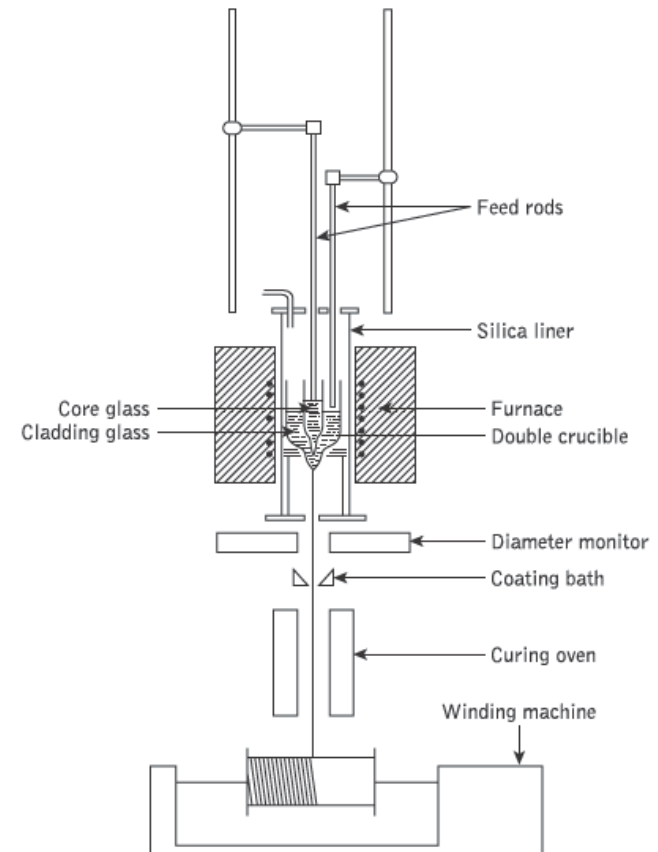
Fabricação

- Técnica de fusão - estiramento da fibra
 - Estiramento por fusão e gravidade



Fabricação

- Técnica de fusão - estiramento da fibra
 - Estiramento por duplo cadinho
 - As preformas do núcleo e bainha são derretidos e o estiramento é feito por gravidade

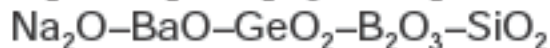
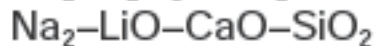
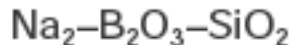


Fabricação

- Técnica de fusão - estiramento da fibra
 - Materiais no sistema de duplo cadinho

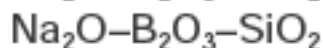
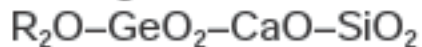
Step index

Core glass

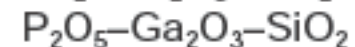
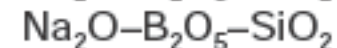
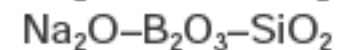
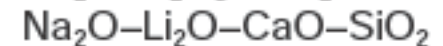


Graded index

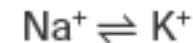
Base glass



Cladding glass



Diffusion mechanism

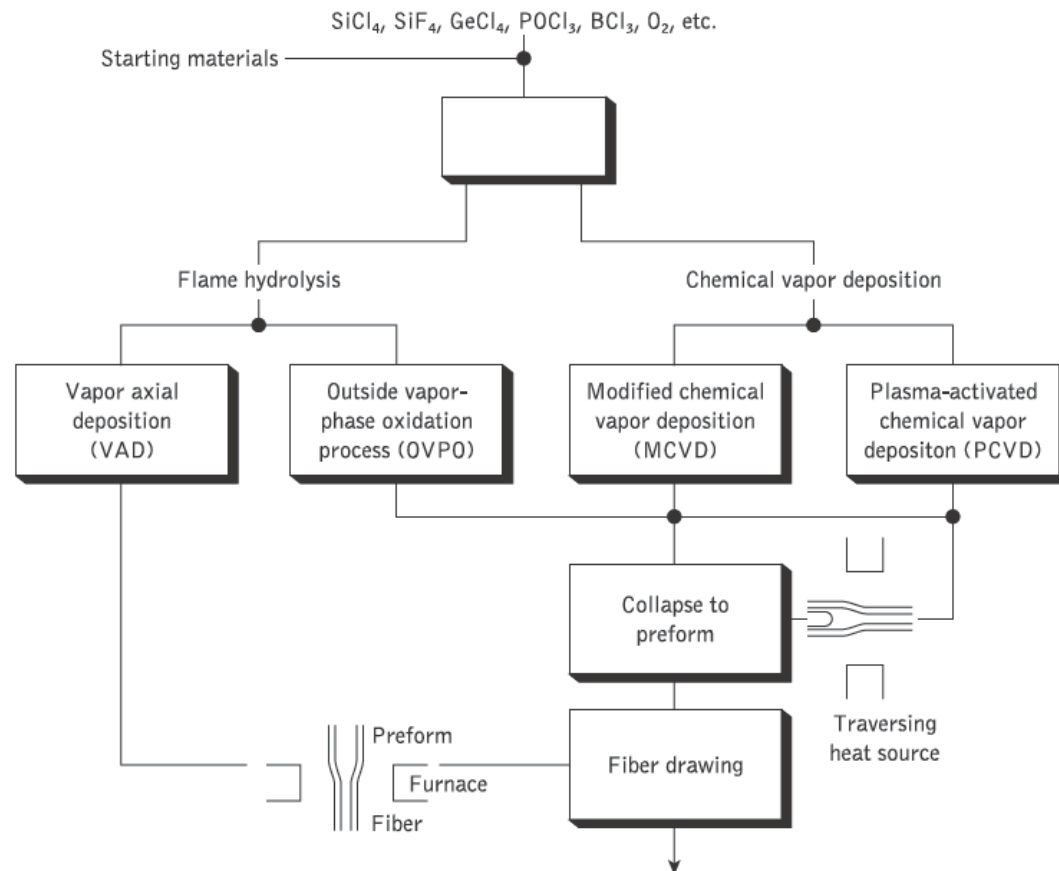


Na_2O diffusion

CaO , BaO , diffusion

Fabricação

- Técnicas por deposição de vapor

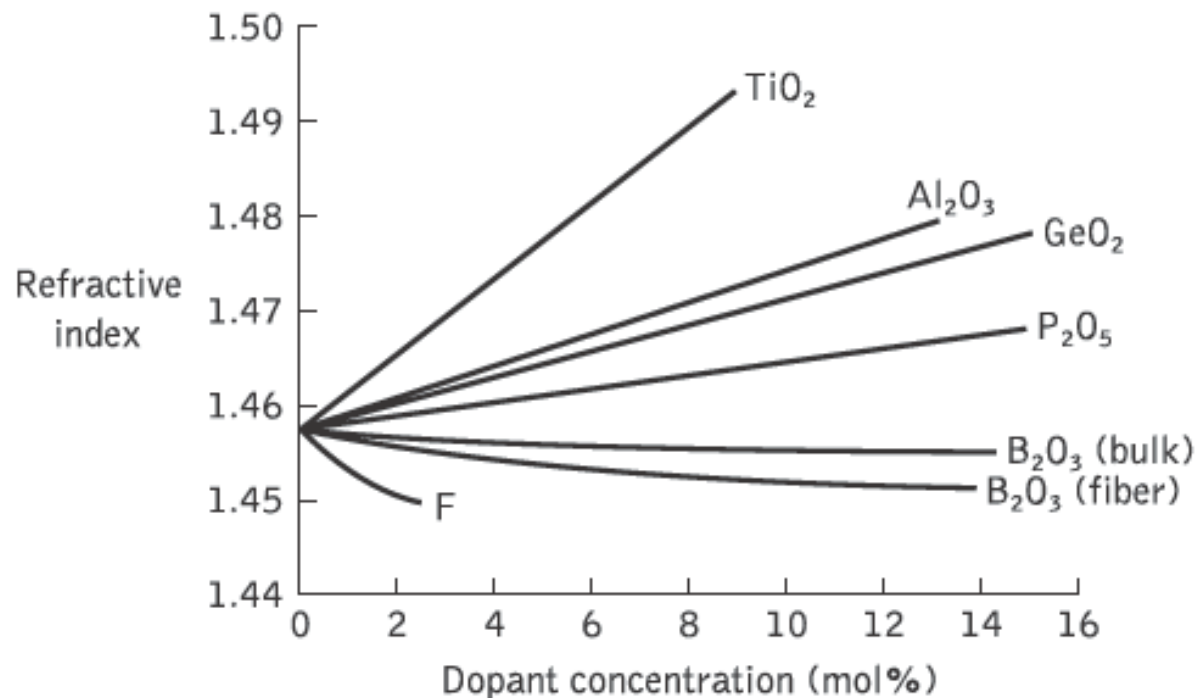


Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado
 - MCVD - Modified Chemical Vapor Deposition
 - Utiliza químicos como compostos voláteis na sua base de construção
 - Tipicamente alguns cloretos e floretos
 - O índice de refração é modificado através da formação de óxidos dopantes desses compostos
 - Silício, Germânio e Boro

Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado

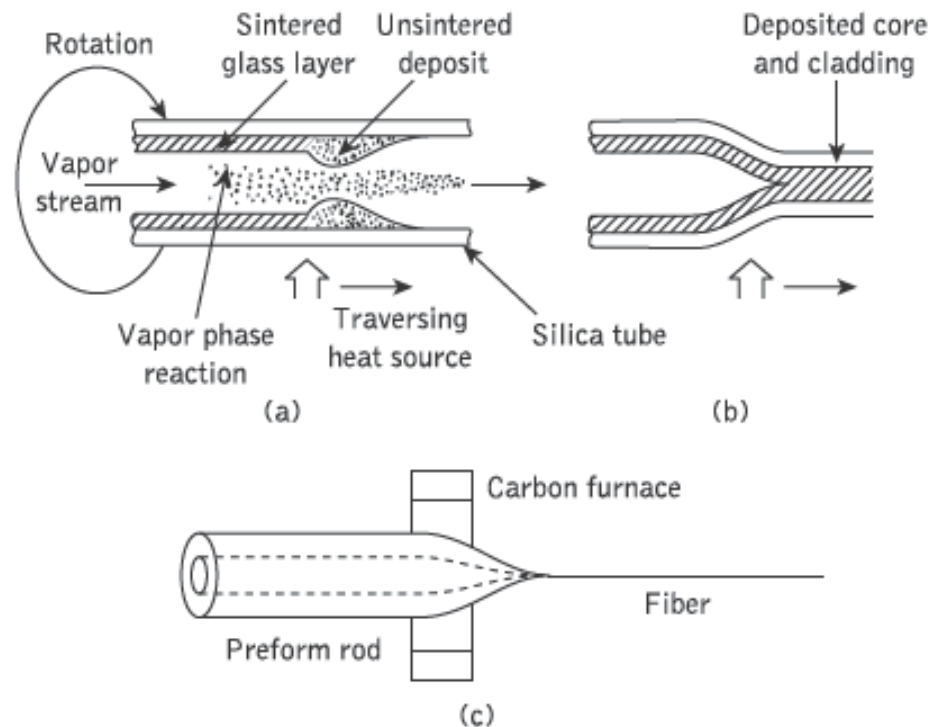


Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado
 - Utiliza um torno mecânico para rodar um tubo de quartzo ou de sílica sintética
 - Age como interface
 - Os vapores gasosos dos cloretos e outros químicos são conduzidos para o interior
 - Com a rotação do tubo um maçarico gera calor no lado exterior do tubo

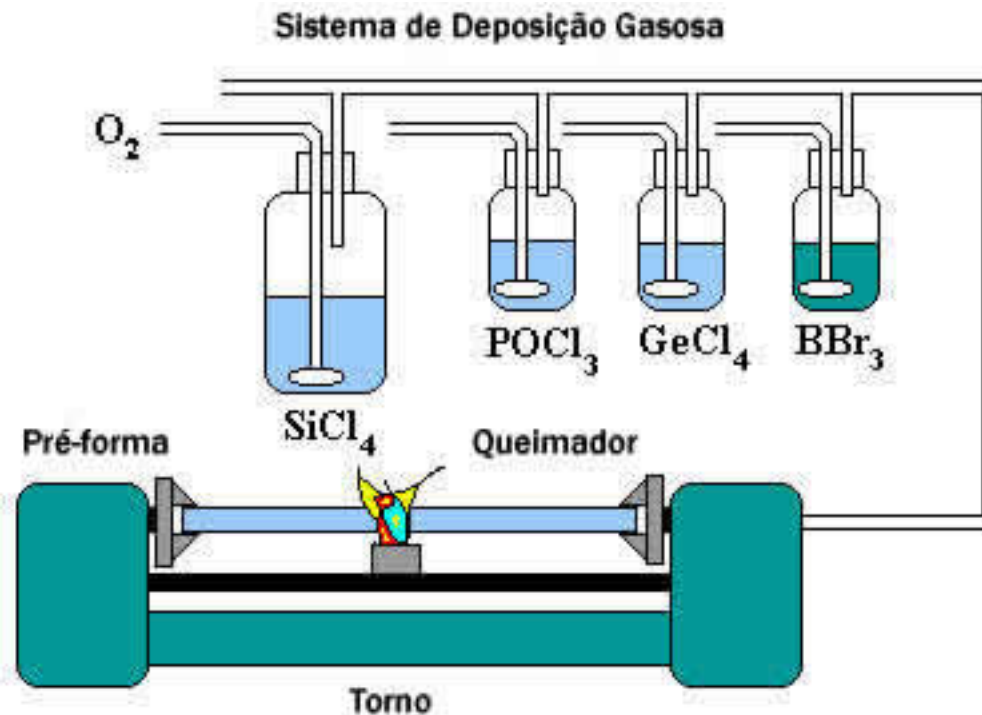
Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado



Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado

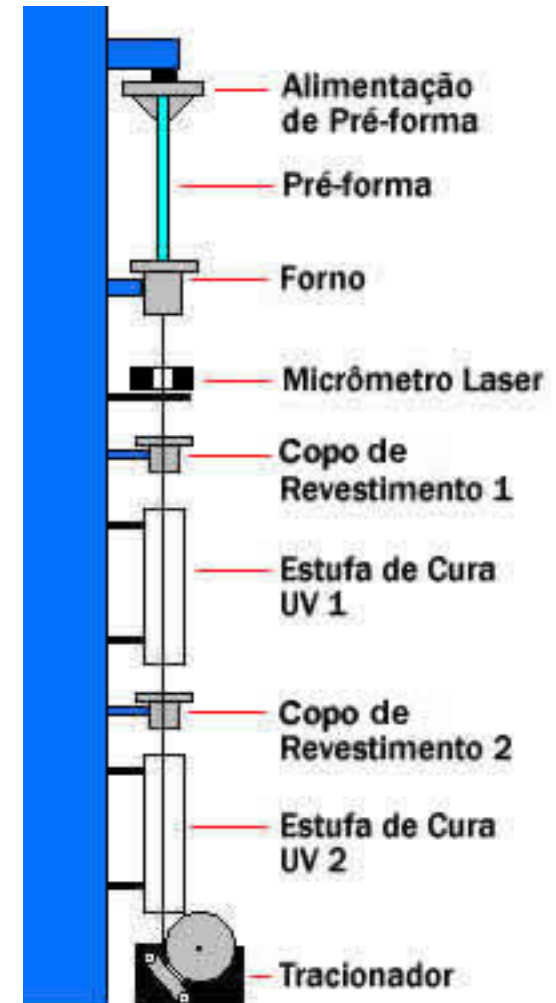


Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado
 - O calor do maçarico produz dois efeitos
 - O Silício e o Germânio reagem com o oxigénio e formam-se os seus óxidos
 - Estes óxidos depositam-se no interior do tubo e fundem para formar o vidro
 - A rotação do torno produz uma distribuição uniforme no tubo

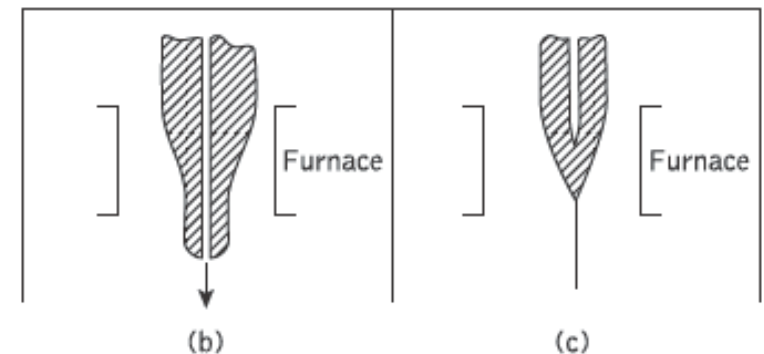
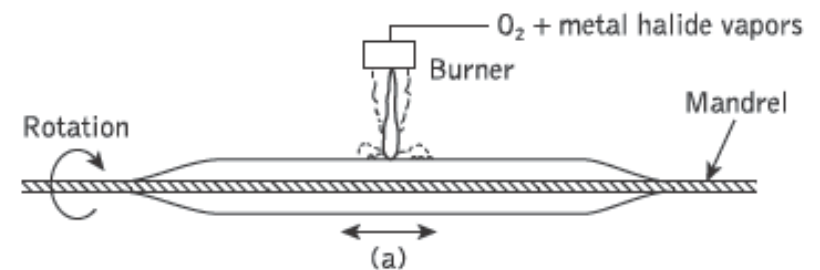
Fabricação

- Técnica de deposição por vapor químico modificado
 - Estiramento vertical por gravidade



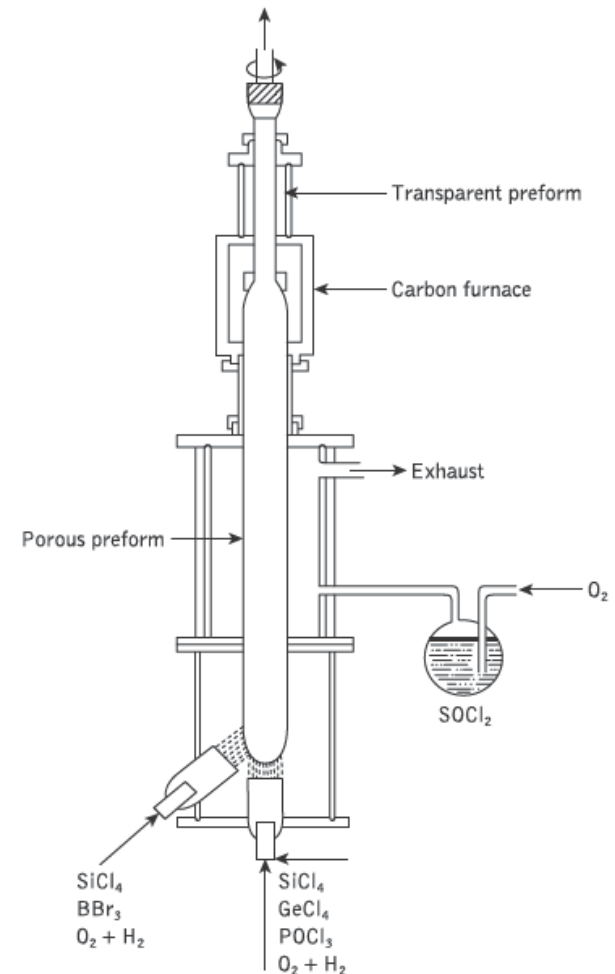
Fabricação

- Técnica OVPO
 - Outside Vapor-Phase Oxidation
 - A deposição dos óxidos é feita de uma forma externa ao tubo



Fabricação

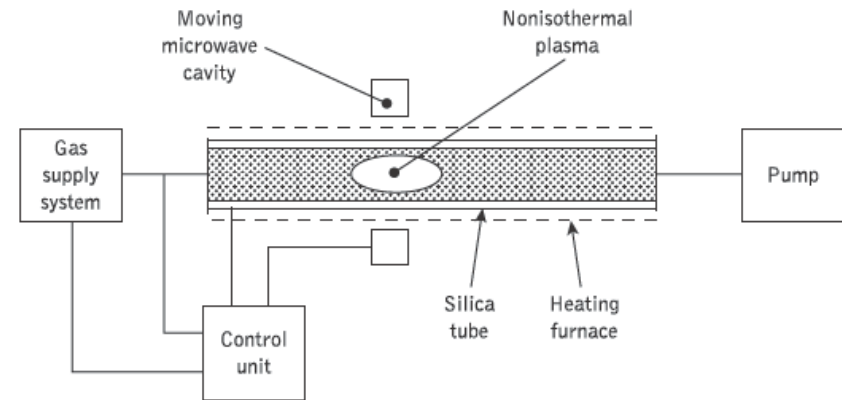
- Técnica VAD
 - Vapor Axial Deposition
 - Método contínuo de produção
 - Os materiais são injetados pelos queimadores e adicionados à preforma
 - A saída da fibra é efetuada por cima (puxada)



Fabricação

- Técnica PCVD

- Plasma-activated Chemical Vapor Deposition
- Uma variação do MCVD
- Um plasma não-isotérmico é mantido em baixa pressão numa cavidade de microondas (2,45 GHz) em torno do tubo
- Reagentes voláteis são acrescentados no tubo que reagem de uma forma heterogénea na cavidade
- A zona de reação é movida para a frente e para trás no tubo para permitir uma deposição simétrica e circular sem necessidade de rotação do tubo



Fabricação

- Sumário das técnicas de deposição por vapor

Reaction type	
Flame hydrolysis	OVPO, VAD
High-temperature oxidation	MCVD
Low-temperature oxidation	PCVD
Depositional direction	
Outside layer deposition	OVPO
Inside layer deposition	MCVD, PCVD
Axial layer deposition	VAD
Refractive index profile formation	
Layer approximation	OVPO, MCVD, PCVD
Simultaneous formation	VAD
Process	
Batch	OVPO, MCVD, PCVD
Continuous	VAD