

**Relatório Final
da disciplina de Instrumentação para o Ensino**

**- F809-
coordenada pelo prof. Lunazzi**

1º semestre de 2003

Aluno: Felipe Modenese RA:001678

Orientador: Prof. Carlos Lenz Cesar

**relativo ao projeto:
“ Fibras Ópticas: Princípios, Aplicações e Fabricação.”**

A tecnologia nova e revolucionária de comunicação por meio de ondas luminosas está transformando as redes de comunicação do mundo.

Quantidades enormes de informação - sinais de telefonia, vídeo, dados digitais - podem ser rápida e eficientemente transmitidas de um lugar para outro através de uma rede de fibras ópticas. Esses condutores de vidro, da espessura de um fio de cabelo, conduzem informação através de longas distâncias, na forma de pulsos de luz. Pretende-se, durante uma aula, focalizar a importância da comunicação através da luz, seus princípios básicos de funcionamento, e algumas formas de fabricação destes condutores, direcionando-nos aos alunos de Ensino médio e graduandos em geral.

Realizou-se a filmagem experimentos envolvendo os temas centrais deste projeto, como forma de ilustração.





Introdução Histórica

O campo das fibras ópticas preocupa-se com o guiamento de luz por múltiplas reflexões ao longo de canais de vidro ou plástico.

O processo de reflexão que é empregado invariavelmente neste campo é o da reflexão interna total em interfaces dielétricas.

Mas a propagação de luz em barras transparentes, por meio de múltiplas reflexões internas totais, é conhecida desde muito tempo. Os antigos artesãos, principalmente os venezianos, utilizaram-na na fabricação de peças para decoração.

E o procedimento de esticar o vidro esquentado em forma de fibras delgadíssimas e barras é conhecido desde tempos imemoráveis. Lembremos dos colares, vasilhas, artigos multicores dos egípcios. Tal procedimento foi utilizado também na fabrica de vidros de Ust-Ruditsky em meados de século XVIII, construída e dirigida por M.V. Lomonósov (nome moderno da cidade russa), fabricante dos brilhantes mosaicos de barras estiradas de seção poligonal, que podem ser admirados ainda hoje.

Dessa forma, a óptica de fibras não se desenvolveu do nada, pelo menos quanto aos procedimentos tecnológicos de estiramento das fibras.

Na história do desenvolvimento da técnica de condução da luz, da fibra óptica, podem-se observar várias etapas e tendências, das quais, as principais podem ser assim resumidas:

1) Guias de luz líquidos

A propagação da luz por meio de reflexões internas totais foi demonstrada primeiramente em 1854 pelo inglês John Tyndall, ao permitir que água jorrasse de um tubo e luz alcançasse a superfície limite da água e ar e seja totalmente refletida, fazendo com a luz fosse “levada” pelo liquido descendente .



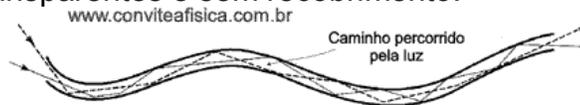
2) Guias de luz ociosos

Aparatos a base de guias de luz ociosos foram construídos por V.N. Chikolev, a partir de 1870.

3) Guias de luz sólidos e transparentes

Em 1905, R. Wood escreve que “é possível levar luz de um ponto a outro sem grandes perdas de energia, utilizando a reflexão interna nas paredes de uma barra de vidro, ou melhor, de quartzo fundido”.

Assim, deu-se início ao desenvolvimento dos guias de luz de um fio, ou fibra, transparentes e sem recobrimento.



4) Nascimento da fibra óptica

Guias de luz com várias fibras colocadas regularmente, condutoras de luz, transparentes e cada qual com sua capa isolante, seu revestimento, começaram a ser desenvolvidas desde a década de 60.

Uma aplicação prática do fenômeno da reflexão interna total em interfaces dielétricas foi proposta pelo inglês Baird e pelo norte-americano Hansell. Em 1927, eles pediram a patente para dispositivos de transferência de imagens que utilizavam fibras de sílica. Mas, já que fibras sem revestimento eram usadas, a eficiência era pouca e essas idéias ficaram dormentes até o começo da década de 50, quando as publicações simultâneas de van Hill, Hopkins e Kapany, tratando da transmissão de imagens através de feixes de fibras de vidro delgadas e protegidas com um revestimento sólido de menor índice de refração, causaram o ressurgimento do interesse por este tema, o que é mantido até hoje.

É importante ressaltar o papel da paralela invenção do laser nesta época, pois tornou acessível pela primeira vez uma fonte coerente de luz e encorajou os pesquisadores a encarar o espectro das frequências ópticas como uma extensão do espectro de rádio e microondas. Emergiu daí um aumento dramático dos estudos dos componentes ópticos: fontes, moduladores, lentes, espelhos, guias de onda, etc. Via-se, neste desenvolvimento, a base do sistema de comunicação definitivo, pois dispunha de uma frequência da ordem de 10^{15} Hz, o que forneceria uma capacidade de comunicação antes nem sonhada.

No começo da década de 60, a maioria do desenvolvimento básico estava completo, e a maior ênfase, desde então, tem sido dada às aplicações desta tecnologia.

Sendo que **os trunfos para este desenvolvimento** foram:

a) a introdução do revestimento sólido por van Heel.

b) o desenvolvimento das fibras múltiplas (envolvendo a produção de fibras muito finas agrupadas numa unidade mecânica com técnicas similares às usadas nos mosaicos de vidro) por Kapany.

c) a introdução de um segundo revestimento absorvedor pela Companhia Óptica Americana.

d) o desenvolvimento do laser de fibra óptica por Snitzer.

e) o desenvolvimento da fibra de índice graduado pela Companhia de Vidro Nippon do Japão.

A tecnologia das fibras ópticas vem sendo utilizada em dois ramos amplos: o transporte de luz e o transporte de informação visual. Usam tipos de feixes ópticos diferentes, coerentes e incoerentes, cujos detalhes não serão discutidos neste trabalho.

Vemos que, embora o princípio básico de reflexão interna total que suporta o campo das fibras ópticas foi demonstrado a 150 anos, o desenvolvimento principal começou a 50 anos e a exploração comercial desta tecnologia tem apenas 40 anos, tendo já uma gama de aplicações inegavelmente válida e ampla.

As fibras ópticas e as comunicações

Um sistema básico de comunicações é composto de um transmissor, ou fonte de sinal, onde a informação é codificada, um meio de transmissão, e um receptor, que decodifica e reconstitui a informação original.

A maioria dos sistemas de comunicação modernos é “digital”, onde a informação é codificada em dígitos binários, possibilitando uma excelente qualidade de transmissão.

A taxa de transmissão de informação, definida como o número de bits transmitidos por unidade de tempo, é diretamente proporcional à frequência do sinal. De modo que, um sistema de comunicação por ondas luminosas - frequência na faixa de 10^{14} , 10^{15} Hz - pode transmitir muito mais informações digitais do que um sistema de comunicação convencional - frequências de rádio $\sim 10^6$ Hz e de microondas $\sim 10^9$ Hz.

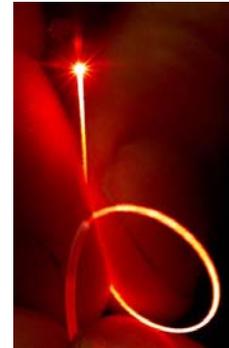
Um sistema simples de comunicações pode ser assim definido: sinais de telefonia, de vídeo ou dados digitais de um computador são codificados numa seqüência binária de zeros e uns. Todos estes sinais são misturados numa unidade multiplexadora, num único pacote de taxa de dados elevada, podendo concatenar milhares de canais dependendo da taxa de dados do sistema .

Cada “um” corresponde a um pulso elétrico e cada “zero” à ausência de pulso. Esses pulsos são usados para ligar e desligar, muito rapidamente, uma fonte de luz – um laser ou um diodo emissor de luz (LED) – como um interruptor. E, assim, **toda a informação codificada em dígitos binários transforma-se numa seqüência regulada de flashes de luz para a transmissão.**

E aí, o meio de transmissão, em si, torna-se a parte seguinte e importante do sistema de comunicação por ondas luminosas. Ao invés de transmitir esse flashes de luz pela atmosfera, o que provocaria grande confusão e interferências no sistema de comunicações, **fibras de vidro, guidoras da luz, conduzem os sinais à distância, do transmissor ao receptor**, onde cada pulso de luz é detectado por um fotodetector. Neste aparato, **cada pulso óptico que ai chega, é transformado num pulso de corrente, novamente.**

O receptor também tem um demultiplexador, que separa os sinais, reconvertendo-os em sinais de telefonia, vídeo e dados de computador, em informação que nos é acessível.

Nosso foco aqui é o meio transmissor, a fibra óptica e examinemos **como** este sistema é capaz de transmitir informação sob a forma de pulsos de luz, ou seja, examinemos o que se segue.



A Teoria Básica da Fibra Óptica

A unidade fundamental em qualquer Sistema de fibras ópticas é a fibra óptica individual, cujas propriedades determinam a performance de todo o sistema. Focalizamos, neste trabalho, sobre a performance teórica deste componente individual.

Uma fibra óptica é basicamente um aparato de guiamento com forma cilíndrica. Se um feixe de energia eletromagnética incide numa das faces circulares deste cilindro, uma porção significativa desta energia pode ser guiada pelo sistema e emergir na outra face.

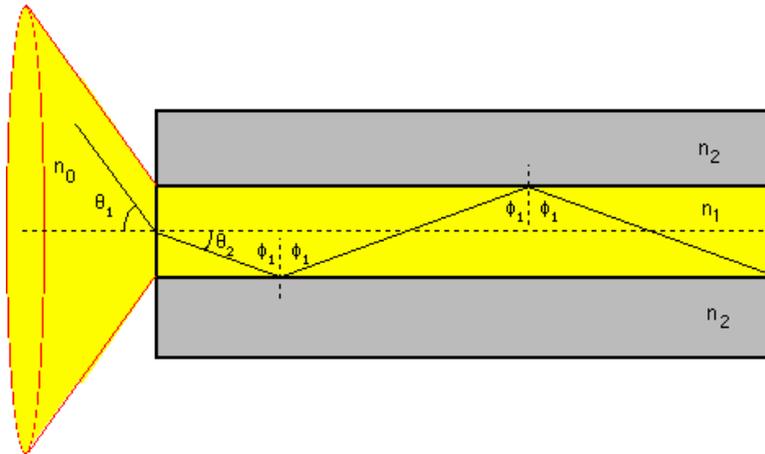
A fonte de luz, um laser ou um LED, é colocada próximo ao núcleo da fibra e emite um cone de luz que é acoplado ao núcleo da fibra e pode ser guiado.

Este guiamento é atingido através de múltiplas reflexões na parede do cilindro, e, como o pulso sofre um grande numero de reflexões, **o ângulos de incidência deve ser tal que permita a reflexão interna total**, permitindo alta refletividade e menores perdas na intensidade do sinal de entrada.

Assim, uma fibra óptica, pode ser definida como um cilindro de material dielétrico, com um **núcleo de um tipo de vidro com índice de refração n_1 , envolto por uma casca de vidro ou plástico, com índice de refração menor, n_2 .** A fibra está imersa num terceiro material dielétrico, de índice de refração n_0 , geralmente o ar, $n_0=1$.

(Uma fibra feita de vidro em geral também possui um revestimento plástico para proteger o vidro contra o desgaste mecânico e outros efeitos ambientais).

Tipicamente, o diâmetro do núcleo (~50 μm tipicamente) é dezenas ou centenas de vezes o comprimento de luz que é propagada (0,75 - 1,5 μm tipicamente), de modo que o fenômeno de propagação pode ser estudado com a Óptica Geométrica:



Raios da fonte de Luz que atingem a superfície reta do cilindro, num ângulo θ_1 , são refratados para dentro da fibra, com um ângulo θ_2 , por causa da diferença dos índices do vidro ($n_n \sim 1,5$, tipicamente) e do ar. Estes raios atingem a interface núcleo-casca num ângulo ϕ_1 e sofrem reflexão interna total aí se este ângulo for maior do que θ_{cr} , para o qual os raios saem rasantes, $\theta_{casca}=90^\circ$, à superfície de contato do meio de maior índice para o de menor ($n_1 > n_2$ como inicialmente proposto).

Lei de Snell

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\phi_1 > \theta_{cr} = \sin^{-1}(n_2 / n_1) \text{ (Condição para Reflexão Interna Total)}$$

Assim, também para a superfície de entrada do feixe na fibra:

$$n_0 \sin(\theta_1) = n_1 \sin(\theta_2) = n_1 \sin(90 - \phi_1) = n_1 \cos(\phi_1) =$$

$$= n_1 [1 - \sin^2(\phi_1)]^{1/2} < n_1 [1 - \sin^2(\theta_{cr})]^{1/2}$$

$$\Rightarrow n_0 \sin(\theta_1) < (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

O ângulo máximo de incidência do raio na fibra (imersa em ar), que define o cone de saída da informação, importante para a coleta de sinal, e o ângulo máximo que permite o acoplamento da luz na fibra, obedece:

$$\sin(\theta_{max}) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = [(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)]^{1/2}$$

Obs: O processo de propagação do laser de argônio por um cilindro de quartzo de 0,5 cm de diâmetro foi filmado. Variou-se o ângulo de incidência do feixe, girando uma cuba com água e com rodamina dissolvida, em que estava imerso o cilindro guia. O número de reflexões aumenta com o ângulo de incidência e pode ser observado devido a propriedades luminescentes do vidro usado até que não há mais propagação pois o ângulo de incidência é tal que não permite mais reflexão interna total e o laser não é mais guiado.

A quantidade $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ é característica da fibra e é chamada Abertura Numérica da fibra, uma medida do poder coletor do sistema, e pode ser aproximada por $\sqrt{2n\Delta n}$, pois os índices da casca e do núcleo são próximos, valendo n , e sua diferença, Δn . De modo que o ângulo do cone de coleta e de saída é tal que:

$$\sin(\theta_{\max}) = \sqrt{2n\Delta n}$$

Quanto maior a diferença de índices de refração núcleo - casca, maior o ângulo de abertura do cone e melhor a capacidade de captação da fibra. Notemos que **o ângulo de aceitação máxima do sistema é definido somente pelos índices de refração da fibra e independente de suas dimensões físicas.**

Duas consequências importantes daí emergem:

- o poder coletor pode ser feito grande, inclusive atingir a unidade.
- a seção transversal da fibra pode ser feita pequena sem interferir na capacidade de coleta do sistema, inclusive podendo torná-la flexível.

Pode-se obter comercialmente fibras com uma grande variedade de aberturas numéricas que vão desde 0,2 a 1,0 ($\theta_{\max}=90^\circ$, e a fibra propaga totalmente a luz que atinge sua entrada).

Nasce daí a necessidade de compreendermos o processo de fabricação deste sistema para que possa manter a função de transmissão e otimizá-lo. Mas antes, comenta-se os tipos de fibras fabricadas e suas propriedades.

Tipos de fibras ópticas

Fibra Multimodo

A fibra simples descrita acima é muito usada **para guiar luz a curtas distâncias.**

Muitos ângulos de luz, ou seja, um pulso de luz é guiado e o índice de refração da fibra é do **tipo degrau** porque o núcleo tem índice de refração constante e maior do que o da casca.

Vários feixes ou ângulos de luz são guiados no núcleo com a mesma velocidade, mas, como incidem com ângulos diferentes, percorrem distâncias diferentes. O feixe que se propaga pelo centro percorre uma distância menor do que aqueles que sofrem múltiplas reflexões internas totais.

Dessa forma, **o pulso estreito de luz que foi inicialmente acoplado à fibra fica consideravelmente alargado** após percorrer quilômetros ao longo da fibra.

Esse efeito é o que condiciona a capacidade da fibra tanto quanto a distância a ser vencida como quanto a quantidade de informação a ser transmitida pois limita o espaçamento entre os pulsos na entrada para que possam ser detectados na saída sem sobreposição.

Para superar estes limites, dois outros tipos de fibras são usados em sistemas de comunicação por ondas luminosas:

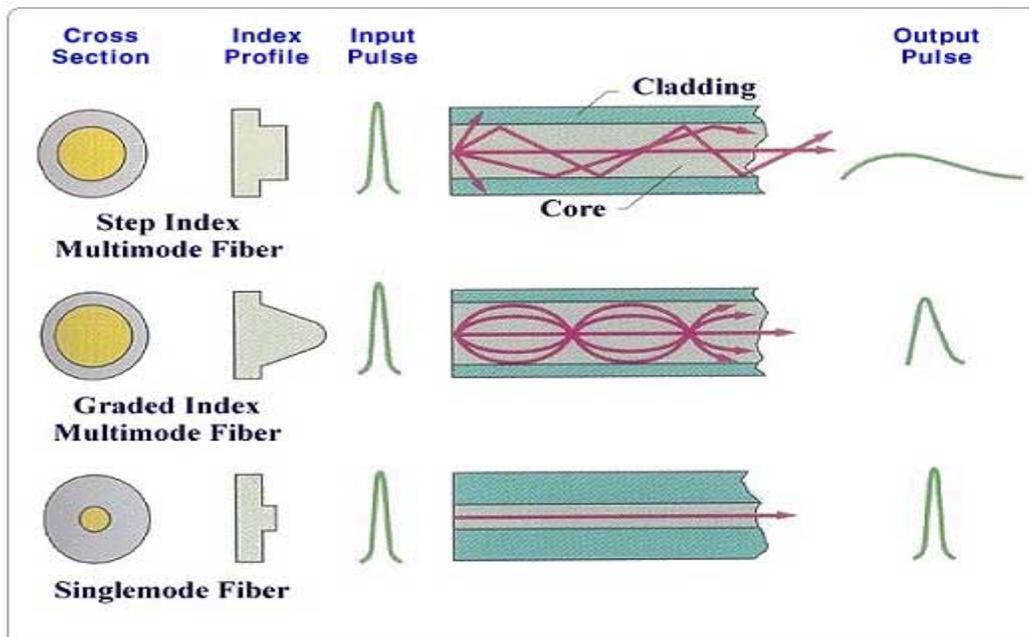
Fibra multimodal de Índice gradual

O núcleo da fibra tem um índice de refração que varia gradualmente.

Como um feixe que percorre a fibra em zigue-zague passa maior parte do tempo na porção de índice de refração mais baixo, ele é transmitido com maior velocidade. Assim, quanto maior o caminho a ser percorrido pelo feixe, ou seja, quanto maior sua inclinação em relação ao eixo do cilindro, maior é a velocidade média com que esse feixe percorre a fita de modo que não mantém um atraso muito grande em relação ao feixe paralelo ao eixo de fibra, ocasionando um menor alargamento do pulso.

Fibra Monomodo

O alargamento do pulso devido a diferentes ângulos da luz que está sendo guiada é completamente eliminado porque o feixe de luz se propaga ao longo do eixo da fibra já que se mantém **pequenas diferenças entre os índices de refração nucle-casca**, embora diminuindo a capacidade de captação, e as dimensões do núcleo também são pequenas.



A minimização do alargamento do pulso de luz enquanto ele se propaga na fibra é de fundamental importância na determinação da taxa máxima de transmissão da informação bem como da distância máxima alcançada pela transmissão.

Outro fator importante que caracteriza a fibra é sua **atenuação óptica**, ou seja a imperfeição na condução da luz intrínseca ao material condutor. A intensidade da luz que se propaga numa fibra é diminuída por **absorção** (transferência para o material de parte da intensidade da luz a ser transmitida) ou **espalhamento** (parte da luz é difundida ou defletida em varias direções, para fora do núcleo) determinando até onde o sinal pode ser transmitido com intensidade suficiente para ser detectado pelo fotodetector no receptor. Essa atenuação é determinada pelo **grau de pureza do material do ducto condutor**.

Por todas as variáveis citadas, nasce a necessidade de compreendermos o processo de fabricação deste sistema de comunicação por luz para que se possa manter e otimizar sua função de transmissão de informação.

Processo de fabricação da Fibra Óptica

A maioria das fibras ópticas de baixa perda é feita de vidro, um sólido amorfo com porcentagens variáveis de óxidos de vidro (dióxido de silício, óxido de cálcio, óxido de sódio, etc). Estes compostos, **sob condições específicas de preparação, formam um material sólido amorfo e não cristalino chamado pré-forma** cuja quantidade de impurezas, na forma de íons metálicos, interfere na atenuação da fibra, ou seja, na capacidade de transmissão da fibra que a ser formada.

De posse da pré-forma necessária à fabricação de fibras ópticas destinadas a um certo tipo de finalidade, dá-se início ao processo básico de fabricação da fibra, (que foi filmado e pretende-se apresentar ao público):

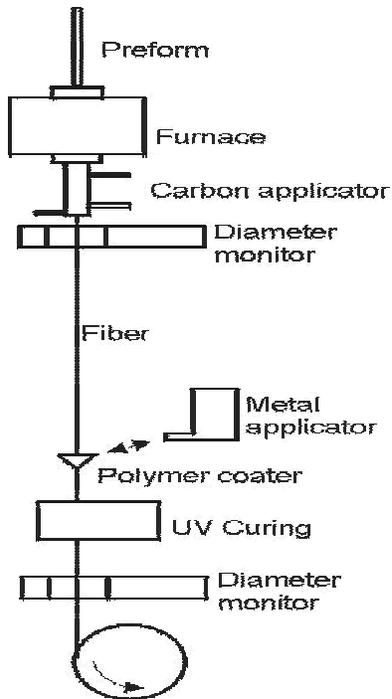
- a pré-forma é abaixada até que seu extremo inferior atinja o extremo inferior de um forno toroidal de indução e é centralizada ai através de uma circunferência de grafite de diâmetro variável.
- O equipamento para controle da temperatura, fluxo de nitrogênio e água no forno é acionado.
- A temperatura do forno é elevada até que o extremo da pré-forma amoleça. Podemos saber de antemão a temperatura de amolecimento do material da pré-forma com testes de Análise Térmica Diferencial (DTA) e Análise Termo-Mecânica (TMA) e ajustamos o forno para atingir tal

temperatura. Caso o material seja desconhecido, a temperatura do forno pode ser aumentada gradualmente a partir de 500° C.

- Como o vidro não tem uma transição abrupta de sólido para líquido, esta temperatura não é exatamente definida e deve-se observar, com um espelho direcionado para o centro do forno, se a parte inferior da pré-forma está se movimentando – sinal de que o vidro atingiu a temperatura de amolecimento.
- Acompanhar a queda da parte inferior da pré-forma, o que provoca um alongamento do vidro amolecido e uma correspondente diminuição do diâmetro do cilindro do material amolecido que é puxado. Enquanto desce, o cilindro fino esfria à temperatura ambiente até que atinge a temperatura de solidificação do material, definindo o diâmetro final da fibra produzida que pode ser medido por instrumentos .

(Cabe aqui uma discussão sobre a viscosidade do vidro liquefeito. No momento em que a extremidade da pré-forma liquefeita está prestes a cair, o cilindro líquido está sujeito a forças de tensão superficial, podendo ser rompido numa série de esferas, como acontece em nossas torneiras de água. Entretanto, se o material da **pré-forma tem uma fase líquida de alta viscosidade** – vidro e plástico - , o efeito das tensões não provoca rompimento do líquido e a fibra pode ser formada quando a temperatura de solidificação é atingida. O efeito da viscosidade do material na formação de fibras pode ser discutido com materiais de diferentes viscosidades.)

- Corta-se a parte disforme que caiu e puxa-se a fibra, fazendo-a passar pelo recipientes de depósito de acrilato, e das lâmpadas de ultravioleta.
- A fibra resultante é puxada e atada a um grande carretel que é colocado em rotação, com velocidade inicial de 2 m/min, para coletar a fibra produzida. Imediatamente ajusta-se a velocidade de descida da pré-forma que atinge o ponto de amolecimento.
- Os **parâmetros que definem o diâmetro da fibra, temperatura do forno (a viscosidade diminui uniformemente com a temperatura), velocidade de rotação do carretel, e taxa com a pré-forma é abaixada ao forno**, podem ser ajustados por retro-alimentação ao monitorar-se o diâmetro da fibra com um equipamento atravessado pela fibra na descida. E o diâmetro desejado da fibra pode ser obtido
- Uma vez obtido o diâmetro desejado, com os parâmetros todos estabilizados, deposita-se acrilato no depósito, provocando o revestimento da fibra, conferindo-lhe flexibilidade e opacidade.



Valores dos parâmetros para as fibras tipicamente produzidas.

Pré-forma: vidro neutro

Diâmetro da pré-forma : 16 mm

Veloc. de descida da pré-forma: 0,5 mm/min

Temp. do forno : 850° C

Veloc. de coleta do carretel : 5 m/min

Diâmetro da fibra resultante (padrão comercial):125µm

Pré-forma: vidro telúrico

Diâmetro da pré-forma : 7 mm

Veloc.de descida da pré-forma: 1,5 mm/min

Temp. do forno : 560° C

Velocidade de coleta do carretel : 3 m/min

Diâmetro da fibra resultante (padrão comercial):125µm

Atributos dos sistemas de fibra óptica

Quando comparado aos meios de transmissão existentes, as atrações destes sistemas, que justificam tamanho investimento no seu desenvolvimento, podem se citadas:

- A conexão entre fonte e detector é feita com apenas vidro e revestimento de polímero, materiais dielétricos, de modo que interferências eletromagnéticas são eliminadas.

- É um meio de transmissão de banda larga com uma largura de banda potencial de vários gigahertz para 1 km e centenas de megahertz para distâncias de 10 km, sem o uso de eletrônica. De forma que os componentes eletrônicos retificadores podem ser restritos aos prédios dos terminais, eliminando os componentes eletrônicos sem número das cidades.
- As dimensões reduzidas das fibras permitem o empacotamento de muitas linhas de transmissão em pequenos espaços, em cabos, de forma compacta.
- Sistemas de fibra óptica são mais baratos para instalar, operar e manter de que os sistemas existentes de performance comparável.



Bibliografia

Fundamentos de Física, volume IV, 4ª Edição; Halliday, Resnick, Walker
Fibre Optics: Theory and Practice, 1973; W.B.Allan
Fibro-optica, 1977; Sattárov
Optical Fibers for Transmission, 1979; J. Midwinter
Optical Fiber Transmission Systems, 1981; S. Personick
Optica, 1974; E. Hecht

O professor orientador esta ausente emergencialmente, de forma que sua nota será dada quando voltar, provavelmente na próxima segunda, 23/06/2003

