

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

# Comunicações Ópticas

Antonio José Martins Soares

Setembro/2005

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Redes de comunicação.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Meios de transmissão.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Evolução dos sistemas de comunicação.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Sistema de comunicação óptico.....</b>	<b>5</b>
1.4.1. Enlace óptico ponto-a-ponto.....	5
1.4.2. Redes de distribuição.....	7
1.4.3. Redes locais.....	8
<b>2. FIBRAS ÓPTICAS.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Vantagens das fibras ópticas.....</b>	<b>9</b>
<b>2.2. Propagação da luz na fibra.....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Óptica geométrica.....	10
2.2.2. Teoria eletromagnética.....	13
2.2.3. A luz como partícula.....	14
<b>2.3. Atenuação e largura de banda.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4. Dispersão cromática.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5. Fibras ITU-T.....</b>	<b>18</b>
<b>3. TRANSMISSOR ÓPTICO.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Perdas por acoplamento.....</b>	<b>20</b>
3.1.1. Perdas por iluminação não interceptada.....	20
3.1.2. Perdas devido à abertura numérica.....	21
3.1.3. Perdas por reflexão.....	24
<b>3.2. Diodos eletroluminescentes.....</b>	<b>24</b>
3.2.1. Característica estática do LED.....	25
3.2.2. Densidade espectral de luz do LED.....	26
<b>3.3. Diodo Laser.....</b>	<b>27</b>
3.3.1. Lasers Fabry Perot.....	28
3.3.2. Lasers DFB.....	29
<b>4. RECEPTORES ÓPTICOS.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Fotodetectores.....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Diodos PIN.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3. Fotodiodos Avalanche (APDs).....</b>	<b>34</b>
<b>5. DISPOSITIVOS ÓPTICOS.....</b>	<b>36</b>
<b>5.1. Amplificadores ópticos.....</b>	<b>36</b>
5.1.1. Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFAs).....	36
5.1.2. Amplificadores ópticos semicondutores (SOAs).....	37
<b>5.2. Repetidores ópticos.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3. Componentes de ligação.....</b>	<b>39</b>
5.3.1. Emendas.....	39
5.3.2. Conectores.....	40

5.3.3. Acopladores.....	40
<b>6. SISTEMA WDM.....</b>	<b>42</b>
6.1. Sistemas WDM ponto-a-ponto e em anel.....	42
6.2. Filtros ópticos.....	45
6.2.1. Filtros Fabry Perot.....	45
6.2.2. Filtros de FBG.....	47
6.2.3. Filtros dielétricos (Multiplexação/Demultiplexação WDM).....	48
6.2.4. Filtros AOTFs.....	48
6.3. Transponders/Conversores de comprimentos de onda.....	49
6.4. OADM.....	50
6.4.1. AWG.....	51
6.4.2. Circuladores com FBGs .....	51
6.5. OXC.....	52
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>



# 1. INTRODUÇÃO

A luz tem sido usada em comunicações desde a época em que os homens utilizavam as mãos como uma forma de linguagem. Este é um tipo de comunicação óptico, uma vez que não pode ser realizado sem a luz. Durante o dia, o sol é a fonte de luz do sistema. A informação é carregada entre o emissor e o receptor pela radiação do sol. Os movimentos das mãos modificam, ou modulam, a luz. O olho funciona como um dispositivo detector da mensagem, que é processada pelo cérebro. A transferência de informação nesse sistema é muito lenta, a transmissão é limitada em distância e as chances de ocorrências de erros são grandes.

Para comunicação em distâncias longas, usavam-se os sinais de fumaça para a transmissão da informação. A mensagem era enviada variando-se a formação da fumaça produzida pelo fogo. A informação também era carregada até o receptor pela luz do sol. Nesse sistema, era necessário que um método de codificação fosse desenvolvido e aprendido pelo transmissor e pelo receptor da mensagem. Isto é semelhante aos sistemas digitais de hoje, que usam os códigos de pulso.

Em 1880, Graham Bell inventou um sistema de comunicação, o *fotofone*, que usava a luz do sol refletida por um espelho modulador da voz para carregar a informação. No receptor, a luz do sol modulada incidia em uma célula fotocondutora, que convertia a mensagem para corrente elétrica. Um receptor telefônico completava o sistema. Esse dispositivo tinha como limitações o pequeno alcance, limitado a 200 metros, e a necessidade de utilização da luz solar direta.

O surgimento das lâmpadas permitiu a construção de sistemas de comunicação ópticos simples, como as luzes piscando para sinalização entre navios ou entre navios e o litoral, os sinais de pisca-pisca nos automóveis e luzes de sinalização de tráfego. De fato, qualquer tipo de lâmpada indicadora é basicamente um sistema de comunicação óptico.

Outras tentativas de comunicação óptica foram realizadas, porém, todas elas consistiam na transmissão de energia luminosa através do ar. Estas idéias fracassaram devido às perturbações atmosféricas, que afetavam sobremaneira o sinal a ser transmitido, e também às limitações de distância, já que o transmissor e o receptor deviam estar visíveis entre si. Surgiu daí a necessidade de se guiar luz de maneira apropriada.

As primeiras experiências de transmissão de luz através do vidro, atribuídas ao alemão Lamb, ocorreram em 1930. Entretanto, o termo fibra óptica só surgiu em 1953, quando Kapany inventou o *fiberscope*. Esse dispositivo permitia a transmissão de imagens através de um feixe flexível de fibra de vidro. Nessa época, a perda de potência luminosa apresentada pela fibra de vidro era da ordem de milhares de decibéis por quilômetro, restringindo o seu uso a distâncias menores que 1 metro.

Até o final da década de 1960, as pesquisas e aplicações da fibra óptica não obtiveram resultados importantes para a sua utilização em sistemas de comunicação. Nesse período, a tecnologia opto-eletrônica avançou até o desenvolvimento dos primeiros dispositivos emissores de luz em estado sólido como o LED e o Laser. A potência de luz emitida pela fonte Laser permitiu conceber sistemas de comunicação ópticos de longo alcance e grande capacidade de transmissão de informação.

Em 1966, Kao e Hockman, na Inglaterra, apresentaram um trabalho que indicava a possibilidade de utilização de fibras ópticas em sistemas de longa distância. Eles mostraram que a grande atenuação da luz nas fibras de vidro, até então observadas, não era intrínseca ao material, mas principalmente devido à presença de impurezas. Concluía-se que através da purificação do material básico da fibra podia-se alcançar atenuações inferiores a 20 dB/km, limite que viabilizava, na época, a sua utilização em sistemas de comunicação.

A partir de então, esforços foram realizados com o objetivo de melhorar o tempo de resposta dos LEDs, Lasers e fotodetetores. Ao mesmo tempo, procurava-se melhorar as fibras ópticas, diminuindo sua atenuação e dispersão. Hoje, consegue-se fabricar fibras com atenuação de 0,2 dB/km. Graças a isso a utilização de sistemas ópticos é cada vez mais freqüente, principalmente nas transmissões de longa distância que demandem grande fluxo de informação.

## 1.1. Redes de comunicação

Historicamente, as redes de comunicação tinham um único propósito. Nos anos de 1840, a rede era empregada no suporte à telegrafia. Em 1870, enquanto a rede de telefonia estava sendo construída, a comunicação de voz era realizada em circuitos telegráficos alugados da Western Union. A transmissão de dados era realizada em baixa velocidade através da rede de voz. Apenas nos anos de 1960 começou a emergir uma rede específica para dados. A partir de então, comunicações de dados aconteciam em redes especificamente projetadas para esse fim e também em circuitos dedicados para serviços de voz e adaptados a serviço de dados. Embora existisse algum nível de compartilhamento de infra-estrutura, as redes de dados e voz eram separadas e distintas.

Com o aumento crescente na demanda por banda de transmissão, devido à popularização da Internet e a utilização cada vez maior de aplicações multimídia, as redes de dados estão superando em tráfego as redes de voz. Isso levou a indústria de telecomunicações a mudar o foco do serviço de voz comutado por circuitos para os serviços de dados comutados por pacotes.

A infra-estrutura óptica instalada ainda é favorável a esse crescimento, pois apenas uma parte da banda disponível nos enlaces ópticos é atualmente utilizada. A grande disponibilização de banda óptica é devida à tecnologia de multiplexação pela divisão em comprimentos de onda (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*), que permite a transmissão de vários comprimentos de onda em uma mesma fibra.

As redes de comunicação podem ser classificadas como sendo de dois tipos: públicas e privadas. Nas redes privadas, as empresas proprietárias dos equipamentos e dos enlaces de comunicação não atuam na área de telecomunicações. Os enlaces que cruzam áreas públicas são alugados de empresas de telecomunicação. As redes dentro de um prédio são denominadas LANs (*Local-Area Networks*), aquelas que se estendem em uma área metropolitana são as MANs (*Metropolitan-Area Networks*) e as que englobam grandes distâncias são as WANs (*Wide-Area Networks*).

Existem também as redes públicas, que pertencem às empresas que atuam na área de telecomunicações. Essas empresas operam as redes e fornecem serviços para os usuários. Junto com esses serviços são alugadas linhas para outras empresas, assim como são oferecidos serviços mais sofisticados. As redes públicas podem ser classificadas em quatro categorias: acesso, local, interurbana e internacional, Figura 1.1. A empresa de telecomunicação tem uma central telefônica nas vizinhanças da região onde ela opera. A rede de acesso se constitui no trecho ligando a central telefônica ao usuário residencial ou comercial. A rede local é responsável pela conexão das centrais telefônicas dentro de uma área metropolitana. A rede interurbana tem longo alcance e conecta diferentes cidades. Observe que essas redes podem pertencer e serem operadas por diferentes empresas. Finalmente, existe a rede internacional, não mostrada na figura, que conecta países que podem estar separados por milhares de quilômetros.

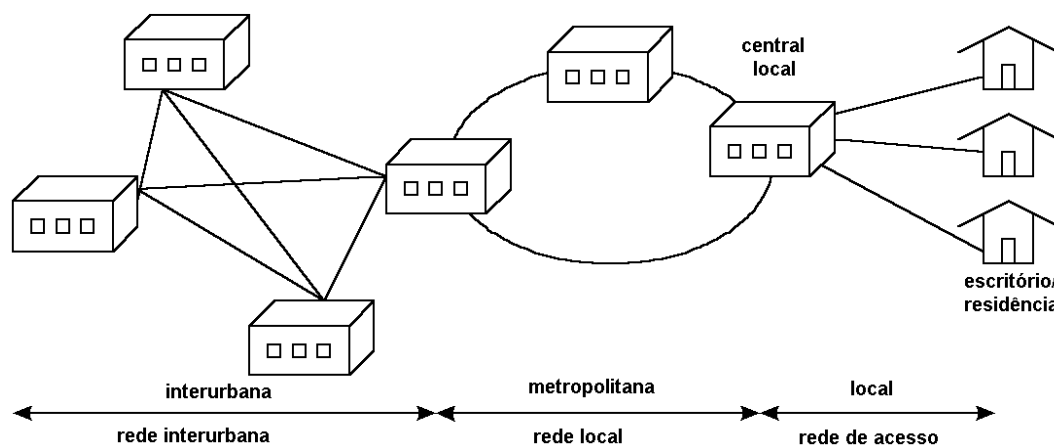


Fig. 1.1. Diferentes partes de uma rede de comunicação pública.

## 1.2. Meios de transmissão

O primeiro meio utilizado para a transmissão de sinais elétricos foi o fio de cobre com dois condutores paralelos. Nessa estrutura, a falta de proteção, particularmente nas frequências mais elevadas, faz com que o sinal seja radiado. Para evitar essa radiação, foram adotadas medidas que impedem a transmissão de dados em alta velocidade. Entre essas medidas, inclui-se a instalação de bobinas, que funcionam como filtros passa-baixa (atenuam as frequências mais elevadas e permitem a passagem de frequências mais baixas, incluindo frequências de voz). Isso limita a aplicação desse tipo de estrutura, uma vez que as frequências mais elevadas são necessárias para a transmissão de dados de alta velocidade.

Os cabos coaxiais consistem de dois condutores concêntricos separados por um isolante dielétrico. Devido à blindagem, os cabos coaxiais não radiam sinal. Por essa razão, as TV por assinatura utilizam esses cabos para a distribuição de sinais a seus assinantes.

As fibras ópticas permitem a transmissão de ondas luminosas, cujas frequências são da ordem de terahertz, o que permite a transmissão de dados com taxas muito maiores que os cabos coaxiais. Considerando a sua capacidade, as fibras são mais baratas que os cabos de cobre, embora sejam mais caras por unidade de comprimento instalado. Então, enquanto grande parte das redes é interligada por meio de fibras, o acesso final às residências é realizado através do cobre.

As fibras podem ser multimodo ou monomodo. A fibra monomodo tem o diâmetro do núcleo menor do que o da fibra multimodo. Como somente um raio de luz (ou modo) se propaga através da fibra monomodo, ela tem uma capacidade muito maior de transportar informação do que a fibra multimodo.

Os sistemas de comunicações via rádio, ou sem fio, incluem microondas, satélite e celular. Algumas das vantagens dos sistemas em radiofrequência são a mobilidade e o fato de não se necessitar de infra-estruturas complexas, o que possibilita uma rápida implementação prática do sistema.

### 1.3. Evolução dos sistemas de comunicação

A frequência é uma das maneiras de se distinguir os diferentes sistemas de comunicação. Uma outra maneira considera se o sistema transmite a informação de forma guiada ou não-guiada. O uso de fios condutores para guiar uma onda eletromagnética foi introduzido em grande escala nos anos 1840, com o surgimento da telegrafia e do código Morse. Esse sistema utilizava uma frequência muito baixa. Depois da invenção do telefone, frequências na faixa de 300 Hz a 400 Hz passaram a ser usadas. Ao longo do tempo tem havido um crescimento exponencial na faixa de frequências para a transmissão de informação guiada. Este desenvolvimento é mostrado na Figura 1.2.

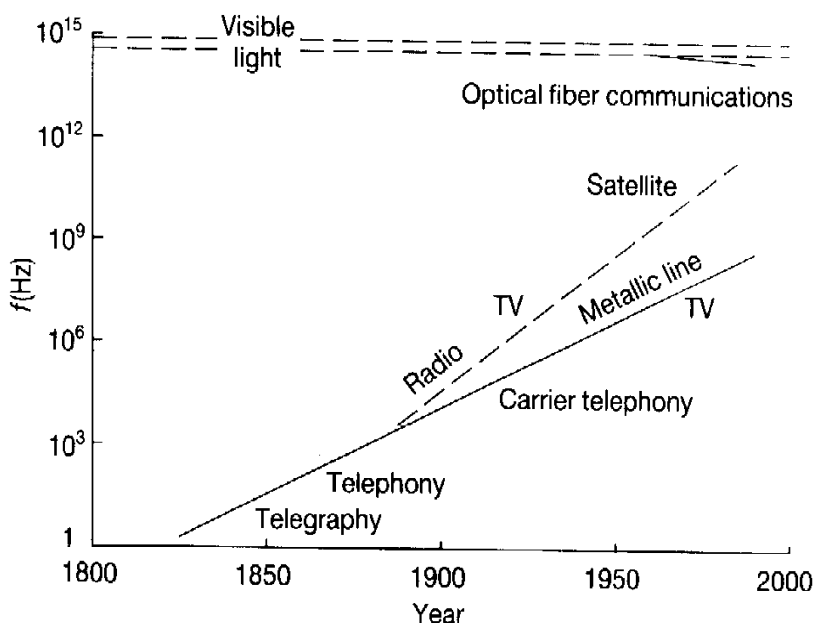


Fig. 1.2. Desenvolvimento dos sistemas de transmissão em função da frequência.

A capacidade de um sistema de comunicação pode ser medida através do produto taxa de transmissão vezes a distância do enlace  $BL$ , em que  $B$  é a taxa de bits e  $L$  é a distância entre repetidores. A Figura 1.3 mostra como o produto  $BL$  tem aumentado, em função do avanço tecnológico, desde o surgimento do telégrafo.

Sistemas de comunicação com  $BL \approx 100 \text{ Mbps} \times \text{km}$  eram disponíveis em 1970. Somente durante a segunda metade do século 20 o produto  $BL$  aumentou por algumas ordens de grandeza devido à utilização da luz como portadora. A primeira geração de sistemas ópticos começou a operar em 1978, num comprimento de onda próximo de  $0,85 \mu\text{m}$ . Eles usavam uma taxa de transmissão na faixa de 50-100 Mbps e o espaçamento entre repetidores podia alcançar cerca de 10 km [ $BL \approx 500 \text{ Mbps} \times \text{km}$ ]. O espaçamento entre repetidores, maior que os sistemas usando cabos coaxiais, diminuía as instalações e os custos de manutenção associados com o número de repetidores.

A segunda geração de sistemas ópticos começou a ser desenvolvida no início dos anos 1980 e permitiu que o espaçamento entre repetidores aumentasse para cerca de 20 km. A taxa de bits dos sistemas de primeira geração estava limitada a 100 Mbps, devido à dispersão modal nas fibras multimodos. Esta limitação foi superada com o uso de fibras monomodo. Em 1987,



um sistema de segunda geração operando em  $1,3 \mu\text{m}$ , numa taxa de  $1,7 \text{ Gbps}$  e com um espaçamento entre repetidores de  $50 \text{ km}$ , estava disponível comercialmente.

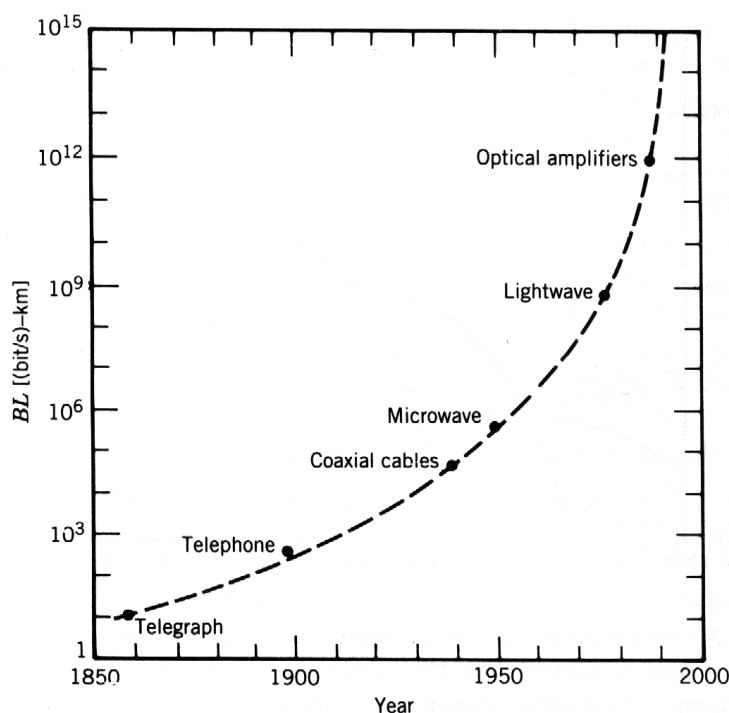


Fig. 1.3. Aumento do produto taxa de bits vezes distância entre 1850 e 2000.

## 1.4. Sistema de comunicação óptico

A faixa de frequência da portadora é uma das características que diferenciam os sistemas de comunicação ópticos dos sistemas de comunicação em radiofrequência. A frequência de uma portadora óptica, em torno de  $300 \text{ THz}$ , é bem superior, por exemplo, à frequência de uma portadora em microondas. Dessa forma, a capacidade de transmissão de informações nos sistemas ópticos é muito maior que a dos sistemas em microondas. Essa maior capacidade está relacionada à largura de banda percentual da portadora modulada. Se a largura de banda do sinal modulado estiver limitada a 1% da frequência máxima disponível, a capacidade dos sistemas em microondas será de centenas de MHz e a dos sistemas ópticos de milhares de MHz. Esse enorme potencial de capacidade de transmissão é o que impulsiona o desenvolvimento das tecnologias de comunicação ópticas.

O sistema de transmissão óptico pode ser classificado em três grandes categorias: enlaces ponto-a-ponto, redes de distribuição (*broadcast*) e redes locais.

### 1.4.1. Enlace óptico ponto-a-ponto

Um enlace de comunicação óptico ponto-a-ponto é composto, basicamente, por um transmissor de luz, uma fibra óptica e um fotodetector, além de amplificadores e regeneradores ópticos, Figura 1.4. Para a geração de luz no transmissor, utiliza-se um laser de alta pureza espectral com o objetivo de minimizar os efeitos da dispersão nas fibras monomodo. Nos receptores, empregam-se fotodetectores PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) ou APD (*Avalanche Photo-Diode*) para a detecção dos sinais de luz transmitidos pelas fibras. Os amplificadores e regeneradores são os dispositivos usados para amplificação e recuperação do sinal óptico transmitido ao longo do enlace.

Os enlaces ópticos podem ser classificados como de curta distância e de longa distância. Os enlaces de longa distância operam na comunicação entre cidades (distâncias superiores a 50 km) utilizando fibras de alta capacidade que agregam o tráfego de outras fibras. Nesse caso, eventualmente o sinal óptico necessita de amplificação ou de regeneração. Os enlaces de curta distância, que atendem ao tráfego dentro das cidades e nas redes locais, operam normalmente com taxas de transmissão mais baixas que os de longa distância.

Quando usados para a conexão de computadores ou servidores dentro de um mesmo prédio ou entre dois prédios vizinhos, Os enlaces de dados têm uma distância relativamente curta de transmissão (< 10 km). Além da baixa perda e da grande largura de banda, as fibras são também usadas nesses enlaces devido às suas outras vantagens, como a imunidade à interferência eletromagnética. Por sua vez, os enlaces de comunicação entre continentes envolvem distâncias de vários milhares de quilômetros. Neste caso, a baixa perda e a grande largura de banda das fibras justificam a transmissão de dados através de cabos ópticos submarinos.

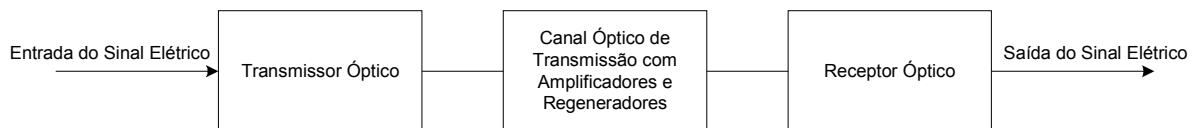


Fig. 1.4. Componentes básicos de um enlace de comunicação óptico.

Dependendo da distância entre transmissor e receptor e do comprimento de onda em operação, pode ser necessário compensar as perdas de energia e a dispersão de luz na fibra para que o sinal óptico seja detectado com precisão. Esta compensação é resolvida com o uso de amplificadores e(ou) regeneradores ópticos. Um regenerador óptico é um par transmissor-receptor que detecta o sinal óptico, recupera o formato de bits no domínio elétrico e os converte novamente em um fluxo de bits óptico. Os amplificadores ópticos amplificam diretamente o sinal óptico, sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico. Como os enlaces de longa distância são geralmente limitados pela dispersão ao invés da perda na fibra, os amplificadores ópticos não podem ser cascadeados indefinidamente. Os regeneradores não sofrem esse tipo de problema, pois regeneram os bits para o seu formato original e compensam tanto a perda como a dispersão da luz na fibra.

A Figura 1.5 ilustra dois enlaces ponto-a-ponto empregando regeneradores e amplificadores ópticos. O principal parâmetro de projeto é a distância entre regeneradores ou amplificadores, pois quanto maior for essa distância menor será o custo do enlace. O produto da taxa de bits pela distância ( $B \times L$ ) é geralmente usado para mensurar o desempenho de um enlace ponto-a-ponto. O produto  $B \times L$  é função do comprimento de onda em operação, pois a perda e a dispersão na fibra dependem desse parâmetro. As três primeiras gerações de sistemas de comunicação ópticos correspondem a três diferentes comprimentos de onda: 850 nm, 1.330 nm e 1.550 nm. Na primeira geração (850 nm), esse produto fica em torno de 1 Gbps  $\times$  km, enquanto que, na terceira geração (1.550 nm), esse valor pode exceder a 1.000 Gbps  $\times$  km.

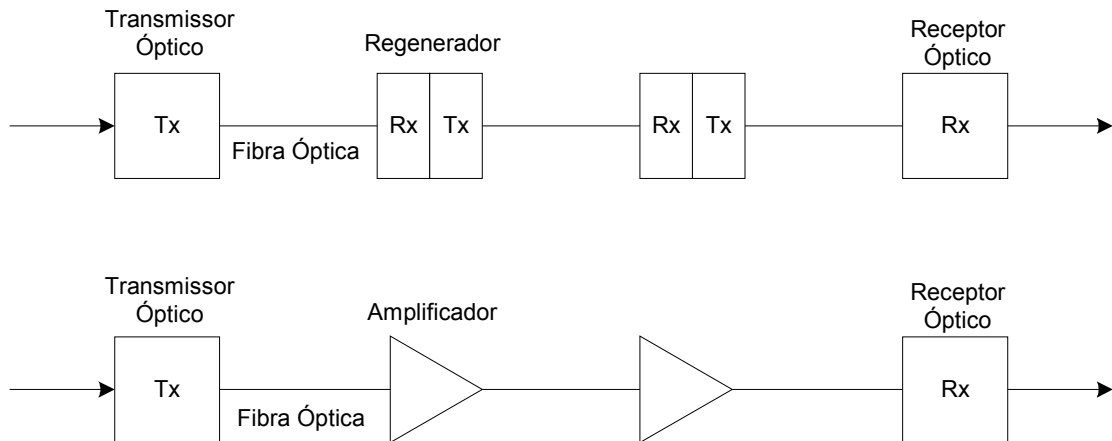
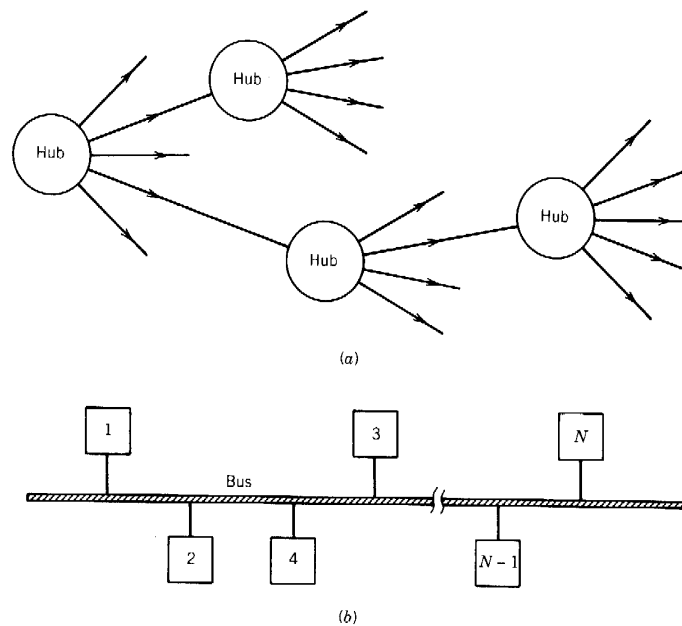


Fig. 1.5. Enlace óptico ponto-a-ponto com regeneradores e amplificadores.

### 1.4.2. Redes de distribuição

Muitas aplicações requerem que a informação não somente seja transportada mas também distribuída para um grupo de usuários. Como exemplo tem-se os sistemas de TV a cabo e as redes digitais de serviços integrados, que são projetadas para distribuir vários serviços, como telefonia, fax, dados e imagem. As distâncias de transmissão são relativamente curtas ( $L < 50$  km), mas a taxa de bits pode ser tão alta quanto 10 Gbps.

A Figura 1.6 mostra a topologia de duas redes de distribuição. O papel da fibra é similar ao caso dos enlaces ponto-a-ponto. Na topologia em barramento, uma única fibra pode transportar diversos canais com informação. A distribuição é realizada através de *taps* ópticos, que retiram uma pequena fração da potência óptica para cada assinante. Um sistema de CATV consiste de uma topologia em barramento que distribui múltiplos canais de vídeo dentro de uma cidade. O uso da fibra permite a distribuição de um grande número de canais ( $\approx 100$ ) devido a sua grande largura de banda, quando comparada com os cabos coaxiais.

Fig. 1.6. (a) Topologia *hub* e (b) topologia em barramento para rede de distribuição.

### 1.4.3. Redes locais

Algumas aplicações exigem redes onde diversos usuários dentro de uma área local (por exemplo, um campus universitário) sejam interconectados de tal modo que qualquer um possa acessar a rede aleatoriamente para transmitir dados para outro usuário. Essas redes são chamadas de redes locais (LANs). Como as distâncias de transmissão são curtas ( $<10$  km), as perdas na fibra não se constituem no principal problema. A motivação para a utilização de fibras é a largura de banda disponível.

A principal diferença entre as redes locais e as redes *broadcast* está relacionada ao acesso aleatório oferecido para os múltiplos usuários pelas LANs. A arquitetura do sistema tem um papel importante nas LANs, dado que o estabelecimento de protocolos é uma necessidade em tais redes. Três topologias normalmente usadas são: barramento, anel e estrela. A topologia em barramento é semelhante a da Figura 1.6. Como exemplo, tem-se a Ethernet, uma rede usada para conectar vários computadores e terminais.

A Figura 1.7 mostra as topologias em anel e estrela. Na topologia em anel, nós consecutivos são conectados por enlaces ponto-a-ponto para formar um único percurso fechado. Cada nó pode transmitir e receber dados usando um par transmissor-receptor, que também atua como repetidor. Na topologia em estrela, todos os nós são conectados, através de enlaces ponto-a-ponto, para um nó central chamado *hub*.

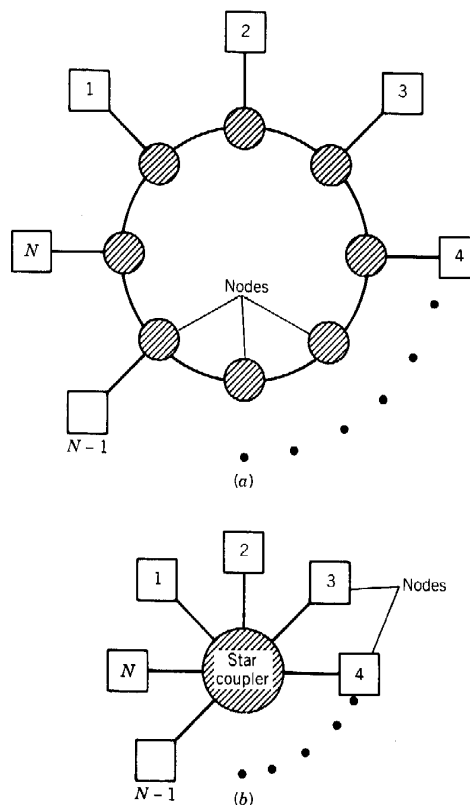


Fig. 1.7. (a) Topologia em anel e (b) topologia em estrela para redes locais.

## 2. FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica permite a transmissão de sinais, com baixas perdas, sobre uma faixa de frequências que é muito maior do que a faixa disponível nos cabos de cobre ou qualquer outro meio de transmissão. Esta propriedade permite que sinais com altas taxas sejam transmitidos sobre longas distâncias, antes que eles necessitem ser regenerados ou amplificados. É devido a estas características que os sistemas de comunicação ópticos estão sendo largamente utilizados.

Quando os enlaces envolvem longas distâncias e altas taxas de bits, o fenômeno da dispersão torna-se um fator limitante importante. Dispersão refere-se ao fenômeno em que diferentes componentes de frequência do sinal caminham com diferentes velocidades no meio de transmissão. Além disso, como os sistemas atuais em longas distâncias utilizam múltiplos comprimentos de onda e altas taxas de bits, efeitos não lineares na fibra também apresentam sérias limitações.

### 2.1. Vantagens das fibras ópticas

Os sistemas de comunicação conectados por fibras ópticas oferecem vários benefícios que não são encontrados nos sistemas tradicionais que usam fios de cobre ou cabos coaxiais. Alguns deles são listados a seguir.

- A capacidade de transportar muito mais informação com grande fidelidade do que os fios de cobre ou cabos coaxiais.
- A fibra óptica pode suportar altas taxas de dados sobre distâncias muito maiores do que os cabos coaxiais, o que a torna ideal para transmissão de dados digitais em série.
- A fibra é totalmente imune a virtualmente todos os tipos de interferência, incluindo descargas atmosféricas, e não conduz eletricidade. Então, ela pode entrar em contato direto com linhas e equipamentos elétricos de alta potência. Ela também não cria qualquer circuito de retorno através da terra.
- Como o material básico das fibras é o vidro, ela não sofre corrosão e não é afetada por muitos produtos químicos. Ela pode ser diretamente enterrada em diferentes tipos de solo ou exposta a ambientes corrosivos em indústrias químicas sem grandes cuidados.
- Como a única portadora na fibra é a luz, não existe a possibilidade de surgimento de arcos elétricos quando uma fibra rompe. Mesmo nas condições de ambientes inflamáveis não existe a possibilidade de incêndio, e nenhum perigo de ocorrência de choque elétrico nos técnicos fazendo manutenção numa fibra rompida.
- Quando colocados em ambientes externos, os cabos de fibra óptica não são afetados pelas condições atmosféricas. Eles também podem ser diretamente amarrados em cabos elétricos já existentes, sem problemas de indução de sinais estranhos.
- O cabo de fibra óptica, mesmo o que contém várias fibras, tem normalmente a seção transversal e o peso muito menores do que um cabo de fios ou de um cabo coaxial que transportam a mesma quantidade de informação. Ele é então mais fácil de manusear e instalar e usa menos espaço em dutos (ele pode frequentemente ser instalado sem dutos).
- O cabo de fibra óptica é ideal para sistemas que exigem segurança da informação, porque é muito fácil a sua monitoração, tornando difícil a retirada de luz sem que se perceba. Além do que não existe nenhuma radiação pela fibra.

## 2.2. Propagação da luz na fibra

Uma fibra óptica consiste de um núcleo cilíndrico envolvido por uma casca. A seção transversal de uma fibra é mostrada na Figura 2.1. Tanto o núcleo quanto a casca são fabricados basicamente com o material sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que tem um índice de refração de aproximadamente 1,45. O índice de refração do material é a relação entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no material. Durante a fabricação das fibras, certas impurezas (ou dopantes) são introduzidas no núcleo e/ou na casca tal que o índice de refração seja um pouco maior no núcleo do que na casca.

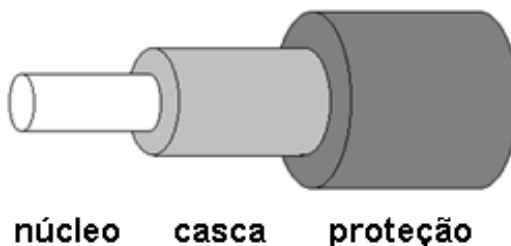


Fig. 2.1. Geometria de uma fibra óptica.

### 2.2.1. Óptica geométrica

Pode-se obter um entendimento simplificado da propagação da luz na fibra através da óptica geométrica ou teoria dos raios. Esta técnica é válida quando o núcleo da fibra tem o raio muito maior do que o comprimento de onda de operação. Essas fibras são chamadas de multimodo. A primeira geração de enlaces de comunicação óptico foram implementados usando-se fibras multimodo com o raio do núcleo na faixa de 25  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  e comprimento de onda em torno de 0,85  $\mu\text{m}$ .

Na técnica da óptica geométrica, a luz pode ser considerada como consistindo de "raios" que se propagam em linhas retas dentro do material (ou meio), sofrendo reflexão e/ou refração na interface entre dois materiais. A Figura 2.2 mostra a interface entre dois meios com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ . Um raio de luz do meio 1 incide na interface entre os meios 1 e 2. O ângulo de incidência  $\theta_1$  é o ângulo entre o raio incidente e a normal à interface entre os dois meios. Parte da energia é refletida para o meio 1, como raio refletido, e a energia restante (desprezando-se absorção) passa para o meio 2, como raio refratado. As leis da óptica geométrica estabelecem que  $\theta_{1r} = \theta_1$  e os ângulos do raio refratado e incidente obedecem a lei de Snell, dada por

$$(2.1)$$

Quando o ângulo de incidência aumenta, o ângulo de refração também aumenta. Se  $n_1 > n_2$ , pode-se ter  $\theta = \pi/2$  radianos. Isto acontece quando  $\theta_1 = \theta_c$  (ângulo crítico). Para  $\theta_1 > \theta_c$ , não existe raio refratado e toda a energia da onda incidente é refletida. Esse fenômeno é chamado de reflexão interna total.

Então, do ponto de vista da óptica geométrica, a luz se propaga na fibra devido a uma série de reflexões internas totais que ocorrem na interface núcleo-casca, Figura 2.3. Nessa figura, mostra-se também o acoplamento da luz na fibra. Somente os raios de luz que incidem para determinado ângulo na interface ar-núcleo sofrerão reflexão interna total na interface núcleo-casca e então serão propagados. Esses são chamados de raios guiados e os ângulos de incidência são dados por

$$\theta_0 < \theta_0^{\max} = \text{sen}^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (2.2)$$

A quantidade  $n_0 \text{sen} \theta_0^{\max}$  é chamada de abertura numérica da fibra  $AN$ . A diferença entre os índices de refração  $n_1 - n_2$  é normalmente pequena. A diferença relativa do índice de refração é definida por  $\Delta$ . Para valores pequenos de  $\Delta$ ,  $AN \cong n_1 \sqrt{2\Delta}$ . Como exemplo, se  $\Delta = 0,01$ , que é um valor típico para fibra multimodo, e  $n_1 = 1,5$ , um valor típico para a sílica, assumindo acoplamento a partir do ar, obtém-se  $AN \cong 0,212$  e, então,  $\theta_{\max} \cong 12^\circ$ .

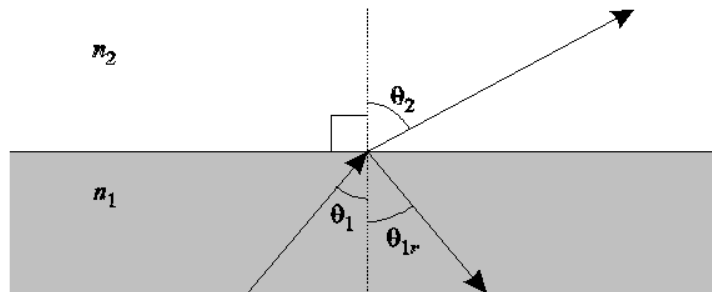


Fig. 2.2. Reflexão e refração da luz na interface entre dois meios.

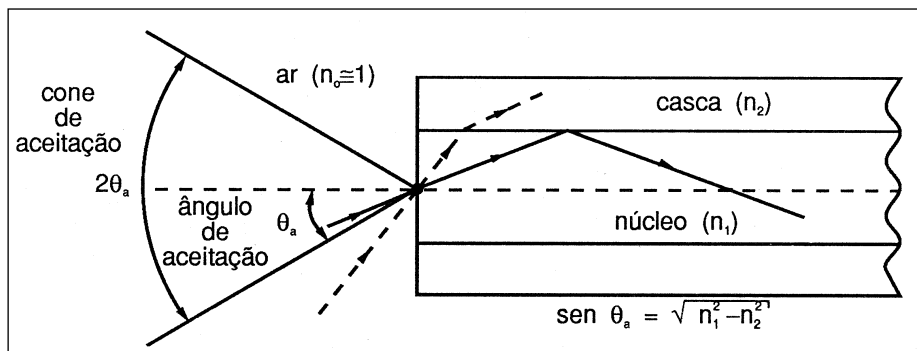


Fig. 2.3. Propagação de raios de luz na fibra por reflexão interna total.

Como diferentes raios percorrem diferentes distâncias ao longo da fibra, a energia contida em um pulso estreito (no tempo), no início da fibra, será espalhada sobre um intervalo de tempo maior, no final da fibra. Esse espalhamento no tempo, que é chamado de dispersão modal, é obtido tomando-se a diferença no tempo entre os raios que percorrem a maior e a menor distância. Essa diferença é dada por

$$\delta T = T_s - T_f = \frac{L}{c} \frac{n_1}{n_2} \Delta \quad (2.3)$$

O valor máximo admitido para  $\delta T$  depende da taxa de bits usada. Pode-se tolerar, por exemplo, uma variação no atraso igual a metade do período dos bits  $1/2B$  segundos. Então o limite da dispersão modal é

$$\delta T = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta = \frac{1}{2B} \quad (2.4)$$

Portanto, o produto taxa vezes distância, para o enlace óptico, é

$$BL < \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1^2} \frac{\Delta}{c} \quad (2.5)$$

Por exemplo, se  $\Delta = 0,01$  e  $n_1 = 1,5$  ( $\approx n_2$ ), tem-se  $BL < 10 \text{ Mbps} \times \text{km}$ . Este limite é mostrado na Figura 2.4.

Observe que  $AN = n_1 \sqrt{2\Delta}$  aumenta com o aumento de  $\Delta$ , ao contrário do produto  $BL$  que diminui com o aumento de  $\Delta$ . Valores típicos de  $\Delta$  da ordem de 1% minimizam os efeitos da dispersão modal, e como  $AN$ , por consequência, é pequena, lentes ou outros mecanismos convenientes são usados para acoplar a luz na fibra.

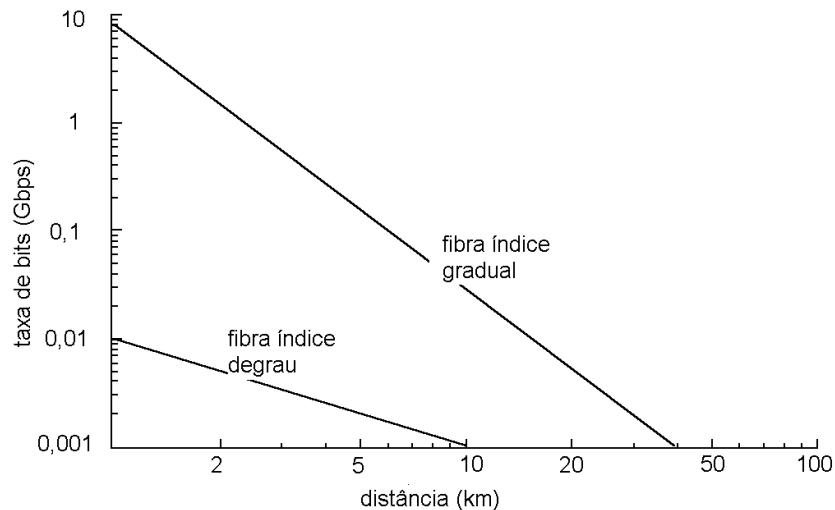


Fig. 2.4. Limite do produto  $BL$  devido à dispersão modal nas fibras índice degrau e índice gradual.

A dispersão modal pode ser significativamente reduzida usando-se fibras de índice gradual. Nas fibras índice gradual o índice de refração diminui gradualmente, ou continuamente, de um valor máximo no centro do núcleo para o valor na interface núcleo-casca. O alargamento do pulso nesse tipo de fibra é

$$\delta T = \frac{L n_1 \Delta^2}{c 8} \quad (2.6)$$

Assumindo-se que a condição  $\delta T < 1/2B$  deve ser satisfeita, o limite do produto  $BL$  para a fibra índice gradual é

$$BL < \frac{4c}{n_1 \Delta^2} \quad (2.7)$$

Por exemplo, se  $\Delta = 0,01$  e  $n_1 = 1,5$ , tem-se que  $BL < 8 \text{ Gbps} \times \text{km}$ . Este limite também está plotado na Figura 2.4.



Para eliminar por completo os efeitos da dispersão modal utilizam-se as fibras chamadas de monomodo. A descrição quantitativa da propagação da luz nessas fibras é feita usando-se a teoria eletromagnética, que é geral e aplicável para todos os valores do raio da fibra.

### 2.2.2. Teoria eletromagnética

A luz é uma onda eletromagnética e a sua propagação, num meio qualquer, é governada pelas equações de Maxwell. A frequência de oscilação da luz é muito alta e o comprimento de onda é muito curto. O espectro eletromagnético de frequências é mostrado na Figura 2.5. O comprimento de onda no espaço livre e as designações mais comuns para várias faixas de frequências estão indicados. O termo óptica (assim como luz) é usado para se referir às frequências no espectro designadas de infravermelho, visível e ultravioleta. Isso ocorre porque as mesmas análises, técnicas e dispositivos são utilizados nessas faixas. A faixa de frequências (ou comprimentos de onda) de interesse particular para as comunicações ópticas é mostrada na Figura 2.5. Comprimentos de onda visíveis variam de 0,4  $\mu\text{m}$  (que corresponde à cor azul) até 0,7  $\mu\text{m}$  (vermelho). As fibras de sílica não são boas transmissoras de luz na região visível porque atenuam muito as ondas. Assim, somente transmissões de enlaces curtos são práticos nessa faixa. As perdas na região ultravioleta são ainda maiores. No entanto, na região de infravermelho existem faixas de frequências onde o vidro é relativamente eficiente para a transmissão da luz.

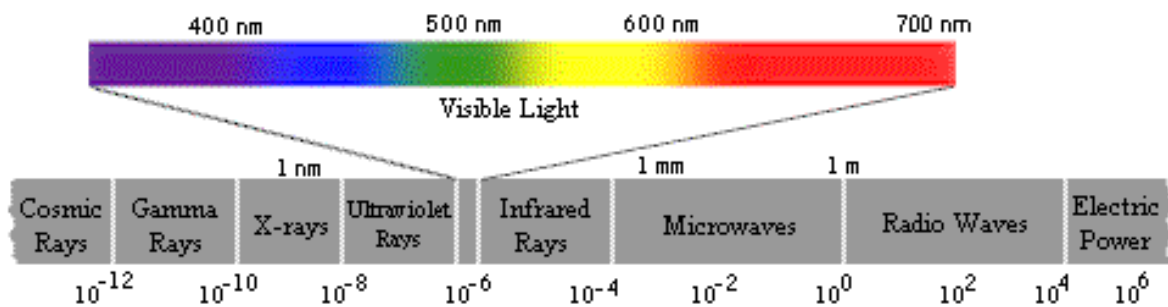


Fig. 2.5. Espectro eletromagnético.

Embora as ondas luminosas tenham frequências muito mais altas que as ondas de rádio, elas obedecem às mesmas leis e compartilham muitas características. Todas as ondas eletromagnéticas têm campos elétrico e magnético associados com elas, e todas caminham muito rapidamente. O campo elétrico é dado por  $\vec{E}$ , em que  $\omega$  é a frequência angular e  $k$  é a constante de propagação da onda. O fator  $(\omega t - kz)$  é a fase da onda, sendo  $kz$  o deslocamento de fase espacial e  $\omega t$  o deslocamento de fase temporal. A onda percorre uma distância de um comprimento de onda para  $kz$  variar de  $2\pi$ , então

$$k\lambda = 2\pi \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (\text{m}) \quad (2.8)$$

No intervalo de tempo necessário para  $\omega t$  variar de  $2\pi$  a onda sofre uma oscilação completa, então

$$\omega t = 2\pi \quad \text{ou} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} \quad (\text{s}) \quad (2.9)$$

Das relações (2.8) e (2.9) tem-se que  $k\lambda = \omega T$ , de onde  $v$ , em que  $v$  é a velocidade de fase da onda. Em termos do índice de refração  $n$  a velocidade de fase da onda é  $v = c/n$ , então

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c} n = k_0 n \quad (2.10)$$

em que  $k_0$  é a constante de propagação no espaço livre. O comprimento de onda pode ser escrito como

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{k_0 n} = \frac{\lambda_0}{n} \quad (2.11)$$

em que  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre e é maior do que o comprimento de onda no dielétrico.

Se a onda perde energia enquanto se propaga, a expressão para o campo elétrico deve ser modificada para  $E = E_0 e^{-\alpha z}$ , onde  $\alpha$  é a constante de atenuação.

### 2.2.3. A luz como partícula

Anteriormente a luz foi descrita como uma onda eletromagnética. Algumas vezes é conveniente analisar a luz como sendo formada de partículas muito pequenas chamadas fótons. A energia de um único fóton é

$$W_p = hf \quad (2.12)$$

em que  $h$  é a constante de Planck. A energia determinada pela relação (2.12) tem unidade de joules (J). É impossível separar uma onda em divisões menores que um fóton. Feixes de luz, normalmente, contêm uma grande quantidade de fótons. Considere, por exemplo, que fótons estejam incidindo num detector de luz com uma potência óptica de 1  $\mu$ W e comprimento de onda 0,8  $\mu$ m. De (2.12) a energia de um único fóton é

$$W_p = hf = h \frac{c}{\lambda} = 2,48 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2.13)$$

Como a potência é a taxa no tempo na qual a energia é liberada, pode-se escrever a energia total como

$$W = Pt \quad (2.14)$$

Para um tempo de incidência da luz no detector igual a 1 s, tem-se que a potência de 1  $\mu$ W vezes o intervalo de tempo de 1 s resulta numa energia de 1  $\mu$ J. O número de fótons necessários para se chegar nessa energia é

$$\frac{W}{W_p} = \frac{10^{-6} \text{ J}}{2,48 \times 10^{-19} \text{ J/fóton}} = 4,03 \times 10^{12} \text{ fótons} \quad (2.15)$$

Neste exemplo, se o tempo de observação fosse reduzido para 1 ns, ainda assim seriam recebidos cerca de 4.000 fótons. Os receptores mais sensíveis podem detectar presença de radiação quando somente uns poucos fótons são recebidos.

A teoria da luz como partícula explica a geração da luz pelas fontes, como os diodos emissores de luz e diodos laser. Ela também explica a detecção da luz pela conversão de radiação óptica para corrente elétrica.

## 2.3. Atenuação e largura de banda

A potência de luz na saída de uma fibra óptica está relacionada à potência de luz na entrada por

$$P_{out} = P_{in} e^{-\alpha L} \quad (2.16)$$

em que  $L$  é o comprimento e o parâmetro  $\alpha$  representa a atenuação na fibra. Esse parâmetro é normalmente expresso em unidades de dB/km. Então, uma perda de  $\alpha_{dB}$  dB/km significa que a relação  $P_{out}/P_{in}$  para  $L = 1$  km satisfaz

$$10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} = -\alpha_{dB} \quad (2.17)$$

ou

$$(2.18)$$

Os dois principais mecanismos de perda nas fibras ópticas são a absorção material e o espalhamento Rayleigh. A absorção material inclui absorção pela sílica e pelas impurezas na fibra. A absorção material na sílica pura é desprezível na faixa de frequências usada em sistemas de comunicação óptico, de  $0,8 \mu\text{m}$  a  $1,6 \mu\text{m}$ . A redução das perdas, devido à absorção por impurezas na sílica, tem tornado a fibra óptica o meio de comunicação extraordinário que é hoje. Tem-se conseguido essa redução para níveis desprezíveis nos comprimentos de onda de interesse para as comunicações ópticas. Então as perdas devido ao espalhamento Rayleigh tornaram-se componente dominante nas três bandas usadas para comunicações ópticas:  $0,8 \mu\text{m}$ ,  $1,3 \mu\text{m}$  e  $1,55 \mu\text{m}$ . A Figura 2.6 mostra a atenuação na sílica em função do comprimento de onda. Uma atenuação mínima de  $0,25$  dB/km é alcançada em  $1,55 \mu\text{m}$ . Em sistemas de comunicações ópticos típicos, um sinal pode sofrer uma perda de cerca de  $20$  dB a  $30$  dB antes que seja necessária a sua amplificação ou regeneração. Para  $0,25$  dB/km, isto corresponde a uma distância de  $80$  km a  $120$  km. Os picos de atenuação mostrados na figura se devem, basicamente, ao vapor de água residual na sílica da fibra.

A largura de banda, do enlace óptico, pode ser medida em termos do comprimento de onda  $\Delta\lambda$  ou em termos da frequência  $\Delta f$ . A relação entre essas medidas é

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (2.19)$$

onde  $f$  é a frequência central e  $\lambda$  é o comprimento de onda central.

A largura de banda útil de uma fibra pode ser obtida tomando-se a banda na qual a perda em dB/km está dentro de um fator de 2 de seu valor mínimo. Em  $1,3 \mu\text{m}$  a banda é de aproximadamente  $80$  nm e em  $1,55 \mu\text{m}$ , a banda é  $80$  nm. Em termos de frequência óptica, essas bandas correspondem à cerca de  $35.000$  GHz. Esta é uma largura de banda extremamente grande, considerando que, hoje, a taxa de bits necessária para diversas aplicações é de algumas dezenas de Mbps.

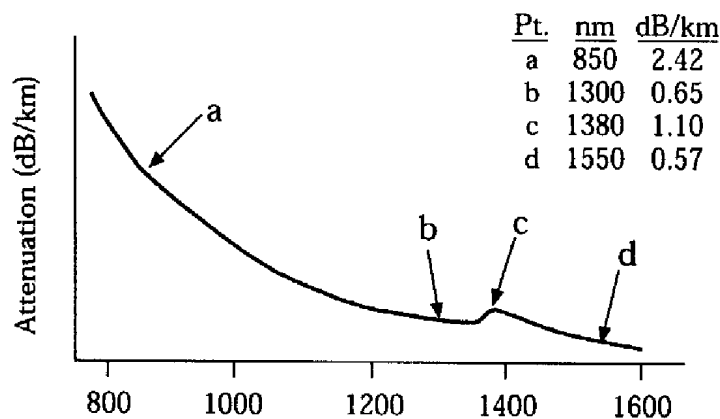


Fig. 2.6. Perdas por atenuação na sílica em função do comprimento de onda.

## 2.4. Dispersão cromática

A fonte de luz não é monocromática. A Figura 2.7 mostra a potência de luz na saída de um LED. Ele emite luz numa faixa de freqüências que é chamada de largura de linha ou largura espectral da fonte. Quanto menor a largura de linha mais coerente é a fonte de luz. Uma fonte perfeitamente coerente emite luz num único comprimento de onda.

A velocidade da luz num dielétrico é  $v = c/n$ . Para o vidro usado em fibras o índice de refração  $n$  varia com o comprimento de onda, Figura 2.8, então a velocidade também varia com  $\lambda$ . Neste caso a variação é causada pelo material, logo ocorre dispersão material. Em fibras, e outras estruturas que guiam a onda eletromagnética, a dispersão também pode ser causada pela própria estrutura, originando a dispersão guia de onda.

A Figura 2.9 mostra o que ocorre quando uma fonte real (largura de linha diferente de zero) emite um pulso de luz que se propaga numa fibra dispersiva. Os pulsos iniciais são idênticos, exceto pelos seus comprimentos de onda. Eles chegam em tempos diferentes no final da fibra. Quando somados produzem um pulso espalhado na saída com relação ao pulso na entrada.

A dispersão também distorce um sinal analógico, Figura 2.10. Na entrada, os três comprimentos de onda estão em fase, criando uma grande variação na intensidade de luz. Depois de caminhar no meio dispersivo eles ficam fora de fase e quando adicionados produzem uma variação menor na amplitude do sinal. A dispersão não varia a potência média ou a freqüência de modulação, mas diminui a variação do sinal. Como a informação transmitida está contida nesta variação, a sua atenuação é prejudicial para a recuperação da informação.

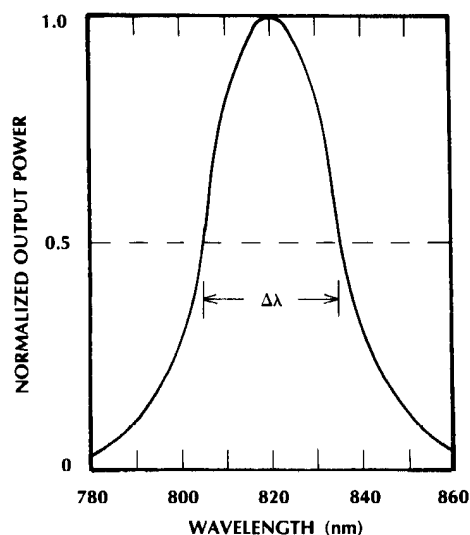


Fig. 2.7. Espectro de luz emitida pelo LED.

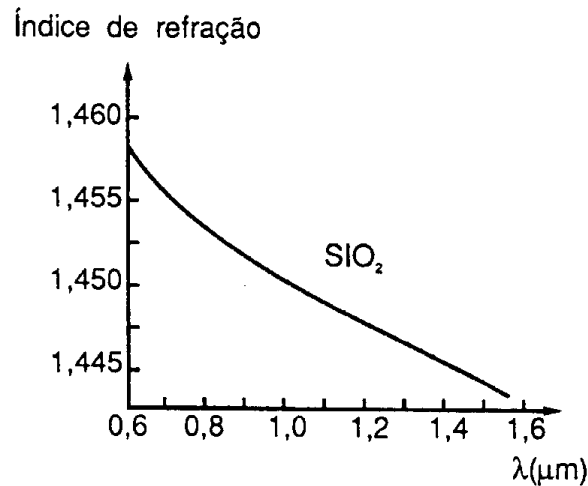


Fig. 2.8. Índice de refração da sílica.

O alargamento do pulso por comprimento da fibra, devido à dispersão material, é dado por

$$\frac{\delta T}{L} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \Delta\lambda = -\frac{\lambda}{c} n'' \Delta\lambda \quad (2.20)$$

A dispersão material é definida como  $M = -\lambda n'' / c$ . Observa-se que  $M$  é proporcional à derivada segunda do índice de refração. Ela é plotada na Figura 2.11 para a sílica. A unidade de  $M$  é ps/(nm×km), que é entendido como o alargamento do pulso em picosegundos por nanometro de largura de linha da fonte e por quilômetro de fibra.

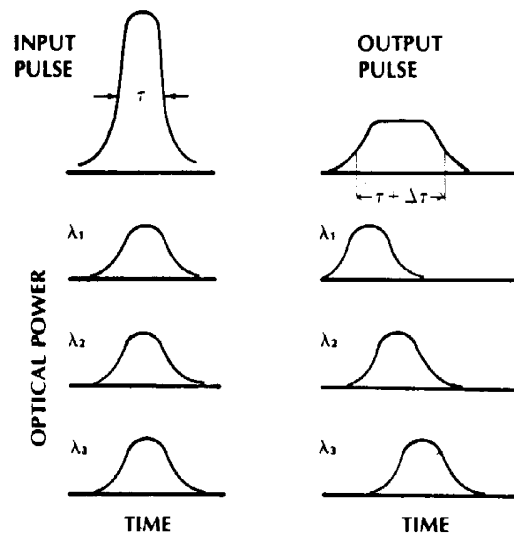


Fig. 2.9. Alargamento do pulso causado pela propagação da luz através de um material dispersivo.

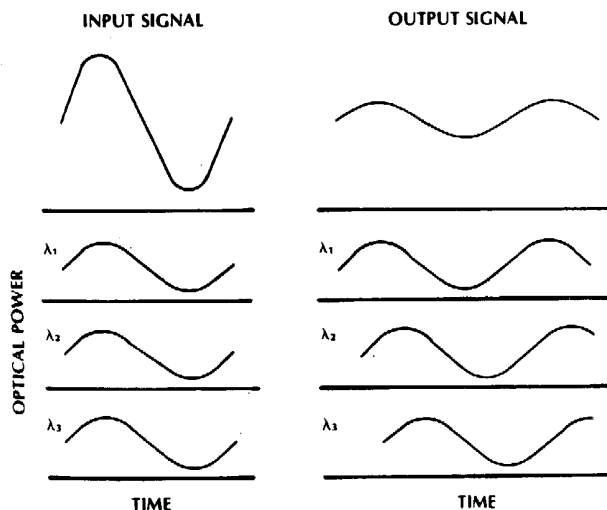


Fig. 2.10. Redução na amplitude de um sinal analógico causada pela dispersão.

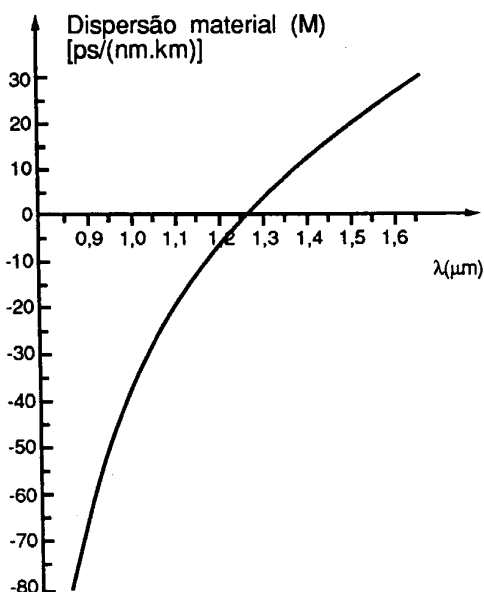


Fig. 2.11. Dispersão material na sílica.

## 2.5. Fibras ITU-T

A fibra ITU-T G.652 (Fibra de Dispersão Não Deslocada), também conhecida como padrão SMF, é a mais conhecida fibra desenvolvida. Esta fibra tem uma simples estrutura de índice degrau e é otimizado para operar na banda de 1.310 nm. E possui um comprimento de onda de dispersão zero em 1.310 nm e pode operar também na banda de 1.550 nm, mas não é otimizado para esta região. Uma típica dispersão cromática em 1.550 nm é alta em 17 ps/nm.km. A compensação de dispersão precisa ser empregada para aplicações de alta taxa de bits. O parâmetro de atenuação para a fibra G.652 é tipicamente de 0,2 dB/km em 1.550 nm, e o parâmetro PMD é menor que 0,1 ps/km.

As fibras G.652 (Fibra de Dispersão Não Deslocada com Baixo Pico d'água) não são otimizadas para aplicações WDM devido à alta atenuação ao redor da região do pico de água. As fibras ITU-T G.652.C oferecem baixa atenuação ao redor dos picos de OH. A fibra G.652.C é otimizada para redes onde a transmissão ocorre através de uma larga banda de comprimentos de onda de 1.285nm a 1.625nm. Apesar das fibras G.652.C oferecem excelentes capacidades para redes de acesso e metropolitanas curtas e sem amplificação, eles não endereçam todas as necessidades para a transmissão a 1.550 nm. O parâmetro de atenuação para a fibra G.652 é tipicamente de 0,2 dB/km em 1.550 nm, e o parâmetro PMD é menor que 0,1 ps/km.

A convencional SMF tem um comprimento de onda com zero de dispersão que fica próximo à banda de 1.310 nm. SMF mostra altos valores de dispersão sobre a faixa entre 1.500 nm e 1.600 nm (terceira janela de banda). A tendência de migrar o comprimento de onda de operação de 1.310 nm para 1.550 nm iniciou o desenvolvimento de um tipo de fibra chamado de Fibra de Dispersão Deslocada (DSF) – ITU-T G.653. DSF exibe um valor de dispersão zero em torno de comprimento de onda de 1.550 nm onde a atenuação é mínima. Os DSFs são otimizados para operar na região entre 1.500 nm a 1.600 nm. Com a introdução dos sistemas WDM, contudo, canais alocados próximos a 1.550 nm em DSF são seriamente afetados por ruído induzido como resultado de efeitos não lineares causados por FWM. Isto iniciou o desenvolvimento do NZDSF.

A fibra ITU-T G.654 (Fibras de Perda Minimizada em 1.550 nm) é otimizada para a operação na região de 1.500 nm a 1.600 nm. Esta fibra possui uma baixa perda na banda de 1.550 nm. A baixa perda é atingida pelo uso de um núcleo de pura sílica. As fibras ITU-T G.654 podem suportar altos níveis de potência e possuem um núcleo com larga área. Estas fibras têm uma alta dispersão cromática em 1.550 nm. A fibra ITU G.654 foi projetada para aplicações oceânicas de longas distâncias.

Usando a fibra de dispersão deslocada não zero (NZDSF) pode suavizar características não lineares. As fibras NZDSF superam estes efeitos pela movimentação do comprimento de onda com zero de dispersão para fora da janela de operação de 1.550 nm. O efeito prático para isto é ter uma pequena mas finita quantidade de dispersão cromática em 1.550 nm, que minimiza efeitos não lineares, como FWM, SPM, e XPM, que são vistos em sistemas DWDM sem a necessidade da custosa compensação de dispersão. Existem duas famílias de fibras chamadas de dispersão não zero (NZD+ e NZD-), nos quais o valor de dispersão zero cai antes e depois de 1.550 nm, respectivamente. Uma dispersão típica cromática para a fibra G.655 em 1.550 nm é de 4,5 ps/nm-km. O parâmetro de atenuação para a fibra G.655 é tipicamente de 0,2 dB/km a 1.550 nm, e o parâmetro PMD é menor que 0,1 ps/km.

Como um exemplo prático, seguem as especificações técnicas dos dois tipos de fibra vendidos pela Pirelli no Brasil. As fibras ópticas SM Pirelli são fibras monomodo do tipo índice de casca casado que operam em 1.310 nm e 1.550 nm. Na região de 1.310 nm, apresenta diâmetros de 9,2/125 µm de núcleo/casca e dispersão zero, e na região de 1.550 nm, apresenta diâmetros de 10,5/125 µm de núcleo/casca, baixa dispersão e também melhor comportamento de sensibilidade à macro-curvatura. Estas fibras podem ser usadas com repetidores à distância de 80 km quando operam a 2,5 Gbps. As fibras ópticas MM Pirelli são fibras multimodo do tipo índice gradual otimizadas para operar em 850 nm e/ou 1.310 nm e apresentam diâmetros de 62,5/125 µm de núcleo/casca. As fibras ópticas SM e MM da Pirelli são fabricadas com a casca em sílica pura e o núcleo com sílica dopada com germânio para a obtenção das características desejadas.

### 3. TRANSMISSOR ÓPTICO

Os transmissores ópticos são compostos de uma fonte de luz, um modulador e um acoplador, Figura 3.1. As fontes utilizadas em sistemas de comunicação são os LEDs (*Light-Emitting Diodes*) e os Lasers (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) devido à compatibilidade da luz gerada com as fibras ópticas. O modulador realiza a função de inserir a informação no sinal óptico, a partir do sinal elétrico de entrada. O sinal óptico pode ser modulado diretamente pela variação da corrente elétrica, ou externamente, nos casos de sistemas em altas taxas de dados. O acoplador é uma micro-lente que focaliza o sinal óptico no plano de entrada da fibra óptica com a máxima eficiência possível.

O estudo da fibra é importante para o entendimento das limitações do enlace óptico com relação à perda de potência e à dispersão. Para completar a discussão, é necessário o conhecimento de fontes e detectores ópticos. Antes de considerar a fonte de luz, é conveniente mencionar os parâmetros que afetam a eficiência de entrada e também calcular as perdas associadas com esse parâmetro.

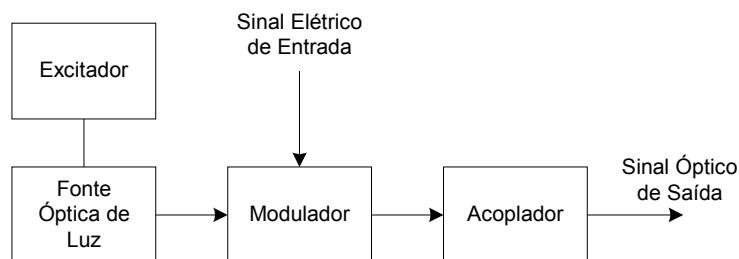


Fig. 3.1. Transmissor óptico.

#### 3.1. Perdas por acoplamento

Além da atenuação na fibra, o acoplamento na entrada contribui muito com as perdas do sistema. Essas perdas estão relacionadas a:

- iluminação não interceptada, resultante do descasamento entre a área da projeção da iluminação da fonte (no plano de entrada da fibra) e a área do núcleo da fibra;
- abertura numérica, devido aos raios de luz com ângulos de incidência fora do cone de aceitação da fibra;
- reflexão, que ocorre na entrada, em conectores e no final da fibra.

Em geral, a magnitude das perdas de acoplamento na entrada depende da característica óptica e da geometria da fonte e da fibra. Parâmetros particularmente importantes são a área e o perfil angular de emissão da fonte, a área do núcleo da fibra, o índice de refração, a abertura numérica e a distância entre a superfície de emissão e o final da fibra.

##### 3.1.1. Perdas por iluminação não interceptada

Se a área de emissão da fonte é maior do que a área do núcleo da fibra, parte da luz emitida não será acoplada na fibra. Então, procura-se escolher uma fonte que seja menor que o núcleo da fibra. As fontes LED e Laser satisfazem essa condição.



Mesmo se a fonte é menor que o núcleo, ainda podem existir problemas como iluminação não interceptada, Figura 3.2. Qualquer separação entre a fonte e a entrada da fibra provoca uma perda da luz emitida. Esta perda de iluminação não interceptada é dada aproximadamente por

$$P_{ilum} = 10 \log \frac{A_c}{A_s} \quad (3.1)$$

em que  $A_c$  é a área do núcleo da fibra e  $A_s$  é a área da projeção da luz no plano transversal à entrada da fibra. A magnitude da perda de iluminação depende, basicamente, do perfil de emissão angular da fonte, da distância entre a superfície de emissão da fonte e a entrada da fibra e do diâmetro do núcleo.

Todas as fontes pequenas têm feixes de radiação que divergem rapidamente. Então, para evitar perdas intoleráveis, a separação entre a fonte e a entrada da fibra não pode ser maior do que duas a quatro vezes o diâmetro do núcleo. Esta necessidade efetivamente elimina o uso de diodos encapsulados, uma vez que a fonte fica tipicamente entre 1 mm e 2 mm atrás da janela. A solução é construir um diodo não-encapsulado e, então, montar a fibra tão perto quanto possível da superfície de emissão, ou utilizar uma fonte com um trecho de fibra já instalado pelo fabricante.

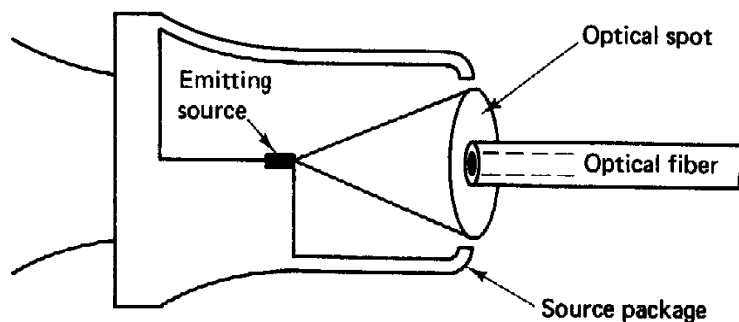


Fig. 3.2. Perdas por iluminação não interceptada.

### 3.1.2. Perdas devido à abertura numérica

Com a perda por iluminação eliminada, pode-se considerar as perdas associadas com o perfil de acoplamento. Especificamente, esta é uma redução da potência devido à abertura numérica. A Figura 3.3 mostra que uma considerável quantidade de luz é perdida devido ao conflito entre o relativamente pequeno ângulo do cone de aceitação da fibra (metade do ângulo da ordem de  $10^\circ$  a  $14^\circ$ ) e a grande divergência do feixe de emissão do LED ou Laser.

Para estimar a eficiência do acoplamento de entrada (perdas AN), é necessário primeiro descrever o perfil do feixe de radiação da fonte. Esta informação nem sempre é fornecida pelos fabricantes na forma necessária, mas pode-se deduzir das especificações dadas. Tipicamente, os fabricantes plotam o perfil do feixe de radiação da fonte em um diagrama polar. As curvas são obtidas medindo-se a intensidade de radiação relativa usando-se um detector que varia num arco de  $180^\circ$ , Figura 3.4.

Esse perfil de potência de emissão é produzido por uma fonte lambertiana, que pode se descrever por

$$P = P_0 \cos \phi \quad (3.2)$$

em que  $P_0$  é a intensidade radiante ao longo da linha  $\phi = 0$ . Outras fontes produzem feixes de radiação com diagramas mais fechados. Matematicamente, pode-se aproximar esses diagramas por

Um conjunto de curvas, plotados para vários valores de  $m$ , é ilustrado na Figura 3.5.

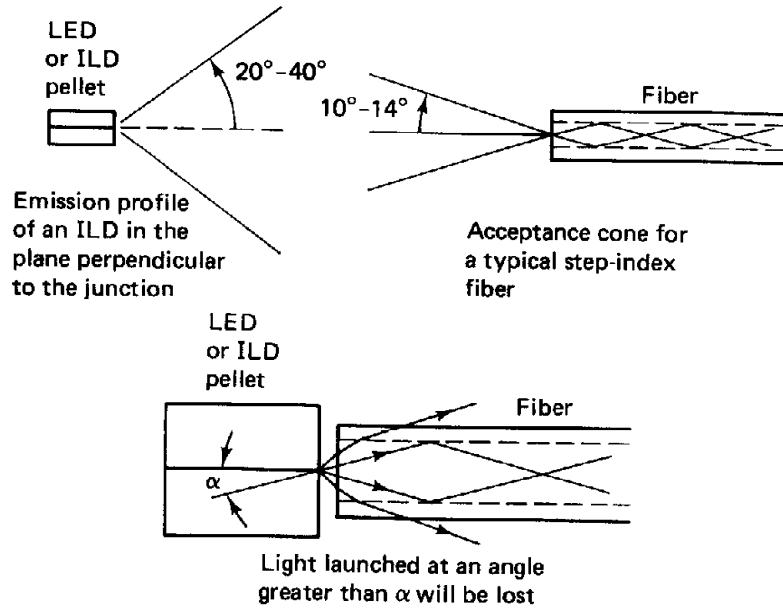


Fig. 3.3. Perdas por acoplamento.

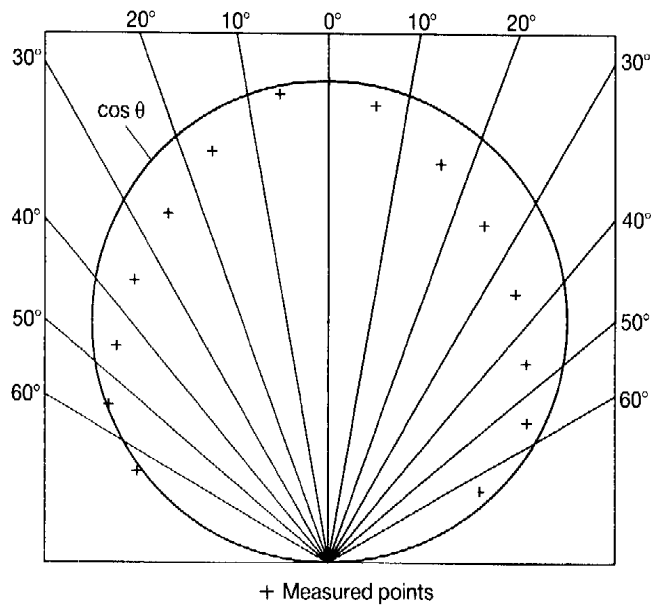


Fig. 3.4. Diagrama de radiação para uma fonte lambertiana.

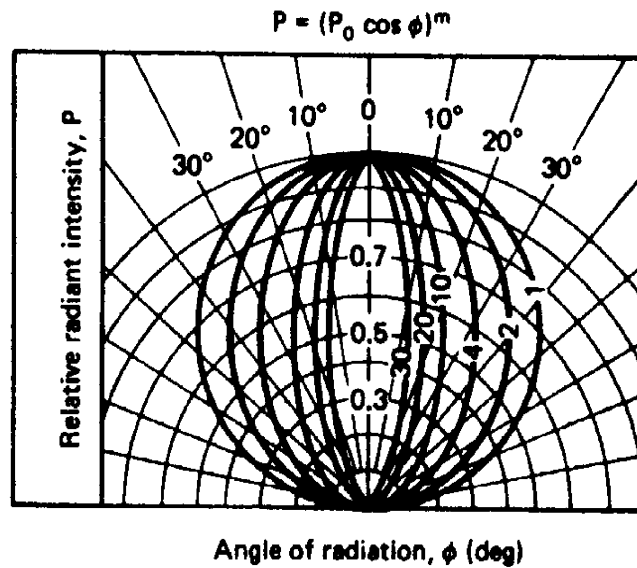


Fig. 3.5. Fontes com larguras de feixe de radiação limitadas.

Com os dados fornecidos pelo fabricante, pode-se usar essas curvas para encontrar um valor aproximado de  $m$ . Em alguns casos, os fabricantes especificam somente os pontos de 50% de intensidade (pontos de meia potência). Interpolação pode ser empregada nas curvas da Figura 3.5. Por exemplo, se os pontos de meia potência forem de 25%, o valor de  $m$  é aproximadamente igual a 7. A quantidade de luz acoplada na fibra pode ser determinada de

$$(3.4)$$

em que  $P_t$  (mW) é a potência da fonte e  $\theta_a$  é a metade do ângulo de aceitação. Como um exemplo, para uma fibra com índices de refração  $n_1 = 1,48$  e  $n_2 = 1,46$ , a abertura numérica é 0,25. Para uma fonte lambertiana a perda de abertura numérica é, então, 12,32 dB.

O fabricante também pode especificar a metade do ângulo do cone de aceitação com a percentagem do fluxo de radiação total dentro do cone da fibra, Figura 3.6. Para uma fibra com metade do cone de aceitação igual a  $14^\circ$  ( $AN = 0,25$ ), cerca de 28% da potência total radiada será capturada.

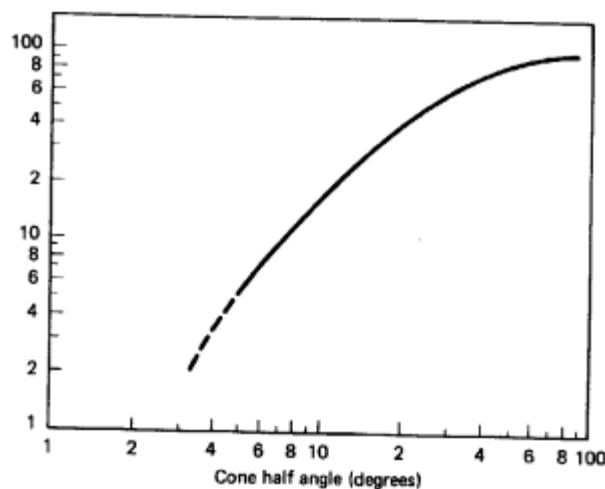


Fig. 3.6. Percentagem de radiação total dentro de um dado cone de radiação.

### 3.1.3. Perdas por reflexão

Comparada às perdas por abertura numérica, a perda por reflexão é quase desprezível. Ela é importante, contudo, nas emendas das fibras. Luz incidindo na entrada da fibra sofre uma variação no índice de refração na interface ar-núcleo. Então, parte da luz é refletida e é perdida.

A proporção de luz que é refletida, com relação à incidente, depende do índice de refração do núcleo. Pode-se definir um coeficiente de reflexão como um índice que dá a fração de luz incidente que é refletida na interface, isto é,

$$\rho = \left( \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 \quad (3.5)$$

A derivação dessa equação é baseada nas fórmulas clássicas da teoria eletromagnética. Em decibéis, a perda por reflexão é

$$(3.6)$$

Como exemplo, para uma fibra com  $n_1 = 1,48$  e  $n_2 = 1,46$ , o coeficiente de reflexão é  $\rho = 0,0374$ , e a perda é  $-0,166$  dB.

## 3.2. Diodos eletroluminescentes

Existem dois tipos de fontes ópticas semicondutoras: os diodos eletroluminescentes (LEDs) e os diodos laser (DLs). Os DLs têm um desempenho superior e uma operação mais cara e complicada que os LEDs.

Com o objetivo de maximizar o comprimento do enlace entre repetidores, a luz emitida pela fonte deve ser tão intensa quanto o estado da arte permite. Além disso, a área de emissão da fonte deve ser menor do que a área do núcleo da fibra, para acoplar eficientemente a potência de luz na fibra. Para ficar dentro do cone de aceitação da fibra, o feixe emitido deve ser direcional. O ideal é que ele seja quase colimado e aproximadamente monocromático para evitar dispersão material.

Os LEDs são os dispositivos mais simples, baratos e confiáveis para se gerar luz. As suas principais desvantagens com relação aos DLs são o espectro mais largo de luz gerada, uma menor eficiência de acoplamento da luz com a fibra e a sua reduzida velocidade de modulação. Por esses motivos, os LEDs são utilizados em sistemas de menor capacidade.

Na primeira janela de transmissão, a dispersão material da fibra, em torno de  $100 \text{ ps}/(\text{nm} \times \text{km})$ , combinada com a largura espectral de  $50 \text{ nm}$ , típica dos LEDs, resulta em um alargamento dos pulsos ópticos de  $5 \text{ ns}/\text{km}$ . Então, os sistemas nessa janela ficam limitados a  $200 \text{ MHz} \times \text{km}$ . Na segunda janela de transmissão, a dispersão quase nula da fibra permite o uso de LEDs no limite de sua capacidade de modulação, situada entre  $100 \text{ Mbps}$  e  $200 \text{ Mbps}$ . Na terceira janela, predomina o uso dos diodos lasers em sistemas de transmissão de alta capacidade.

Existem duas geometrias básicas dos LEDs em uso comercial: a de emissão por superfície e a de emissão lateral. O diodo de emissão por superfície é mostrado na Figura 3.7. Observa-se que a luz é emitida numa direção normal ao plano da junção. Essa superfície emite de forma aproximada à fonte lambertiana, tendo como resultado altas perdas de abertura numérica. Para melhorar o acoplamento da fonte com a fibra, é necessário melhorar a diretividade da fonte. Para isso é usada a geometria de emissão lateral, mostrada na Figura 3.8.

Na configuração da Figura 3.8, o canal formado pelas camadas de confinamento guia a luz para produzir um feixe de saída estreito, com significativa redução de perdas por abertura numérica. A espessura da junção (camada ativa) é da ordem de  $1 \text{ } \mu\text{m}$  a  $2 \text{ } \mu\text{m}$ . Uma fita de

contato restringe a largura da área para  $10\ \mu\text{m}$  a  $20\ \mu\text{m}$ . Este processo resulta numa área ativa retangular da fonte menor que o núcleo da fibra. Graças ao guiamento, a abertura angular do feixe de luz fica reduzida a cerca de  $30^\circ$  no plano perpendicular ao plano da junção. No plano lateral permanece a abertura lambertiana de  $120^\circ$ . A melhor diretividade num dos planos é suficiente para melhorar a eficiência de acoplamento com a fibra. Além disso, ela simplifica os esquemas de focalização da luz através de lentes, que podem melhorar esse acoplamento até determinados limites.

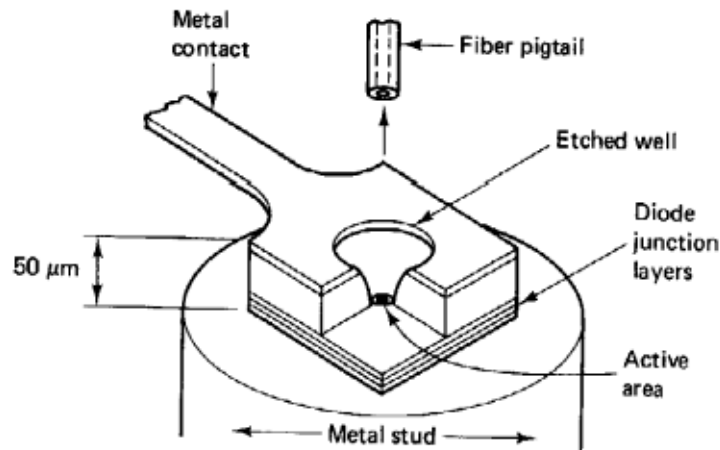


Fig. 3.7. LED de emissão por superfície.

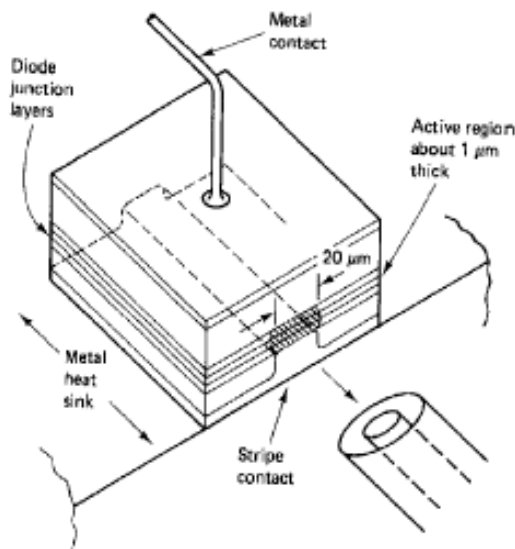


Fig. 3.8. LED de emissão lateral.

### 3.2.1. Característica estática do LED

A característica estática (corrente de entrada versus potência óptica de saída) para os LEDs é aproximadamente linear, como mostra a Figura 3.9. As potências de saída estão reduzidas a uma fração da máxima potência óptica que poderia ser gerada para uma dada corrente injetada, em virtude dos processos internos de recombinação não-radiativa, reabsorção, recombinações superficiais e reflexões internas.

Deve-se notar que embora os LEDs de emissão lateral gerem menos potência óptica no ar, em virtude de sua menor eficiência quântica externa, eles são mais eficientes para colocar a luz na fibra, em razão de sua maior diretividade.

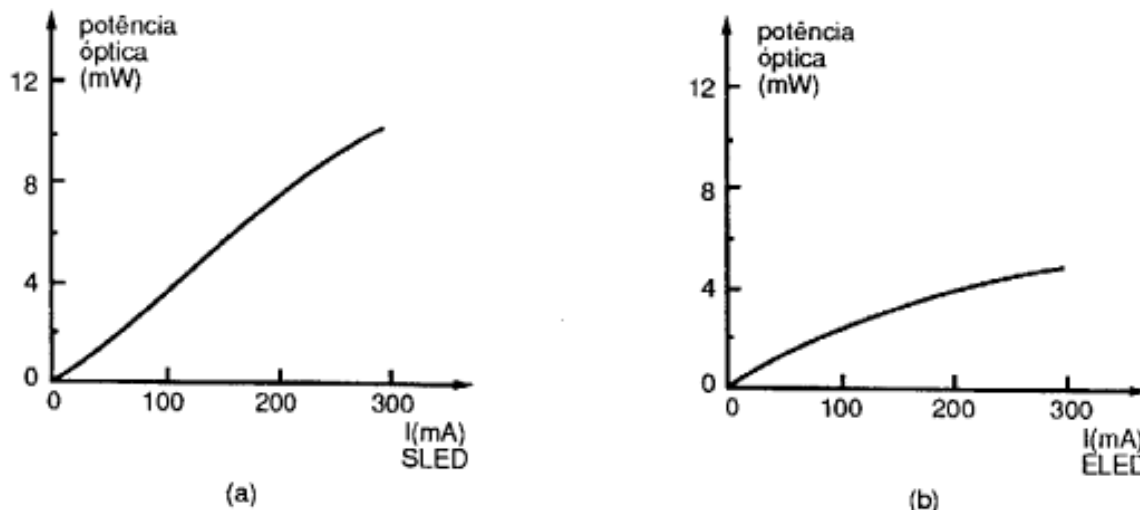


Fig. 3.9. Característica estática dos LEDs: (a) emissão por superfície e (b) emissão lateral. Os níveis de potência óptica se referem à potência no ar.

### 3.2.2. Densidade espectral de luz do LED

Na temperatura ambiente, a largura espectral da luz emitida pelo LED é dada aproximadamente por

$$(3.7)$$

em que  $\lambda_0 (\mu\text{m})$  é o comprimento de onda central. Na prática, os LEDs operando na primeira janela apresentam larguras espectrais entre 25 nm e 40 nm. Para a segunda janela essas larguras se situam entre 50 nm e 100 nm. O espectro de radiação emitida pelo LED é gaussiano, como mostra a Figura 3.10. O aumento da temperatura tende naturalmente a alargar esse espectro.

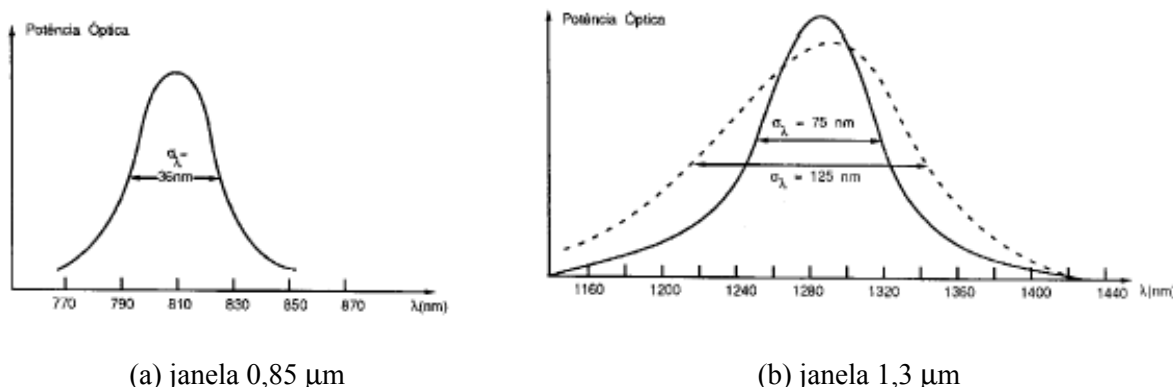


Fig. 3.10. Espectros de emissão típicos de LEDs.

### 3.3. Diodo Laser

A potência máxima de saída dos LEDs é menor que  $-10$  dBm, um valor muito baixo para transmissão em longas distâncias. Eles também são limitados em termos de taxa de modulação. Por sua vez, os lasers possuem uma potência de saída entre 0 dBm a 10 dBm, e podem operar em taxas de transmissão da ordem 10 Gbps a 15 Gbps, sendo limitados apenas pelos dispositivos eletrônicos. Portanto, os lasers são os melhores tipos de luz para a comunicação óptica.

O laser é uma fonte óptica que opera com o princípio da emissão estimulada. Alguns fótons viajando através de um meio excitado interagem com elétrons e lacunas na região de recombinação. Átomos são derivados do seu estado de alta energia para um estado de energia mais baixa, liberando energia na forma de luz. Nesse processo, um único fóton é capaz de produzir vários outros. Os fótons emitidos entram em uma cavidade e são refletidos para formar um intenso feixe monocromático coerente. Fótons emitidos em outras direções são eventualmente perdidos através das paredes da cavidade.

Os lasers podem ser modulados com muita precisão e podem produzir relativa alta potência. Em aplicações de comunicação, estão disponíveis lasers semicondutores que produzem potência acima de 20 mW e outros lasers semicondutores (amplificadores ópticos) que possuem saídas acima de 250 mW. Como a luz do laser é produzida em feixes paralelos, grande parte (50% a 80%) pode ser transferida para a fibra.

Os lasers utilizados na operação de redes de comunicação devem ter uma largura de banda espectral estreita, resposta rápida e ser capaz de acoplar uma quantidade significativa de potência óptica em uma fibra. Os lasers são dispositivos relativamente caros pois, em aplicações de longa distância, o controle de temperatura e o controle de potência de saída são necessários. O controle de temperatura mantém um laser com limiar estável, e o controle de potência garante que o detector possa receber um sinal estável.

O comprimento de onda que o laser produz é uma característica do material usado e sua física de construção. Os lasers precisam ser individualmente desenhados para cada comprimento de onda que produzirá. Os lasers ajustáveis existem e estão começando a se tornar comercialmente disponíveis, mas a faixa de ajuste disponível ainda é muito estreita e o ajuste muito lento.

A modulação de amplitude da maioria dos lasers é difícil pois a potência de saída do laser é geralmente não linear com a potência do sinal de entrada, ou seja, as variações na luz produzida não correspondem diretamente às variações da amplitude do sinal de entrada. No entanto, desenvolvimentos recentes dos lasers estão tornando a modulação analógica uma tecnologia possível. É possível também, modular o sinal depois dele sair do laser com um dispositivo chamado de modulador externo.

Como o sinal é atenuado enquanto trafega na fibra, quanto maior a potência do sinal utilizada, maior a distância de transmissão sem a necessidade de regeneração. E um receptor óptico precisa de uma certa quantidade mínima de potência para cada bit transmitido para detectá-lo. Para aumentar a taxa de bits é necessário aumentar a potência ou aumentar a sensibilidade do receptor. Como os transmissores são limitados em potência e os receptores são limitados na sua sensibilidade, para aumentar a taxa de bits é necessário reduzir a atenuação, diminuindo a distância entre estações, e por conseguinte, aumentando a potência do sinal no receptor.

Para a operação dos lasers em sistemas WDM, é necessário o atendimento das seguintes requisitos:

- Comprimento de onda de operação (ou faixa) – os lasers precisam operar nos comprimentos de onda apropriados para o sistema a ser projetado.

- Estabilidade da frequência (comprimento de onda) – em um sistema WDM, cada laser precisa manter o comprimento de onda dentro de sua banda de alocação. Por exemplo, o laser *Fabry Perot* varia 0,4 nm por grau Celsius de variação de temperatura, mas a maioria dos lasers é significativamente melhor que isto, mas o controle de temperatura é crítico.
- Tempo de comutação e modulação – as características fundamentais de operação de qualquer laser são as técnicas de modulação possíveis e as velocidades em que elas podem operar. No geral, todos os lasers podem ser modulados pelo OOK (*On/Off Keying*) e alguns pelo FSK (*Frequency Shift Keying*). Outras técnicas de modulação requerem um modulador externo colocado em um feixe de luz após ser gerado.
- Faixa de ajuste e velocidade – em vários sistemas WDM propostos, transmissores e/ou receptores precisam ser comutados entre diferentes comprimentos de onda (canais). Quanto mais rápida a comutação, mais estreita será a faixa de canais sobre as quais poderá comutar. Outro ponto é que os lasers ajustáveis são frequentemente capazes de continuamente selecionar uma faixa de comprimentos de onda, ou seja, quando eles são ajustados, eles mudam de um comprimento de onda para outro.

O laser de comunicação mais comum é chamado de laser *Fabry Perot*. Em várias aplicações, este tipo de laser produz um bom resultado, mas como produz relativamente uma grande largura espectral, não é considerado apropriado para aplicações que requerem grandes distâncias, recepção coerente, ou multiplexação de comprimentos de onda. Mas quando uma grade de difração é colocada dentro de uma cavidade, o laser pode produzir uma largura espectral muito estreita (atualmente 0,2 e 0,3 nm). Os lasers usando este princípio são chamados lasers DFB (*Distributed Feedback*).

### 3.3.1. Lasers Fabry Perot

O laser *Fabry Perot* (FP) é conceitualmente um LED com um par de espelhos e como sua cavidade funciona como um interferômetro *Fabry Perot*, acabou herdando esse nome. Para entender o funcionamento desse laser é necessário entender o princípio do funcionamento do filtro *Fabry Perot*.

Em resumo, no filtro *Fabry Perot*, a luz entra na cavidade através de um espelho não totalmente reflexivo e deixa a cavidade através de outro espelho com as mesmas características do outro lado. Somente os comprimentos de onda que ressoam dentro da cavidade conseguem atravessar, enquanto os outros comprimentos de onda são fortemente atenuados. Este dispositivo funciona como uma cavidade ressonante, onde a cavidade ressoa em um comprimento de onda determinado pelo comprimento da cavidade e pela velocidade da luz dentro da cavidade. Quando a distância entre os espelhos é um inteiro múltiplo de meio comprimento de onda, o comprimento de onda selecionado será reforçado enquanto os outros sofreram interferência destrutiva.

No laser FP, a luz é emitida dentro da cavidade ao invés de ser emitida de fora. Esta cavidade de laser é uma cavidade *Fabry Perot*, mas quando a cavidade é muito longa comparada ao comprimento de onda envolvido, surgem vários comprimentos de onda ressonantes e todos são muito próximos uns dos outros. Com isto, a importante característica de filtragem da cavidade *Fabry Perot* é perdida, Figura 3.11.

Para aplicações em sistemas WDM, os lasers FP apresentam problema significativo. Em sistemas WDM, é necessário o transporte de muitos sinais ópticos multiplexados na mesma fibra. Para fazer isto, é importante que cada sinal tenha a mais estreita largura espectral possível e seja o mais estável possível. E os lasers FPs possuem uma largura espectral relativamente grande para o uso nesta aplicação.



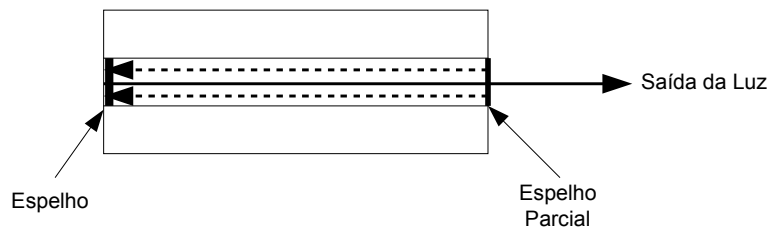


Fig. 3.11. Laser Fabry Perot.

### 3.3.2. Lasers DFB

Os lasers DFB (*Distributed Fiber Grating*) são montados com a colocação da grade Bragg dentro da cavidade do laser FP. A presença da grade de Bragg causa uma variação periódica no índice de refração da região dentro da cavidade ao longo do seu comprimento, e esta variação causa pequenas reflexões. Quando um período da grade de Bragg é múltiplo inteiro de um comprimento de onda de um feixe de luz, ocorre uma interferência construtiva e parte da luz é refletida. Os outros comprimentos de onda sofrem interferência destrutiva e não podem ser refletidos. Esse efeito é mais forte quando o período da grade de Bragg é igual ao comprimento de onda da luz a ser selecionada. No entanto, o dispositivo funciona quando o período da grade é um inteiro múltiplo de um comprimento de onda e somente um modo pode ser transmitido, o modo que é compatível com o comprimento de onda da grade, Figura 3.12.

Em dispositivos mais recentes, a aplicação da grade dentro da região ativa apresentou muita atenuação, portanto, a grade foi movida para uma camada de guia de onda imediatamente adjacente à cavidade. A cavidade onde a luz está propagando, estende-se para dentro da camada adjacente e interage com a grade para produzir o efeito desejado. A princípio, o laser DFB não precisa de espelhos, pois a grade pode ser configurada para produzir reflexão suficiente para o laser acontecer.

Uma forma de melhorar a eficiência do dispositivo é colocar um espelho final de alta refletância em uma ponta da cavidade e um revestimento na outra ponta da cavidade. Neste caso, a grade não precisa ser muito forte, mas o suficiente para garantir que um simples modo domine. Como os lasers DFB são confiáveis nas frequências nas regiões 1.310 nm e 1.520 nm a 1.565 nm, são compatíveis com os amplificadores EDFA e excelentes fontes em aplicações DWDM.

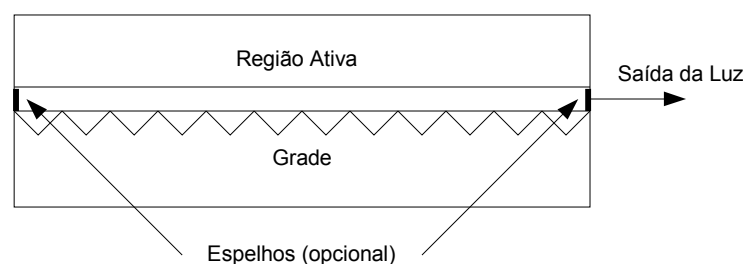


Fig. 3.12. Esquemático do Laser DFB

## 4. RECEPTORES ÓPTICOS

Os receptores ópticos são compostos de um acoplador, um fotodetector e um demodulador, Figura 4.1. O acoplador focaliza o sinal óptico recebido para a entrada do fotodetector. Os fotodetectores utilizados em sistemas de comunicação são fotodiodos semicondutores devido a sua compatibilidade com as fibras ópticas. Frequentemente, o sinal recebido está na forma de pulsos ópticos representando os bits 0 e 1. No processo denominado detecção direta, o sinal recebido é convertido diretamente em corrente elétrica. A demodulação é realizada por um circuito de decisão que identifica os bits como 0 ou 1, dependendo da amplitude da corrente elétrica. A precisão do circuito de decisão depende da relação sinal-ruído (SNR) do sinal elétrico gerado no fotodetector.

O receptor óptico possui um papel importante no desempenho do sistema de transmissão, caracterizado pela taxa de bits errados (BER) detectados pelo receptor. Apesar da BER ser definida como um erro cometido dentro de uma determinada quantidade de bits transmitidos, ela é dependente da taxa de bits. Uma BER de  $10^{-6}$  corresponde, em média, a um bit errado a cada um milhão de bits transmitidos. A maioria dos sistemas de comunicação especifica uma  $BER \leq 10^{-9}$  como requisito de operação, sendo que alguns ainda requerem uma BER tão pequena quanto  $10^{-14}$ .

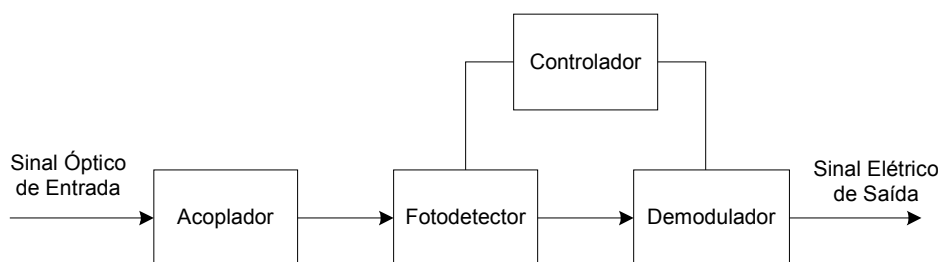


Fig. 4.1 Receptor óptico

A sensibilidade é um dos parâmetros utilizados para se medir o desempenho de um receptor óptico. É usualmente definido como a potência óptica média mínima que deve ser recebida no receptor óptico para se garantir uma BER especificada. A sensibilidade do receptor depende da SNR, que, por sua vez, depende de várias fontes de ruído que corrompem o sinal recebido. Mesmo em um receptor perfeito, alguns ruídos são introduzidos pelo próprio processo de fotodetecção. A sensibilidade do receptor é determinada para efeito cumulativo de todos os possíveis mecanismos que degradam a SNR no circuito de decisão. Em geral, isso também depende da taxa de bits, pois a contribuição de algumas fontes de ruído aumenta proporcionalmente com a largura de banda do sinal.

Os tipos predominantes de fotodetectores usados em sistemas de comunicação utilizam o princípio da ionização em um material semicondutor, e os outros dispositivos apenas utilizam uma variação deste princípio. Existem três tipos de receptores ópticos, os fotocondutores, os fototransistores e os fotodiodos.

Os fotocondutores são os mais simples receptores, e consistem de uma peça de material semicondutor não dopado com contatos elétricos conectados. Uma voltagem é aplicada nos contatos que gera um campo elétrico, e quando um fóton chega ao semicondutor, é absorvido criando um par elétron/buraco. Devido ao campo elétrico, o elétron migra para o contato positivo e o buraco para o contato negativo. Com isto, a resistência do dispositivo sofre variação com a quantidade de luz chegando sobre ele. Este tipo de detector é perfeitamente útil

para grandes comprimentos de onda (10 a 30  $\mu\text{m}$ ), mas não é apropriado para aplicações em comunicação.

Os fototransistores são dispositivos similares aos transistores BJTs, a diferença é que os transistores são amplificadores e, nos fototransistores, o ganho é controlado pela quantidade de luz que chega ao dispositivo. Os fototransistores não são usados em aplicações de comunicação, o uso mais comum é em sistemas de alarmes e em controles remotos. Os fototransistores são também ocasionalmente utilizados como parte de um circuito integrado, sendo referenciados como IPDs (*Integrated Preamplifier Detectors*).

Os fotodiodos são os fotodetectores utilizados em aplicações de comunicação. Esses dispositivos convertem a luz diretamente em corrente elétrica. Um diodo ideal pode converter um fóton em um elétron de corrente. Isto significa que a corrente de saída de um dado dispositivo é muito pequena e um amplificador externo é necessário antes que o sinal possa ser distribuído pelo receptor. Os dois principais tipos de fotodetectores são os diodos PIN e os Fotodiodos Avalanche (APD).

#### 4.1. Fotodetectores

O princípio básico da fotodeteção é ilustrado na Figura 4.2. Fotodetectores são construídos com materiais semicondutores. Os fótons incidentes num semicondutor cedem energia para elétrons na banda de valência. Como resultado, esses elétrons são excitados para a banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência. Quando uma tensão externa é aplicada no semicondutor, os pares elétron-lacuna originam uma corrente elétrica, denominada de fotocorrente.

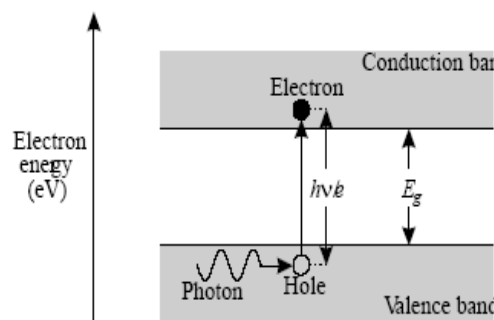


Fig. 4.2. Princípios básicos da fotodeteção em um semicondutor.

De acordo com a mecânica quântica, cada elétron pode absorver somente um fóton para a transição entre níveis de energia. Então a energia do fóton incidente deve ser pelo menos igual à energia da banda proibida para que fotocorrente seja gerada. Isto também está ilustrado na Figura 4.2. Portanto, tem-se a seguinte restrição para a utilização do material semicondutor como fotodetector:

$$h f_c = \frac{hc}{\lambda} \geq eE_g \quad (4.1)$$

em que  $c$  é a velocidade da luz e  $e$  é a carga do elétron.

O maior valor de  $\lambda$  para o qual (4.1) é satisfeita é denominado comprimento de onda de corte. A Tabela 4.1 lista a banda de energia e o comprimento de onda de corte para alguns materiais semicondutores. Observa-se que o silício (Si), o arseneto de gálio (GaAs) e o fosfeto de índio (InP) não podem ser usados como fotodetectores nas bandas de 1,3  $\mu\text{m}$  e 1,55  $\mu\text{m}$ .

Embora o germânio (Ge) possa ser utilizado nessas bandas, ele tem algumas desvantagens que reduzem a sua aplicação. Fotocondutores de silício são muito utilizados na banda de 0,8  $\mu\text{m}$ .

Tabela 4.1. Banda de energia para diversos materiais semicondutores.

Material	$E_g$ (eV)	$\lambda_{\text{corte}}$ ( $\mu\text{m}$ )
Si	1,17	1,06
Ge	0,775	1,6
GaAs	1,424	0,87
InP	1,35	0,92
$\text{In}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{As}$	0,75	1,65
$\text{In}_{1-0,45y}\text{Ga}_{0,45y}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,75 a 1,35	1,65 a 0,92

A fração da energia do sinal óptico que é absorvida e origina a fotocorrente é chamada de eficiência do fotodetector. Em transmissão sobre longas distâncias e altas taxas de bits, a energia óptica é escassa e então é importante que o fotodetector tenha uma eficiência o mais próximo de 1 possível. Isto pode ser alcançado usando-se um semiconductor com espessura otimizada. A potência absorvida pelo semiconductor com uma espessura  $L$   $\mu\text{m}$  pode ser escrita como

$$(4.2)$$

em que  $P_{in}$  é a potência do sinal óptico incidente e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção do material. Então

$$\eta = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = (1 - e^{-\alpha L}) \quad (4.3)$$

O coeficiente de absorção depende do comprimento de onda, sendo zero para comprimentos de onda maiores que o comprimento de onda de corte. Então, o semiconductor é transparente para comprimentos de onda maiores do que o seu comprimento de onda de corte. Valores típicos de  $\alpha$  são da ordem de  $10^4/\text{cm}$ , de modo que para se alcançar uma eficiência  $\eta > 0,99$ , é necessária uma espessura da ordem de 10  $\mu\text{m}$ . A área do fotodetector é escolhida suficientemente grande para que toda a potência óptica incidente seja capturada por ela. Os fotodetectores têm uma largura de banda de operação muito grande, uma vez que o semiconductor funciona como fotodetector para todos os comprimentos de onda menores do que o comprimento de onda de corte. Assim, um fotodetector projetado para a banda de 1,55  $\mu\text{m}$  pode também ser usado na banda de 1,3  $\mu\text{m}$ .

Os fotodetectores são caracterizados por suas responsividades. Se ele produz uma fotocorrente média  $I_p$ , quando a potência óptica incidente é  $P_{in}$ , a responsividade é

$$R = \frac{I_p}{P_{in}} \quad \left( \frac{\text{A}}{\text{W}} \right) \quad (4.4)$$

Como uma potência óptica incidente corresponde a uma incidência de  $P_{in}/hf$  fótons/s, em média, e uma fração  $\eta$  desses fótons incidentes são absorvidos e geram elétrons no circuito externo, pode-se escrever

$$R = \frac{e\eta}{hf} \quad (4.5)$$

A responsividade é normalmente expressa em termos do comprimento de onda como

$$R = \frac{e\eta\lambda}{hc} = \frac{\eta\lambda}{1,24} \frac{\text{A}}{\text{W}} \quad (4.6)$$

em que  $\lambda$  é dado em  $\mu\text{m}$ . Como  $\eta$  pode ser muito próximo de 1, as responsividades alcançadas são da ordem de 1 A/W em 1,3  $\mu\text{m}$  e 1,2 A/W em 1,55  $\mu\text{m}$ .

Na prática, o simples uso de uma placa semicondutora como fotodetector não resulta em alta eficiência. Isto ocorre porque muito dos elétrons da banda de condução se recombinam com lacunas antes que eles alcancem o circuito externo. Então é necessário enviar rapidamente os elétrons da banda de condução para fora do semicondutor, impondo um campo elétrico suficientemente intenso na região onde eles são gerados. Este campo pode ser obtido usando-se um semicondutor com uma junção  $pn$ , no lugar de uma placa homogênea, e aplicando-se uma voltagem reversa nessa junção, Figura 4.3. Esse fotodetector é chamado de fotodiodo.

Na região de depleção de uma junção  $pn$  é criado um campo elétrico. Tanto a região de depleção como o campo elétrico podem ser aumentados aplicando-se uma voltagem reversa (polaridade positiva no material tipo- $n$  e negativa no material tipo- $p$ ). Neste caso, os elétrons que são gerados pela absorção de fótons dentro ou perto da região de depleção serão acelerados na região tipo- $n$  do semicondutor, antes que eles se recombinem com lacunas na região tipo- $p$ . Este processo é chamado de deriva e dá origem à corrente no circuito externo. Da mesma forma, as lacunas geradas dentro ou próximo da região de depleção derivam através da região tipo- $p$ .

Os pares elétron-lacuna que são gerados distantes da região de depleção caminham basicamente sobre o efeito da difusão e podem-se recombinar sem dar origem a uma corrente no circuito externo. Isto reduz a eficiência do fotodetector. Como difusão é um processo mais lento do que deriva, a corrente de difusão que é gerada pelos pares elétron-lacuna não responde rapidamente em intensidade ao sinal óptico aplicado, o que reduz a resposta do fotodiodo.

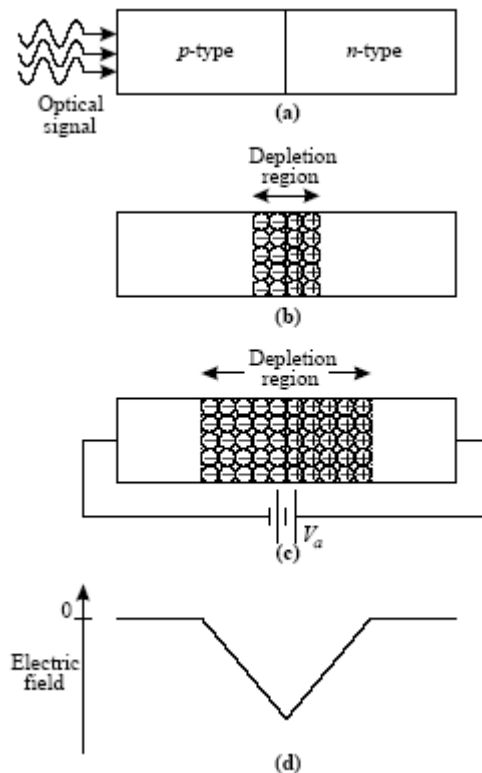


Fig. 4.3. Junção  $pn$  polarizada reversamente. (a) Fotodiodo  $pn$ . (b) Região de depleção sem voltagem aplicada. (c) Região de depleção com voltagem aplicada. (d) Campo elétrico na região de depleção.

## 4.2. Diodos PIN

O diodo PIN funciona como um LED reverso, ao invés da luz ser emitida, é absorvida na junção  $pn$ . Em uma junção  $pn$  reversa não há corrente até que ocorra a excitação de elétrons da camada de valência para a camada de condução dentro da zona de depleção. Com isto, fótons com energia suficiente, podem ser absorvidos pela junção e excitar um elétron da camada valência para a camada de condução, gerando uma lacuna na camada de valência. O elétron livre e a lacuna, que foram criados pela absorção do fóton, são atraídos pelas suas cargas opostas em cada lado da junção, por consequência, a corrente flui, Figura 4.4.

Como a zona de depleção é extremamente fina, a maior parte da luz atravessa sem ser absorvida na junção. Para solucionar este problema, a junção é estendida pela adição de uma camada muito fina e levemente dopada, chamada de zona intrínseca entre as zonas dopadas  $p$  e  $n$ . Por isto, o dispositivo é chamado de diodo PIN, onde a camada intrínseca “I” possui apenas uma pequena quantidade de dopante, e atua com uma grande camada de depleção.

Isso aumentou as chances do fóton incidente ser absorvido, devido ao aumento do volume de material da zona de depleção. Com o aumento da junção, ocorreu a redução da capacitância através da junção, e o aumento da velocidade de resposta do dispositivo. O aumento da largura da camada de depleção favoreceu o transporte pelo processo de derivação (*drift*) que é mais rápido que o processo de difusão. Com isto, diminui o tempo de resposta do fotodetector para próximo de algumas dezenas de picosegundos.

Na operação dos diodos PIN, a energia necessária para o fóton ser absorvido precisa ser suficiente para excitar um elétron através da camada de depleção, ou seja, não seja absorvido. No entanto, o material absorverá fótons de qualquer energia maior que sua energia de intervalo de banda. Então, quando discutindo diodos PIN, é comum falar sobre comprimento de onda de corte. Tipicamente diodos PIN operarão am qualquer comprimento de onda menor que o comprimento de onda de corte. Isto sugere a idéia de usar um material com uma baixa energia intervalo de banda para todos os diodos PIN indiferente do comprimento de onda. Infelizmente, menor a energia do intervalo de banda, maior a corrente escura (ruído térmico).

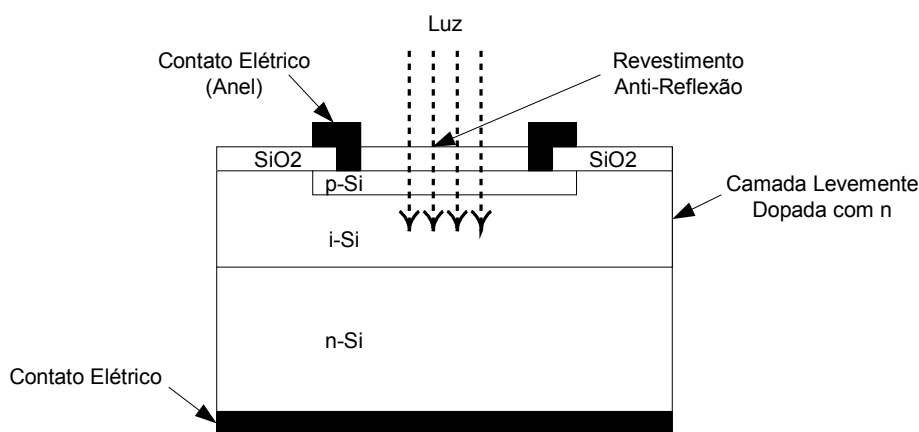


Fig. 4.4. Esquemático de um diodo PIN de silício.

### 4.3. Fotodiodos Avalanche (APDs)

Os fotodiodos avalanche (APD) amplificam o sinal durante o processo de detecção. Eles utilizam um princípio similar ao dos tubos fotomultiplicadores usados na detecção de radiação nuclear. No tubo fotomultiplicador, um fóton atuando no dispositivo libera um elétron que é acelerado através de um campo elétrico até atingir o material alvo. Esta colisão com o alvo causa um impacto ionizante que libera múltiplos elétrons. Esses elétrons são então acelerados através do campo elétrico até atingirem outro alvo que libera mais elétrons. Esse processo é repetido até os elétrons finalmente atingirem um elemento coletor. Desta forma, através de vários estágios, um único fóton resultou em uma corrente com muitos elétrons, Figura 4.5.

Os tubos fotomultiplicadores são tubos de vácuo com alvos metálicos arrumados em estágios por todo o comprimento do tubo. E os APDs utilizam o mesmo princípio, mas a multiplicação toma lugar dentro do próprio material semiconductor. Este processo nos APDs resulta, geralmente, em uma amplificação interna entre 10 e 100 vezes.

Na forma básica, um APD é justamente um diodo PIN, mas com uma inclinação reversa grande (50 volts), em comparação, os diodos PIN mais comuns possuem uma inclinação reversa apenas de 3 volts ou menos. Anteriormente, alguns APDs no mercado necessitavam de uma inclinação reversa de várias centenas de volts, mas recentemente menores voltagens foram atingidas. A principal diferença estrutural entre um APD e um diodo PIN é que a zona “I” chamada  $\pi$  no APD, é levemente dopada com “p”, ao invés da dopagem com “n” no diodo PIN, e é tipicamente mais espessa que a zona “I”. O APD é cuidadosamente desenhado para garantir um campo elétrico uniforme através de toda a camada.

Na operação do APD, os fótons incidentes geralmente passam diretamente através da junção n<sup>+</sup>-p devido a sua fineza, e são absorvidos na camada  $\pi$ . Esta absorção produz um elétron livre na banda de condução e uma lacuna na banda de valência. O potencial elétrico através da camada  $\pi$  é suficiente para atrair os elétrons e as lacunas, em direções opostas, aos dois contatos. Os elétrons são atraídos em direção à camada n<sup>+</sup> no topo do dispositivo pois com inclinação reversa possui carga positiva. O gradiente potencial através da camada  $\pi$  não é suficiente para as cargas ganhem energia suficiente para ocorrer a multiplicação. Em torno da junção entre as camadas n<sup>+</sup> e p, o campo elétrico é tão intenso que os elétrons são fortemente acelerados, ganham energia, e colidem com outros átomos na grade produzindo novos pares de elétron/lacuna. Este processo é chamado de ionização de impacto. As novas cargas liberadas, elétrons e lacunas, são aceleradas por si próprias, em direções opostas, e podem colidir novamente.

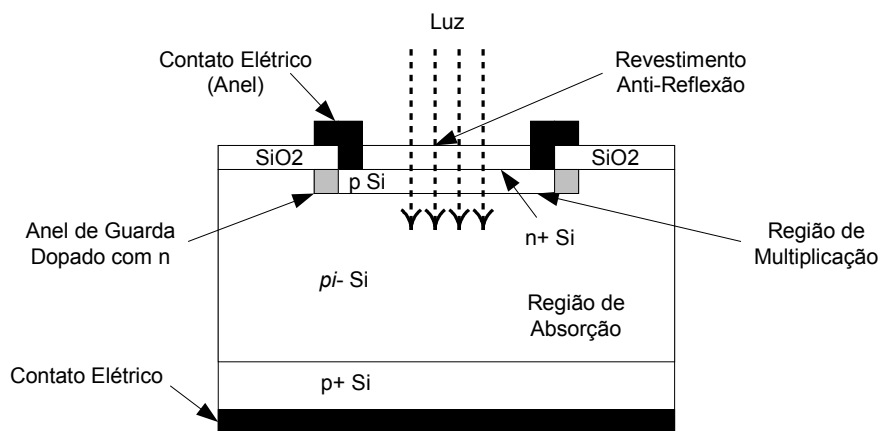


Fig. 4.5. Esquemático de APD.





## 5. DISPOSITIVOS ÓPTICOS

### 5.1. Amplificadores ópticos

O amplificador óptico é um dispositivo que amplifica diretamente o sinal óptico sem a necessidade de conversão OEO. A luz é diretamente amplificada, e como o sinal óptico é amplificado sem a conversão OEO, ocorre a diminuição da probabilidade de erro. A amplificação óptica não é dependente da velocidade ou do formato do código de transmissão. Em um sistema WDM, o amplificador óptico amplifica todos os comprimentos de onda, permitindo a construção de sistemas WDM. Desta forma, os amplificadores ópticos, responsáveis pela amplificação direta da luz, permitem a expansão dos comprimentos das fibras entre a fonte dos dados e o destino.

Os amplificadores podem ser construídos com tecnologia semicondutora, com tecnologia de guias de onda planares e com fibras. Os dois tipos de amplificadores em uso são os amplificadores ópticos semicondutores (SOA) e os amplificadores de fibras dopadas com érbio (EDFA). Os SOAs podem ser fabricados a partir de qualquer laser semicondutor, com a adição de um rabicho na face ainda não conectada à fibra para permitir à luz entrar no dispositivo, o aumento do comprimento da região de ganho em 3 vezes, e a colocação de um revestimento anti-reflexão em ambas as faces do laser. Os EDFAs são os amplificadores mais importantes, e são de baixo custo, alta eficiência e baixo ruído. O sinal óptico passa ao longo de um comprimento curto de uma fibra especial, sem deixá-la e sem convertê-la em sinal elétrico, e é amplificado. Atualmente, existe uma grande classe de amplificadores ópticos baseados nos mesmos princípios do EDFA.

#### 5.1.1. Amplificadores de Fibra Dopada com Érbio (EDFAs)

Os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFAs) são constituídos por alguns metros de fibra, em média 10 metros, dopados com um elemento químico raro, o Érbio, na forma do íon  $\text{Er}^{+++}$ . Quando essa fibra é alimentada com luz em um comprimento de onda específico, o érbio atua produzindo um ganho ao sinal óptico entrante. O princípio de funcionamento é justamente o do laser. Os íons de Érbio são capazes de existir em vários estados de energia. Quando um íon de Érbio está no estado de alta energia, um fóton de luz irá estimulá-lo a desistir de parte de sua energia, também em forma de luz, e retornar a um estado de menor energia e maior estabilidade. Isto é chamado de emissão estimulada. Para o funcionamento deste princípio, é necessário levar os átomos de Érbio ao estado de excitação. Portanto, um diodo laser gera um feixe de luz de alta potência entre 10 mW e 200 mW em um comprimento de onda, de forma que os íons de érbio absorvem a luz e mudam para o estado de excitação.

Os EDFAs possuem as seguintes vantagens: alta eficiência na transferência de potência do amplificador para o sinal, amplificação direta e simultânea de uma grande região de comprimentos de onda, saturação de saída maior que 1 mW, longo tempo de ganho constante, larga faixa dinâmica, baixa figura de ruído, independência de polarização e é adequado para aplicações em longa distância. As suas desvantagens são: dispositivos são relativamente grandes, emissão espontânea de luz amplificada, *cross-talk* e saturação de ganho. Apesar do dispositivo ser alimentado por energia elétrica, a amplificação do sinal é totalmente óptica.

O princípio básico do EDFA é mostrado na Figura 5.1. Em sua operação, um feixe de luz de alta potência é misturado com um sinal entrante usando um acoplador seletivo de comprimento de onda. A luz misturada é guiada dentro de uma seção de fibra com os íons de érbio incluídos no núcleo. Esse feixe de luz de alta potência excita os íons de érbio para seus estados de alta energia. Quando os fótons pertencentes ao sinal, em um comprimento de onda diferente da fonte de luz, encontram os átomos de érbio excitados, os átomos de érbio desistem

de parte de suas energias para o sinal e retornam aos seus estados de baixa energia. Isto não ocorre para todos os comprimentos de onda da luz do sinal, apenas uma faixa de 24 nm é amplificada.

Um ponto importante é que o érbio desiste de sua energia na forma de mais fótons, que estão exatamente em mesma fase e direção do sinal que está sendo amplificado. Desta forma, o sinal é amplificado somente em sua direção de transmissão. Com isto, toda a potência adicionada ao sinal é guiada no mesmo modo que sinal a ser amplificado na fibra. Também existe um isolador localizado na saída para prevenir as reflexões retornando da fibra conectada. Estas reflexões atrapalham o funcionamento do amplificador, podendo até transformar o amplificador em um laser.

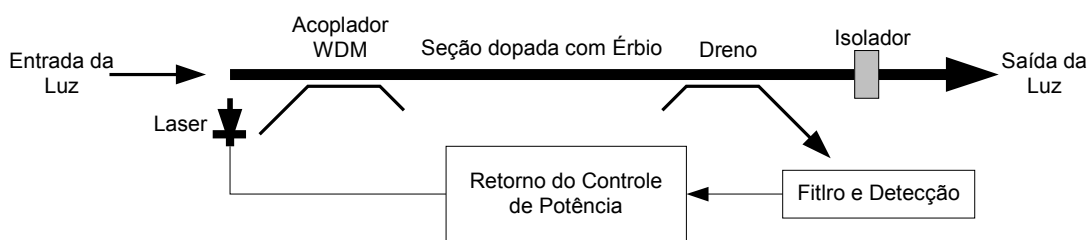


Fig. 5.1. Esquemático de um EDFA.

### 5.1.2. Amplificadores ópticos semicondutores (SOAs)

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs – *Semiconductor Optical Amplifier*), também conhecidos como amplificadores de laser semicondutores (SLA – *Semiconductor Laser Amplifier*), são caracterizados pela dependência de polarização, ganhos relativamente altos (da ordem de 20 dB), potência de saturação de saída entre 5 dBm e 10 dBm, larga banda de transmissão e operação nas regiões de comprimentos de onda de 0,8  $\mu\text{m}$ , 1,3  $\mu\text{m}$  e 1,5  $\mu\text{m}$ . Por serem compactos, podem ser integrados com outros dispositivos semicondutores ou componentes ópticos, tendo também alta figura de ruído, alto nível de *crosstalk* e necessitam de conversão OEO. Os SOAs podem ser de dois tipos: SOA simples e TWSLA.

Os SOAs simples são quase similares aos lasers FP, onde a face posterior possui um rabicho para permitir a entrada do sinal de luz. O principal problema é que vem sendo difícil fazer SOAs mais longos do que 450  $\mu\text{m}$ . Com esta distância curta, não existe ganho suficiente para se obter uma boa amplificação com apenas uma passagem pelo dispositivo. A solução encontrada é manter as características das faces reflexivas (espelhos) do laser. Os SOAs típicos possuem um espelho reflexivo em torno de 30%. Desta forma, o sinal possui a chance de refletir algumas vezes dentro da cavidade e obter uma boa amplificação. No entanto, esse é o princípio de funcionamento do laser, ou seja, um amplificador cercado por espelhos. A operação do SOA deve ficar restringida ao limiar do laser, para não se formar um laser independente, mas isso acaba limitando as características do amplificador devido aos efeitos de saturação. Outra desvantagem é que as ressonâncias *Fabry Perot* da cavidade acabam estreitando a banda passante e gerando uma amplificação desigual dos canais WDM.

Os amplificadores a laser semicondutores de ondas viajantes (TWSLAs) se diferem dos SOAs pois a cavidade é alongada (dobro ou triplo) para permitir espaço suficiente para ganho suficiente. A face posterior é revestida com material anti-reflexão, e tem um rabicho criado para permitir a entrada de luz incidente. A face de saída do amplificador é a mesma para o laser, é também revestida com material anti-reflexão, Figura 5.2. Como existe falta de retorno, o TWSLA pode operar acima do limiar de laser, dando alto ganho por unidade de comprimento

do que um simples SOA. Ganhos acima de 25 dB sobre uma banda de transmissão de 40 nm já foram reportados.

Os SOAs apresentam algumas limitações:

- não podem entregar muita potência, apenas alguns mWs. Um canal de transmissão pode operar com essa potência, mas em um sistema WDM, é geralmente necessária a potência de transmissão acima de alguns mWs por canal;
- o acoplamento da fibra de entrada tende a não ser bom, reduzindo a eficiência do amplificador. Para solucionar este problema, o amplificador precisa de ganho adicional para superar a perda na entrada.
- tendem a ser muito ruidosos e altamente sensíveis à polarização;
- podem produzir severo *crosstalk*, quando múltiplos canais ópticos são amplificados. Esta característica faz dos SOAs inúteis como amplificadores em sistemas WDM, mas ganham a habilidade de atuar como conversores de comprimentos de onda, ou como simples portas lógicas em sistemas de redes ópticas.

A maior vantagem dos SOAs é que eles podem ser integrados com outros componentes em um simples substrato planar. Por exemplo, um dispositivo transmissor WDM pode ser construído incluindo talvez 10 lasers, em diferentes comprimentos de onda, e um acoplador, todos no mesmo substrato. Nesse caso, o SOA pode ser integrado em uma saída para superar algumas das perdas de acoplamento.

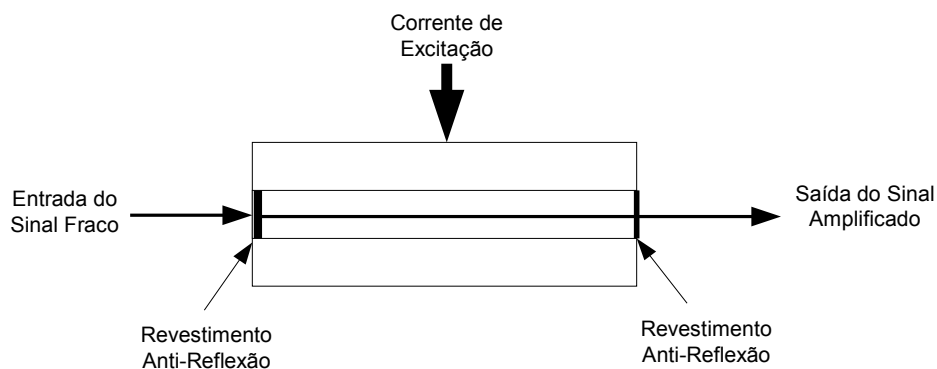


Fig. 5.2. Amplificador óptico a semicondutor.

## 5.2. Repetidores ópticos

Antes do surgimento dos amplificadores ópticos, os sinais ópticos só podiam ser propagados com a conversão para a forma elétrica, e depois, regenerados, amplificados e novamente convertidos para a forma óptica. O amplificador apenas recebe o sinal e o amplifica, incluindo o ruído e qualquer dispersão presente. Contudo, os amplificadores são mais simples, mais baratos, e não são sensíveis à codificação usada na fibra. Como os amplificadores se tornaram comercialmente disponíveis apenas após 1992 e só agora estão começando a serem utilizados nos novos sistemas de transmissão, os repetidores foram os dispositivos escolhidos para propagar os sinais ópticos.

Os repetidores são dispositivos responsáveis pela reconstituição do sinal óptico degradado ao longo da transmissão. Os repetidores são receptores que reconstróem, temporizam, e amplificam um determinado fluxo de bits para transmissão, Figura 5.3. Com isto, o sinal repetido possui toda a dispersão e o ruído removidos. Por executar estes três processamentos, os repetidores são reconhecidos por desempenhar os 3Rs (Reamplificação,

Reconstrução e Retemporização). Existem também repetidores 2R que desempenham somente reamplificação e reconstrução, mas não retemporização.

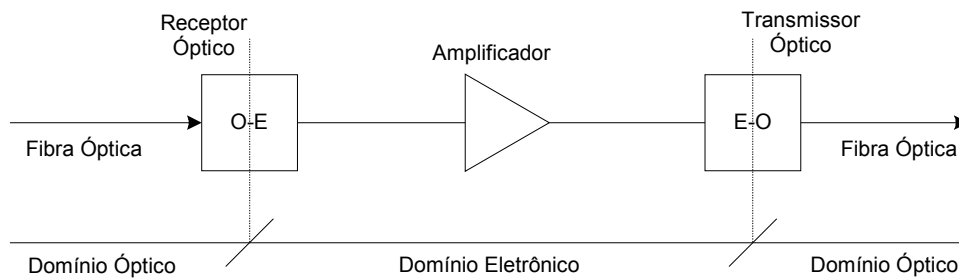


Fig. 5.3. Repetidor óptico.

Os repetidores são dispositivos muito complexos e mais caros que os amplificadores simples. Eles são também muito inflexíveis, pois necessitam ser construídos especificamente para o comprimento de onda, o protocolo, e a velocidade de sinal transmitido. Eles não conseguem repetir múltiplos comprimentos de onda. Para transmitir os diferentes comprimentos de onda em uma mesma fibra com repetidores, os comprimentos de onda precisam ser separados em cada repetidor, repetidos separadamente e finalmente multiplexados. Este processo é mecanicamente complexo e requer um repetidor separado para cada comprimento de onda, e os repetidores que suportam múltiplos comprimentos de onda ainda são caros. Em sistemas multimodo, onde dispersão é o principal fator limitador da distância, os repetidores eletrônicos vão continuar a ser a melhor forma de transmissão de um sinal. Mas em sistemas monomodo de longa distância, a dispersão não é um problema, e portanto, os amplificadores ópticos estão rapidamente substituindo os repetidores.

## 5.3. Componentes de ligação

### 5.3.1. Emendas

As emendas são utilizadas para unir comprimentos de fibras ou cabos, de forma definitiva. Perdas, durabilidade e facilidade de confecção são as questões fundamentais a serem abordadas em relação às emendas. O parâmetro fundamental a ser considerado nas emendas é a atenuação, a qual se manifesta de duas formas:

- Perdas intrínsecas: oriundas das diferenças entre as fibra a serem emendadas, como diferenças na variação dos índices, diferenças na elipsidade e na excentricidade do núcleo.
- Perdas extrínsecas: estão relacionadas com a natureza da própria emenda; dependem do alinhamento entre as fibras, da contaminação, casamento do índice de refração entre as extremidades, etc.

Estas duas contribuições combinam-se gerando uma atenuação total menor que a soma aritmética de ambas, apresentando níveis muito baixos. A respeito dos tipos de emendas, tem-se basicamente:

**Emenda de Fusão:** Consiste no derretimento das extremidades das duas fibras conjuntamente, fundindo-as., obtendo-se emendas que apresentam perdas entre 0,05 dB e 0,2 dB (em geral abaixo de 0,1 dB). Tal procedimento é obtido através de um emendador de fusão, que é um aparelho que possui, como peças chave, os seguintes elementos: soldador de fusão;

mecanismos para alinhamento mecânico das fibras; câmara de vídeo ou microscópio; e instrumentos para checar a potência ótica transmitida através da emenda.

**Emenda Mecânica:** As emendas mecânicas consistem na junção de duas fibras através de estruturas de travamento ou de colagem de suas extremidades. Apresentam maiores perdas e maior custo de consumo que as emendas de fusão, porém requerem equipamentos menos sofisticados para serem efetuadas.

### 5.3.2. Conectores

Os conectores são úteis na interligação temporária entre equipamentos que podem ser rearranjados. Podem ser citados como exemplos:

- interface entre dispositivos e redes de área local;
- conexões com enlaces de dados de pequenas distâncias,
- ponto onde um sistema de telecomunicações entra em um edifício;
- conexões entre redes e equipamentos terminais.

Os conectores apresentam atenuação mais alta que a encontrada nas emendas, situando-se, tipicamente, entre 0,2 e 0,7dB. As perdas em uma conexão são dadas por uma série de fatores, advindos da maneira como a luz é guiada nas fibras, tais como: sobreposição dos núcleos das fibras; alinhamento dos eixos das fibras; abertura numérica da fibra; espaçamento das fibras; e reflexão na extremidades das fibras.

### 5.3.3. Acopladores

Em diversas situações faz-se necessária em um sistema de comunicações a conexão de muitos terminais. Por exemplo no caso de uma rede local em anel, em cada ponto em que um dispositivo é conectado à rede, o sinal precisa ser dividido em uma parte que é entregue ao dispositivo e outra que deve continuar ao longo da rede. Uma outra aplicação dos acopladores é como separadores ou combinadores em um sistema WDM (multiplexação por divisão de comprimento de onda). Pode-se através de um acoplador combinar sinais gerados em diferentes comprimentos de onda e transmiti-los em um mesmo canal (fibra).

Os acopladores sensíveis ao comprimento de onda são chamados de acopladores WDM, enquanto os acopladores destinados apenas a divisão de potência em um mesmo comprimento de onda recebem o nome de *splitter*.

Os acopladores, em sua maioria, são dispositivos passivos que dividem sinais entre duas ou mais portas de saída, o que ocasiona as chamadas perdas de acoplamento. As perdas de acoplamento são definidas como a razão entre a potência presente em uma determinada porta de saída e a potência de entrada.

Além das perdas características de acoplamento (em uma divisão do sinal, por igual, em duas fibras a perda característica é de 3dB), podem existir perdas adicionais dado que são componentes passivos.

Os acopladores podem ser classificados em direcionais e bidirecionais. Nos chamados direcionais o acoplamento só funciona de forma eficiente em um sentido de propagação, um sinal sendo transmitido em sentido contrário sofre grandes perdas, sendo praticamente aniquilado.

No projeto ou escolha de acopladores são fatores relevantes: número de portas; sensibilidade à direção da transmissão de luz; seletividade de comprimento de onda; tipo de fibra (monomodo ou multimodo); atenuação do sinal; e custo.

Quanto à forma, os acopladores podem ser dos seguintes tipos: T ou Y, árvore, estrela.

Em relação à tecnologia são realizáveis:

- Acopladores de fibra. Os acopladores de fibra são construídos a partir da fusão de fibras, em geral com parte da casca removidas para unificar os seus núcleos neste trecho de acoplamento. Na realidade isto produz um acoplador com duas entradas e duas saídas, geralmente uma destas entradas é isolada ou cortada, gerando um acoplador Y.
- Acopladores por óptica integrada. Constituem-se de guias de onda fabricados em uma fina camada sobreposta a um substrato. Tais estruturas podem ser confeccionadas em vidro, semicondutores e niobato de lítio.

## 6. SISTEMA WDM

O sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma evolução do sistema óptico ponto-a-ponto tradicional. O seu princípio de funcionamento é essencialmente o mesmo da multiplexação pela divisão em frequência (FDM), em que vários sinais são transmitidos através do mesmo meio com o uso de diferentes portadoras. A tecnologia WDM possibilita a transmissão de várias portadoras ópticas em uma mesma fibra, cada uma delas carregando determinado fluxo de dados.

A técnica WDM utiliza a banda espectral na região de 1.300 nm e 1.500 nm, que são as duas janelas de comprimento de onda onde as fibras ópticas possuem perda de sinal muito baixa. Inicialmente, cada janela era usada para transmitir apenas um único sinal digital. O desenvolvimento dos componentes ópticos, como os *lasers* de realimentação distribuída (DFB), os amplificadores de fibras dopadas com érbio (EDFAs), e os fotodetectores e os filtros ópticos, permitiu a utilização de cada janela para a transmissão de vários sinais ópticos, cada um ocupando uma pequena fração da janela total disponível.

Os sistemas WDM evoluíram para as tecnologias DWDM e CWDM. O DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) refere-se a sistemas que utilizam um espaçamento menor que 200 GHz entre os comprimentos de onda. O CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) refere-se a sistemas mais baratos que utilizam espaçamentos maiores entre os comprimentos de onda, que ficam normalmente em torno de 0,1 GHz.

### 6.1. Sistemas WDM ponto-a-ponto e em anel

Um sistema de transmissão WDM ponto-a-ponto é formado pela ligação de dois ou mais nós. Em um nó estão presentes os equipamentos WDM de transmissão e multiplexação e, no outro nó, os equipamentos WDM de recepção e demultiplexação. A Figura 6.1 ilustra um sistema WDM ponto-a-ponto constituído por três nós. Nesse enlace, o nó A transmite os dados para o nó C através de um nó intermediário B. O sistema pode operar nas bandas S, C, L e U, ou uma combinação delas, com os sinais ópticos espaçados de 100 GHz (0,8 nm) ou 50 GHz (0,4 nm), de acordo com o padrão ITU.

No nó A, os sinais elétricos de equipamentos de transmissão são inseridos nos dispositivos ópticos que os convertem em diferentes comprimentos de onda. Esses equipamentos podem ser da plataforma SDH, *switches* ATM, roteadores IP ou LSRs (*label switch routers*). Os níveis de potência de cada sinal óptico são ajustados usando-se atenuadores ópticos controláveis para evitar efeitos não-lineares na fibra. Os sinais ópticos são multiplexados em sinal WDM por um guia de onda seqüencial (AWG) ou por um multiplexador-acoplador. O sinal WDM é amplificado antes de ser transmitido na fibra e, no nó intermediário B, o sinal é amplificado novamente antes do demultiplexador AWG. Cada sinal óptico demultiplexado é inserido em um comutador óptico (OADM ou OXC), que pode ser totalmente óptico (OOO) ou óptico-elétrico-óptico (OEO).

No nó C, o sinal óptico é novamente amplificado e demultiplexado em diferentes comprimentos de onda, que são detectados por um conjunto de fotodetectores. Os sinais elétricos já convertidos são encaminhados para as interfaces das redes de dados clientes. Os transponders geralmente desempenham esta função de ser a interface que detecta e converte o sinal da rede WDM em sinal de dados cliente, que podem ser ainda demultiplexados no domínio do tempo para possibilitar taxas de dados menores, Figura 6.2.

Esta conversão é realizada pelos transponders, que serão detalhados neste capítulo. Os transponders também convertem os comprimentos de onda que chegam das redes de dados clientes para a grade ITU de comprimentos de onda. O sinal também pode ser derivado no nó B, se o destino for esse nó, como ilustra a Figura 6.3.

Um anel WDM é construído utilizando-se a mesma estrutura do enlace ponto-a-ponto de 3 nós. Neste caso, o anel WDM é composto de vários nós com comutadores ópticos e nós de passagem. Um enlace pode ser estabelecido no anel por meio da inserção de um sinal óptico em determinado nó do anel e da derivação em outro nó, Figura 6.4. O comutador óptico utilizado para o estabelecimento de um anel WDM é o OADM (*optical add drop multiplexer*) que permite a inserção e a derivação dos sinais ópticos.

A aplicação do enlace WDM ponto-a-ponto na formação de um anel WDM mostra a evolução da topologia de uma rede WDM, Figura 6.5, permitindo a sua expansão e utilização sobre a infra-estrutura de redes ópticas instalada. Essa infra-estrutura foi montada para atender a topologia de funcionamento da tecnologia SDH que é atualmente a rede de transporte de comunicação de dados mais utilizada no mundo.

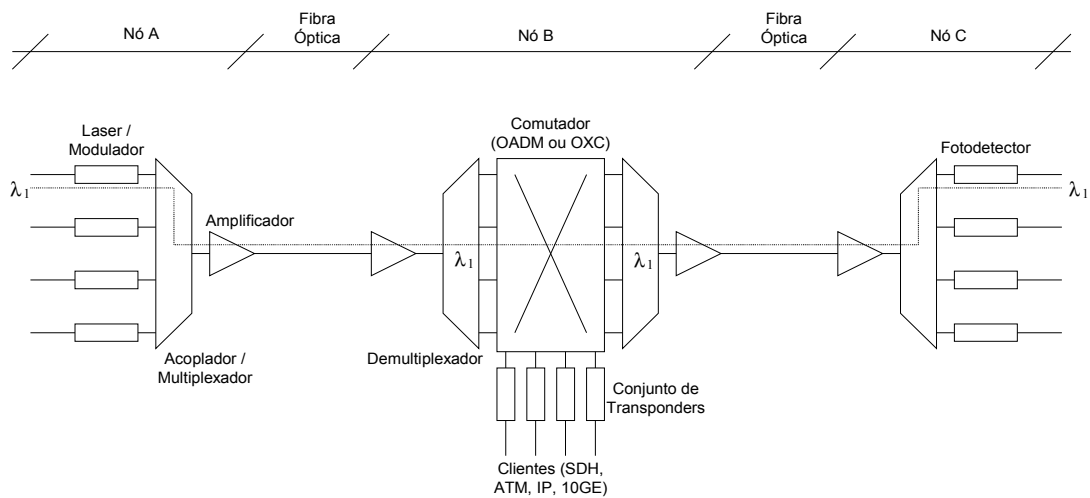


Fig. 6.1. Um sistema de transmissão WDM ponto-a-ponto.

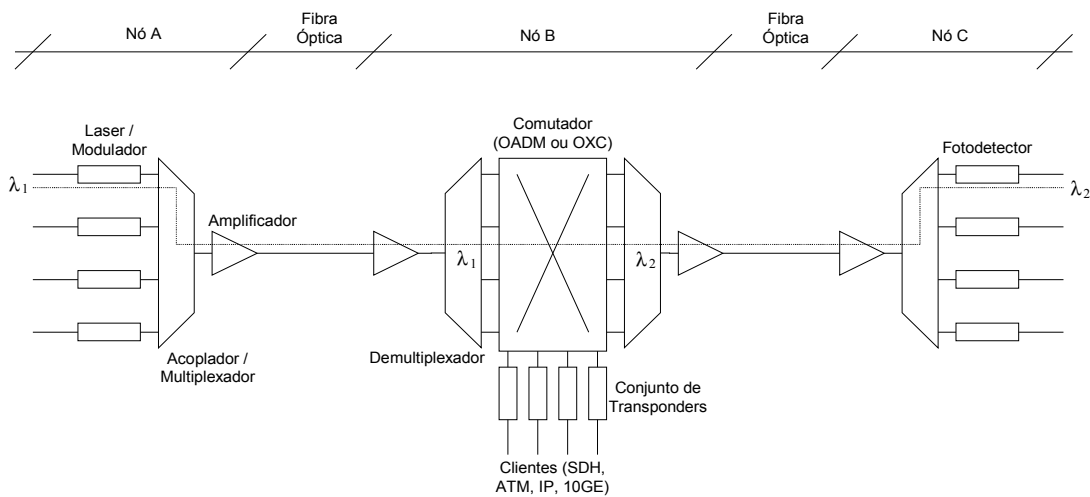


Fig. 6.2. Conversão de comprimento de onda em um enlace ponto-a-ponto.



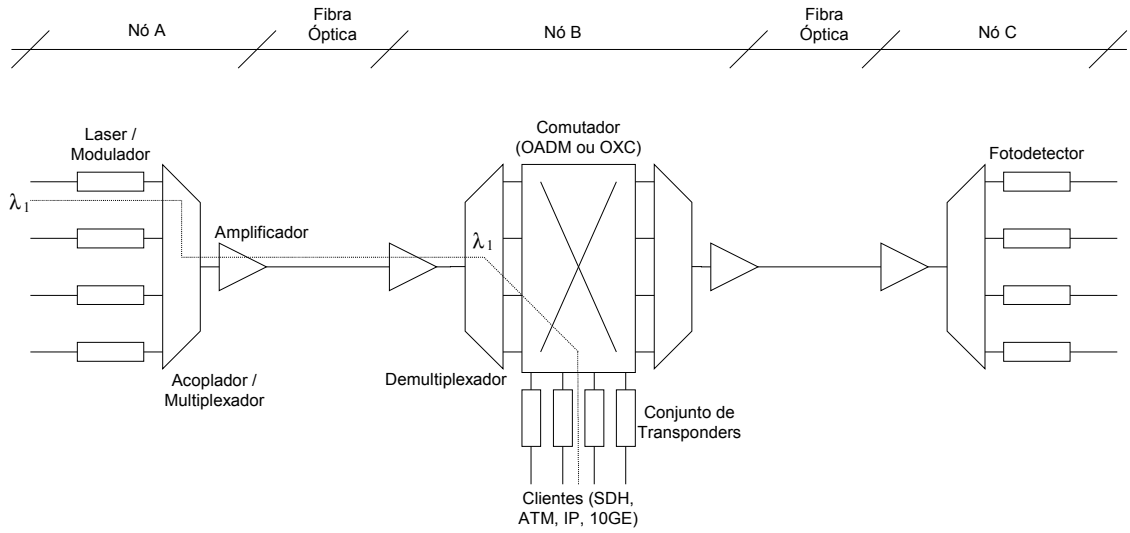


Fig. 6.3. Derivação de um sinal óptico em um enlace ponto-a-ponto.

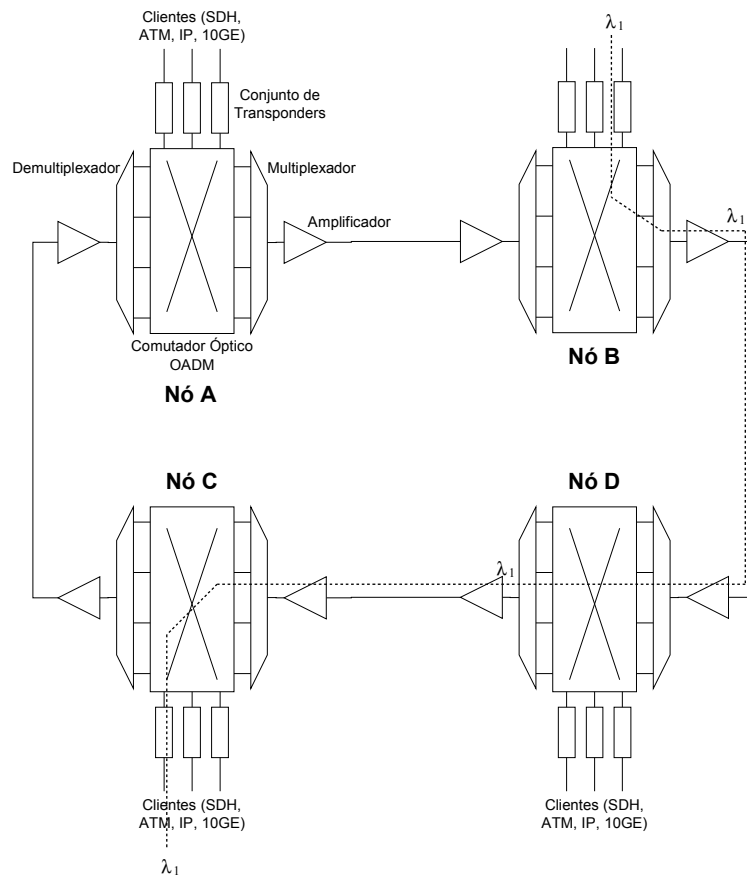


Fig. 6.4. Constituição de um anel WDM.

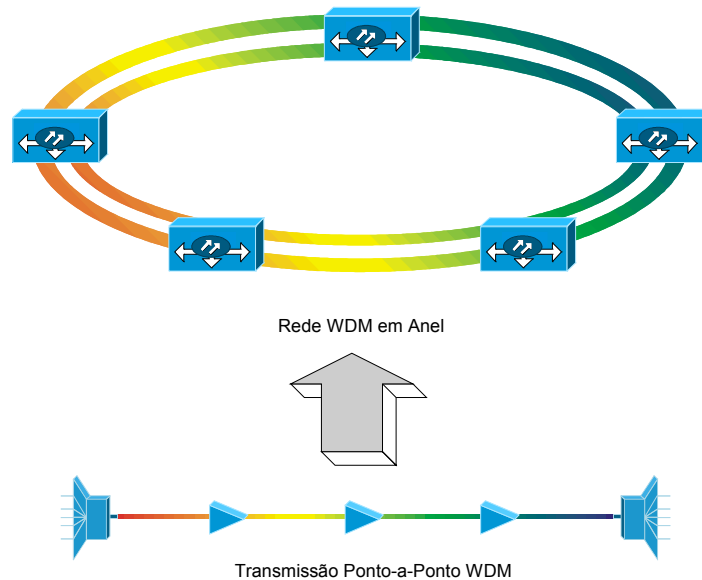


Fig. 6.5. Evolução da conexão WDM.

## 6.2. Filtros ópticos

Os filtros ópticos são dispositivos que permitem a demultiplexação de um sinal WDM, e também a multiplexação. Um filtro é projetado para ter as seguintes características: janela de operação limpa, ou seja, mínimo *crosstalk* entre os canais adjacentes; faixa de ajuste capaz de cobrir toda a banda de operação; velocidade rápida de ajuste para facilitar as mudanças dos requisitos de tráfego; e não deve afetar o estado de polarização de um sinal passante. Nos atuais sistemas ópticos, filtros são frequentemente necessários e usados, e nas futuras redes WDM, os filtros serão muito importantes, principalmente para a seleção de um determinado sinal e o controle de qual caminho através da rede este sinal irá tomar.

### 6.2.1. Filtros Fabry Perot

O filtro *Fabry Perot* é um dos filtros mais simples e utiliza o princípio do interferômetro *Fabry Perot*. Este dispositivo consiste de cavidade cercada nas duas pontas por espelhos com refletância não total, que podem ser movidos em direções opostas, mas se os espelhos permanecem fixos, este dispositivo é chamado de *etalon*. Este dispositivo funciona como uma cavidade ressonante, onde a cavidade ressoa em uma frequência (comprimento de onda) determinada pelo comprimento da cavidade e pela velocidade da luz dentro da cavidade, Figura 6.6. Os comprimentos de onda produzidos são inteiros múltiplos de meios comprimentos de onda que precisam caber exatamente dentro da coluna.

Na operação do filtro, a luz é emitida sobre a parte externa de um dos dois espelhos, mas a maior parte é refletida e somente uma pequena parte consegue entrar na cavidade. Quando a luz que conseguiu entrar alcança o espelho oposto, uma pequena parte consegue passar pelo espelho, mas a maior parte é refletida. De volta ao espelho oposto, o mesmo processo se repete, e continua a acontecer na cavidade com a mesma quantidade de luz entrando e saindo. Se o ajuste da cavidade for exatamente do comprimento correto, ocorre o surgimento de interferências destrutivas de comprimentos de onda indesejáveis. Somente um comprimento de onda, ou uma banda estreita, consegue sair e todas as outras são fortemente atenuadas.

No espelho da entrada da cavidade ocorre um efeito interessante, quando a luz de um determinado comprimento de onda não ressonante chega ao espelho, grande parte será

refletida, dependendo da refletância do espelho, e uma pequena parte entra na cavidade, e ficará refletindo até finalmente sair por um dos espelhos ou ser absorvida como perda.

Outro efeito interessante é que, quando a luz de um determinado comprimento de onda ressonante chega ao espelho, consegue entrar dentro da cavidade sem perda. Isto ocorre pois, assumindo que já existe luz no comprimento de onda ressonante correto dentro da cavidade, uma pequena parte desta luz tentará sair pelo espelho de entrada (refletância parcial). A luz que chega ao espelho de entrada, que é no comprimento de onda ressonante e é coerente com a luz que está na cavidade, tentará refletir. No entanto, existe uma interferência destrutiva a luz deixando a cavidade e a luz coerente com ela sendo refletida pelo espelho da entrada. Como resultado, 100% da luz do comprimento de onda ressonante incidente no espelho da entrada entra na cavidade. E mais, a luz do comprimento de onda ressonante já dentro da cavidade não pode sair através deste espelho devido à luz que incide com interferência destrutiva. Então, toda a luz dentro da cavidade é refletida e somente pode deixar a cavidade pelo espelho oposto, ou talvez ser absorvido pelas perdas. Por este motivo, somente a luz do comprimento de onda ressonante é aceita dentro da cavidade sem perda, enquanto todos os outros comprimentos de onda sofrem significativa reflexão.

O requisito mais importante para o funcionamento do filtro FP, é que as superfícies reflexivas sejam extremamente finas, preferencialmente dentro de uma centena de um comprimento de onda, e sejam absolutamente paralelas entre si. É comum pratear as superfícies de vidro que formam espelhos 99% reflexivos.

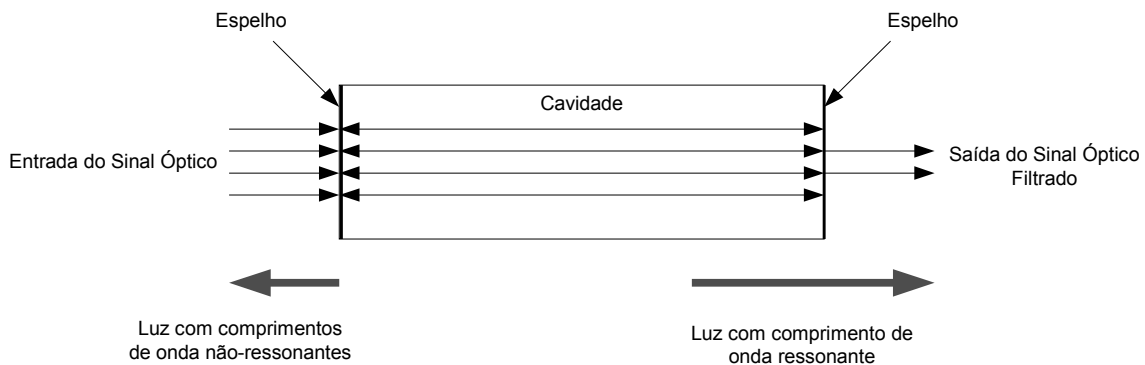


Fig. 6.6. Filtro *Fabry Perot*

Uma medida de efetividade reconhecida do filtro FP é chamada de “*finesse*”. Essa é a proporção da quantidade de energia armazenada dentro do filtro pela quantidade de energia que passa por ele. Quanto maior a “*finesse*”, mais estreita é a largura de banda e mais definido seus limites. O fator que mais influencia a “*finesse*” é a refletividade dos espelhos, quanto mais reflexivos forem os espelhos, maior a “*finesse*”. E a absorção dentro do dispositivo, especialmente dentro dos espelhos, reduz a agudeza dos picos do filtro. Os picos nos filtros FP são os comprimentos de onda ressonantes e a distância entre eles é chamada de faixa espectral livre (FSR – *Free Spectral Range*).

Um filtro FP é multi-lobulo, pois possui múltiplas bandas passantes, mas na prática, somente um lóbulo é usado. Com o espaço entre os picos (FSR) de apenas 2 nm, este filtro seria muito útil para a recuperação de um sinal de um feixe WDM com 20 nm de largura. E para aumentar o FSR, é preciso diminuir o espaçamento entre os espelhos.

Quando filtros são cascadeados, o dispositivo resultante opera como um novo filtro. O novo filtro fica com a banda passante onde as bandas passantes dos filtros FP cascadeados se coincidem e a banda passante resultante é sempre estreitada. A *finesse* é muito melhorada com aumento do FSR, tanto que é o menor múltiplo comum dos dois FSRs dos filtros cascadeados.

Então o FSR é aumentado muito significativamente. Se dois filtros com as mesmas características são cascateados, apenas consegue-se um estreitamento da banda passante. Se os filtros cascateados possuem diferentes FSRs, então o FSR do novo filtro é muito maior.

### 6.2.2. Filtros de FBG

O dispositivo FBG (*Fiber Bragg Grating*) é quase um filtro perfeito. No entanto, eles possuem um grande defeito, são reflexivos por natureza, ao invés de transmissivos. Um FBG removerá um determinado comprimento de onda de um feixe de luz, refletindo este comprimento de onda de volta à sua fonte. Portanto, para fazer uso de um FBG como um filtro transmissivo, é necessário utilizar um circulator, Figura 6.7.

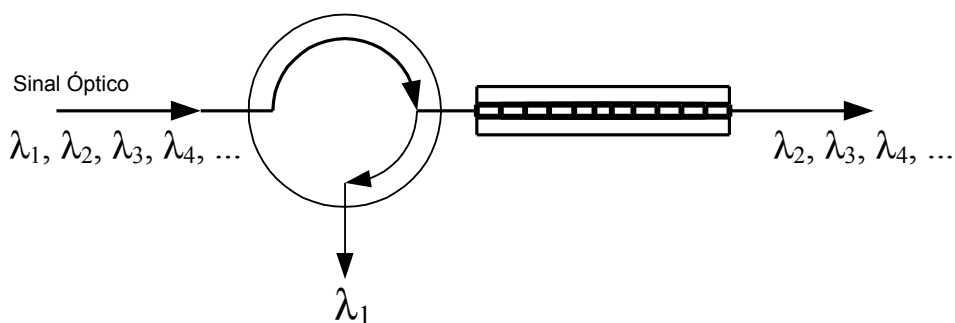


Fig. 6.7. FBG usado como filtro.

O FBG é um filtro seletivo de comprimentos de onda muito simples e de baixo custo, que possui muitas aplicações que melhoram a qualidade e reduzem os custos das comunicações ópticas. O FBG é um pedaço de uma fibra monomodo com apenas alguns centímetros com o índice de refração do núcleo variando longitudinalmente ao longo da fibra. Um determinado comprimento de onda de um feixe de luz emitido dentro da fibra é refletido na direção da fonte devido à variação do índice de refração, e os comprimentos de onda restantes atravessam a variação com pouca ou nenhuma atenuação até encontrar a variação do índice que fará com que sejam refletidos. Esta é a característica mais importante dos FBGs, os comprimentos de onda ressonantes são refletidos de volta à fonte, e os comprimentos de onda não ressonantes são transmitidos através do dispositivo sem perda.

A grade de Bragg é construída através de variações regulares do índice de refração do núcleo longitudinalmente ao longo da fibra. Se a grade for espaçada formando uma condição de ressonância para um determinado comprimento de onda, este comprimento de onda de um feixe de luz será refletido. Para a construção de uma eficiente grade, não é necessária uma grande variação no índice de refração, pois a diferença de 0,0001 no índice de refração é o suficiente para produzir o efeito desejado, Figura 6.8.

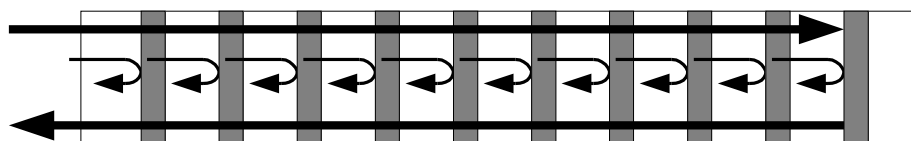


Fig. 6.8. Esquemático do FBG.

### 6.2.3. Filtros dielétricos (Multiplexação/Demultiplexação WDM)

Um filtro dielétrico opera no mesmo princípio de um filtro *Fabry Perot*. A diferença é que no filtro dielétrico, os espelhos são substituídos pelo depósito de uma camada de material dielétrico de fineza controlada. Como todos os filtros FP, o comprimento de onda selecionado é transmitido e todos os outros comprimentos de onda são refletidos. O dispositivo é construído com um cristal de material transparente, pois precisamos de lados absolutamente paralelos, em que filtros dielétricos de diferentes espessuras estão depositados, Figura 6.9.

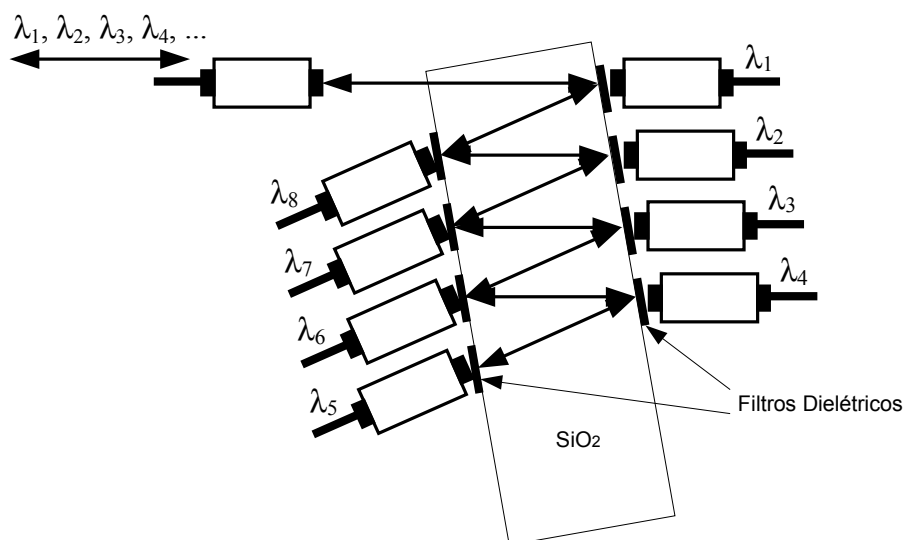


Fig. 6.9. Esquemático do filtro dielétrico.

Cada um dos filtros dielétricos permite que um comprimento de onda seja transmitido e todos os outros refletidos. Desta forma, um feixe de luz emitido no dispositivo terá, progressivamente, os seus comprimentos de onda separados. O maior problema deste dispositivo é que existe uma atenuação para cada estágio do processo de filtragem. Com isto, pode-se observar na Figura 6.9, que o comprimento de onda 5 é mais atenuado que o comprimento de onda 1. Utilizando-se este dispositivo de modo inverso, atuará como um multiplexador WDM.

### 6.2.4. Filtros AOTFs

O filtro AOTF (*Acoustooptic Tunable Filters*) tem um grande potencial como comutador de comprimentos de onda, pois permite a comutação de múltiplos comprimentos de onda ao mesmo tempo. Considere, por exemplo, um comutador com duas saídas e uma entrada, e um feixe de luz com 6 comprimentos de onda (1 a 6). O AOTF é capaz de direcionar os canais 3, 5 e 6 para uma saída e os canais restantes (1, 2 e 4) para a outra saída. Além disso, qualquer combinação pode ser executada facilmente.

Quando uma vibração mecânica está presente em um material, causa o aparecimento de zonas regulares de compressão e tensão que acabam mudando o índice de refração. A mudança regular do índice de refração dentro do material é chamada de grade de difração. Portanto, com a aplicação de vibrações de alta frequência dentro de um meio óptico (cristal), pode-se realizar a difração da luz. Com o ajuste da amplitude das vibrações (som) de forma muito precisa, pode-se controlar a quantidade de luz difratada, Figura 6.10. Nos filtros AOTFs este princípio é utilizado, onde as ondas ópticas e acústicas viajam tanto na mesma direção como em direções opostas.

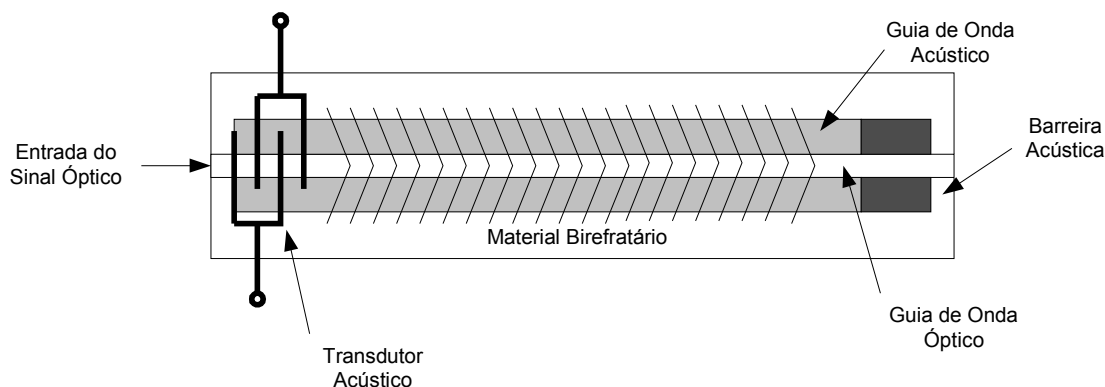


Fig. 6.10. Esquemático do AOTF.

Os filtros AOTFs refletem os comprimentos de onda selecionados quando o comprimento de onda acústico é igual ou um múltiplo (2 ou 3 vezes) do comprimento de onda óptico. Quando o comprimento de onda acústico é significativamente maior que o comprimento de onda óptico, a reflexão cessa e a onda acústica estimula a onda óptica a mudar os modos. Na configuração de guia de onda ilustrada, pode-se estimular a mudança para o estado de polarização ortogonal, e quando as condições estão corretas, a luz em uma polarização pode perfeitamente mudar para a polarização ortogonal.

Neste caso, as condições corretas são: luz de entrada polarizada; meio do guia de onda duplamente refrativo; meio do guia de onda precisa apresentar diferentes índices de refração para os dois diferentes estados de polarização (ortogonal); relação do comprimento de onda óptico e o comprimento de onda acústico precisa ser exatamente correto; comprimento do acoplamento dentro do dispositivo precisa ser exatamente correto.

As maiores vantagens dos filtros AOTFs são: o seu ajuste sobre uma grande faixa de comprimentos de onda; e sua habilidade em comutar muitos canais simultaneamente. E as suas limitações são: o número máximo de canais que podem ser comutados simultaneamente é limitado pela máxima potência do transdutor acústico; o formato do espectro de potência atualmente comutado é muito longe do quadrado; a velocidade máxima de ajuste é limitada pelo tempo necessário para a onda acústica viajar do fim de uma região de interação para outra (10  $\mu$ sec); a melhor resolução de comprimento de onda (espaçamento entre canais WDM) que pode ser atingido fica em torno de 1 nm; os AOTFs comerciais ainda não estão preparados para aplicações WDM, no entanto, espera-se que novas versões estejam preparadas em um futuro próximo.

### 6.3. Transponders/Conversores de comprimentos de onda

Como é muito difícil obter, na entrada de um multiplexador óptico, comprimentos de onda com os sinais ópticos na mesma intensidade, com espaçamento adequado entre eles, e com comprimentos de onda diferentes, foi desenvolvido dentro do sistema WDM um dispositivo chamado transponder. Este dispositivo tem por finalidade uniformizar a intensidade dos comprimentos de onda dos sinais ópticos recebidos, impor um espaçamento adequado e converter os comprimentos de onda quando necessário, Figura 6.11. O transponder permite aos usuários de uma rede WDM, o acesso aos canais WDM através da detecção dos sinais ópticos em diferentes comprimentos de onda e o ajuste para a inserção na rede.

Os transponders são componentes WDM complexos, sendo compostos de diversos subsistemas, como lasers, fotodetectores e filtros, e podem ser fixos ou sintonizáveis. Da

mesma forma que os repetidores ópticos, os transponders estão disponíveis na versão 2R (Reamplificação, Reconstrução) e 3R (Reamplificação, Reconstrução e Retemporização), sendo esta a versão mais utilizada. Diferentemente dos repetidores ópticos, que são dispositivos que permitem a propagação de sinais ópticos em longas distâncias através da recuperação de um comprimento de onda específico, os transponders não são dispositivos de repetição, mas de ajuste de sinais ópticos para serem multiplexados e inseridos em uma rede WDM.

Como os transponders utilizam a conversão OEO como uma forma de converter os comprimentos de onda associados aos sinais de transmissão para os comprimentos de onda do enlace WDM, podem ser considerados essencialmente conversores de comprimento de onda. Os sistemas de transmissão WDM com transponders são considerados sistemas mais acessíveis devido à compatibilidade com a base instalada de transmissão (SDH/ATM/IP). Eles permitem que o sinal de um equipamento legado de transmissão seja inserido diretamente em um transponder. Com isto, os transponders permitem uma variedade de interfaces para os sinais de transmissão sobre as redes WDM.

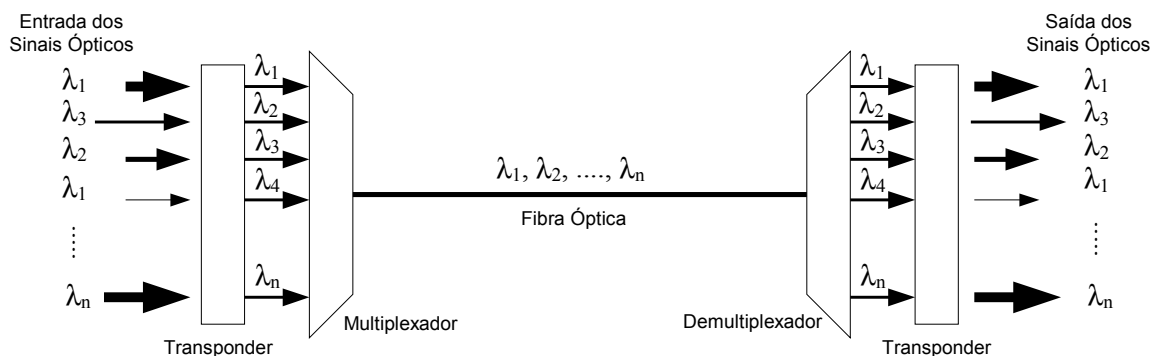


Fig. 6.11. Função do transponder

## 6.4. OADM

OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*) é o dispositivo capaz de inserir e/ou derivar comprimentos de onda de um sinal WDM transportado em uma fibra, Figura 6.12. Isso permite a retirada ou a inclusão de dados em um comprimento de onda específico. O OADM é composto de um demultiplexador, um multiplexador e um *switch* óptico  $2 \times 2$ . O demultiplexador separa todos os comprimentos de onda presentes na fibra. O *switch* é posicionado no segmento do comprimento de onda que se deseja derivar/inserir. O multiplexador prepara todos os comprimentos de onda para serem enviados pela fibra de saída. O dispositivo possui duas portas nas quais as fibras são conectadas e duas portas para a derivação local.

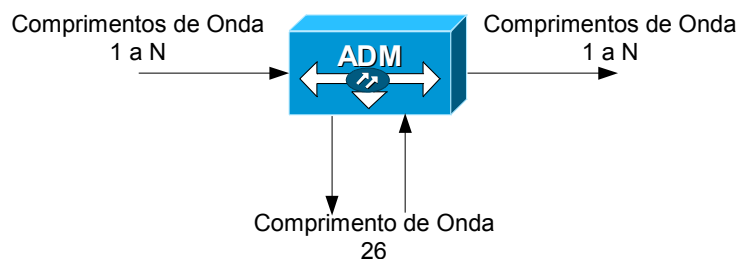


Fig. 6.12. Funcionamento de um OADM.

O OADM, caracterizado por ser um elemento reconfigurável da rede óptica, pode ser classificado como de seleção fixa ou dinâmica de comprimentos de onda. No caso de seleção fixa, mantém-se o comprimento de onda selecionado para inserção ou derivação até que uma intervenção mude a configuração. Na seleção dinâmica, os comprimentos de onda entre o demultiplexador e o multiplexador ópticos podem ser dinamicamente selecionados para a derivação e inserção. Existem vários tipos de dispositivos de desempenham esta função, dentre eles, o AWG (*Array Waveguide Gratings*) e os circuladores com FBGs.

#### 6.4.1. AWG

Na Figura 6.13, pode-se observar um AWG (*Array Waveguide Gratings*) configurado como um OADM. O comprimento de onda é adicionado ao fluxo de comprimentos de onda multiplexado do lado esquerdo da figura e derivado (demultiplexado) do fluxo entrante do lado direito da figura. Esta função é muito versátil, pois múltiplos canais podem ser adicionados ou derivados na mesma operação. No entanto, a perda do sinal fica em torno de 5 dB para atravessar o dispositivo. Então canais que não são adicionados ou derivados sofrem uma perda em torno de 10 dB. Neste sistema, é necessário equalizar a potência do sinal entre os canais, onde as potências dos canais adicionados precisam ser igualadas com as potências dos sinais derivados. E provavelmente, é necessária a amplificação do sinal inteiro. Para a derivação e a adição de um simples canal, a configuração do circulador com FBG é bem melhor.

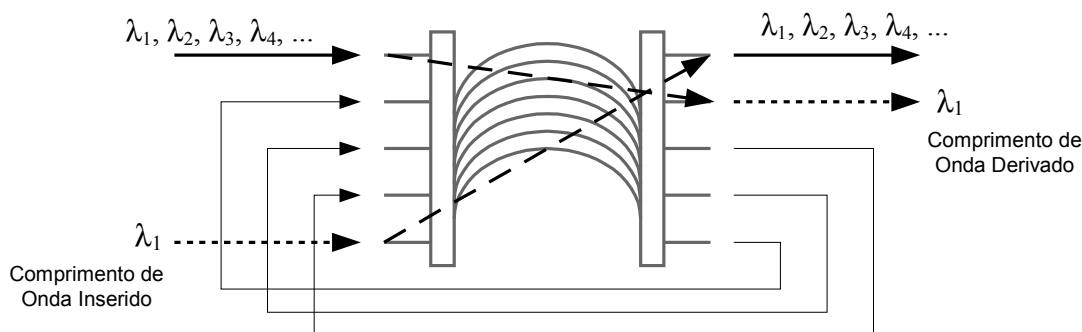


Fig. 6.13. OADM construído com AWG.

#### 6.4.2. Circuladores com FBGs

Na Figura 6.14, a derivação e a inserção de um simples canal é feita através do uso de um FBG com um par de circuladores. A operação é da seguinte forma: Um sinal entre no lado esquerdo da figura e é roteado através do circulador para o FBG. Os comprimentos de onda não selecionados atravessam o FBG para o próximo circulador. O comprimento de onda selecionado é refletido pelo FBG e então direcionado para fora da próxima porta do circulador. O comprimento de onda a ser adicionado que precisa ser o mesmo do que foi derivado entra na porta de adição do segundo circulador. Ele viaja através do FBG e é refletido de volta para o circulador, e esse processo mistura o canal adicionado com o fluxo multiplexado.

Esta configuração possui relativa baixa perda de 3 dB para um fluxo multiplexado. Pode ser muito apropriado para a operação em uma MAN, onde uma simples fibra em anel interconecta muitas localidades dentro da área de uma cidade.



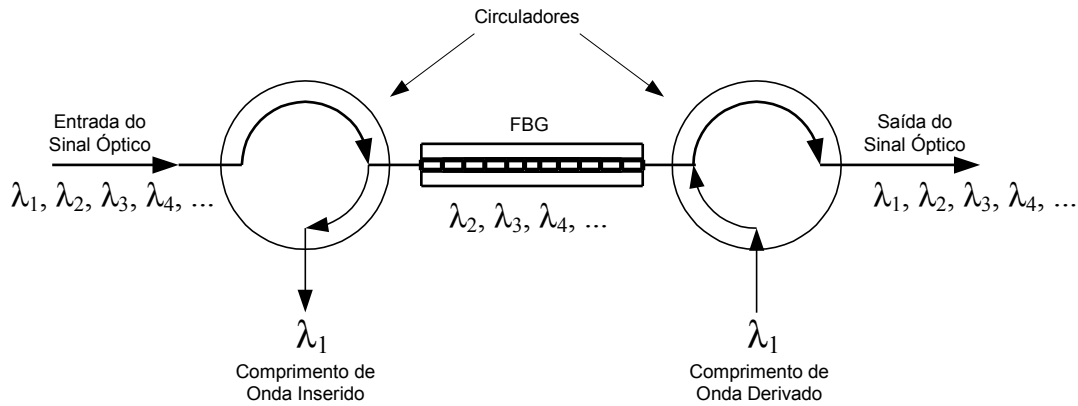


Fig. 6.14. OADM usando circuladores e FBG.

## 6.5. OXC

O OXC (*Optical Cross Connect*) ou WXC (*Wavelength Cross Connect*) é um comutador óptico em que N portas de entrada podem se conectar com N portas de saída. Portanto, o OXC fornece a capacidade de comutação de canais de transmissão, ou seja, o fluxo de dados vindo de qualquer uma de suas portas de entrada pode ser desviado para qualquer uma de suas portas de saída.

Os OXCs são realizados por meio de multiplexadores, demultiplexadores, comutadores e conversores. A Figura 6.15 mostra a arquitetura de um OXC. Os sinais ópticos multiplexados chegam em um demultiplexador, onde são decompostos em vários comprimentos de onda e enviados a um banco de comutadores. Cada um destes comutadores tem a função de rotear os vários comprimentos de onda para um banco de multiplexadores de saída, que multiplexa e injeta os sinais nas respectivas fibras de saída. Essa comutação é controlada por meio da configuração de uma tabela para a conexão cruzada. Conversores podem ser utilizados entre os comutadores e os multiplexadores de saída com o objetivo de permitir uma maior flexibilidade de roteamento.

O OXC apresenta uma capacidade de processamento de sinal proporcional a  $N \times M \times B$ , em que N é o número de portas (fibras) de entrada/saída, M é o número de comprimentos de onda transportados por cada fibra e B é a taxa de bits por comprimento de onda. Por exemplo, um OXC com 4 portas, 40 comprimentos de onda por fibra (porta) e 155 Mbps por comprimento de onda resulta em uma banda de transmissão de 25 Gbps. Aumentando-se a taxa de bits por comprimento de onda para 2,5 Gbps, a capacidade desse OXC chega a 400 Gbps.

O estabelecimento de um caminho de luz na comunicação entre OXCs é feito por meio da configuração de conexões cruzadas em OXCs intermediários. Dessa forma, um caminho de luz contínuo é estabelecido entre a porta de entrada do primeiro OXC, passando pelos OXCs intermediários e terminando na porta de saída do último OXC do caminho. Esses caminhos de luz são bidirecionais, ou seja, o caminho de recepção de um OXC final, passando pelos OXCs intermediários, segue a mesma rota do caminho de transmissão.

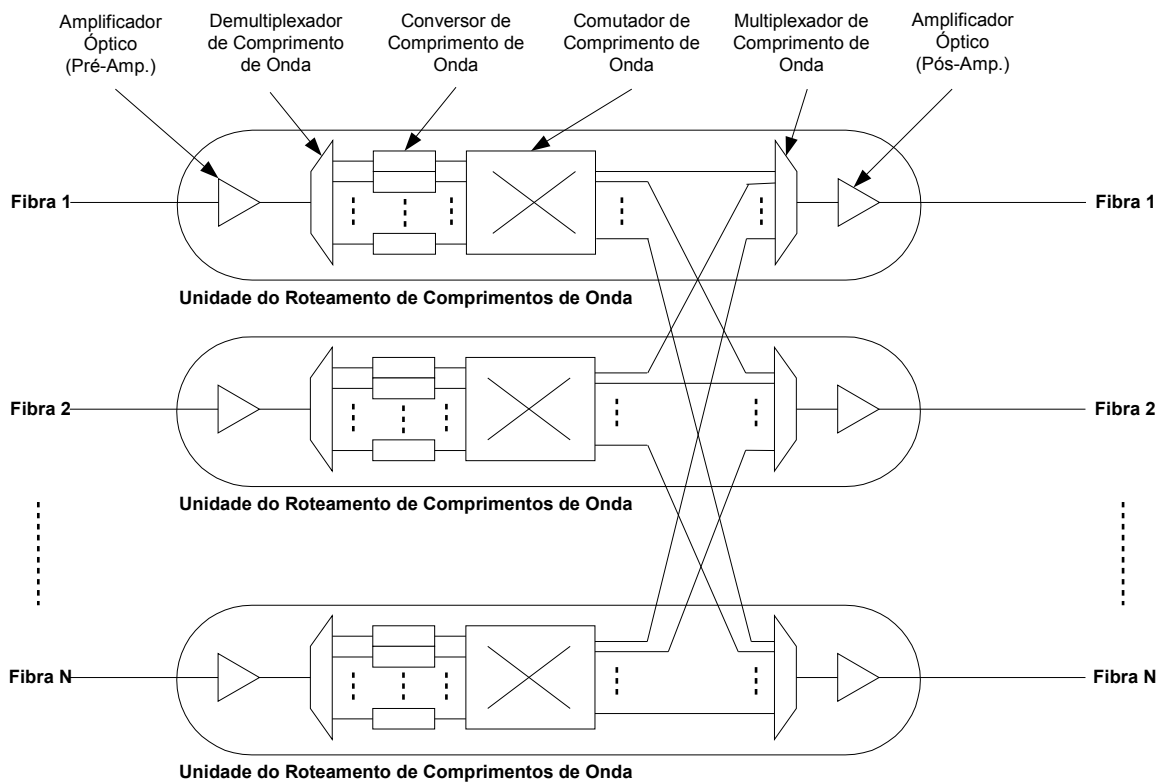


Fig. 6.15. Arquitetura do OXC.

Por meio dos OXCs, é possível realizar o provisionamento automático de caminhos de luz dentro de uma rede. Para isso, são necessários os seguintes mecanismos.

- Detecção das proximidades – detecção automática de enlaces entre OXCs de uma proximidade e o levantamento do estado dos enlaces (*up/down*, disponibilidade de banda etc).
- Atualização do estado dos enlaces – coleta das informações do estado do enlace de cada OXC para determinar a topologia vigente e as características do estado do enlace de toda a rede.
- Cálculo das rotas – para que o caminho de luz seja estabelecido, levando em consideração as necessidades de banda de transmissão, as outras restrições existentes para o caminho e o estado da rede.
- Estabelecimento do caminho – estabelecimento das conexões em cada OXC na rota calculada para realizar o caminho fim-a-fim.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W.F. Giozza, E. Conforti e H. Waldman, “Fibras ópticas, Tecnologia e Projeto de Sistemas”, Makron Books, São Paulo, 1991.
- [2] P. Agrawal, “Fiber-optic communication systems”, John Wiley, New York, 1992.
- [3] J.C. Palais, “Fiber optic communications”, Prentice Hall, London, 1992.
- [4] Wim Van Etten and Jan Van Der Plaats, “Fundamentals of optical fiber communications”, Prentice Hall, London, 1991.
- [5] Dutton, J. R. Harry; “Understanding Optical Communications”; International Technical Support Organization; Setembro, 2003; (<http://www.redbooks.ibm.com>).
- [6] P. Green, “Progress In Optical Networking”, IEEE Communications Magazine, Janeiro 2001, pp. 54-62.
- [7] Rajagopalan, D. Pendarakis, D. Saha, R. S. Ramamoorthy, K. Bala, “IP Over Optical Networks: Architectural Aspects”, IEEE Communications Magazine, Setembro 2000, pp. 94-102.
- [8] “Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)”, Web ProForum Tutorials, The International Engineering Consortium – IEC, <http://www.iec.org>.
- [9] “Fiber Optics Technology”, Web ProForum Tutorials, The International Engineering Consortium – IEC, <http://www.iec.org>.
- [10] E. Fagundes, “Simplificando a Topologia das Redes Ópticas”, <http://www.efagundes.com/>.
- [11] Kartalopoulos, Stamatios V., “Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow”, IEEE Press, Lucent Technologies, Inc., 2000.
- [12] <http://www.cisco.com>.
- [13] [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialdwdm/pagina_3.asp)