

---

## MAIS CIÊNCIA

---

# CONCEITOS UTILIZADOS NA COMUNICAÇÃO ÓPTICA NUMA VISÃO CRONOLÓGICA DO DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA

*Antonio de Campos Sachs*

### Introdução

Desde a década de 80 quando as operadoras de telefonia instalaram os primeiros cabos com fibras ópticas, os sistemas de telecomunicações vêm sendo ampliados aceleradamente. Hoje, graças ao rápido desenvolvimento tecnológico do laser de semicondutor e das fibras ópticas, o mundo está todo interligado por redes ópticas para transmissão de voz (telefonia), vídeo (TV a cabo), dados (internet) e qualquer tipo de informação que possa ser convertido em luz. A internet, que conecta várias redes do mundo em uma única comunidade virtual, utiliza esta infra-estrutura instalada e concorre ainda mais para o seu desenvolvimento e ampliação.

Dos dispositivos semicondutores geradores de luz (LASER ou LED) o laser é escolhido na maior parte das aplicações por conseguir transmitir um sinal óptico para mais longe e com taxa de transmissão mais alta do que se consegue com qualquer outro dispositivo. Os lasers, incluindo aqui todos os tipos de laser, são utilizados em muitas aplicações (Babichak, 1998). O próprio laser de semicondutor, assim chamado por ser baseado em materiais semicondutores, também tem muitas aplicações e pode ser utilizado na medicina, ou para fabricar canetas

ponteiro, ou aparelhos de CD e de DVD. Mas uma de suas primeiras aplicações, a qual serviu de estímulo para o seu desenvolvimento, foi sem dúvida, a comunicação óptica. Estes dispositivos são micrométricos como um chip de um diodo ou um chip de um transistor e funcionam pela passagem de corrente elétrica. Quanto maior a corrente elétrica injetada no dispositivo, maior é a potência óptica gerada e esta propriedade permite, com relativa facilidade, promover a conversão de um sinal originalmente elétrico em sinal óptico.

Os sistemas de comunicações ópticas (Amazonas, 2005) permitem juntar um número muito grande de canais de informação em uma única fibra. Esta capacidade vem da frequência da luz (da ordem de 200.000 GHz) que é muito maior do que a frequência de outros sinais. A frequência da microonda (1 a 30 GHz), que também é muito utilizada como onda portadora em processos de comunicação, é muito menor que a frequência da luz.

### Marcos de 1970

Na década de 60 apareceram os primeiros lasers de semicondutor. No início só funcionavam na temperatura do

nitrogênio líquido (77K que corresponde a  $-196^{\circ}\text{C}$ , ou seja: 196 graus abaixo de zero) e com corrente elétrica pulsada para evitar aquecimento em excesso. Já havia expectativa de utilizá-los para transmitir centenas ou mesmo milhares de canais telefônicos em uma única fibra óptica. Estas fibras, por sua vez, apresentavam alta atenuação, ou seja: a luz inserida numa extremidade era bastante atenuada quando emergia na outra extremidade. Esta atenuação e a dificuldade tecnológica para se fazer fibras muito longas inviabilizavam a transmissão do sinal óptico para longas distâncias. Em 1970, quase que simultaneamente nos Estados Unidos (Hayashi et al., 1970) e na União Soviética (Alferov et al., 1970), foram feitos os primeiros lasers de hetero-estrutura dupla. Muito mais eficientes que os lasers de semicondutor fabricados até aquela data, funcionavam com valores mais baixos de corrente elétrica e podiam operar continuamente na temperatura ambiente. Neste mesmo ano de 1970 a Corning (Keck, 2000) relata a obtenção de centenas de metros de fibra óptica do tipo monomodo com atenuação inferior a 20 dB/km<sup>1</sup>. Este valor é muito grande e corresponde a reduzir 99% da potência óptica em cada quilômetro de fibra (depois de cada trecho de um quilômetro resta somente 1% da potência que existia no início do mesmo trecho). Mesmo assim, os resultados eram bastante promissores e foi grande o estímulo para a pesquisa de materiais e de novas estruturas tanto para a fibra óptica como para o laser de

<sup>1</sup> Nos enlaces ópticos (trecho de fibra óptica entre o transmissor e o receptor) as potências variam ordens de grandeza. A relação  $R=P1/P2$ , entre duas potências de luz, é medida logaritmicamente. A medida em dB (decibéis) é muito conveniente para os projetistas de enlaces ópticos. Formalmente se calcula  $R$  (em dB) =  $10 \log_{10} R$ .

semicondutor. Hoje as fibras perdem 0,2 dB/km que corresponde a perder apenas 5% da potência óptica em cada quilômetro.

Estimulados pela especificidade do comprimento de onda  $\lambda=850\text{nm}$ , valor para o qual a atenuação é mínima, os primeiros lasers de hetero-estrutura dupla foram feitos de arseneto de gálio (GaAs), material que emite luz com este mesmo comprimento de onda. Iniciaram-se as instalações de fibras ópticas por todo o mundo e o Brasil não ficou muito para trás, instalando um primeiro enlace entre os bairros Jacarepaguá e Cidade de Deus no Rio de Janeiro logo no início da década de 80<sup>3</sup>.

Com a evolução tecnológica o mínimo de atenuação das fibras melhorou e também se deslocou para  $\lambda=1310\text{nm}$ . Os lasers passaram a ser feitos de ligas quaternárias (quatro átomos diferentes) contendo In, Ga, As e P (índio, gálio, arsênio e fósforo) com composição adequada para emitir luz que aproveite o novo mínimo de atenuação das fibras. No início da década de 80 já era possível transmitir mais de mil canais telefônicos por dezenas de quilômetros em uma única fibra óptica.

## Dispersão Cromática

<sup>2</sup> Nanometro (símbolo nm) corresponde a um milésimo de um micrometro (símbolo  $\mu\text{m}$ ) que por sua vez é um milésimo de um milímetro. Com comprimento de onda  $\lambda=850\text{nm}$  a luz não é visível, sendo classificada como pertencente à região infravermelho. Com este comprimento de onda mais luz conseguia passar pela fibra.

<sup>3</sup> Alguns fatos da história da fibra óptica no Brasil podem ser encontrados em Smolka (2006).

Fótons<sup>4</sup> com diferentes comprimentos de onda caminham com velocidades diferentes dentro da fibra, mas quem é mais rápido? A velocidade da luz<sup>5</sup> dentro de um material qualquer, é a velocidade da luz no vácuo “c” dividida pelo índice de refração “n” do material. Como regra geral o índice de refração dos materiais diminui quando aumentamos o comprimento de onda da luz (Figura 1). Mas na fibra não temos apenas o efeito do material; aparece também o efeito do guia de onda. O núcleo da fibra tipo “SMF” (Single Mode Fiber) tem aproximadamente 9  $\mu\text{m}$  (0,009 mm) de diâmetro. Quando a luz é guiada dentro de um canal tão pequeno, parte da luz penetra no material fora do guia<sup>6</sup> fazendo com que a luz perceba um índice de refração efetivo menor do que o índice do material do guia. A luz experimenta um material composto pelo guia e pelo material que envolve o guia. A fração de luz que caminha fora do núcleo depende do comprimento de onda da luz. Portanto, o índice de refração efetivo também depende do comprimento de onda da luz. O índice de refração efetivo, também

conhecido como índice de grupo  $n_g$ , define a velocidade de propagação. O índice de grupo é função do índice do material do núcleo, do índice do material que envolve o núcleo e do efeito de guiamento. Este efeito depende do comprimento de onda de maneira inversa fazendo com que  $n_g$  não seja sempre decrescente com o comprimento de onda. Para comprimentos de onda menores (Figura 1)  $n_g$  decresce quando o comprimento de onda aumenta, mas inverte este comportamento depois de um determinado comprimento de onda que chamamos de  $\lambda_0$  (1300 nm no exemplo da Figura 1). Como a velocidade de propagação da luz dentro da fibra depende de  $n_g$  ( $v=c/n_g$ ) concluímos que os fótons de maior comprimento de onda são mais rápidos se estivermos abaixo de  $\lambda_0$ . E, contrariamente, os fótons com maior comprimento de onda são mais lentos se estivermos acima de  $\lambda_0$ .

Com o aumento da taxa de bits e da distância total a que se podia transmitir um sinal óptico, o fenômeno de dispersão cromática ganhou importância nos cálculos e projetos de enlaces ópticos. Os lasers não são absolutamente monocromáticos, isto é: os fótons gerados não são todos do mesmo comprimento de onda. E também, quando modulamos a luz para formar os bits que codificados transmitem a informação desejada, aumentamos ainda mais as pequenas variações de comprimento de onda. Como foi visto anteriormente a luz caminha na fibra com velocidade levemente diferente para diferentes comprimentos de onda. Um único bit é formado por vários fótons. Na taxa de 1 Gb/s<sup>7</sup> cada bit tem 1

<sup>4</sup> Nos modelos da física, para descrever a luz, utiliza-se o conceito de “fótons”. Um fóton é algo que se comporta como um pacote singular de energia contendo a menor quantidade de energia possível para uma dada frequência da luz. A energia de um fóton é dada por  $E=hf$  onde  $f$  é a frequência da luz (dada em Hz, Hertz) e  $h$  é a constante de Planck ( $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s).

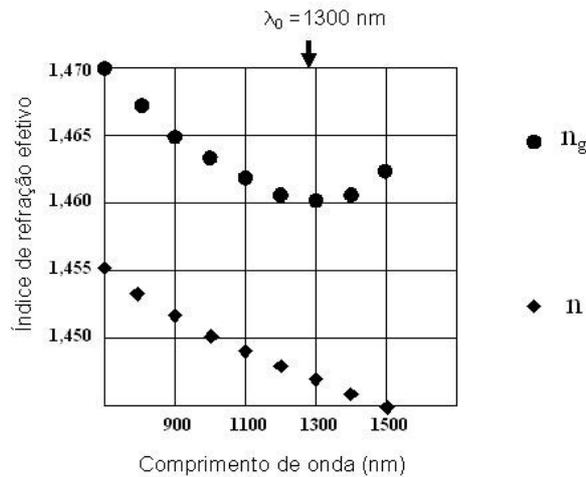
<sup>5</sup> A velocidade da luz no vácuo é dada por  $c = 299.792.458$  m/s. Normalmente aproximamos para 300.000 km/s, mas para algumas aplicações precisamos considerar o valor exato.

<sup>6</sup> A parte da luz que passa pelo lado de fora dos guias de onda conhecida como campo evanescente, não é fácil de entender intuitivamente e também não é prevista pelo modelo de raios refletidos (com reflexão total) no interior do guia. O modelo de raios não serve para descrever as ondas evanescentes. Modelos mais completos, como o modelo de propagação de ondas eletromagnéticas de Maxwell, conseguem descrever o fenômeno.

<sup>7</sup> Um gigabit corresponde a mil megabits. Um megabit corresponde a um milhão de bits. Assim, 1Gb/s corresponde a um bilhão de bits por segundo. Um bit é

nanosegundo de largura na escala de tempo. Sendo composto por fótons rápidos e fótons lentos o bit é alargado interferindo nos bits adjacentes e introduzindo erro na comunicação. Este fenômeno é conhecido como dispersão cromática.

distâncias sem nos referirmos à taxa e também não é tão importante aumentar a taxa de transmissão se não dissermos para que distância isto foi conseguido. Para avaliar a qualidade dos sistemas é necessário utilizar um parâmetro que considere as duas coisas. Foi criado, então,



**Figura 1:** Variação do índice de grupo  $n_g$  (que inclui efeito do guia de onda de uma fibra de  $\text{SiO}_2$ ) e do índice de refração  $n$  ( $\text{SiO}_2$ , sem efeito do guia) em função do comprimento de onda da luz. Os valores são aproximados e baseados na Figura 2.8 do livro de Agrawal (1997).

Transmissões para longas distâncias não podem ser realizadas para grandes taxas de bit por serem limitadas pela dispersão cromática. Por outro lado, é possível transmitir altas taxas por percursos menores. O mérito não é tão grande quando atingimos grandes

o parâmetro de mérito BL que é o produto da taxa de bits B pela distância L. Em 1974 a tecnologia permitia atingir  $BL=1$  Gb/s-km e em 1980 atingimos  $BL=100$  Gb/s-km.

## O laser DFB

A atenuação da fibra diminui e continua o seu deslocamento para maiores comprimentos de onda. No entorno de  $\lambda_0 = 1310\text{nm}$  a dispersão cromática era quase nula e o mínimo de atenuação acontecia em 1550nm. Optava-se por permanecer com o padrão de emissão do laser em 1310nm para evitar a dispersão e trabalhar com altas taxas ou fabricar lasers em 1550nm para chegar mais longe aproveitando o mínimo de atenuação. Os lasers evoluíram para minimizar o efeito

um dígito no sistema numérico binário e é a menor quantidade de informação que se consegue transmitir ou armazenar. Veja mais detalhes em <http://en.wikipedia.org/wiki/Megabit>. Muitas vezes, o gigabit é utilizado para representar quantidade de dados armazenados em memória de computadores e decorrente do fato destas memórias serem contadas na base 2, define-se o gigabit como  $2^{30}$  bits que é exatamente 1.073.741.824 bits. Neste texto, entretanto, utilizaremos o prefixo giga como  $10^9$ , conforme definido pelo sistema internacional de unidades (SI). Veja, por exemplo, o endereço: [http://www.chemkeys.com/bra/ag/uec\\_7/sidu\\_4/sidu\\_4.htm](http://www.chemkeys.com/bra/ag/uec_7/sidu_4/sidu_4.htm). Isto resulta dizer que utilizaremos 1 Gb correspondendo a exatamente 1.000.000.000 (um bilhão) de bits.

da dispersão passando a operar com um único modo longitudinal estável. Estes lasers são chamados DFB (sigla em inglês para Distributed Feedback) por ter a realimentação distribuída ao longo de uma grade de difração. Os lasers fabricados até então, eram chamados de laser FP (Fabry-Perot) caracterizados por terem uma cavidade ressonante formada por dois espelhos.

### Fibras DS

As fibras também evoluíram. Apareceram as fibras de dispersão deslocada (DSF na sigla em inglês para Dispersion Shifted Fiber) que têm o mínimo de atenuação em 1550nm e ao mesmo tempo o zero de dispersão deslocado para este mesmo comprimento de onda. Com a fibra DS e com laser operando em 1550nm foi possível atingir longas distâncias com altas taxas sem problema de atenuação ou de dispersão. O Japão, no topo de sua inovação tecnológica, instalou muitas fibras DS. No Brasil, a Embratel instalou algumas destas fibras em cabos submarinos que ligavam Florianópolis a Fortaleza atendendo grandes centros em quase toda costa brasileira. O fator de mérito BL chegou a um Terabit/s-km<sup>8</sup> no início dos anos 90. Apareceram também os primeiros amplificadores ópticos funcionando na faixa de 1530nm a 1560nm fazendo com que se chegasse muito longe com o sinal óptico. Sem dispersão e com amplificadores ópticos o fator de mérito BL chegou a um Petabit/s-km<sup>9</sup> no final dos anos 90.

<sup>8</sup> Um Terabit corresponde a mil Gigabits. E cada Gigabit tem um bilhão de bits.

<sup>9</sup> Um Petabit corresponde a mil Terabits.

### Efeitos Não Lineares

Distâncias cada vez maiores requerem potências ópticas cada vez mais altas. Estas potências altas fazem aparecer fenômenos não lineares. Já muito estudados em laboratórios de física, estes fenômenos aparecem agora em fibras ópticas já instaladas e operando comercialmente. Muitos dados já foram coletados em laboratório para vários materiais, inclusive para o quartzo, material utilizado para a fabricação da fibra óptica. Sabe-se que o quartzo não é intrinsecamente um material não linear, sendo necessário submetê-lo a potências ópticas muito elevadas para que estes fenômenos sejam observados. Na fibra óptica, entretanto, a concentração de potência é muito grande. Não é rara a necessidade de iluminarmos um enlace de longa distância (principalmente quando utilizamos mais do que um comprimento de onda) com +27 dBm de potência óptica<sup>10</sup>. Isto corresponde a 512 mW colocados no estreito núcleo de uma única fibra. Já vimos, quando falávamos sobre dispersão cromática, que a fibra SMF tem núcleo com 9 µm de diâmetro. A luz, que não se concentra totalmente dentro do núcleo, caminha dentro de uma área efetiva de aproximadamente 80 µm<sup>2</sup> (que corresponde a 8 x 10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>). Fazendo a conta resulta 640.000.000 mW/cm<sup>2</sup>, que é pelo menos cinco milhões de vezes a

<sup>10</sup> dBm (dB miliwatt) é uma unidade de potência (energia por unidade de tempo). Zero dBm corresponde a 1mW, 3dBm são 2mW, 6dBm são 4mW, 9dBm são 8 mW, 12dBm são 16mW, 15dBm são 32mW e assim sucessivamente, a potência dobra para cada 3dB acrescentado, até que chegamos a 27 dBm correspondendo a 512mW. Formalmente, e mais exatamente, calculamos a potência em dBm pela mesma fórmula da nota 1, fazendo  $R=PmW/1mW$ . Assim, a potência em relação a 1mW é  $P(dBm)=10 \times \log_{10}[P(mW)/1mW]$ .

potência da luz do sol por unidade de área que atinge nossa pele em um dia ensolarado. Com esta densidade de potência muitos efeitos não lineares passam a existir e interferir na transmissão do sinal. Não vamos nos alongar muito sobre os vários tipos de efeitos não lineares e o limiar de potência necessário para ativar cada um deles, mas pode ser interessante identificar alguns efeitos e suas origens.

### **Espalhamentos Inelásticos**

Quando a fibra é fabricada o quartzo fundido se solidifica deixando micro flutuações de densidade que causam o espalhamento Rayleigh, principal fenômeno responsável pela atenuação da luz dentro da fibra óptica. Este espalhamento é dito elástico porque não altera a energia de um fóton. Isto é: a frequência da luz se mantém. O comprimento de onda da luz não se altera dentro do material. Há, entretanto, outros fenômenos que são ligados a espalhamentos inelásticos da luz. Neste caso, a energia dos fótons (e, portanto, suas frequências) se alteram. Os efeitos Raman e Brillouin são exemplos de espalhamentos inelásticos. Os dois estão relacionados à perda de energia do fóton espalhado, sendo que esta energia é transmitida para fônons<sup>11</sup> ópticos (fônons de maior energia) no caso Raman e para fônons acústicos (fônons de menor energia) no caso Brillouin. Com elevados

<sup>11</sup> Fônons, assim como os fótons, são entidades utilizadas nos modelos da física para descrever fenômenos encontrados na natureza. Um fônon representa a menor quantidade de energia de vibração da matéria associada a uma única frequência de um determinado modo de vibração. Em qualquer temperatura acima do zero absoluto (-273,15 °C) toda matéria contém fônons.

níveis de potência estes fenômenos passam a ocorrer de forma estimulada e provocam perdas importantes na transmissão.

### **SPM e XPM**

Além dos espalhamentos não lineares, existe a dependência do índice de refração com a potência. Flutuações de potência óptica na entrada da fibra (que ocorre naturalmente quando modulamos o sinal óptico para impingir-lhe nossa informação) geram flutuações na fase da luz. Estes fenômenos são chamados de auto-modulação de fase (SPM vem da sigla em inglês para Self Phase Modulation). O seu efeito é um alargamento espectral<sup>12</sup> com conseqüente aumento da dispersão cromática. Quanto mais largo o espectro maior é a diferença de frequência entre os fótons que constituem cada bit de informação. Quando a flutuação de potência óptica é provocada por outro sinal com comprimento de onda diferente que caminha na mesma fibra o fenômeno ganha o nome de modulação cruzada de fase (XPM é uma sigla que se refere ao inglês Cross Phase Modulation).

### **Mistura de Quatro Ondas**

Duas frequências  $\omega_1$  e  $\omega_2$  podem gerar sinais ópticos com frequências  $\omega_3=2\omega_2 - \omega_1$  e  $\omega_4=2\omega_1 - \omega_2$ . As frequências geradas roubam potência dos sinais originais e também impedem que se possa transmitir outras informações na posição

<sup>12</sup> O espectro óptico é o gráfico da intensidade em função da frequência da luz. No caso dos lasers o espectro óptico é um pico bastante estreito. Nos lasers FP aparecem vários picos representando cada modo de operação. Nos lasers DFB o espectro mostra um único pico. Quando o pico do espectro óptico aparece mais largo dizemos que houve um alargamento espectral.

dos sinais gerados. Este efeito é conhecido por mistura de quatro ondas. São muito prejudiciais aos sistemas que desejam transmitir mais de um comprimento de onda numa mesma fibra. São intensificados para potências altas e pela ausência de dispersão. As fibras DS, por exemplo, que constituíram uma grande revolução tecnológica por juntar o mínimo de atenuação com o mínimo de dispersão, ficam bastante prejudicadas, pois para fazer esta adaptação da dispersão a fibra deve ter núcleo ainda menor, resultando maior concentração de potência óptica. Além disso, a própria falta de dispersão intensifica estes efeitos e a mistura de quatro ondas constitui um forte golpe na importância das fibras DS. Foram criadas fibras especiais com maior área efetiva do que a fibra DS, com dispersão não nula para diminuir um pouco os efeitos não lineares, mas as fibras SMF, produzidas em larga escala, voltaram a ter importância e podem ser utilizadas na maioria das aplicações.

### **Sistemas WDM e Retorno da Fibra DS**

Cabos ópticos podem comportar mais de mil fibras e muitos comprimentos de onda podem ser colocados em cada fibra caracterizando os sistemas WDM (do inglês Wavelength Division Multiplexing que traduzimos por multiplexação por comprimento de onda). Cada comprimento de onda pode transmitir na taxa de 10Gb/s em equipamentos comerciais, e taxas de 100 Gb/s já estão sendo estudadas em laboratório. Os mesmos sistemas WDM que diminuíram a importância das fibras DS agora devolvem esta importância, pois precisamos de

fibras com dispersão quase nula em várias posições para acomodar um número cada vez maior de comprimentos de onda. Na verdade não queremos mais condições ótimas para um comprimento de onda específico, pois desejamos colocar vários comprimentos de onda numa mesma fibra.

### **Estado da arte em 2006**

O Efeito Raman é prejudicial, mas pode ser utilizado a nosso favor. Hoje existem amplificadores ópticos baseados nestes efeitos que permitem melhorar bastante a sensibilidade na recepção. Isto é muito conveniente para longos enlaces, pois não podemos lançar muita potência na transmissão (temos que evitar efeitos não lineares) e uma solução é melhorar a sensibilidade na recepção. A mistura de quatro ondas também pode ser utilizada construtivamente. Pode-se utilizá-la, por exemplo, para fazer conversão de comprimento de onda. A conversão de comprimento de onda é útil nas redes WDM quando um sinal óptico, com um determinado valor de comprimento de onda, precisa passar por um enlace onde este comprimento de onda já está sendo utilizado. Hoje muitos destes efeitos, já estudados e compreendidos, estão sendo utilizados para fabricação de novos dispositivos.

Quanto aos lasers de semicondutor, hoje temos lasers DFB com poços quânticos<sup>13</sup> na camada ativa e outros

<sup>13</sup> A camada de material que gera a luz dentro de um laser de semicondutor (camada ativa) define o comprimento de onda do laser. Quando esta camada é muito fina (menor que 10 nm) ela funciona como um poço de energia confinando os elétrons dentro dela (poço quântico). Este confinamento faz aparecer níveis de energia discretos dentro do poço. Poucos níveis de energia são permitidos para os elétrons. Efeito

truques que utilizam a natureza a nosso favor. Os novos dispositivos trazem benefícios como menor corrente de operação, possibilidade de miniaturização, maior tempo de vida de operação, maior potência óptica, facilidade de produção com vários comprimentos de onda, possibilidade de sintonizar o comprimento de onda. É possível até fabricar laser em conjunto com circuitos integrados de silício e com isso é possível construir equipamentos ou computadores que utilizam troca de informação sendo realizadas internamente na taxa de 40 Gb/s em guias ópticos conectando lasers e detectores<sup>14</sup>.

As fibras ópticas também estão mais desenvolvidas. Hoje existem fibras compensadoras de dispersão, fibras específicas para cabos submarinos, para aplicação em rede de telecomunicação metropolitana, para pequenas redes de acesso perto dos usuários finais e são fabricadas com características específicas para cada aplicação. As velhas fibras ópticas SMF com dispersão zero em 1310nm, agora melhoradas pela remoção de impurezas que absorviam muita luz perto de 1400nm, são ainda campeãs de venda e largamente utilizadas.

---

semelhante ocorre quando o elétron está confinado a um átomo. O confinamento gera poucos níveis de energia permitidos. A mecânica quântica é o modelo físico que consegue calcular estes níveis de energia. A precisão é incrível e os valores podem ser confirmados experimentalmente. A posição destes níveis de energia, que depende da largura do poço, passa a definir o comprimento de onda do laser. Além de definir o comprimento de onda, os poços quânticos permitem operação com menor corrente elétrica (menor consumo e menor dissipação de calor) e relaxa tensões aumentando o tempo de vida do dispositivo.

<sup>14</sup> Nos sistemas de comunicações ópticas os lasers geram a luz e os detectores, também fabricados com materiais semicondutores, são utilizados na outra extremidade da fibra para converter o sinal óptico em sinal elétrico.

Os sistemas ópticos estão bastante difundidos e a fibra chega bem próximo do usuário final com altas taxas de transmissão. Os computadores pessoais (PC) já possuem placas de rede na taxa de 1Gb/s e podem ter interface óptica com um par de fibras ópticas sendo ligados diretamente ao PC. Roteadores<sup>15</sup> e comutadores<sup>16</sup> com portas ópticas de 1Gb/s são comuns no mercado de equipamentos de rede de computadores. Portas de 10Gb/s também já são utilizadas. Outros dispositivos são utilizados para chavear a luz, filtrar a luz separando seus comprimentos de onda, juntar vários comprimentos de onda com pouca perda de potência e trocar o comprimento de onda sem que seja necessária a conversão do sinal óptico para sinal elétrico. Estes dispositivos permitem montar redes com comutação<sup>17</sup> totalmente óptica que são chamadas de redes transparentes e possuem capacidade de tratar um número muito grande de usuários com aplicações sofisticadas como os vídeos de alta resolução ou escoamento de tráfego de telefones celulares de terceira geração (celulares que entram na internet e também sintonizam TV digital).

Muitos destes dispositivos são ainda experimentais e têm custo elevado, mas o preço diminui quando aparece uma oportunidade de aplicação que justifique a fabricação em grande escala. Muitos outros dispositivos baseados em efeitos quânticos, efeitos não lineares e outros

---

<sup>15</sup> Roteadores são equipamentos de rede de computadores com capacidade para estabelecer rotas que passam por vários nós da rede conectando origem com destino.

<sup>16</sup> Chaves que conectam portas de entrada com portas de saída sem se preocupar com as rotas fim-a-fim.

<sup>17</sup> Chaveamento (tradução da operação designada em inglês como switching, termo utilizado na área de redes de computadores).

efeitos da natureza dos materiais, estão sendo estudados e podem ser utilizados em um futuro próximo. Muitas vezes estudos de efeitos fundamentais de comportamento da matéria e da luz permanecem nos laboratórios, mas sempre pode acontecer de serem coroados com uma aplicação tecnológica em um futuro próximo ou uma aplicação ainda não imaginada em um futuro mais longínquo.

## Referências

AGRAWAL, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997.

ALFEROV, Zh. I.; ANDREEV, V. M.; GARBUZOV, D. Z.; ZHILYAEV, Yu. V.; MOROZOV, E. P.; PORTNOI, E. L. e TRIOFIM, V. G. Investigation of the influence of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at room temperature. *Fiz. Tekh. Poluprov*, 4, 1970, p. 1826. (veja também em *Sov. Phys. Semicond.*, 4, 1971, p. 1573).

AMAZONAS, J.R.de A. *Projeto de Sistemas de Comunicações Ópticas*. São Paulo: Manole, 2005.

BABICHAK, C. C. Laser. *Ciência & Ensino*, n. 5, dezembro, 1998, p.24-27.

HAYASHI, I.; PANISH, M. B.; FOY, P. W. e SUMSKI, S. Junction lasers which operate continuously at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 17, 1970, p.109.

KECK, D. B. *Lightwave Special Report*, 2000. Disponível em <<http://www.corning.com/docs/opticalfiber/r3461.pdf>>.

SMOLKA, F. Depoimento. *Boletim Eletrônico Inovação*, Unicamp, 7 de agosto de 2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/nws-40anos-smolka.shtml>>.

---

*Antonio de Campos Sachs, trabalhou com fabricação de laser de semicondutor no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás de 1978 a 1994 durante o período estatal da instituição. Após a privatização do sistema Telebrás, de 1994 até 2005, trabalhou com desenvolvimento de sistemas ópticos na Fundação CPqD que herdou as atribuições do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telebrás. Atualmente Sachs é colaborador no LARC – Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores - Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, onde trabalha com redes ópticas no projeto KyaTera que é financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e tem por objetivo o desenvolvimento de uma rede óptica de alta capacidade interligando vários laboratórios do Estado de São Paulo.*

*E-mail: [antoniosachs@larc.usp.br](mailto:antoniosachs@larc.usp.br)*