

# Multiplexadores Add/Drop Baseados em Grades de Bragg para Enlaces Ópticos Analógicos

Marcelo Martins da Silva Costa, José Edimar Barbosa Oliveira e Olympio Lucchini Coutinho

Divisão de Engenharia Eletrônica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias, CEP12228-900, São José dos Campos, SP - Brasil

**Resumo** — Um multiplexador ótico add/drop (OADM) utilizando grades de Bragg à fibra (FBG) é um componente chave para processamento de sinais em sistemas de RF/micro-ondas utilizando-se da multiplexação por divisão por comprimento de onda (WDM). Neste artigo, de forma expositiva, ressaltam-se topologias de multiplexadores ópticos add/drop baseados em grades de Bragg para emprego em enlaces analógicos à fibra óptica que utilizam a WDM e suas variações. Da revisão bibliográfica, tem-se, como foco, a aplicação do componente fotônico add/drop para a manipulação de sinais de RF/micro-ondas. Estudos voltados para distorção de dados na forma de “crosstalk” interferométrico e características térmicas também são mencionados. Ao final, são tecidas considerações finais relativas ao emprego da tecnologia fotônica e à inserção deste tema em atividades de ensino e pesquisa em áreas de interesse operacional do Ministério da Defesa.

**Palavras-Chaves** — Multiplexação, multiplexador óptico add/drop, grades de Bragg.

## I. INTRODUÇÃO

Modernos sistemas de Guerra Eletrônica (GE) têm imposto aos equipamentos de geração, transmissão e processamento de sinais de RF/micro-ondas, rígidos requisitos de largura de faixa, baixas perdas e alta imunidade a interferências magnéticas. Paralelamente, sistemas comerciais de comunicações digitais e de distribuição de sinais de RF, tais como os de telefonia celular e de televisão a cabo [1], [2], têm apresentado estas mesmas demandas, em face à crescente expansão da capacidade de transmissão de dados ou de canais. Nos dois casos, o emprego da tecnologia fotônica usada para o tratamento de sinais na faixa de RF/micro-ondas tem proporcionado a fusão destas duas áreas do conhecimento.

A inserção da tecnologia de fotônica em sistemas de RF/micro-ondas tem encontrado crescentes aplicações comerciais, sejam elas de natureza civil ou militar. O processamento óptico de sinais de rádio frequência (RF), especialmente na faixa de micro-ondas, tem se tornado um tema bastante atraente com crescentes aplicações em áreas de Guerra Eletrônica, tais como o controle de antenas remotas, fontes irradiantes de RF/micro-ondas usadas como alvos e despistadores de armas antirradar, sistemas de antenas *phased array*, etc... Vale ressaltar que o uso de componentes fotônicos no lugar de dispositivos eletrônicos convencionais de mesma função traz consigo a vantagem intrínseca de sistemas ópticos, quais sejam imunidade elevada a interferências eletromagnéticas, capacidade de banda larga, baixa inserção de perdas, baixo peso, grande capacidade de integração, etc... Enquanto o processamento óptico de sinais

digitais é uma tecnologia bem estabelecida na área de telecomunicações, há uma lista crescente de aplicações analógicas onde o interesse de vários grupos de pesquisa pelo processamento de tais sinais tem aumentado. As redes de comunicações digitais a fibra óptica constituem atualmente a base do sistema de comunicações a longas distâncias. Avanços tecnológicos obtidos no desenvolvimento e na fabricação de fibras ópticas especiais e de multiplexadores têm contribuído para tal. Com o emprego da tecnologia de multiplexação por divisão por comprimento de onda, visando ao atendimento da crescente demanda por serviços de multimídia, o multiplexador óptico add/drop, de custo extremamente baixo, que desempenha um papel de seleção de comprimento de onda e roteamento de canal, representa um componente chave que permite uma maior conectividade e flexibilidade em redes WDM [3]. Tal tecnologia constitui uma solução promissora para aumentar a capacidade nos enlaces de telecomunicações de longa distância. Certamente, a grade de Bragg à fibra óptica torna-se também um dispositivo bastante atraente para tal finalidade, uma vez que fornece alta refletividade em um determinado comprimento de onda com perdas de transmissão desprezíveis [4], fornecendo uma seleção com baixo “crosstalk” entre canais adjacentes. Encontram-se, na literatura, multiplexadores add/drop empregando grades de Bragg escritas em fibras dopadas, dentre eles: interferômetro Mach-Zehnder com grades de Bragg (MZ-FG) [5], dois circuladores combinados com uma grade de Bragg [6], divisores de feixe empregando grades à fibra [7] e par de grades de Bragg acopladas (FGC) [8]. Projetos desenvolvidos com acopladores direcionais e grades de Bragg também têm permitido fazer com que múltiplos canais de informação (cada qual com um diferente comprimento de onda) sejam transmitidos simultaneamente sobre uma única fibra.

## II. MULTIPLEXADORES ÓPTICOS ADD/DROP

Várias configurações de multiplexadores add/drop foram descritas na literatura científica, sendo a mais comum aquela que utiliza um acoplador direcional com uma grade de Bragg em cada braço do acoplador. Tal configuração foi uma das primeiras a ser utilizada e foi baseada em um acoplador de 3 dB.

Marcelo M. S. Costa, [mmscosta@ita.br](mailto:mmscosta@ita.br), Tel +55-12-39476894; José Edimar B. Oliveira, [edimar@ita.br](mailto:edimar@ita.br); Olympio L. Coutinho, [olympio@ita.br](mailto:olympio@ita.br).

Uma outra variação de multiplexadores add/drop contendo acopladores direcionais foi demonstrada por Park K.N. et al. [9] em que o dispositivo fotônico é baseado em interferômetros Mach-Zehnder. Os multiplexadores descritos anteriormente foram construídos em guias monomodo.

O conceito básico do dispositivo multiplexador/demultiplexador foi originalmente proposto por Johnson D.C. e Hill K.O., em 1987 [10], tendo-se demonstrado tal desempenho, pela primeira vez, num experimento WDM de seis canais, a uma taxa de 10 Gbps [11].

Na Fig. 1, de Narayankhedkar S.K. et al., tem-se um diagrama esquemático de um multiplexador óptico add/drop baseado em grades de Bragg à fibra. Considerando-se uma onda incidente com  $N$  canais com comprimentos de onda de  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  na entrada do dispositivo óptico, o canal a ser extraído no terminal “drop” é fortemente refletido pela grade de Bragg, sendo os demais canais transmitidos com baixa inserção de perdas. Pode-se inserir dados ao sistema de multiplexação, através do terminal “add”, utilizando-se do mesmo comprimento de onda refletido, tendo-se, na saída do multiplexador, o sinal original.

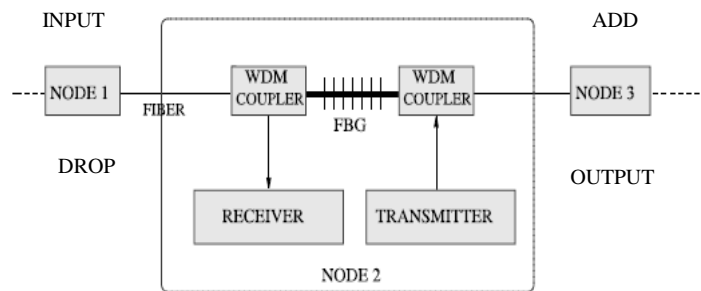


Fig. 1. Configuração típica de um OADM baseado em grades de Bragg.

Interferômetros Mach-Zehnder compostos por grades de Bragg à fibra são dispositivos promissores para multiplexação óptica de comprimentos de onda. Comparando-se com aqueles que utilizam circuladores ópticos, tem-se baixas perdas, tamanhos menores e maior potência admissível de entrada devido à presença da fibra óptica, conforme Mizuochi T. et al. Uma outra configuração proposta, em 1994, por Archambault J.L. et al. refere-se a um “grating-frustrated coupler” [12]. Neste acoplador, uma grade de Bragg foi escrita no núcleo de uma fibra de um acoplador de 100% de acoplamento. O canal a ser extraído vê um acoplador desbalanceado, não ocorrendo o acoplamento

Bilodeau F. et al., ao projetar e fabricar, em 1995, um dispositivo interferométrico multiplexador/demultiplexador (MUX/DEMUX) para aplicação em um sistema WDM de sete canais, com canal de espaçamento de 100 GHz (0,8 nm), a 1550 nm, demonstraram alto desempenho ao atingir eficiência igual a 99,4% quando da extração do sinal e ao minimizar o “crosstalk”, adotando-se uma refletividade mínima de 99%. Entre os principais parâmetros medidos, obteve-se uma rejeição superior a -20 dB, no terminal “drop”, dos canais adjacentes e perdas inferiores a 0,5 dB, no terminal de saída.

Embora multiplexadores interferométricos por divisão por comprimento de onda tenham demonstrado excelentes características, há algumas desvantagens, como, por exemplo, necessidade de sintonia fina dos braços do interferômetro,

alto custo e dificuldades de fabricação [Othonos A. et al.]. Diante do exposto, alternativas baseadas em sistemas não interferométricos foram desenvolvidas.

Dentre elas, em 1997, Se Yoon Kim et al., experimentalmente, construíram, conforme Fig. 2, um OADM empregando dois divisores de feixe (PBS), controladores de polarização (PC) e duas grades de Bragg idênticas com refletividade de 99% a 1549,3 nm, 0,4 nm de largura de banda. A rejeição de canais adjacentes foi maior que -22 dB e a perda de sinal através da saída, menor que -30 dB. Tal multiplexador, de fácil fabricação, apresentou alta estabilidade contra perturbações e bom desempenho num sistema de transmissão WDM. Vale ressaltar que o canal refletido pelas grades, com polarização circular, ao atravessar os PCs, torna-se outra vez linearmente polarizado, defasado de 90 graus em relação a polarização original de entrada. Um dos maiores méritos deste OADM é referente a baixa sensibilidade às mudanças de temperatura ambiente, por serem os sinais direcionados ao terminal de saída não por interferência, mas pela simples adição da intensidade de dois feixes ortogonais polarizados.

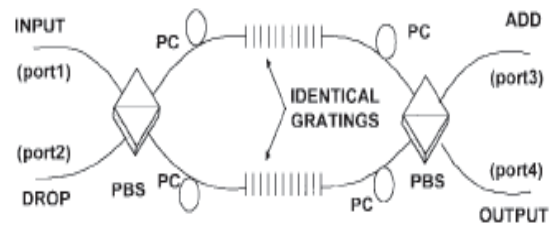


Fig. 2. Esquema de um multiplexador add/drop não interferométrico com grades de Bragg e divisores de feixe.

Dentre os sistemas não interferométricos desenvolvidos, é notável mencionar um outro multiplexador add/drop de construção simples, baseado em grades de Bragg e circuladores ópticos, onde se observou baixa inserção de perda (2 dB para os canais add/drop) e um dos maiores isolamentos dos terminais “drop” e “add” (superior a 50 dB) [Othonos A. et al.]. Similar multiplexador programável add/drop, de quatro canais, foi reportado por Quetel L. et al. [13]

Através do “setup” experimental da Fig. 3, Mizuochi T. et al. confirmaram o desempenho e as excelentes características do dispositivo através de seis canais, faixa de 1550,8 a 1567,8 nm e espaçamento de canal de 3,4 nm, a 10Gbps, dentre elas: a) refletividade da grade de Bragg de 98%; e b) perdas de 0,7 dB no terminal de entrada em relação ao de extração e 0,5 dB, em relação ao de saída.

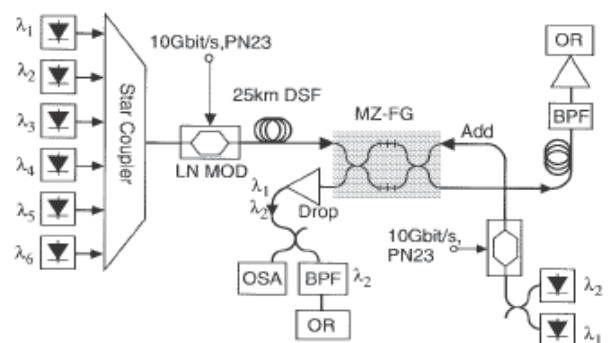


Fig. 3. Setup experimental de um OADM, a 10 Gbps, usando o MZ-FG.

A Fig. 4 mostra o espectro WDM referente a cada terminal [Mizuochi T. et al.]. No terminal “drop”, Fig. 4(b), pode-se observar um valor de rejeição de  $-38$  dB obtido para os canais adjacentes. A Fig. 4(c), terminal “OUTPUT”, apresenta uma pequena fuga de  $-22$  dB dos canais extraídos.

Neste experimento, observou-se uma degradação da taxa de erro de bit (BER) quando da adição simultânea do canal extraído causada pela interferência “crosstalk”.

Para contornar as exigências de equilíbrio do interferômetro de Mach-Zehnder, em 1998, uma solução baseada em fibra “twincore”, onde dois guias de onda foram incorporados em uma mesma casca, foi proposta por Bethuys S. et al. [14]. Neste “setup”, o comprimento de onda lançado no terminal de entrada e refletido pelas grades de Bragg estará presente no terminal “drop” se o caminho óptico entre o acoplador 3dB de entrada e as grades encontrar-se em fase. Devido às considerações simétricas, a função “add” requer a mesma condição. Nos resultados experimentais, obteve-se, a exemplo de Bilodeau F. et al., baixa inserção de perdas para os comprimentos de onda fora da faixa de rejeição, inferior a 0,5 dB. No comprimento de onda de Bragg, 1547 nm, a extração chegou a aproximadamente  $-29$  dB, confirmando-se o isolamento de 30 dB entre as portas “add” e “output” e a funcionalidade do dispositivo.

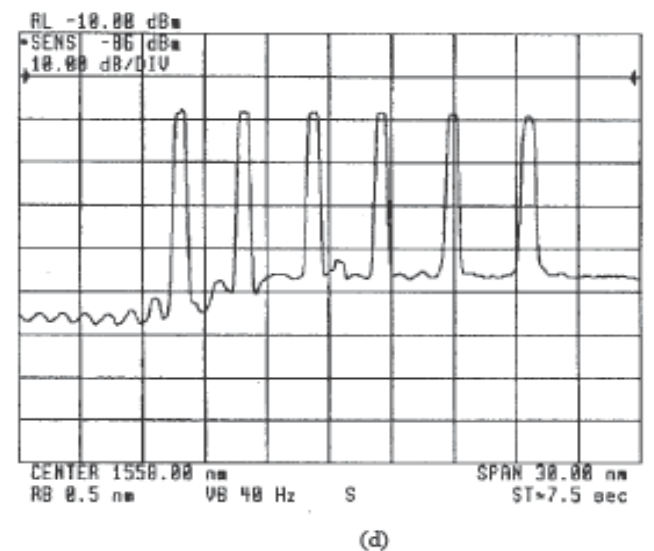
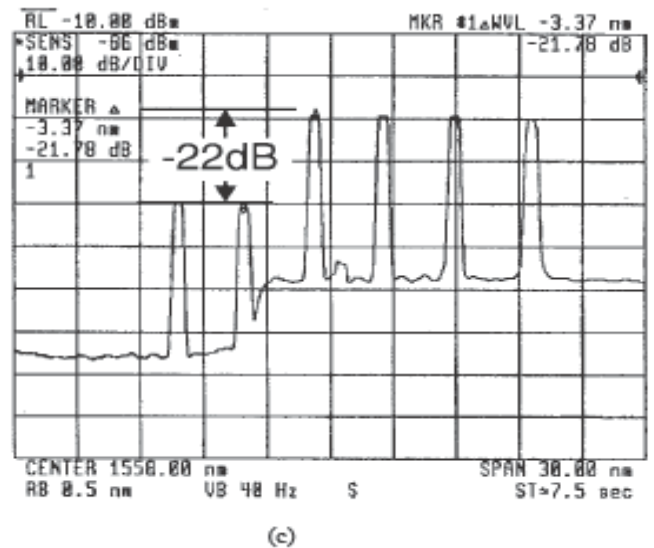
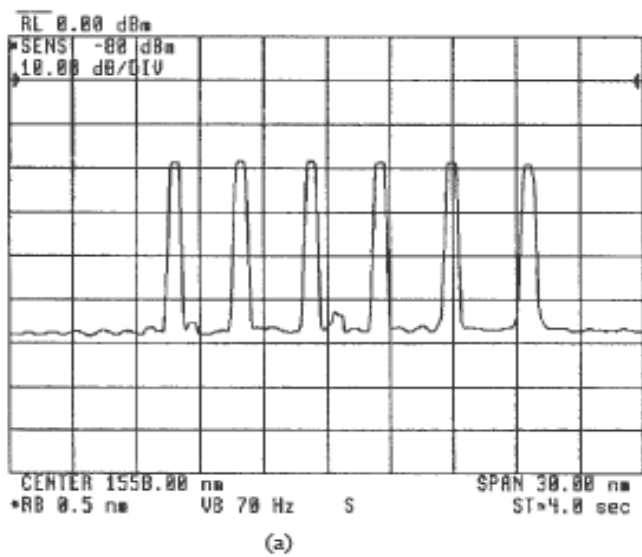


Fig. 4. Espectro WDM a cada porta do MZ-FG. (a) porta de entrada. (b) extração de  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . (c) porta de saída. (d) recombinação do sinal.

Em 1998, Kewitsch A.S. et al.[15] demonstraram um multiplexador add/drop (ADM) com zero inserção de perdas (aproximadamente 0,1 dB), sem dependência da polarização e com estreita largura de banda espectral de 0,7 nm para utilização na técnica WDM (vide Fig. 5). Para se obter  $-30$  dB de rejeição adequada de canal, uma eficiência de grade de 99,9% foi requerida.

Com a eficiência add/drop aumentada, espera-se utilizar tal filtro em diversas aplicações de multiplexação por divisão por comprimento de onda densa (DWDM), incluindo roteamento e comutação óptica.

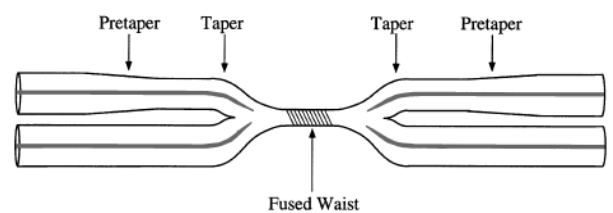


Fig. 5. Estrutura do filtro add/drop.

Em 2002, um multiplexador óptico add/drop utilizando um par de grades de Bragg acopladas foi proposto por Yokota H. et al. (vide fig. 6).

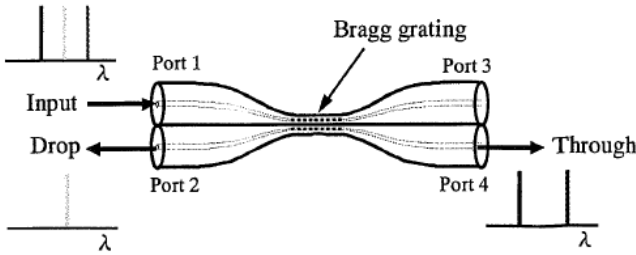


Fig. 6. ADM com par de FBG acopladas.

### III. “CROSSTALK” INTERFEROMÉTRICO E CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

A propagação de sinais num DWDM utilizando-se de grades de Bragg é afetada de duas maneiras: a primeira, através da distorção de dados com interferência entre símbolos (ISI) dentro de um mesmo canal e a segunda, o “crosstalk” inter canal, está relacionada com os lóbulos laterais do espectro de refletividade [16].

No caso de um circuito OADM utilizando o MZ-FG, interferência “crosstalk” é induzida entre o sinal “drop” e a fuga do sinal “add” ou situação inversa, devida principalmente a imperfeição da refletividade da grade de Bragg.

Segundo Bilodeau F. et al., devido a simetria do dispositivo, “crosstalk” entre sinais multiplexados e demultiplexados ocorre a menos que a refletividade das grades de Bragg seja infinitamente alta. Na prática, para minimizá-la, refletividades acima de 99% são requeridas.

Para solucionar o problema de interferência “crosstalk”, propõem-se dois esquemas: o primeiro é o regime de compensação de comprimento de onda e o segundo, MZ-FG em cascata.

Os dispositivos do regime de compensação de comprimento de onda baseados em interferômetro Fabry-Perot são de difícil manufatura devido às tolerâncias requeridas para os sistemas.

Assumindo, conforme Fig. 7[Mizuochi T. et al.], no terminal de entrada de um MZ-FG, a presença do campo elétrico  $E_{in}$  e ausência de perda excessiva, pode-se afirmar que o respectivo campo elétrico de cada porta é governado pela Teoria de Modos Acoplados. Neste caso, o campo elétrico, no terminal de saída, é dado por (1)

$$E_{out}(\lambda) = -jE_{in}(\lambda)e^{-j\beta L}[\cos \kappa_1 l_1 \cdot \text{sen} \kappa_2 l_2 + e^{j\phi} \text{sen} \kappa_1 l_1 \cdot \cos \kappa_2 l_2] \quad (1)$$

onde  $\beta$  e  $L$  são a constante de fase e o comprimento da região de interação, respectivamente,  $\kappa_1 l_1$  e  $\kappa_2 l_2$  são os parâmetros de acoplamento dos acopladores de 3dB e  $\phi$ , fase. O campo elétrico, no terminal “add”, é dado por (2)

$$\overline{E_{out}(\lambda)} = E_{in}(\lambda)e^{-j\beta L}[\cos \kappa_1 l_1 \cdot \cos \kappa_2 l_2 - e^{j\phi} \text{sen} \kappa_1 l_1 \cdot \text{sen} \kappa_2 l_2] \quad (2)$$

No caso do comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), o campo elétrico do terminal “drop” é expresso por (3)

$$E_{drop}(\lambda) = \sqrt{R}E_{in}(\lambda)e^{-j\beta L} \text{sen} \kappa_1 l_1 \cdot \cos \kappa_1 l_1 (1 + e^{j\phi}) \quad (3)$$

sendo  $R$  a refletividade da grade de Bragg, que relaciona as potências incidente e refletida na porção de fibra óptica.

A perda no terminal de saída, no comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), é definida por (4)

$$\overline{E_{drop}(\lambda)} = -j\sqrt{(1-R)}E_{in}(\lambda)e^{-j\beta L} \cdot (\cos \kappa_1 l_1 \cdot \text{sen} \kappa_2 l_2 + e^{j\phi} \text{sen} \kappa_1 l_1 \cdot \cos \kappa_2 l_2) \quad (4)$$

Assume-se que o campo elétrico do terminal de saída é dado por (5)

$$E_{add}(\lambda) = \sqrt{R}E_{in}(\lambda)e^{-j\beta L} \text{sen} \kappa_2 l_2 \cdot \cos \kappa_2 l_2 (1 + e^{j\phi}) \quad (5)$$

A perda do terminal “drop” no comprimento de onda  $\lambda_B$  é definida por (6)

$$\overline{E_{add}(\lambda)} = -j\sqrt{(1-R)}E_{in}(\lambda)e^{-j\beta L} \cdot (\cos \kappa_1 l_1 \cdot \text{sen} \kappa_2 l_2 + e^{j\phi} \text{sen} \kappa_1 l_1 \cdot \cos \kappa_2 l_2) \quad (6)$$

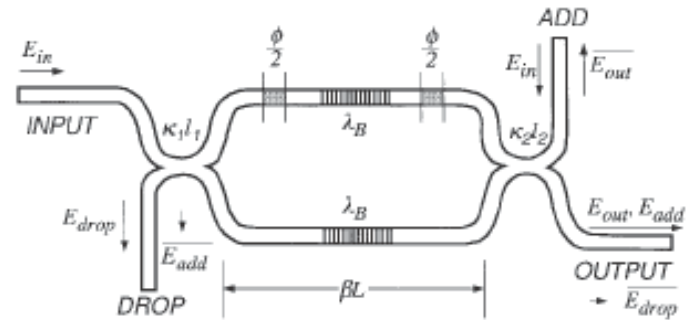


Fig. 7. Modelo de análise para “crosstalk” interferométrico.

A diretividade é definida pela razão entre as potências, nos terminais “add” e de saída,  $\frac{|E_{out}(\lambda)|^2}{|E_{add}(\lambda)|^2}$  e  $|E_{out}(\lambda)|^2$ , respectivamente.

A interferência “crosstalk” observada no terminal “drop” é expressa por (7)

$$X_{drop} = \frac{|E_{add}(\lambda)|^2}{|E_{drop}(\lambda)|^2} \quad (7)$$

e, no terminal de saída, a mesma interferência é expressa como segue por (8)

$$X_{add} = \frac{|E_{drop}(\lambda)|^2}{|E_{add}(\lambda)|^2} \quad (8)$$

No terminal de saída de um projeto em cascata de dois MZ-FG, simetricamente conectados com uma grade de Bragg, a interferência devido ao sinal residual “drop” pode ser dada por (9)

$$X_{add} = \frac{(1 - \varepsilon)(1 - R)^3}{R} \quad (9)$$

onde  $\varepsilon$  é a diretividade.

No terminal de extração, a interferência devido ao sinal “add” pode ser obtida por (10)

$$X_{drop} = \frac{\varepsilon^2 (1 - R)^3}{R(1 - \varepsilon)} \quad (10)$$

Com uma refletividade da grade de Bragg de 93%, pode-se suprimir o “crosstalk” devido ao sinal residual “drop”, no terminal de saída, a -35 dB. Este mesmo valor pode ser alcançado, no terminal de extração, para uma refletividade de somente 70% (vide Fig. 8).

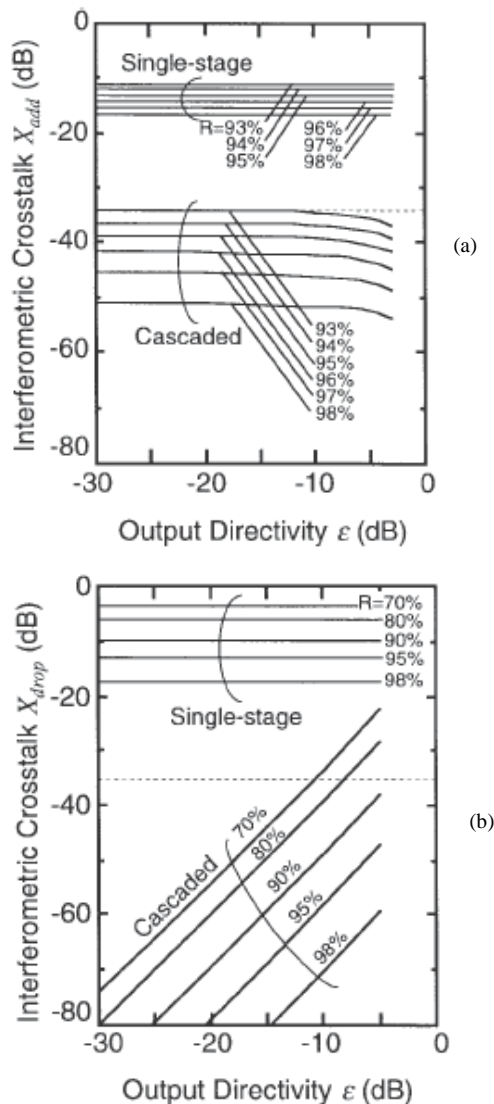


Fig. 8. MZ-FG em cascata. (a) crosstalk interferométrico induzido pelo sinal “drop” residual, no terminal de saída. (b) crosstalk interferométrico induzido pelo sinal “add” residual, no terminal de extração [Mizuochi T. et al.].

A Fig. 9 ilustra um diagrama esquemático de um interferômetro Mach-Zehnder composto por grades de Bragg proposto por Mizuochi T. et al. Ainda que a refletividade do primeiro MZ-FG seja imperfeita, a grade de Bragg intermediária (FG) intercepta o sinal residual  $\lambda_B$ . Além disso, o segundo MZ-FG também pode eliminar uma possível fuga da grade intermediária, sendo a interferência não mais detectável.

Em contrapartida, o comprimento de onda inserido no terminal “add” é refletido pelo segundo MZ-FG para emergir do terminal de saída. De forma idêntica, qualquer fuga de sinal pode ser eliminada pela grade intermediária ou pelo primeiro MZ-FG.

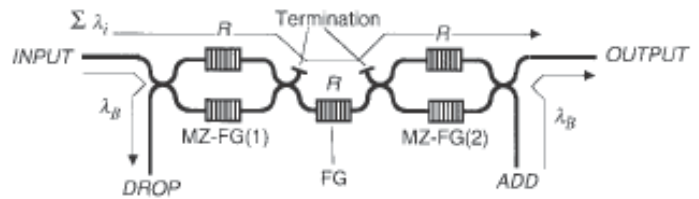


Fig. 9. Diagrama esquemático de um MZ-FG em cascata.

Yong-Hwan Son et al., em 2009, utilizando-se de uma fonte óptica de banda larga, na faixa de 1530 nm a 1560 nm, analisaram numericamente o espectro de saída a fim de investigar as características térmicas de operação do multiplexador óptico add/drop. Sabendo-se que o comprimento de onda de Bragg sofre alteração de aproximadamente 0,014223 nm quando a temperatura aumenta de 1°C numa faixa de -30°C a 90°C, resultados experimentais mostraram uma mudança de cerca de 0,011266 nm. Diante de tais valores, num sistema DWDM com espaçamento de canal de 25 GHz, o comprimento de onda central de um certo canal pode ser alterado no caso de uma variação de temperatura de -17°C a +17°C. Para uma variação de temperatura de +8,3°C a -8,3°C e conforme visto anteriormente, o desempenho de um certo canal pode vir a degradar devido ao efeito “crosstalk” gerado entre canais adjacentes.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o exposto, pode-se observar que o componente fotônico em evidência possui diversas aplicações em sistemas WDM, podendo ser utilizado para prever erros ou ajustar o comprimento de onda central de um sinal óptico, além da possibilidade de utilização como filtro óptico. Tais dispositivos baseados em grades de Bragg apresentam a vantagem de serem adaptáveis às fibras ópticas. Apesar de exigir um equilíbrio preciso, o interferômetro Mach-Zehnder apresentou excelentes características, tais como baixa inserção de perdas inferior a 0,5 dB e rejeição de canais adjacentes da ordem de 30 dB. Lembrando-se que o desempenho de um certo canal pode vir a degradar devido ao efeito “crosstalk”, além do apresentado, vários outros autores demonstraram projetos em cascata, tendo o presente esquema mostrado-se mais apropriado ao permitir a possibilidade de um OADM livre de perturbações e maior conectividade. Pesquisas em áreas de atuação de natureza dual trazem consigo vantagens como a facilidade de aquisição de componentes e sistemas, aliada à redução de custos

decorrente da produção em larga escala, e a inserção de resultados provenientes de pesquisas no mercado de aplicação em massa. Some-se a estas vantagens a facilidade de atração de recursos humanos e participação de instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento em prol de uma Política de Defesa Nacional (PDN).

#### REFERÊNCIAS

- [1] Alwyn J. S., Keith J. W., "Microwave Photonics", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, Dez. 2006.
- [2] Cox C.H., "Techniques and applications of analog fiber optic links", IEEE, 1995.
- [3] Mizuochi T., Kitayama T., Shimizu K., Ito K., "Interferometric crosstalk-free optical add/drop multiplexer using Mach-Zehnder-based fiber gratings", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, Fev. 1998.
- [4] Othonos A., Kalli K., "Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing", Artech House, Boston, 1999.
- [5] Bilodeau F., Johnson D.C., Thériault S., Malo B., Albert J. et al., "An all-fiber dense-wavelength-division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 388-390, Abr. 1995.
- [6] Giles C.R., Mizrahi V., "Low-loss add/drop multiplexer for WDM lightwave networks", In *Tenth Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, 1995, Tech. Dig., vol. 3, paper ThC2-1.
- [7] Se Yoon Kim, Sang Bae Lee, Joon Chung, Sang Yong Kim, Il Jong Park et al., "Highly stable optical add/drop multiplexer using polarization beam splitters and fiber Bragg gratings", *IEEE Photonics Letters*, vol. 9, Ago. 1997.
- [8] Yokota H., Igarashi J., Satoda Y., Ohuchi S., Sasaki Y., "All-fiber optical add-drop multiplexer using a pair of fiber grating couplers", *Optical Review*, vol. 9, pp. 94-99, 2002.
- [9] Kwang No Park, Young Tak Lee, Min Hyung Kim, Kyung Shik Lee, Yong Hyub Won, "All-fiber drop-pass filters with fiber Bragg gratings", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 555-557, Abr. 1998.
- [10] Johnson D.C., Hill K.O., Bilodeau F., Faucher S., "New design concept for a narrowband wavelength-selective optical tap and combiner", *Electron. Lett.*, vol. 23, pp. 668-669, Jun. 1987.
- [11] Mizuochi T., Shimizu K., Kitayama T., "All-fiber add/drop multiplexing of 6x10 Gbit/s using a photo-induced Bragg grating filter for WDM networks", In *Tech. Dig. OFC'96*. San Jose, CA, Fev. 1996, paper WF2.
- [12] Archambault J. L., Russell P. St. J., Barcelos S., Hua P., Reekie L., "Grating-frustrated coupler: a novel channel-dropping filter in single-mode optical fiber", *Optics Letters*, vol. 19, pp. 180-182, Fev. 1994.
- [13] Quétel L., Rivoallan L., Delevaque E., Poignant H., Monerie M. et al., "Programmable fiber grating based wavelength demultiplexer", In *Proc. OFC'96*, Paper WF6, pp. 120-121, 1996.
- [14] Bethuys, S., Lablonde L., Rivoallan L., Bayon J.F., Brilland L. et al., "Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg gratings in twincore fibre Mach-Zehnder interferometer", *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1250-1252, Jun. 1998.
- [15] Kewitsch A.S., Rakuljic G.A., Willems P.A., Yariv A., "All-fiber zero-insertion-loss add-drop filter for wavelength-division multiplexing", *Optics Letters*, vol. 23, pp. 106-108, Jan. 1998.
- [16] Narayankhedkar S.K., Shevgaonkar R.K., "Inter channel crosstalk in fiber Bragg grating based optical add drop multiplexer", *Information Sciences*, pp. 53-59, 2003.
- [17] Yong-Hwan Son, Yong-Yuk Won, Moon-Ki Hong, Sang-Kook Han, "Thermal characteristics of an all-optical add-drop multiplexer using fiber Bragg gratings and Mach-Zehnder interferometer", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, Fev. 2009.