

**SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E
OPTOELETRÔNICA, 11, São Paulo, 2004. (MOMAG 2004)**

SBMO – SBMAG

16-19 Agosto 2004

São Paulo, SP

ISSN – 1807-0809

Estrutura ARROW para Interconexões e Filtros Ópticos

Fábio Renan Durand

D 948 e

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 13081, Campinas, SP, Brasil.

Ben-Hur Viana Borges

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, 13566-590, São Carlos, SP, Brasil.

Resumo — Neste trabalho foi projetada e analisada uma nova estrutura ARROW (*Antiresonant Reflecting Optical Waveguide*) para aplicações em interconexões e filtros ópticos. A estrutura apresentou os seguintes resultados: *leakage* em torno de 300 dB/cm, eficiência de acoplamento de 80% para fotodetectores de 300 μm , também observou-se que alterando a espessura de uma das camadas é possível alterar a largura de banda do sinal acoplado. Empregando este recurso projetou-se um filtro óptico com isolamento – 32 dB entre canais separados em 0,8 nm. Observa-se que esta estrutura pode ser obtida empregando técnicas de fabricação planares.

Palavras-chaves — ARROW, Interconexões e Filtros Ópticos.

I. INTRODUÇÃO

A integração monolítica de guias de onda com fotodetectores tem se apresentado como elemento imprescindível em aplicações como sensores, interconexões e comunicações ópticas [1]. A combinação da óptica integrada com circuitos eletrônicos integrados sobre mesmo substrato deu origem a dispositivos optoeletrônicos integrados que reúnem as vantagens da óptica integrada como imunidade à interferência eletromagnética, maior largura de banda e tamanho reduzido, com as características de processamento de sinal dos circuitos eletrônicos [1]. A integração monolítica deste tipo de dispositivo apresenta as vantagens da miniaturização, maior nível de confiabilidade, produção em larga escala e baixo custo [2]. Em geral, duas tecnologias são utilizadas na integração de dispositivos optoeletrônicos, a primeira tecnologia é baseada em semicondutores III-V, como GaAs ou InP, os quais permitem a integração monolítica de circuitos integrados optoeletrônicos incluindo guias de onda, lasers e fotodiodos sobre o mesmo substrato [3]. A segunda tecnologia é baseada em silício, que possibilita a integração monolítica de circuitos eletrônicos, circuitos fotônicos e estruturas micromecânicas, utilizando processos de fabricação de baixo custo [3].

Um tipo de guia de onda fabricado sobre o substrato de silício que vem sendo empregado com sucesso na integração com fotodetectores é o guia de onda ARROW (*Antiresonant Reflecting Optical Waveguide*) [4]. Este tipo de guia de onda foi originalmente proposto por Duguay *et al* em 1986 [5] e emprega o princípio das reflexões anti-ressonantes no confinamento do sinal óptico. As principais características

que estes guias de onda apresentam são perdas baixíssimas de propagação, efetivamente monomodo para um tamanho do núcleo relativamente grande ($\sim 9\mu\text{m}$), facilitando conexões eficientes com fibras ópticas monomodo, alto grau de confinamento da luz no núcleo, seletividade quanto à polarização e comprimento de onda, fácil processo de fabricação e tolerância em relação a variação da espessura das camadas [5][6]. Como será detalhado a seguir, várias configurações de guia ARROW vêm sendo propostas com o objetivo de alcançar um bom nível de acoplamento entre o sinal do guia de onda e o fotodetector. Um dos melhores resultados obtidos consiste de um *leakage* em torno de 200 dB/cm [4], onde o *leakage* é o direcionamento da potência óptica para o substrato. Porém, se observa que para alcançar um nível elevado de *leakage* são projetadas estruturas com um alto grau de complexidade de fabricação. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é projetar e analisar uma nova estrutura ARROW para efetuar o acoplamento do sinal óptico com o fotodetector. Os requisitos que esta estrutura deve apresentar consistem de um valor elevado de *leakage* e fácil processo de fabricação. O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II ilustram-se os principais tipos de técnicas de acoplamento empregando guias ARROW. Na Seção III descreve-se a estrutura proposta juntamente com o seu princípio de funcionamento. Na Seção IV ilustra-se a metodologia empregada na análise. Na seção V são apresentados os principais resultados obtidos e finalmente, na Seção VI discutem-se as conclusões obtidas no trabalho.

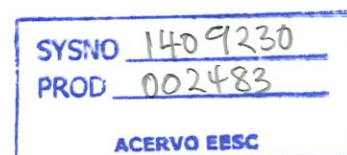
II. TÉCNICAS DE ACOPLAMENTO

Nos guias de onda ARROW (ver Fig. 1) a luz que se propaga no núcleo de SiO_2 sofre reflexão interna total na interface ar- SiO_2 , e reflexões muito altas nas interfaces Si_3N_4 - SiO_2 . Esta alta refletividade, na ordem de 99,96%, é obtida devido à característica anti-ressonante das reflexões nas interfaces Si_3N_4 - SiO_2 [6]. Considera-se que as camadas de Si_3N_4 tenham características de transmissão de um ressoador Fabry-Perot. Isto se explica pelo fato destas possuírem índice de refração muito mais alto que as demais camadas, portanto as interfaces Si_3N_4 - SiO_2 comportam-se como espelhos paralelos. Assim, os comprimentos de onda que satisfazem a condição de ressonância do ressoador Fabry-Perot serão transmitidos no sentido vertical até a próxima camada. As reflexões desta natureza são designadas por reflexões ressonantes. As reflexões compostas por comprimentos de onda que não satisfazem a condição de ressonância e que

F. R. Durand, durand@dsif.fee.unicamp.br, Tel +55-19-37883766, Fax +55-19-378863760; B. V. Borges, benhur@sel.eesc.sc.sup.br, Tel. +55-16-2739372.

1409230

241164



foram quase totalmente refletidas são designadas por reflexões anti-ressonantes.

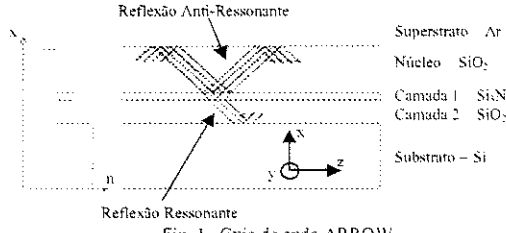


Fig. 1. Guia de onda ARROW.

Quando uma reflexão ressonante ocorre, existe a fuga de potência óptica para o substrato. Isto acontece porque a luz tende a ir para o material de índice de refração mais elevado. Essa fuga de potência óptica é comumente denominada na literatura como *leakage*, termo que será utilizado neste trabalho para quantificar este tipo de perda. Portanto, em guias de onda ARROW, as perdas por *leakage* podem ser baixíssimas ou elevadíssimas dependendo da espessura das camadas que funcionam como ressonador Fabry-Perot. O acoplamento do sinal óptico com o fotodetector localizado no substrato vem sendo realizado por meio da manipulação destas camadas que funcionam como ressonador Fabry-Perot [4][7][8]. As três principais formas de acoplamento guia-fotodetector podem ser vistas esquematicamente na Fig. 2.

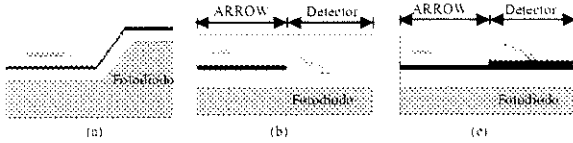


Fig. 2. Tipos de acoplamentos utilizados. (a) Acoplamento End-Fire, (b) e (c) Acoplamento por *leakage*.

No acoplamento *End-Fire*, Fig. 2(a), o sinal óptico percorre o guia de onda inclinado até alcançar o fotodetector que está no substrato. Esta configuração é pouco empregada em virtude de somente um fotodetector poder ser acoplado a cada guia de onda e em função da dificuldade de sua fabricação empregando processos planares [4][8]. No acoplamento por *leakage*, tanto a Camada 1 como a Camada 2 podem ser alteradas na região sobre o fotodetector para induzirem uma grande quantidade de *leakage*. Assim, ocorre o direcionamento do sinal óptico para o fotodetector. Com relação à alteração da Camada 1 sobre o detector existem duas configurações largamente empregadas como mostram as Fig. 2(b) e Fig. 2(c). Na Fig. 2(b) a Camada 1 é removida e na Fig. 2(c) a Camada 1 possui uma espessura que satisfaz a condição de ressonância, dada por [6]:

$$d_c = \frac{\lambda}{2n_c} \left[m + \frac{3\lambda}{2\pi \cdot d_{cr} \sqrt{n_c^2 - n_l^2}} \right] \left[1 - \left(\frac{n_l}{n_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda, n_c é o índice de refração do núcleo, n_l é o índice de refração da Camada 1 e d_{cr} é a espessura efetiva do núcleo incluindo a defasagem de Goos-Hänchen. O valor de d_{cr} pode ser aproximado por [6]:

$$d_{cr} = d_c + \zeta \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_c^2 - n_0^2}} \quad (2)$$

onde n_0 é o índice de refração da camada superior ao núcleo. Neste caso, n_0 representa o índice de refração do ar e ζ representa os efeitos da polarização e possui valor igual a 1 para modos TE e $(n_l/n_c)^2$ para modos TM [6]. Empregando estas configurações obtêm-se um *leakage* de 7 e 9 dB/cm para Fig. 2(b) e Fig. 2(c), respectivamente [4]. Outra configuração empregada no acoplamento por *leakage* consiste na alteração da Camada 2 para aumentar a eficiência de acoplamento. A Fig. 3 ilustra a técnica mais empregada onde a espessura da Camada 2 é zero.

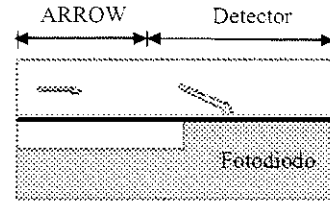


Fig. 3. Acoplamento por *leakage* utilizando a espessura da Camada 2 igual a zero.

Neste caso, a Camada 1 atua como uma camada anti-refletora e possui uma espessura otimizada dada por [7]:

$$d_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \left[1 - \left(\frac{n_l}{n_c} \right)^2 \right] \cos^2 \theta \quad (2m+1) \quad (3)$$

Para este tipo de configuração obtêm-se valores altos de *leakage*, podendo alcançar até 200 dB/cm. Porém, esta configuração exige técnicas de fabricação mais complexas [4]. Dentre as principais aplicações destas técnicas de acoplamento encontradas na literatura pode-se citar o demultiplexador integrado com o fotodetector para aplicações WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) proposto em [7] e as estruturas para interconexões ópticas empregando fotodetectores laterais propostas em [8]. Em [7] foi projetado um dispositivo para detecção dos comprimentos de onda empregando a configuração ilustrada na Fig. 2(c). Para a detecção dos comprimentos de onda de 0,78 e 0,88 μm obteve-se uma isolamento em torno de -21,6 dB. A eficiência de detecção foi de 58% para um fotodetector de 100 μm . Já em [8] empregou-se um fotodetector lateral sobre um superstrato de ITO que foi projetado para a condição de ressonância. Esta variação da configuração ilustrada na Fig. 2(c) apresentou *leakage* da ordem de 200 dB/cm. Recentemente observou-se o emprego de guias ARROW em conjunto com redes de Bragg para acoplamento em interconexões ópticas [9]. Como resultado obteve-se uma eficiência de acoplamento de 64% para uma largura de banda de 3 nm. Neste contexto, verifica-se que um dos principais desafios no projeto de dispositivos optoeletrônicos é o direcionamento do sinal óptico até o fotodetector. Isto ocorre em função da compatibilidade dos materiais do detector e do guia de onda, e do processo de fabricação. Assim, um tipo de

guia de onda que satisfaz estes requisitos é o guia de onda ARROW fabricado sobre substrato de silício. Porém, mesmo observando o emprego deste tipo de guia de onda como elemento de acoplamento com o fotodetector para aplicações como WDM e interconexões ópticas, verificou-se que as estruturas ARROW utilizadas acoplam o sinal óptico numa faixa larga de comprimentos de onda. Desta forma, o projeto e a análise de uma nova estrutura ARROW visando acoplar o sinal óptico até o fotodetector em um comprimento de onda distinto e com largura de banda estreita de forma não sofra interferências dos comprimentos de onda adjacentes será descrito na próxima seção.

III. ESTRUTURA PROPOSTA

A estrutura projetada e analisada é ilustrada em corte na Fig. 4. Uma estrutura similar foi empregada inicialmente em [10], para compor um filtro tipo *dropping* em conjunto com um duplo refletor de Bragg (DBR) inscrito em fibra tipo D. Porém, não foi analisado seu desempenho e seus parâmetros não foram otimizados para aplicações como interconexões ópticas e filtros ópticos para integração monolítica. Esta análise se justifica tendo em vista o grande interesse na integração de filtros ópticos seletivos em comprimento de onda e fotodetectores em um único substrato de silício. Este dispositivo teria um tamanho reduzidíssimo comparado a uma estrutura que agrega filtro óptico e fotodetector em regiões distintas do substrato.



Fig. 4. Estrutura ARROW projetada e analisada

Nesta estrutura a Camada 1 é projetada para funcionar como um refletor para a luz confinada no núcleo do guia de onda. Desta forma ela deve possuir um índice de refração maior que o núcleo para que a refletividade seja máxima e espessura adequada para satisfazer a condição de anti-ressonância para os comprimentos de onda incidentes. Assim, o sinal óptico se propaga no núcleo com perdas baixíssimas. As Camadas 2 e 4 realizam a função de isolamento e são compostas de SiO₂ com índice de refração de 1.458. A Camada 3 é responsável por efetuar a seletividade em comprimento de onda. Esta camada é composta de Si e também apresenta as características de um ressonador Fabry-Perot. Porém, esta camada é projetada para a condição de ressonância no comprimento de onda que se deseja detectar no substrato. A largura de banda do sinal detectado no substrato é dada por:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c}{m \times F} \quad (4)$$

onde $\Delta\lambda$ é a largura de banda medida em 3 dB, λ_c é o comprimento de onda detectado, m é a ordem de ressonância da Camada 3 e F é a finesse. A finesse é função da refletividade das interfaces entre as camadas adjacentes [5] e, portanto, é constante. Desta forma, o controle da largura de banda é realizada pela alteração da ordem de ressonância da Camada 3. Nesta estrutura, o substrato é constituído por um *wafer* de Si que fornece estabilidade mecânica, além de facilitar a integração com outros elementos eletrônicos, tais como o fotodetector.

IV. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Como foi ilustrado, neste tipo de estrutura procura-se induzir uma grande quantidade de *leakage* na região sobre o fotodetector. Assim, se for admitido que as perdas são uniformes ao longo da estrutura, a perda de potência óptica pode ser expressa como [4]:

$$P(z) = P(0)[1 - \exp(-\alpha z)] \quad (5)$$

onde α é o coeficiente de atenuação (*leakage*) que é equivalente ao coeficiente de acoplamento entre a estrutura ARROW e o fotodetector. Para o cálculo do *leakage* empregou-se a Técnica da Matriz Transferência (TMT) descrita em [11]. Em se tratando de estruturas tipo ARROW, as constantes de propagação são complexas, onde a parte imaginária fornece a magnitude do *leakage*. Desta forma, optou-se pela TMT por ser uma técnica robusta na obtenção das constantes de propagação, além de possibilitar a simulação de estruturas que apresentem um grande número de camadas. Por simplicidade todos os resultados obtidos neste trabalho são referentes ao modo transversal elétrico (TE), pois os guias ARROW apresentam perdas seletivas a polarização.

V. RESULTADOS

Os dados da estrutura ARROW que será analisada a seguir são listados na Tabela I. As simulações realizadas consideraram o comprimento de onda de 1550 nm.

Camada	Material	n	Espessura (nm)
Superstrato	ar	1	∞
Núcleo	SiO ₂	1.465	4
Camada 1	Si ₃ N ₄	2.0	0.33
Camada 2	SiO ₂	1.465	0.5
Camada 3	Si	3.5	0 até 5
Camada 4	SiO ₂	1.465	0.5
Substrato	Si	3.5	∞

As perdas por *leakage* variam nos guias de onda ARROW em função da variação da espessura da Camada 3, a qual é projetada para a condição de ressonância. A Fig. 5 ilustra o *leakage* em função da espessura da Camada 3.

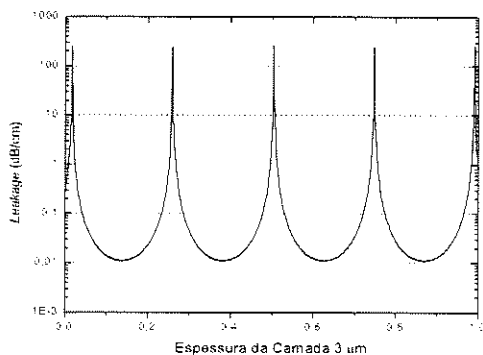


Fig. 5. Leakage em função da espessura da Camada 3

Pode-se observar na Fig. 5 que o leakage apresenta pontos de máximo e mínimo. Os pontos de máximo (~ 300 dB/cm) ocorrem para as espessuras que satisfazem a condição de ressonância da estrutura ARROW. A Fig. 6 mostra a eficiência de acoplamento do sinal guiado com o fotodetector em função das espessuras da Camada 3 que satisfazem a condição de ressonância.

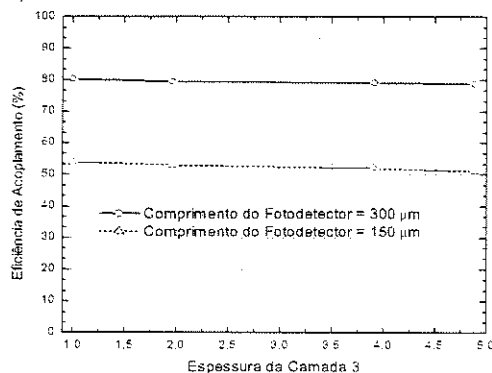


Fig. 6. Eficiência de acoplamento em função da espessura da Camada 3

Verifica-se que a estrutura ARROW apresenta uma eficiência de acoplamento elevada podendo alcançar até 80% de acoplamento empregando um fotodetector com comprimento de 300 μm . A resposta espectral do dispositivo é ilustrada na Fig. 7. Neste caso foi empregada a espessura da Camada 3 igual a 1.965 μm ($m = 8$).

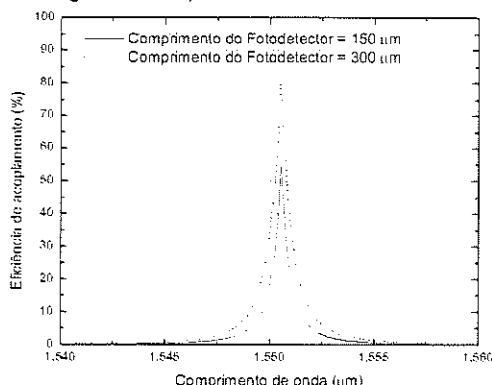


Fig. 7. Resposta espectral da estrutura ARROW

Pode-se observar na Fig. 7 que a largura de banda do sinal acoplado é estreita e apresenta FWHM (Full Width at Half Maximum) em torno de 2 nm. Esta faixa estreita de acoplamento é adequada para aplicações onde se requer grande isolamento entre os comprimentos de onda adjacentes. Na Fig. 8 ilustra-se a variação da largura de banda (FWHM) do sinal acoplado para o fotodetector com comprimento de 300 μm em função da espessura da Camada 3.

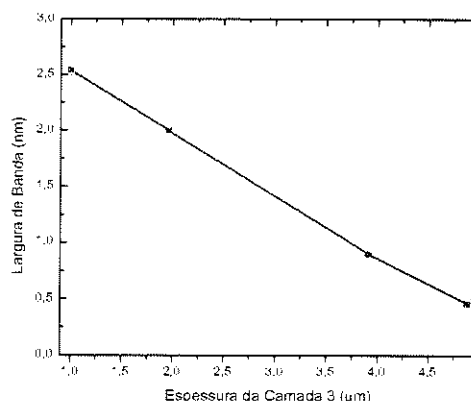


Fig. 8. FWHM em função da espessura da Camada 3

A Fig. 8 mostra que a largura de banda diminui em função da espessura da Camada 2. Este comportamento é previsto por meio de (5), pois aumentando a espessura da Camada 3 aumenta-se a ordem de ressonância. Em função desta característica espera-se que esta estrutura ARROW possua um alto grau de isolamento em relação aos comprimentos de onda adjacentes quando empregado como filtro para sistemas WDM. Empregando a estrutura ARROW projetada neste trabalho na configuração de demultiplexador proposto em [7] obteve-se as eficiências de acoplamento ilustradas na Fig. 9 para $\lambda_1 = 1549.2$ nm e $\lambda_2 = 1550.8$ nm com um nível de isolamento de aproximadamente -22.3 dB para uma separação de canais de 1.6 nm (200 GHz). A isolamento entre os canais obtidos em [7] foi de -21.6 para 100 nm (12.5 THz) de separação entre os canais.

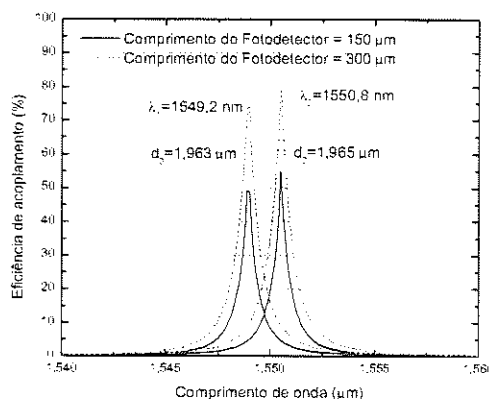


Fig. 9. Eficiência de acoplamento para duas estruturas ARROW projetadas para $\lambda_1 = 1549.2$ nm e $\lambda_2 = 1550.8$ nm

A isolamento de λ_1 com relação à λ_2 é obtida por meio de [7]:

$$I \equiv 10 \log \left[\frac{\text{Eficiência}(\lambda_1)}{\text{Eficiência}(\lambda_2)} \right] \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

onde $\text{Eficiência}(\lambda_i)$ ($i = 1, 2$) é a eficiência de acoplamento do guia de onda com o fotodetector. Por outro lado, considerando dois comprimentos de onda separados em 0.8 nm (100 GHz) obtém-se uma isolamento em torno de -15 dB. A Fig. 10 ilustra as eficiências de acoplamento para $\lambda_1 = 1550.8$ nm e $\lambda_2 = 1551.6$ nm.

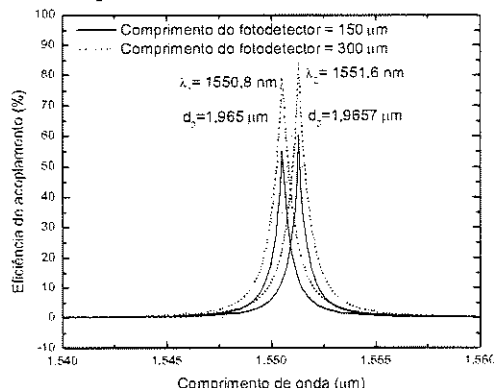


Fig. 10. Eficiência de acoplamento para duas estruturas ARROW projetadas para $\lambda_1 = 1550.8$ nm e $\lambda_2 = 1551.6$ nm

Como a largura de banda do sinal acoplado varia com espessura da Camada 3, a isolamento entre os canais também varia. Este efeito é ilustrado na Fig. 11, onde se verifica que o aumento da espessura desta camada implica no aumento da isolamento entre os canais adjacentes. Desta forma, empregando uma espessura de 4.866 μm pode-se alcançar uma isolamento de até -32 dB entre canais separados em 0.8 nm e -40 dB entre canais separados em 1.6 nm. Neste trabalho considerou-se a espessura máxima de 5 μm , porém se o projeto da espessura desta camada determinar a utilização de um valor de espessura muito elevado ($>5\mu\text{m}$), pode-se utilizar *wafers* de Si ao invés da fabricação por deposição [12]. Estes *wafers* são polidos de modo a obter precisamente a espessura requerida. As demais camadas são então crescidas na sua região superior e inferior.

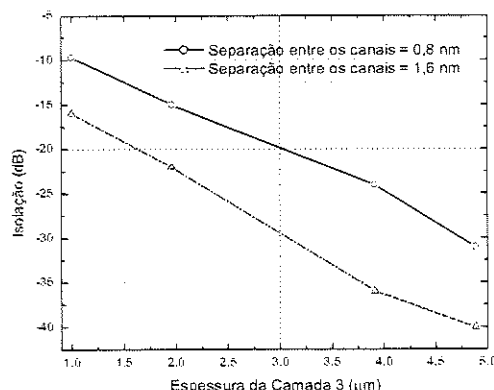


Fig. 11. Isolamento entre os comprimentos de onda adjacentes.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi projetada e analisada uma nova estrutura ARROW para aplicações em interconexões e filtros ópticos. A estrutura apresentou os seguintes resultados: *leakage* em torno de 300 dB/cm, eficiência de acoplamento de 80% para fotodetectores de 300 μm , também observou-se que alterando a espessura de uma das camadas é possível alterar a largura de banda do sinal acoplado. Empregando este recurso projetou-se um filtro óptico com isolamento - 32 dB entre canais separados em 0.8 nm. Observa-se que esta estrutura pode ser obtida empregando técnicas de fabricação de planares.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Cristea, F. Craciunoiu and M. Caldararu, "Components for optoelectronic and photonic integrated circuits - design, modeling, manufacturing and monolithic integration on silicon", *Materials Science and Engineering*, vol. B74, pp. 89 - 95, 2000.
- [2] T. Tamir, *Guide-wave optoelectronics*, New York, Springer-Verlag, Cap. 3, 1988.
- [3] K. Benaissa and A. Nathan, "Silicon anti-resonant reflecting optical waveguides for sensor applications", *Sensors and Actuators*, vol. A65, pp. 33 - 44, 1998.
- [4] K. Benaissa, A. Nathan, S. T. Chu, and W. Huang, "IC Compatible Optical Coupling Techniques for Integration of Arrow with Photodetector", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, n. 8, agosto de 1998.
- [5] M. A. Duguay, Y. Kokubun and T. L. Koch, "Antiresonant reflecting optical waveguides", *Applied Physics Letters*, vol. 49, n. 1, pp. 13-15, julho de 1986.
- [6] T. Baba and Y. Kokubun, "Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides - numerical results and analytical expressions", *IEEE Journal of Quantum Electron.*, vol. 28, n. 7, pp. 1689 - 1700, julho de 1992.
- [7] T. Baba, Y. Kokubun and H. Watanabe, "Monolithic integration of an ARROW-type demultiplexer and photodetector in the shorter wavelength region", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, n. 1, pp. 99 - 104, janeiro de 1990.
- [8] M. Moreno and J. Calderer, "Lateral Photodetector on ARROW Structures for Optical Interconnections", *Optics Communications*, vol. 140, pp. 27 - 31, 1997.
- [9] R. Orobtchouk *et al.*, "New ARROW optical coupler for optical interconnect", *Interconnect Technology Conference*, 2003, *Proceedings of the IEEE 2003 International*, June 2-4, 2003, Pages:233 - 235.
- [10] F. Durand, B. V. Borges and M. Martinez, "Filtro tipo Drooping para Redes Ópticas Passivas WDM (PON - WDM)", *Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, SBMO 2002*, 12-16 de Agosto, Recife, Brazil, 2002.
- [11] Ben-Hur V. Borges, Murilo A. Romero, e Amílcar C. Cesar, "Leakage loss analysis in rib type waveguides by the effective index method", *1999 SBMO/IEEE MTT-S, AP-S and LEOS International Microwave and Optoelectronic Conference-IMOC'99*, pp. 202-206, 9-12 de Agosto no Rio de Janeiro, Brazil, 1999.
- [12] J. Gehler, S. Sato, S. Chu, W. Pan and Y. Kokubun, "Narrowband optical wavelength comb by ARROW-type vertical coupler with thick cavity", *Electronics Letters*, vol. 33, n. 23, pp. 1947-1948, novembro de 1997.