

FILTROS ÓPTICOS BASEADOS EM FOTÔNICA DE SILÍCIO

Guilherme Minoru Taniguti

Pontifícia Universidade Católica de Campinas
CEATEC
guilherme.mt@pucamp.edu.br

Marcelo Luís Francisco Abbade

Grupo de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada
CEATEC
abbade@puc-campinas.edu.br

Resumo: Este trabalho consiste em dimensionar anéis ressonantes (*Ring Resonators*, RR) para a operação de filtros ópticos baseados em fotônica de silício. Para isto foram feitas simulações no software RSoft. Os resultados indicam que um silício sobre substrato (*Silicon on Insulator*, SOI) RR com largura do guia de onda de 0,4 μm , altura de 0,2 μm e raio de 6 μm pode possuir um fator qualidade (Q) de 2610, faixa espectral livre (*Free Spectral Range*, FSR) de 50 nm e largura total da metade do máximo (*Full Width at Half Maximum*, FWHM) de 0,6 nm.

Palavras-chave: *Ring Resonator*, CWDM, DWDM

Área do Conhecimento: Elétrica – Telecomunicações.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos, os chips de silício revolucionaram a microeletrônica e atualmente um chip de 1 cm² contém cerca de 1 bilhão de transistores [1]. Para os avanços tecnológicos continuarem crescendo conforme a lei de Moore [2] e com o grandioso aumento do tráfego de internet [3], os dispositivos necessários para suprir essa demanda precisam suportar gradativamente a elevada taxa de transmissão de dados que o mercado exige. Para isso é necessário buscar tecnologias baseadas na óptica, utilizando infraestruturas existentes em tecnologia CMOS para integrar dispositivos eletrônicos com ópticos a baixo custo.

A fotônica de silício é uma tecnologia que vem crescendo rapidamente dentro campo da óptica integrada e tem atraído a atenção das telecomunicações e interconexões ópticas na microeletrônica [4]. A grande demanda por dispositivos mais compactos, processamento de sinais com elevada largura de banda e baixo consumo de energia são os principais fatores que estimulam a pesquisa e a fabricação de circuitos integrados de opto-eletrônica (*opto-electronic integrated circuits*, OEIC).

Uma importante e promissora área de pesquisa na fotônica de silício são os ring resonators (RR), que possuem uma ampla gama de aplicações para construção de dispositivos fotônicos, incluindo sensores, moduladores, switches, células de memória, linhas

de atraso e multiplexadores [5-10]. A construção dos anéis ressonantes com semicondutores da família III-V começou em 1990, com vários grupos que demonstraram o bombeamento óptico em microdiscos de GaInAsP-InP e III-Nitreto com diâmetro de 15 μm utilizando fibra óptica para acoplar a luz diretamente do disco [11]. Somente em 1997 com anéis ressonantes de GaAs-AlGaAs foi demonstrado por Rafizadeh [12], o acoplamento lateral com guias de onda de barramento. Desde então diversas a pesquisas foram feitas sobre ring resonators com diferentes dimensões e materiais, incluindo o silício, que apesar de ser um material de *gap* indireto, o que é desvantajoso para construção de fontes ópticas, possui algumas vantagens importantes pelo fato de ser um material relativamente de baixo custo, ter alta condutividade térmica para fabricação de dispositivos sintonizáveis [13] e ser opticamente transparente para comprimentos de onda de 1,3 e 1,55 μm , dentro à janela de telecomunicações.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar como os RRs podem ser dimensionados e utilizados para construir filtros ópticos em Fotônica de Silício. Foram realizadas simulações no Software RSoft, convertendo estruturas de guias de onda *rib* 3-D em estruturas 2-D efetivas [10].

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. A seção 2 trata da teoria fundamental do RR. A seção 3 condiz os parâmetros do RR. Na seção 4 mostra o arranjo de simulação para implementação de filtros ópticos com RRs. A Seção 5 apresenta os resultados e análises e a Seção 6 conclusões finais.

2. TEORIA FUNDAMENTAL DO RING RESONATOR

Os RRs estudados neste trabalho são basicamente constituídos por dois guias de onda *rib* de barramento com determinada largura w_{bus} e micro-anéis com certa largura w_{ring} , altura h , *gap* e raio R , como mostra a Fig. 1(a), sendo o guia de onda constituído por um núcleo de silício com índice de refração $n_1=3,5$, um revestimento superior de ar com índice de refração $n_3=1$ e um revestimento inferior de SiO₂ com índice de refração $n_2=1,44$, como ilustrado na Fig. 1(b). As dimensões e configurações dos RRs são estabe-

lecionadas e determinadas conforme a finalidade de utilização do dispositivo.

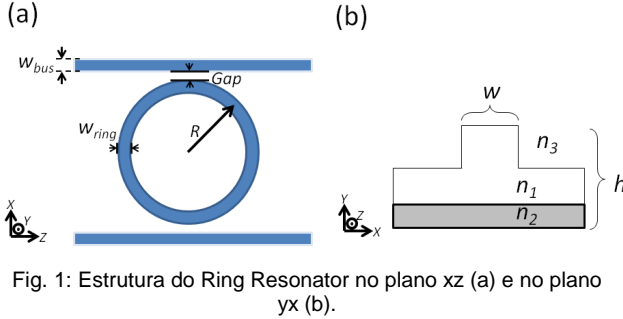


Fig. 1: Estrutura do Ring Resonator no plano xz (a) e no plano yx (b).

RRs formados por dois barramentos apresentam uma porta de entrada, uma de *through*, uma de *drop* e outra de *add*, como ilustrado na Fig. 2. Este dispositivo opera como um filtro, quando um determinado comprimento de onda da luz ressoa conforme a configuração do RR. Assim, quando inserido sinais ópticos com comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 na porta de entrada do barramento, é selecionado pelo anel, um único comprimento de onda, neste caso o λ_2 , como mostra a Fig. 2. O sinal com a frequência de ressonância do anel é transmitido pela porta *drop*, a qual possui a resposta de transmissão de um filtro passa-faixa, pois filtra os comprimentos de onda ressonantes. Já os outros comprimentos de onda que não estiverem na condição de ressonância são transmitidos pela porta *through*, que possui uma resposta de transmissão de um filtro rejeita-faixa, o qual permite a passagem de todos os comprimentos de onda menos os que acoplarem ao anel e a porta *add* permite a inserção de mais comprimentos de onda no dispositivo, funcionando como um multiplexador óptico *add-drop* (*Optical add-drop multiplexer*, OADM).

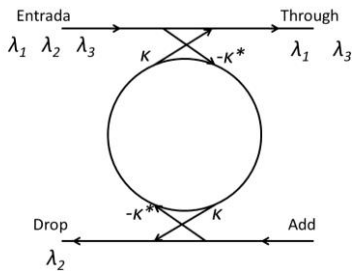


Fig. 2: Modelo básico de um filtro RR *add-drop*.

Sendo assim, o RR se comporta como um interferômetro, quando a cada volta completa, a luz no anel estiver em fase com a luz recebida, ressoando somente se o deslocamento de fase introduzido pela propagação ao longo do anel, $\Delta\phi$, for um número inteiro de períodos de comprimento de onda [13,14]

$$\Delta\Phi = 2m\pi, \quad (1)$$

$$\beta L = 2m\pi, \quad (2)$$

em que β é a constante de propagação do guia de onda, L é comprimento do caminho óptico e m é um número inteiro. Então o dispositivo irá ressoar para comprimentos de onda que satisfizerem esta condição. Substituindo o comprimento do caminho óptico pelo comprimento do anel

$$L = 2\pi R, \quad (3)$$

sendo R o raio do anel, e substituindo β em termos de comprimento de onda [13]

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}, \quad (4)$$

em que n_{eff} é o índice de refração efetivo do guia onda e λ é o comprimento de onda de referência. É possível obter a expressão do comprimento de onda ressonante do anel [13]

$$\lambda_{res} = \frac{2\pi R n_{eff}}{m} \quad (5)$$

Quando a condição de ressonância é satisfeita, ocorre o acoplamento da luz da porta de entrada do barramento para o anel por meio do campo evanescente, correspondente ao campo eletromagnético que se propaga por fora do núcleo do guia de onda [13]. Após ocorrer esta transferência de potência do barramento para o anel, a resposta de transmissão do comprimento de onda ressonante depende da perda óptica do anel e do coeficiente de acoplamento entre o barramento e o anel [15,16]

$$\kappa = \frac{\omega \epsilon_0 \cos(k_{x_{p,q}} w_q) (n_p^2 - n_0^2)}{2\sqrt{P_p P_q} (k_{xp}^2 + \alpha_q^2)} \sqrt{\pi R n_{eff}} \times e^{[\alpha_q (w_q - 2s_0)]} [\alpha_q \cos(k_{xp} w_p) \sinh(\alpha_q w_p) + k_{xp} \sin(k_{xp} w_p) \cosh(\alpha_q w_p)] \quad (6)$$

em que R_{eff} é o raio efetivo da curvatura do anel, ω é a frequência angular, ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, $P_{p,q}$ é a potência do modo, $k_{xp,q}$ é a constante de propagação no núcleo, $\alpha_{p,q}$ é a constante de decaimento no revestimento, $2w_q$ e $2w_p$ são a largura dos guias de onda acoplados com índices de refração n_q e n_p , envolvidos por um revestimento de índice n_0 , no plano de menor separação $2s_0$, definida como o *gap* centro a centro, em que p refere-se ao barramento e q ao anel. Como pode ser visto em (6), os parâmetros que possuem maior influência no valor de κ são a constante de decaimento, a largura do anel e o *gap* centro a centro devido ao termo exponencial da equação.

3. PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO RING RESONATOR

Os filtros RR podem ser caracterizados por certas figuras de mérito que são geralmente usadas para qualificar os filtros ópticos. Uma figura importante é a distância em comprimentos de onda entre os picos de ressonância chamada faixa espectral livre (*Free Spectral Range*, FSR) [17]

$$FSR = -\frac{2\pi}{L} \left(\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} \right)^{-1} \approx \frac{\lambda^2}{n_{eff}L} \quad (7)$$

Outro parâmetro importante é a largura definida como largura total da metade do máximo (*Full Width at Half Maximum*, FWHM) [17]

$$FWHM = \frac{\kappa^2 \lambda^2}{\pi L n_{eff}} \quad (8)$$

Duas medidas qualitativas dos RRs são o parâmetro de *Finesse* [17]

$$F = \frac{FSR}{FWHM}, \quad (9)$$

e o fator Q [17]

$$Q = \frac{\lambda}{FWHM} \quad (10)$$

Outro parâmetro relevante, já citado anteriormente, é o índice efetivo, uma vez que este determina a constante de propagação e quando a dispersão pode ser um fator limitante para comunicações de alta velocidade [18]. Este índice é calculado pelo método de

análise do índice efetivo, o qual propõe a decomposição da estrutura *rib* em duas dimensões do guia de onda planar para o modo de polarização transversal elétrico (TE) [13], como descrito no relatório parcial desta Iniciação Científica [19].

4. ARRANJO DE SIMULAÇÃO

A Fig. 3 (a) corresponde ao arranjo de simulação do software RSfot 9.0, utilizado para simular o filtro RR com um anel, indicando as posições da fonte com polarização TE e dos monitores de processamento e análise do campo eletromagnético em função do tempo e da frequência. A Fig. 3(b) representa o arranjo de simulação de filtro RR com dois anéis.

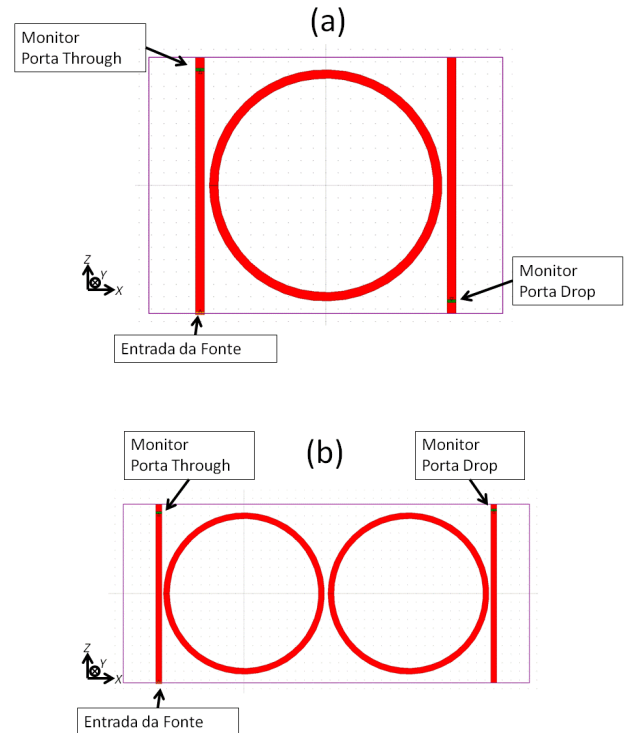


Fig. 3: Arranjo de simulação para um anel (a) e dois anéis (b).

A fim de fazer comparações dos resultados das simulações realizadas neste projeto com os encontrados na literatura [10], foram realizadas primeiramente simulações com 1 anel variando R e depois variando w_{bus} , com a finalidade de avaliar o FSR, o FWHM e o fator Q. Para que os resultados das simulações ficassem próximos aos de [10], que não define os parâmetros w_{ring} e *gap*, esses foram ajustados e configurados conforme apresentados na Seção 5. Além destas simulações, também foi projetado um outro filtro com 1 anel e depois 2 anéis, com o intuito de

verificar o efeito causado com a inserção deste segundo anel no filtro RR.

Todas as simulações foram realizadas com estruturas de duas dimensões, partindo de um guia de onda *rib* de três dimensões. Foi utilizado o método do índice efetivo para a polarização transversal elétrica, a fim de encontrar os índices efetivos das estruturas, por meio da técnica aplicada em [13]. Sendo assim foi calculado e encontrado o índice de refração para o núcleo de 2,78 e de 1,62 para o revestimento.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados variando o raio do anel

As Figs. 4 (a), (b), (c) e (d) mostram as respostas espectrais da porta *through*, respectivamente, para os raios de 2,7, 3,5, 4,5 e 6 μm , para um RR com 1 anel e w_{bus} fixo de 0,2 μm . Os valores dos parâmetros w_{ring} e gap utilizados para cada raio são apresentados na Tabela I.

TABELA I. Valores dos parâmetros de dimensão da w_{ring} e do gap utilizados para cada raio do anel RR simulado.

Raio (μm)	w_{ring} (μm)	gap (μm)
2,7	0,18	0,15
3,5	0,18	0,18
4,5	0,17	0,17
6	0,18	0,15

Para comparar com os resultados obtidos com os encontrados em [10], foram calculados os parâmetros de desempenho do filtro, mostrados na Tabela II. Como pode ser visto, os valores de FSR dos RR simulados neste trabalho são iguais aos de [10], devido ao fato deste parâmetro depender basicamente do comprimento de onda de referência, índice de refração efetivo e do raio do anel, como mostrado em (7), que foram configurados conforme a referência. Já os valores do parâmetro FWHM, apresentaram uma pequena diferença em relação à [10], exceto para o raio de 3,5 μm , que obteve o valor idêntico ao do artigo. Essa diferença dada por um fator de -1, +0,7, +1,4 nm, para os raios de 2,7, 4,5 e 6 μm , respectivamente, se deram devido aos valores de w_{ring} e gap , que são variáveis relevantes para (8) e não fornecidos por [10].

TABELA II. Valores dos parâmetros de desempenho do filtro RR variando o raio.

Raio (μm)	FSR (nm)	FWHM (nm)	Fator Q
2,7	50	15	103
3,5	40	10	155
4,5	30	8,3	186
6	22	7,6	204

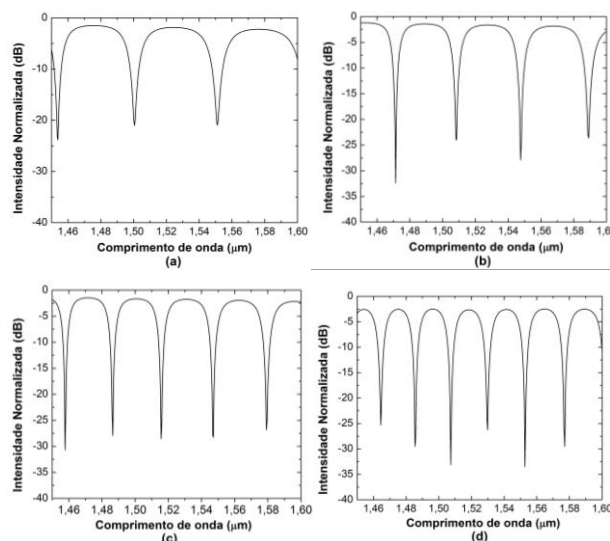


Fig. 4: Resposta espectral da porta *through* do RR em função do comprimento de onda, para os raios de (a) 2,7 (b) 3,5 (c) 4,5 e (d) 6 μm .

5.2. Resultados variando a largura dos barramentos

Para simular um filtro RR variando a largura dos barramentos com 0,25, 0,32, 0,35 e 0,4 μm , foram obtidas as respostas espectrais da porta *through*, como ilustrados na Figs. 5 (a), (b), (c) e (d), respectivamente. Para isso foram utilizados os parâmetros $w_{ring}=0,21$ μm , $h=0,2$ μm , $gap=0,15$ μm e $R=4,5$ μm para as diferentes larguras do barramento.

A Tabela III mostra os parâmetros característicos do filtro, para serem comparados com os encontrados em [10]. Ao fazer esta comparação foi possível analisar que o FSR dos RR simulados neste trabalho possuem os mesmos valores do artigo e os FWHMs possuem uma diferença de +0,5, -0,7 e +0,1 para as larguras do barramento de 0,32, 0,35 e 0,4 μm , respectivamente, exceto para o w_{bus} de 0,25 μm , que possui um FWHM igual ao da referência. Essa diferença é justificada pela a mesma dada na Seção 5.1.

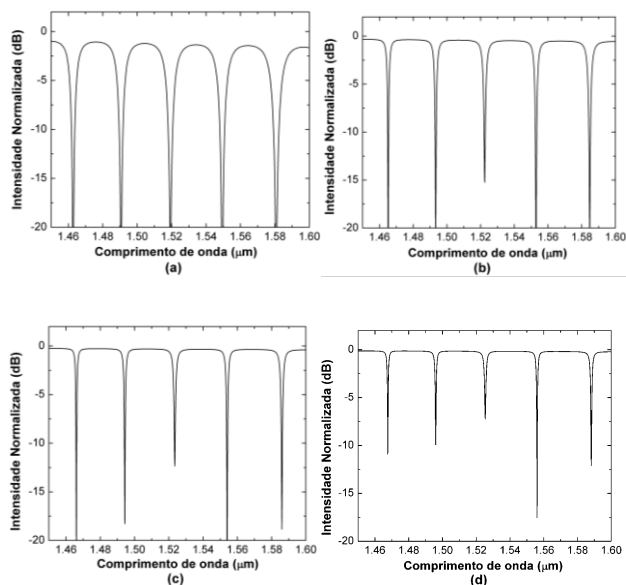


Fig. 4: Resposta espectral da porta *through* do RR em função do comprimento de onda, para w_{bus} de (a) 0,25 (b) 0,32 (c) 0,35 e (d) 0,4 μm .

TABELA III. Valores dos parâmetros de desempenho do filtro RR variando o w_{bus} .

w_{bus} (μm)	FSR (nm)	FWHM (nm)	Fator Q
0,25	30	7	221
0,32	30	2,5	621
0,35	30	1,7	914
0,4	30	0,9	1729

5.3 Resultados variando o número de anéis

Com o objetivo de analisar o resultado da aplicação do filtro RR com dois anéis, foi projetado um RR de segunda ordem casado. A Fig. 6 (a) mostra a resposta espectral de um filtro com um anel de $w_{bus}=w_{ring}=0,4 \mu\text{m}$, $h=0,2 \mu\text{m}$, gap entre o barramento e o anel de $0,2 \mu\text{m}$, $R=6 \mu\text{m}$ e a Fig. 6 (b) de um filtro com os mesmos parâmetros, porém com 2 anéis e gap entre os anéis de $0,45 \mu\text{m}$ e dimensão de total de $213,2 \mu\text{m}^2$.

Os parâmetros de desempenho dos dois filtros RR foram calculados e encontrados os valores mostrados na Tabela IV. Utilizando um filtro de segunda ordem é possível analisar conforme a Tabela IV e as Figs. 6 (a) e (b) que a resposta espectral da porta *drop* do filtro ficou mais plana e estreita em relação ao filtro de primeira ordem, sendo o FWHM menor por um fator -0,2 nm e o fator Q 1,33 vezes maior.

Isto acontece pelo fato da utilização de mais um anel no RR que faz o sinal óptico ressoar no mesmo comprimento de onda que o primeiro anel. Para isso foi necessário configurar o *gap* entre os anéis de forma que o segundo anel casasse com o comprimento de onda ressonante do primeiro anel.

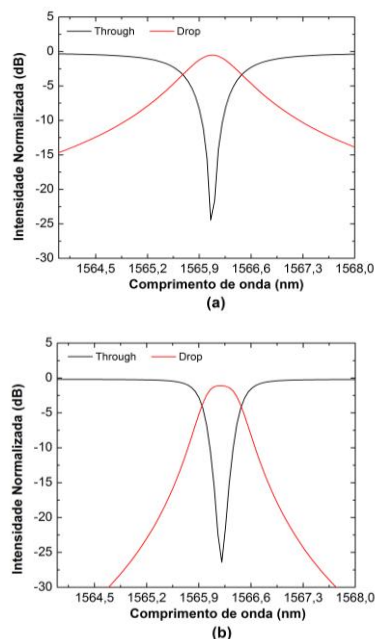


Fig. 6: Resposta espectral da porta *through* e *drop* do RR com (a) um e (b) dois anéis em função do comprimento de onda.

TABELA IV. Valores dos parâmetros de desempenho do filtro RR variando o número de anéis.

Números de anéis	FSR (nm)	FWHM (nm)	Fator Q
1	50	0,8	1958
2	50	0,6	2610

6. CONCLUSÃO

Foi analisado como RRs podem ser dimensionados e utilizados para construir filtros ópticos em Fotônica de Silício. Com (7), (8), (10) e os resultados obtidos nas simulações foi possível concluir que os parâmetros de desempenho FWHM e fator Q dependem consideravelmente de w_{bus} e gap . Infelizmente, devido à falta de dados na literatura, não foi possível obter os valores exatamente iguais aos de [10], porém foi possível obter valores bem próximos, que variaram em até 1,4 nm de FWHM. Estes tipos de filtros pos-

suem aplicação em sistemas de comunicação óptica multiplexado por divisão de comprimento de onda com separação de 20 nm entre os canais (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*, CWDM).

Os resultados obtidos com um maior número de anéis foram bastante satisfatórios, já que foi possível casar os dois anéis, deixando a resposta espectral da porta *drop* do filtro mais plana, com menor largura de banda de 0,6 nm, maior fator Q de 2610 e comprimento de onda de ressonância em 1566 nm. Este tipo de filtro tem a vantagem de possuir características de um filtro para aplicações em telecomunicações, como em multiplexação por divisão de comprimento de onda densa (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM), além de possuir uma dimensão pequena de 213,2 μm^2 .

REFERÊNCIAS

- [1] Jalali, B.; Paniccia, M.; Reed, G., "Silicon photonics," *Microwave Magazine*, IEEE , vol.7, no.3, pp.58,68, 2006.
- [2] Frank, D. J., "Power-constrained CMOS scaling limits," *IBM J. Res. Develop.*, vol. 46, no. 2/3, pp. 235–244, Mar.–May 2002.
- [3] CISCO, The Zettabyte Era, 2012. Disponível em <http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ms705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.htm>. Acesso em 02/04/2013.
- [4] Lockwood, D. J.; Pavesi, L., "Silicon Photonics II Components and Integration," Springer, 2011.
- [5] Kim, G. D.; Lee, H. S.; Park, C. H.; Lee, S. S.; Lim, B. T.; Bae, H. K.; Lee, W. G., "Silicon photonic temperature sensor employing a ring resonator manufactured using a standard CMOS process," *Opt. Express* 18, 2010.
- [6] Pradhan, S.; Schmidt, B.; Martinez, L.; Xu, Q.; Almeida, V.R.; Barrios, C.; Lipson, M., "Electro-optic modulator on silicon-on-insulator substrates using ring resonators," *Lasers and Electro-Optics*, 2005. (CLEO). Conference on , vol.1, no., pp.107,109 Vol. 1, 22-27 May 2005.
- [7] Cai, H.; Xu, K. J.; Tao, J. F.; Ding, L.; Tsai, J.M.; Lo, G.Q.; Kwong, D. L., "A nano-optical switch driven by optical force using a laterally coupled double-ring resonator," *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2012 IEEE 25th International Conference on , vol., no., pp.1297,1300, Jan. 29 2012-Feb. 2 2012.
- [8] Tucker, Rodney S.; Riding, J.L., "Optical Ring-Resonator Random-access Memories," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.26, no.3, pp.320,328, Feb.1, 2008.
- [9] Poon, J. K. S.; Scheuer, J.; Xu, Y.; Yariv, A., "Designing coupled-resonator optical waveguide delay lines," *J. Opt. Soc. Am. B* 21, 1665-1673, 2004.
- [10] Cholan, N. A.; Khabollah, S.; Talib, R., "Analysis and design of micro-ring resonator as an add drop filter for Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) application," *RF and Microwave Conference*, 2008. RFM 2008. IEEE International , vol., no., pp.348,351, 2-4 Dec. 2008.
- [11] Heebner, J.; Grover, R.; Ibrahim, T., "Optical Microresonators Theory, Fabrication, and Applications," Springer, 2007.
- [12] Rafizadeh, D.; Zhang, J. P.; Hagness, S. C.; Taflove, A.; Stair, K. A.; Ho, S. T.; Tiberio, R. C., "Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6 nm free spectral range," *Optics Letters*, vol. 22, pp. 1244–1246, 1997.
- [13] Reed, G. T.; Knights, A. P., "Silicon Photonics-An Introduction," John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [14] Reed, G. T.; Knights, A. P., "Silicon Photonics- The state of the Art," John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [15] Little, B. E.; Chu, S.T.; Haus, H.A.; Foresi, J.; Laine, J. P., "Microring resonator channel dropping filters," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.15, no.6, pp.998,1005, Jun 1997.
- [16] Emelett, S. J.; Soref, R., "Design and simulation of silicon microring optical routing switches," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.23, no.4, pp.1800,1807, April 2005.
- [17] Rabus, D. G., "Integrated Ring Resonators-The Compendium," Springer, 2007.
- [18] Dattner, Y.; Yadid-Pecht, O., "Analysis of the Effective Refractive Index of Silicon Waveguides Through the Constructive and Destructive Interference in a Mach-Zehnder Interferometer," *Photonics Journal*, IEEE , vol.3, no.6, pp.1123,1132, Dec. 2011.
- [19] Taniguti, G. M., "Filtros Ópticos Baseados em Fôtonica de Silício", Relatório Parcial de Iniciação Científica, Fevereiro 2013.