

# Linhas de Retardo de RF Baseadas em Cavidades Ópticas em Anel Integradas

\*Olympio L Coutinho, \*\*Vilson R. Almeida

\*Div. de Engenharia Eletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  
Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias, CEP 12.228.900, São José dos Campos, SP – Brasil

\*\*Divisão de Fotônica – Instituto de Estudos Avançados – IEAv  
Rod. dos Tomoios km 5,5 – Bairro Torrão de Ouro, CEP 12228-840, São José dos Campos

**Resumo** — O emprego de sistemas optoeletrônicos em processamento, transmissão e geração de RF atualmente constitui uma tecnologia promissora, em função ampla largura de banda, baixas perdas, imunidade a interferência eletromagnética e grande capacidade de integração, entre outros. Este trabalho aborda o emprego de cavidades ópticas em anel integradas como linhas de retardo de RF, construídas com tecnologia de silício em isolante (SOI). Quando próximas à frequência de ressonância, tais cavidades apresentam valores expressivos de atraso de grupo e de dispersão de atraso de grupo. A partir de simulações feitas com base em dados experimentais conhecidos, apresenta-se cavidades capazes de produzir atrasos de grupo compatíveis com aqueles necessários em sistemas de RF.

**Palavras-chaves** — Linhas de retardo, cavidades ópticas ressonantes, fotônica em RF, enlace óptico analógico, antenas.

## I. INTRODUÇÃO

O emprego de optoeletrônica em sistemas de RF/microondas tornou-se realidade em redes comerciais de distribuição de sinais, tais como os de televisão a cabo (CATV) e de telefonia celular [1]-[2]. Optoeletrônica também tem encontrado aplicações emergentes em sistemas de guerra eletrônica e antenas *phased array* [1]-[3]-[4], basicamente em função das características de baixas perdas, ampla largura de banda, imunidade a interferência eletromagnética e grande capacidade de integração. Dispositivos optoeletrônicos de modulação e detecção capazes de operar em frequências que se estendem até a faixa de ondas milimétricas têm sido demonstrados ao longo dos últimos anos e têm impulsionado a realização de pesquisas na área de processamento, transmissão e geração de RF/microondas por meio de tecnologia fotônica [5]-[6]-[7]. Recentemente foi demonstrado experimentalmente um conceito inovador de receptor de RF/microondas fotônico, tendo um *front-end*, ou cabeça de recepção, totalmente composto de componentes puramente dielétricos [8]-[9]. Isento de partes metálicas e de componentes semicondutores em seu *front-end*, tal receptor é imune a pulsos eletromagnéticos de alta potência, uma vulnerabilidade de receptores de guerra eletrônica e radares até então não solucionada frente a armas desta natureza.

A tecnologia de fotônica aplicada a sistemas de RF/microondas já foi por nós abordada em trabalhos anteriores [10]-[11]. Ela consiste basicamente do processamento do sinal de RF/microondas na faixa óptica do espectro eletromagnético. Esta técnica está apresentada esquematicamente na Fig. 1.

Neste caso, o sinal de RF/microondas modula uma portadora óptica fazendo a transposição deste para a faixa óptica do espectro eletromagnético. O sinal óptico modulado propaga-se no meio óptico, sendo em seguida detectado e então recuperado o sinal de RF/microondas. Sinais de controle são utilizados para alterar as propriedades de propagação do meio óptico ou características dos componentes ópticos, dispositivos de modulação e detecção que compõem o sistema, possibilitando desta forma a realização de processamento do sinal de interesse.

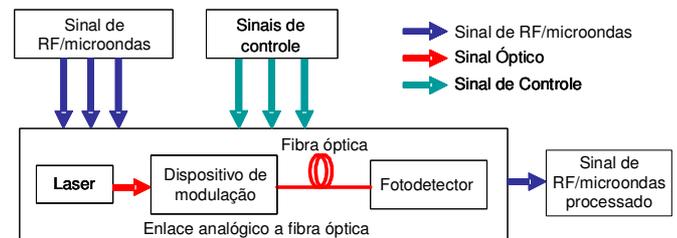


Fig. 1: Diagrama esquemático da técnica de processamento óptico de sinais de RF/microondas.

Este trabalho aborda o uso de cavidades ópticas em anel integradas como linhas de retardo de RF/microondas. Operando próximo a uma frequência de ressonância, tais cavidades apresentam valores de atraso de grupo e de dispersão de atraso de grupo compatíveis com aqueles necessários em sistemas de RF/microondas [12]. Dependendo do tipo de tecnologia empregado na fabricação destas cavidades, suas dimensões podem ser da ordem de alguns mm a alguns  $\mu\text{m}$ , dimensões estas bem reduzidas se comparadas com as linhas de retardo fotônicas baseadas em fibra óptica [ ] e que possibilitam a sua integração em circuitos integrados ópticos[ ]. Será dado ênfase a cavidades construídas com a tecnologia SOI, *silicon-on-insulator*, que em função do alto contraste de índice de refração entre o silício e o óxido de silício possibilita a construção de guias de ondas monomodo na faixa de comprimento de onda de 1300nm a 1550 nm com dimensões submicrométricas e baixas perdas devidas a curvaturas, um fator crítico na construção destas cavidades [ ]. Tais características aumentam significativamente a capacidade de integração destes dispositivos. Mais ainda, SOI é uma tecnologia compatível com os processos industriais de fabricação de circuitos integrados MOS, metal-óxido-semicondutor[ ]. Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II sobre a teoria em torno das cavidades ressonantes em anel, onde são abordados a resposta de amplitude e de fase, bem como o atraso de grupo e dispersão corresponde; na seção III simulações com base na variação dos parâmetros da cavidade em anel são realizadas buscando-se valores de atraso de

grupo e dispersão compatíveis com os necessários em processamento de sinais de RF/microondas; na seção IV são tecidas conclusões a respeito dos resultados obtidos.

## II. CAVIDADE ÓPTICA RESSONANTE EM ANEL

Idealmente, considerando as perdas ópticas nulas, uma cavidade óptica ressonante em anel pode ser considerada com um filtro óptico com resposta em amplitude é unitária, porém com uma resposta em fase bastante crítica na região próxima as frequências de ressonâncias [A1]. Uma representação esquemática de uma cavidade óptica ressonante em anel está mostrada na Fig.2, constituindo basicamente de um guia de onda óptico reto acoplado a um outro guia formando uma circunferência de raio  $R$ . Na figura,  $E_1$  e  $E_2$  representam o campo elétrico de entrada e de saída do dispositivo, respectivamente;  $\kappa$  o coeficiente de acoplamento de campo elétrico entre os dois guias;  $\tau$  o coeficiente de transmissão dos guias na região de interação de campo elétrico; e  $\alpha$  corresponde ao coeficiente de perdas na região de cavidade, estando incluídas as perdas devidas à propagação do guia de ondas, bem com as perdas devidas à curvatura no guia em anel.

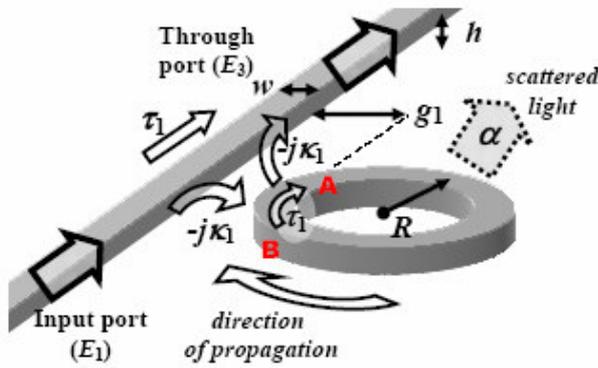


Fig. 2: Diagrama esquemático de uma cavidade óptica ressonante em anel [A2].

A função de transferência característica do dispositivo é dada por[A3]:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\tau - e^{-2\pi\alpha R} e^{-j\frac{4\pi R n_{eff}}{\lambda_0}}}{1 - \tau e^{-2\pi\alpha R} e^{-j\frac{4\pi R n_{eff}}{\lambda_0}}}, \quad (1)$$

onde  $n_{eff}$  é o índice efetivo do guia de onda do anel e  $\lambda_0$  o comprimento de onda no vácuo.

A transmitância do dispositivo pode ser expressa como [A2]:

$$\left| \frac{E_2}{E_1} \right|^2 = \frac{\tau^2 + e^{-4\pi\alpha R} - 2\tau e^{-2\pi\alpha R} \cos\left(4\pi^2 \frac{R}{\lambda_0} n_{eff}\right)}{1 + \tau^2 + e^{-4\pi\alpha R} - 2\tau e^{-2\pi\alpha R} \cos\left(4\pi^2 \frac{R}{\lambda_0} n_{eff}\right)}. \quad (2)$$

A resposta em fase é descrita como:

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{\kappa^2 e^{-2\pi\alpha R} \sin\left(4\pi^2 \frac{R}{\lambda_0} n_{eff}\right)}{\left(1 + e^{-4\pi\alpha R}\right) \tau - e^{-2\pi\alpha R} \left(2 - \kappa^2\right) \cos\left(4\pi^2 \frac{R}{\lambda_0} n_{eff}\right)} \right]. \quad (3)$$

A Fig. 3 ilustra o comportamento da transmitância e da resposta em fase de uma cavidade em função do comprimento de ondas para uma cavidade sem perdas e uma com perdas, considerando todos os outros parâmetros do dispositivo constantes.

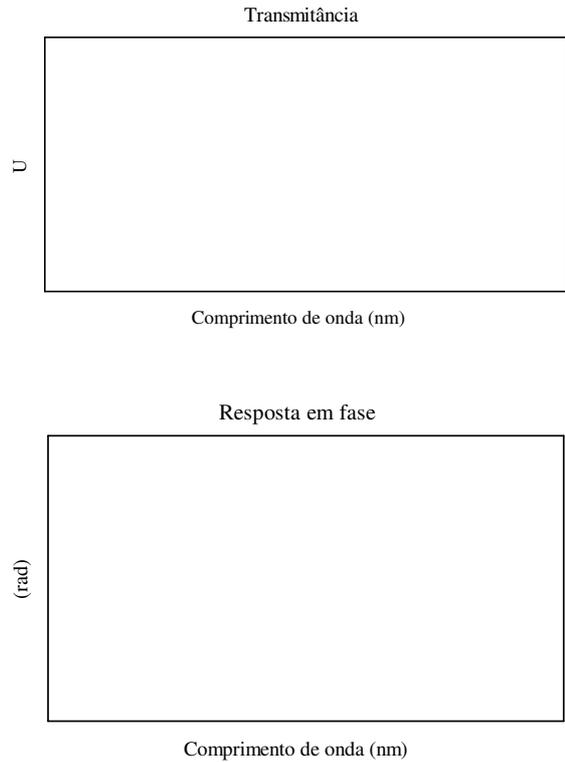


Fig. 3: Transmitância e resposta em fase de uma cavidade óptica em anel ressonante.

Na Fig. 3 pode-se observar que para uma cavidade sem perdas a transmitância é unitária ao longo de toda a faixa de comprimento de onda. Havendo perdas, observam-se vales na transmitância em cada frequência de ressonância, cuja profundidade depende dos parâmetros de perdas e coeficiente de acoplamento. Verifica-se ainda uma variação acentuada da fase em frequências próximas à frequência de ressonância. Em função deste comportamento na resposta em fase, valores consideráveis de atraso de grupo ( $\tau_g$ ) e dispersão de atraso de grupo ( $D$ ) podem ser obtidos, sendo definidos respectivamente como [A3]:

$$\tau_g = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \frac{\partial \phi(\lambda_0)}{\partial \lambda_0}; \quad D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda_0}. \quad (4)$$

## III. EFEITOS DO ATRASO DE GRUPO E DA DISPERSÃO DE ATRASO DE GRUPO NO SINAL DE RF/MICROONDAS

O atraso de grupo e a dispersão de atraso de grupo verificados no sinal óptico modulado após se propagar pelo dispositivo são refletidos no sinal de RF/microondas. Para

uma modulação em amplitude da portadora óptica, em banda lateral dupla, o sinal de RF/microondas ( $V_{RF}$ ) detectado será proporcional à [A4]:

$$V_{RF} \propto \cos\left(\frac{\lambda_0^2}{4\pi c} D(\lambda_0) \omega_{RF}^2\right) \cos[\omega_{RF}(t - \tau_g(\lambda_0))], \quad (5)$$

onde  $\omega_{RF}$  é a frequência angular do sinal modulante. A Fig. 4 mostra a atenuação induzida no sinal de RF/microondas em função da variação da dispersão de atraso de grupo, considerando-se uma frequência de 10 GHz, e um comprimento de onda óptico de 1550 nm,

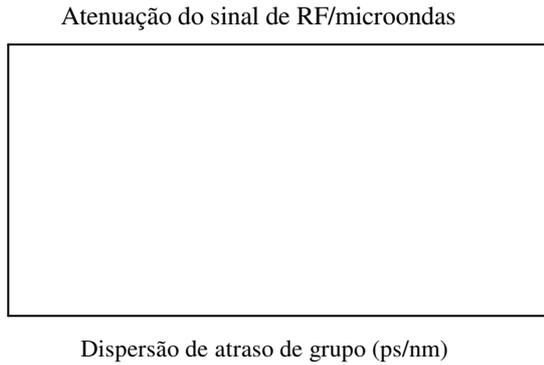


Fig. 4. Atenuação da amplitude do sinal de RF/microondas em função da dispersão, para uma frequência de 10 GHz e um comprimento de onda de 1500 nm.

Nesta mesma frequência modulante, um atraso de grupo de 50 ps representa metade do comprimento de onda do sinal de RF/microondas, o que pode ser considerado um valor significativo, tendo em vista que causaria um desvio de 180° na fase do sinal processado. Ainda, este atraso equivaleria a uma distância de 15 cm de propagação do espaço livre, ou o atraso equivalente a 10 cm de fibra óptica.

#### IV. SIMULAÇÃO DE CAVIDADES ÓPTICAS EM ANEL SIMPLES

A resposta em fase do dispositivo pode ser moldada por meio da escolha apropriada dos parâmetros da cavidade e guias de onda, e conseqüentemente o atraso de grupo e a dispersão. O índice efetivo do guia de onda em geral é um parâmetro estreitamente relacionado com o modo de propagação do guia e que, em função da necessidade de operação monomodo, não é possibilitada liberdade de variação [1]. Com relação ao coeficiente de perdas, busca-se minimizá-lo ao máximo para se obter seletividade da cavidade, resultando em uma resposta em fase bastante rápida na região da frequência de ressonância, sendo este um parâmetro muito ligado à técnica de fabricação [A5-A6]. Guias fabricados em SOI com perdas de até 3,6 dB/cm já foram reportados recentemente [A5]. Perdas por curvatura do guia de onda também têm que serem consideradas, sendo um fator crítico para rios de curvaturas muito pequenos. Em SOI, curvas de 90° com rios de 2 μm podem apresentar perdas entre 0,006 a 0,46 dB/curva, reduzindo para valores inferiores a 0,005 dB/curva para curvaturas com raio de 5 μm. O raio da cavidade e o coeficiente de acoplamento são parâmetros com relativa liberdade de variação. No caso do raio da cavidade em anel, o fator limitante está relacionado com as perdas por

curvatura. Entretanto, com o objetivo de se buscar altos valores de atraso de grupo e dispersão, raios maiores que 5 μm são necessários, não sendo as perdas por curvatura um problema crítico nesta aplicação. Com relação ao coeficiente de acoplamento, este não pode ter valores muito próximos do total de perdas acumulada em uma volta ao longo do anel da cavidade, o que irá reduzir sobremaneira a transmitância do dispositivo em frequências próximas à ressonância da cavidade. Um caso extremo ocorre quando o coeficiente de acoplamento se iguala às perdas em uma volta no anel da cavidade, conhecido como acoplamento crítico, quando a transmitância é reduzida a zero [A7]. Com base na formulação apresentada na seção II e atento para as considerações acima expostas, buscou-se simular diversas cavidades em anel com o objetivo de se obter valores de atraso de grupo próximos aos mencionados na seção III. A Fig. 5 mostra os gráficos de transmitância, atraso de grupo e dispersão resultantes da simulação três cavidades com raios diferentes, mantendo-se os demais parâmetros fixos.

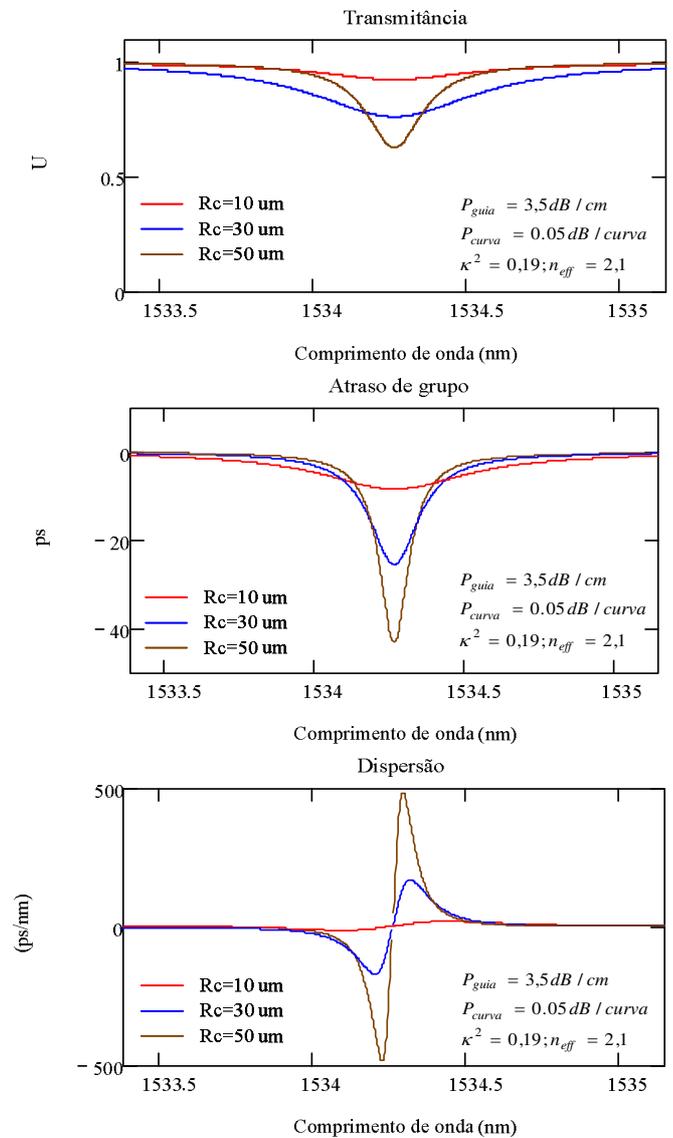


Fig. 5. Transmitância, atraso de grupo e dispersão para valores diferentes raio da cavidade em anel.

Aumentando-se o raio da cavidade observa-se um aumento do atraso de grupo. Observa-se que há um compromisso entre atraso de grupo e dispersão. A obtenção de valores mais altos

de atraso de grupo está associada ao aumento da dispersão de atraso de grupo em torno da frequência de ressonância. Um fato a ser observado é que na frequência de ressonância, quando o atraso de grupo é máximo, a dispersão é nula. O aumento do atraso de grupo com o aumento do raio da cavidade resulta em um efeito indesejável da diminuição da transmitância na região de ressonância. Ainda, quanto maior o atraso de grupo mais seletivo se torna a cavidade, reduzindo a largura de banda útil do dispositivo. Com uma raio de 50  $\mu\text{m}$  obteve-se um atraso de grupo de 42,9 ps e uma transmitância de 0,52 com largura de banda total de meia potência de 0,14 nm. Tomando como limite uma queda de 10% no valor do atraso de grupo na ressonância, obtêm-se uma largura de banda útil de 0,036 nm, que equivale a 18,14 GHz no comprimento de onda de ressonância de 1534 nm, tendo os limites extremos desta faixa uma dispersão de -358 ps/nm à esquerda e 358 ps/nm à direita.

Outra simulação foi realizada considerando valores de coeficiente de acoplamento diferentes, sendo os demais parâmetros mantidos constantes. O resultado está mostrado na Fig. 6.

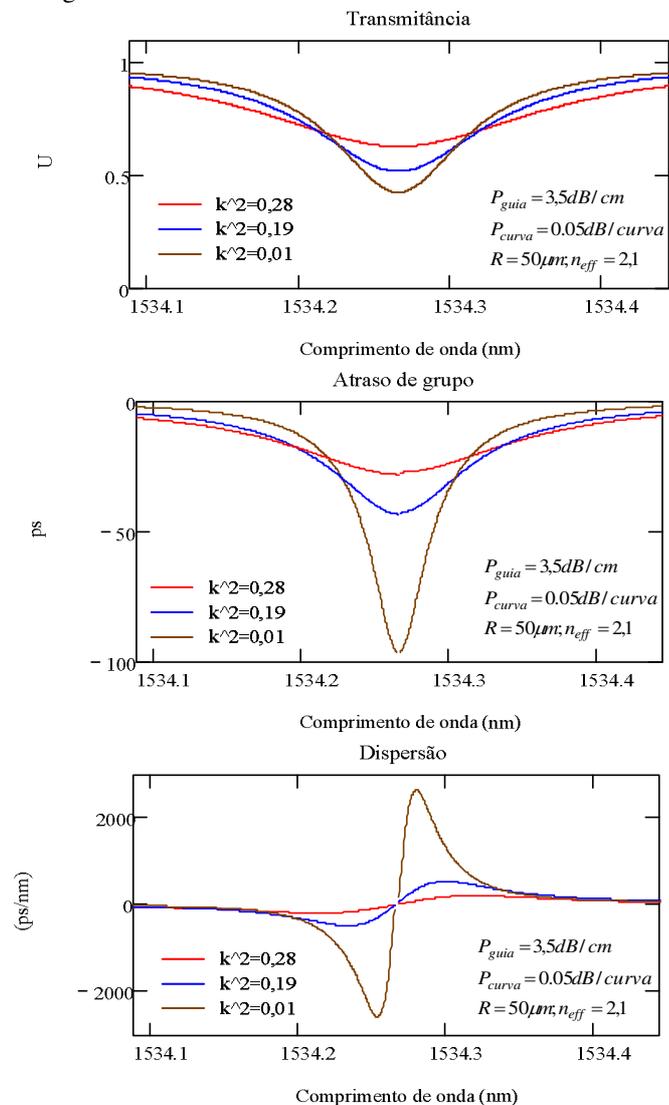


Fig. 6. Transmitância, atraso de grupo e dispersão para valores diferentes de acoplamento entre o guia reto e a cavidade em anel.

Novamente o compromisso de aumento entre o aumento do atraso de grupo e o aumento da dispersão foi verificado, bem com a redução da transmitância na frequência de ressonância

e da largura de banda útil. Para um coeficiente de acoplamento de 0,1 obteve-se um atraso de grupo de 92,25 ps e uma transmitância de 0,25 com largura de banda total de meia potência de 0,11 nm. Tomando como limite uma queda de 10% no valor do atraso de grupo na ressonância, obtêm-se uma largura de banda útil de 0,014 nm, que equivale a 13,61 GHz no comprimento de onda de ressonância de 1534 nm, tendo os limites extremos desta faixa uma dispersão de -1384 ps/nm à esquerda e 1384 ps/nm à direita.

#### IV. CONSIDERAÇÕES

Analizou-se neste trabalho uma cavidade óptica ressonante em anel isoladamente, tendo-se obtido valores de atraso de grupo compatíveis com aqueles necessários em processamento de sinais de RF/microondas na faixa de 10 GHz. Em frequências mais baixas são necessários valores de atraso de grupo mais altos, demandando entretanto uma largura de banda útil no espectro óptico mais estreita [A4]. No caso de frequências de RF/microondas maiores, embora o atraso de grupo requerido seja menor, a largura de banda óptica útil se torna um fator de maior preocupação. Uma forma de lidar com estes requisitos é por meio da interligação de diversas cavidades em anel, ligeiramente fora de sintonia em entre si, com o objetivo de implementar a resposta em fase desejada [A8-A9]. A alta dispersão encontrada pode ser minimizada por meio da interligação em cascata de duas cavidades, uma sintonizada ligeiramente à esquerda e outra à direita do comprimento de onda de operação, uma vez que os valores de dispersão são anti-simétricos em relação à ressonância.

Outra consideração a ser feita é com respeito à área ocupada pela cavidade, que para uma cavidade com 50  $\mu\text{m}$  de raio construída em SOI é da ordem de centésimos de  $\text{mm}^2$ , dimensões estas extremamente reduzidas se comparadas com o comprimento de fibra óptica da ordem de dezenas de cm necessário da se obter o mesmo atraso.

Em função do coeficiente termo-óptico do silício, cavidades construídas em SOI podem ser sintonizadas, ou mesmo mantidas em sintonia por meio dispositivos termoeletrônicos externos de controle de temperatura [A10]. A sintonia também pode ser obtida eletricamente por meio da variação da densidade de portadores de carga livre no silício [A11].

Mais ainda, SOI é uma tecnologia compatível com processos de fabricação industriais de circuito integrados CMOS, possibilitando que a parte eletrônica e a óptica sejam incorporadas em um mesmo circuito integrado.

Finalmente, a utilização de guias de onda com terminações em *tapes* [A12] permitem um acoplamento de modos bastante eficiente entre guias submicrométricos de SOI e fibras ópticas, assim como guias de onda de  $\text{LiNbO}_3$ .

#### V. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou, por meio de uma abordagem analítica, resultados de simulação e com base em dados experimentais conhecidos, a viabilidade e o potencial do emprego de cavidades construídas com tecnologia SOI na construção de linhas de retardo aplicadas ao processamento optoeletrônico de sinais de RF/microondas. Retardos com ordem de grandeza necessários para processamento optoeletrônico de sinais de RF/microondas foram demonstrados, acrescentando vantagens de redução drástica

de tamanho do dispositivo, fusão do circuito integrado óptico com o circuito integrado eletrônico e interfaceamento eficiente com outras tecnologias de circuitos integrados ópticos consagradas em dispositivos de modulação eletroópticos e fibras ópticas.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Alwyn J. Seeds, Keith J. Williams, “*Microwave Photonics*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, december 2006.
- [2] E.I. Ackerman and C.H. Cox, RF “*RF Fiber Link Performance*”, **IEEE** magazine.
- [2] J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73.

