

Investigação preliminar usando anel ressonador de silício para transmissão de energia

Renato V. Franzé e Danilo H. Spadoti

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Instituto de Eng. de Sistemas e Tecnologia da Informação – IESTI, Av. BPS, 1303, Itajubá – MG

Resumo — Recentes avanços na ciência e no processo de fabricação possibilitaram a demonstração de dispositivos ópticos, passivos e ativos, utilizando a tecnologia do silício. Dentre os dispositivos passivos, ganha destaque o anel ressonador, que possui diversas vantagens e distintas aplicações. Neste artigo busca-se investigar a transferência de energia e potência em nano-anéis ressonadores de silício. A eficiência na transferência de energia obtida entre dois anéis ressonadores, operando em 1550nm, foi da ordem de 20%.

Palavras-Chave—fotônica do silício, anel ressonador, nanofotônica.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a tecnologia do silício foi empregada no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. Atualmente, o silício vem sendo investigado para atuar em outra área, na faixa de frequência da ordem de tera-Hz, ou seja, na indústria da fotônica. Estimulados por uma série de recentes avanços no campo da ciência, e impulsionados pelo aumento dos investimentos nesse setor, a fotônica do silício é, atualmente, uma das áreas de pesquisa mais investigadas dentro do campo da óptica integrada [1,2]. O silício, na faixa de espectro do infravermelho (IR) médio, tem excelentes propriedades ópticas, tanto lineares como não-lineares, possibilitando, assim, o desenvolvimento de novos dispositivos fotônicos, nas mais diferentes áreas [2,3].

Logo, o silício vem se tornando uma plataforma ideal no projeto de circuitos ópticos integrados com dimensões da ordem de centenas de nanômetros. Devido ao alto contraste de índice de refração entre o silício (Si) e a sílica (SiO₂) ou ar é possível projetar dispositivos com dimensões reduzidas e, ainda assim, garantir o confinamento da luz [3]. Este fato possibilita a aplicação de alta intensidade óptica em uma área reduzida de silício, tornando possível observar interações ópticas não-lineares, como, por exemplo, efeitos Raman e Kerr. No silício, os efeitos não-lineares Kerr e Raman são, respectivamente, 100 e 1000 vezes maiores aos encontrados nas fibras de sílica [1]. Dessa forma, é possível projetar estruturas nanofotônicas, operando em banda larga, atuando como, por exemplo, na amplificação óptica, conversão de comprimento de onda, entre outros [1-3]. Estas funções, até recentemente, pareciam estar além do alcance do silício.

A nanofotônica é definida como área da ciência que combina a nanociência com a área da fotônica, e tem-se fundamentado como um novo e importante campo de estudo. Portanto, combinar óptica, opto-eletrônica e a tecnologia do silício, possibilita projetar dispositivos fotônicos passivos e ativos com alto desempenho [4].

Conforme comentado, entre os dispositivos passivos, um dos mais investigados é formado por guias de onda tipo canal e anéis ressonadores, exemplificado na Fig. 1. Este tipo de construção permite desenvolver dispositivos desde filtros a conversores de frequências, utilizados, por exemplo, em sistemas de comunicação, sistemas de multiplexação por comprimento de onda (WDM) [5]. Logo, a utilização de micro- e nano- anéis de silício para a construção de dispositivos utilizados nestes sistemas é amplamente difundido devido ao seu tamanho reduzido, alto fator de qualidade, Q , e ausência de reflexão intrínseca [6].

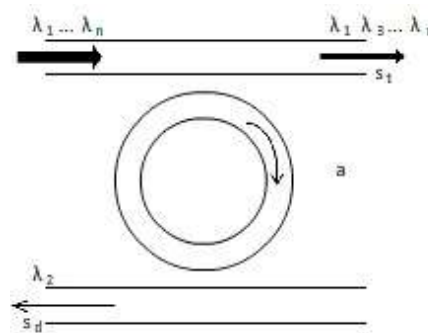


Fig. 1. Anel ressonador usado como filtro [5]

O funcionamento do anel ressonador pode ser verificado quando diferentes comprimentos de onda são acoplados no guia de onda superior, e apenas a informação desejada, no caso, λ_2 , é transmitida para o guia inferior através do anel. Este acoplamento ocorre de tal forma que os comprimentos de onda restantes continuam a se propagar apenas no guia superior. Pode, também, ser utilizada de forma recíproca, inserindo a informação no guia inferior, e após entrar em ressonância no anel, acopla-se no guia superior junto com os outros sinais presentes. Contudo, dispositivos com a geometria em anel, feitos em silício, tornam-se extremamente compactos e versáteis. Devido ao alto contraste de índice de refração da plataforma SIO (*silicon on insulator*), i.e. Si/SiO₂, esses anéis podem ser construídos com raios da ordem de 0,9μm e perdas de 0,5dB [5].

Ademais, podem-se desenvolver componentes ativos incorporando mecanismos de injeção de portadora. Ganho óptico ou absorção óptica, com esta mesma estrutura, pode ser observado. Como exemplo, têm-se os moduladores eletro-óptico, lasers e detectores [6,7]. Dessa forma, a maioria dos dispositivos ópticos necessários em um sistema completo de comunicação pode ser desenvolvida em apenas um chip de silício [6]. Este fato garante ampla aplicação em sistemas de defesa, que necessitam de estruturas ultracompactas e de alto desempenho.

Entretanto, a construção de dispositivos em anel não se limita ao projeto de um único anel por chip. Estudos demonstram a aplicação e desenvolvimento de dispositivos ópticos utilizando um ou mais anéis ressoadores [7].

Logo, neste trabalho, busca-se analisar e investigar a transmissão de energia entre dois anéis ressoadores, projetados para operar no comprimento de onda de 1550nm.

II. INVESTIGAÇÃO TEÓRICA DE ANEIS RESSOADORES

Um esquema, já bem definido na literatura, para o estudo do acoplamento de um anel ressoador com dois guias de onda é descrito utilizando o modelo da Fig. 2 [7]:

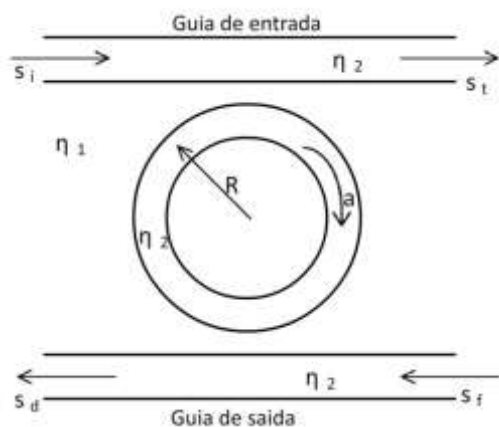


Fig. 2. Anel ressoador acoplado a dois guias de onda.

onde: S_i , S_t , S_d , S_f representam as ondas incidente, transmitida, detectada e filtrada, respectivamente. R é o raio do anel e n_1 e n_2 os índices de refração da sílica e do silício, respectivamente.

Especificamente no anel, supõe-se uma onda de amplitude $A(t)$, normalizada para que $|A(t)|^2$ possa representar o fluxo de potência, inserida na seção do guia de onda da porta S_i , em um tempo, t . O anel pode ser visto como um oscilador, então possui energia de amplitude $a(t)$, normalizada para que $|a(t)|^2$ represente o total de energia armazenada no anel. A relação entre o fluxo de potência e a energia armazenada é dada por [7]:

$$|a(t)|^2 = |A(t)|^2 2\pi R/v_g. \quad (1)$$

onde v_g é a velocidade de grupo.

A energia no anel é alimentada pela onda incidente de amplitude S_i . A saída é dada pela onda de detecção S_d e a potência não aproveitada pelo anel é dada pela onda de transmissão S_t . Caso haja mais anéis ou outros dispositivos acoplados, o anel pode ser realimentado pela onda de *feedback* S_f .

A relação entre a onda incidente e a transmitida é

$$s_t = s_i - j\mu a. \quad (2)$$

onde o parâmetro $-j$, denominado fator de fase, é escolhido devido a configuração dos planos geométricos. O parâmetro μ pode ser definido como acoplamento mutuo entre o anel e a onda no guia [7].

A onda de amplitude $A(t)$ presente no anel se relaciona com a equação 2 [7]:

$$|s_t|^2 = k^2 |A(t)|^2 = k^2 v_g (2\pi R)^{-1} |a(t)|^2. \quad (3)$$

sendo: k^2 é definido como a fração de potência acoplada a região de interação fora do anel, sendo k normalmente definido como coeficiente de acoplamento.

Pela conservação da energia, a potência na onda de detecção é [7]

$$|s_d|^2 = |s_t|^2 - |s_i|^2. \quad (4)$$

O fator de qualidade Q pode ser calculado conforme definido em [7]. Corresponde ao tempo médio de energia armazenada por ciclo óptico dividido pela potência acoplada as duas ondas de saída (S_d e S_f). Portanto, conforme [7]:

$$\begin{aligned} Q &= \omega_0 |a|^2 / (|s_d|^2 + |s_f|^2) \\ &= \omega_0 \pi R / k^2 v_g \\ &\approx 2\pi^2 R n_e / \lambda_0 k^2. \end{aligned} \quad (5)$$

onde: v_g pode ser aproximado pela velocidade de fase c/n_e e ω_0 é a frequência de ressonância do anel. Logo, é necessário um pequeno valor de k para um alto valor de Q [7].

III. DOIS ANEIS RESSOADORES

Pode-se estender o estudo previamente descrito para um anel ressoador único, para a condição de acoplamento em mais de um anel. As características de transferências estudadas na seção anterior podem ser modificadas e, o esquema dos anéis ressoadores, pode ser visualizado na Fig. 3 [7]:

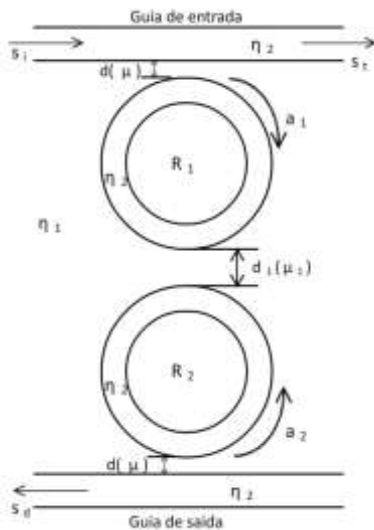


Fig. 3. Dois anéis ressoadores acoplados aos guias de onda.

No dispositivo com dois anéis haverá uma onda de amplitude a_1 no primeiro anel e amplitude a_2 no segundo anel. Ambas são consideradas no acoplamento. Então, a onda presente no primeiro anel e no segundo anel é escrita em (7a) e (7b), respectivamente:

$$da_1/dt = (j\omega_1 - 1/\tau_e)a_1 - j\mu_1 a_2 - j\mu_s i \quad (7a)$$

$$da_2/dt = (j\omega_2 - 1/\tau_d)a_2 - j\mu_1 a_1 \quad (7b)$$

onde $1/\tau_e$ e $1/\tau_d$ representam a taxa de decaimento relacionada a potência que sai do anel (onda transmitida) e a potência acoplada ao guia de onda de saída, respectivamente. Negligenciando as perdas, μ_1 que representa a energia mutua acoplada entre os anéis, pode ser escrita conforme [7]:

$$\mu_1 = \mu'_1 \sqrt{v_{g2}(2\pi R_2)^{-1}} \quad (8a)$$

sendo μ'_1 o acoplamento entre a potência normalizada A_2 e a energia normalizada a_1 , μ'_1 pode ser reescrito como [7]:

$$\mu'_1 = \kappa_1 \sqrt{v_{g1}(2\pi R_1)^{-1}} \quad (8b)$$

Então, substituindo (8b) em (8a), tem-se que [7]:

$$\mu_1 = \mu'_1 \sqrt{v_{g1} v_{g2} (2\pi R_1)^{-1} (2\pi R_2)^{-1}} \quad (9)$$

Que é a equação que descreve o comportamento da energia acoplada entre os anéis.

IV. RESULTADOS PRELIMINARES

Uma estrutura envolvendo dois anéis ressoadores, esquematizado na Fig.4, foi simulada. Os parâmetros físicos e geométricos utilizados nas simulações são: a fonte de excitação, cujo comprimento de onda utilizado foi, $\lambda = 1550$ nm, a largura dos guias de 300nm, a distância entre guia e

anel foi $d(\mu) = 30$ nm e distância entre anéis de também $d_1(\mu_1) = 30$ nm. O raio interno de cada anel vale 1200nm e o externo 1500nm. O silício, n_2 , foi utilizado como material de guia de onda e a sílica, n_1 , como material isolante. A onda de excitação é aplicada no guia superior e a detecção é colhida no guia inferior. O resultado da simulação do comportamento do campo elétrico pode ser visualizado na Fig. 4. A seta vermelha representa a onda incidente na entrada e a seta verde a onda na saída do guia de onda após ser transferida do primeiro para o segundo anel ressoador.

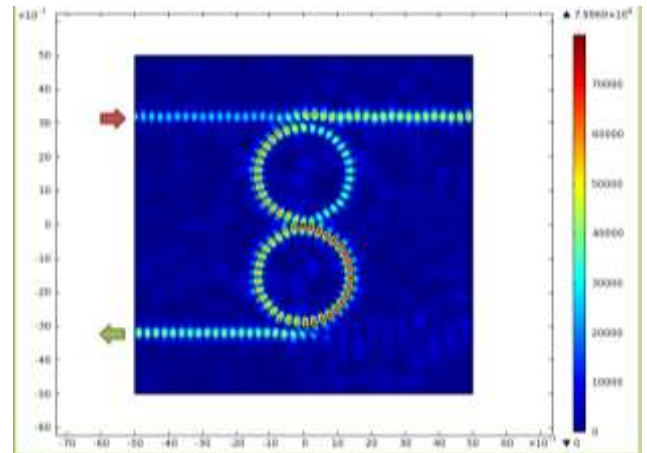


Fig. 4. Visualização do acoplamento do campo elétrico entre dois anéis ressoadores de silício.

Entretanto, ainda não foi possível quantificar todos os valores envolvidos nesta simulação. Considerando o equacionamento desenvolvido na seção anterior, encontramos um fator de qualidade Q da ordem de 460 e o coeficiente de acoplamento entre anéis da ordem de 20%. Contudo, estes valores não são definitivos, pois, a princípio, ainda serão ajustadas as dimensões físicas da estrutura. Como perspectiva para a sequência dessa pesquisa de iniciação científica fica a proposta de melhoria no acoplamento da estrutura, o estudo da potência e corrente transmitida, assim como, os cálculos previamente descritos.

REFERÊNCIAS

- [1] Jalali B., Fathpour S., "Silicon photonics", Journal Of Lightwave Technology, vol. 24, n.12, p.4600-4615, Dezembro 2006.
- [2] Soref R., Lorenzo J., "All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ ", Journal Of Quantum Electronics, vol. 22, n.6, p.873-879, Junho 1986.
- [3] Foster M. A., Turner A. C., Lipson M., Gaeta A. L., "Nonlinear optics in photonic nanowires", vol. 16, n. 2, p.1300-1320, Janeiro 2008.
- [4] Almeida V. R., Panepucci R. R., Lipson M., "Nanotaper for compact mode conversion", vol. 28, n. 15, p. 1302-1304, Agosto 2003.
- [5] Lipson M., "Guiding, modulating, and emitting light on silicon - challenges and opportunities", Journal Of Lightwave Technology, vol. 23, n.12, p. 4222-4238, Dezembro 2005.
- [6] Xu Q., Fattal D., Beausoleil R. G., "Silicon microring resonators with $1.5\text{-}\mu\text{m}$ radius", Optics Express, vol. 16, n. 6, p. 4309-4315, Março 2008.
- [7] Little B. E., Chu S. T., Haus H. A., Foresi J., Laine J. -P., "Microring resonator channel dropping filters", Journal Of Lightwave Technology, vol. 15, n. 6, p. 998-1005, Junho 1997.