

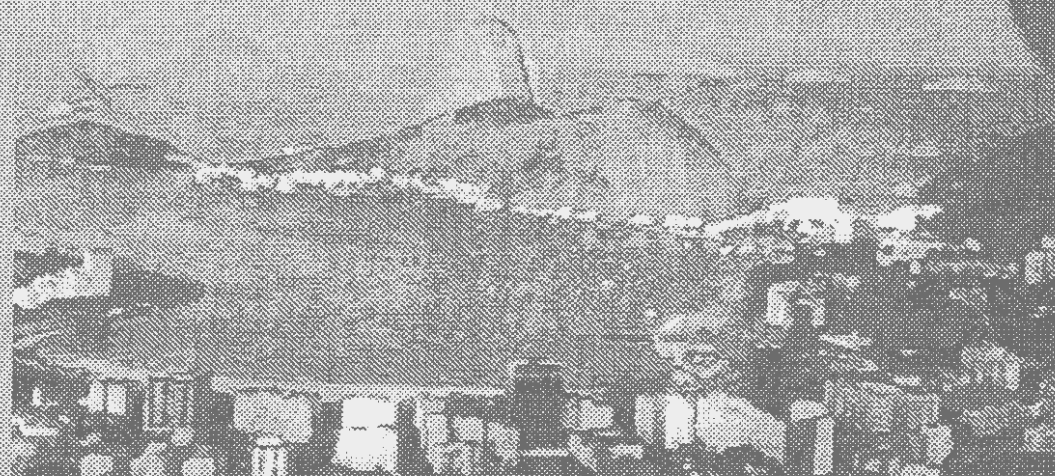
**Anais do
XX Simpósio Brasileiro
de Telecomunicações
SBT'03**

*"20 anos de SBT e o futuro das
Telecomunicações no Brasil"*



**EDITORA
ABRIL**

Rio de Janeiro, 25 a 28 de Outubro de 2003 •



Apresentação

Tutoriais

Sessões Técnicas

Autores

Consulta

Apresentação

XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'03)

Copyright © 2003 by Sociedade Brasileira de Telecomunicações (SBrT)

Editores: Rosângela Fernandes Coelho e José Antônio Apolinário Jr.

Todos os direitos reservados.

ISBN 85-89748-01-4



XX Simpósio Brasileiro
de Telecomunicações
SBT'03

Menu Principal



Projeto de Isolador Óptico Utilizando Algoritmo Genético

L.D.S. Alcantara, M.A.C. Lima, A.F.R. Araújo, A.C. César e B.-H.V. Borges

Resumo—O projeto de um isolador óptico auxiliado por algoritmo genético é descrito neste artigo. A síntese é feita com base na otimização do valor da espessura da camada que separa as guias acopladas. Os valores dos índices de refração de todas as camadas são fixados a priori e é imposta uma restrição ao comprimento da região de acoplamento, de tal forma que satisfaça às condições de operação. A simulação do funcionamento do dispositivo é feita utilizando o método da propagação de feixe (BPM). Os resultados numéricos atestam que o dispositivo pode ser utilizado eficientemente como isolador em sistemas de comunicações ópticas.

Palavras-Chave—Comunicações ópticas; óptica integrada; guias de onda não-recíproco; otimização; algoritmo genético; método numérico, beam-propagation method (BPM).

Abstract—This paper presents an optical isolator design optimized via genetic algorithm. The synthesis of the device is carried out in terms of the coupled waveguide separation thickness. The structure refractive indices are defined a priori. A constraint on the device coupling length is imposed so that the operating conditions are fully satisfied. Once optimized, the structure behavior is simulated with a beam propagation method (BPM). The numerical results clearly demonstrate the efficient applicability of this device as an isolator in optical communications systems.

Index Terms—Optical communications; integrated optics; nonreciprocal waveguides; optimization; genetic algorithm; numerical method, beam propagation method (BPM).

I. INTRODUÇÃO

O avanço do setor de telecomunicações produziu nos últimos anos uma grande variedade de inovações tecnológicas. Estas inovações traduziram-se em novos serviços, principalmente de faixa larga, exigindo o desenvolvimento e implantação de redes de comunicação de alto desempenho. O atendimento à demanda por elevadas taxas de transmissão tem sido possível graças às redes de comunicações ópticas, especialmente aquelas do tipo

A347
totalmente ópticas. As redes ópticas têm contado ainda com o esquema de multiplexação em comprimento de onda (WDM-*wavelength division multiplexing*). Para satisfazer as exigências tecnológicas, um diversificado conjunto de dispositivos ativos e passivos tem sido analisado, caracterizado e fabricado. São lasers, fotodetectores, amplificadores, acopladores, chaves, moduladores e filtros, dentre muitos. Estes dispositivos empregam as mais diversas propriedades de materiais como anisotropia e não-linearidade. Dentre os diversos dispositivos, os que empregam materiais magnetoópticos formam uma importante categoria, compreendendo os não-recíprocos, como isoladores e circuladores [1], [2]. Os isoladores são empregados para proteger as fontes ópticas de luz refletida e estão presentes nos sistemas de amplificação óptica. Os circuladores fazem parte dos derivadores que extraem comprimentos de onda em esquemas WDM.

Dada a importância que os dispositivos desempenham nas redes atuais, a otimização, análise e simulação de funcionamento têm sido considerados de crucial importância, exigindo o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais.

Os algoritmos baseados em princípios evolutivos têm despertado grande interesse nos últimos tempos por causa de seu potencial de aplicação em problemas de otimização em várias áreas de conhecimento. Dentre eles, tem se destacado o algoritmo genético (AG), por ser computacionalmente simples e eficaz na busca por uma solução ótima. Ele é capaz de proporcionar confiabilidade e busca orientada em espaços complexos de soluções.

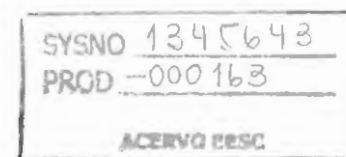
Os princípios básicos dos algoritmos genéticos foram propostos por John Holland em 1975 [3], com base em fenômenos naturais, tais como herança genética e seleção. O AG opera a partir de um conjunto ou população de soluções potenciais que evolui para uma solução ótima ou sub-ótima global, sendo aferida por uma função de aptidão.

O AG tem sido empregado com sucesso para resolver diversos tipos de problemas de otimização em eletromagnetismo [4]. Em sistemas de comunicação sem fio, AGs têm se mostrado ser uma ferramenta versátil na alocação fixa e dinâmica de canais [5], [6] e planejamento e alocação de sites [7]. AGs também exibem bom desempenho em síntese de arranjos de antenas [8]. Em redes de comunicações ópticas, roteamento, alocação de comprimentos de onda e posicionamento otimizado de conversores de comprimento de onda em nós têm sido investigados com base em AGs [9], [10].

A área de projeto e modelagem de circuitos e dispositivos é muito promissora para o uso de AGs, tanto na faixa de

Licinius D.S. Alcantara, e-mail: licinius@sel.eesc.usp.br e Marcos A.C. Lima, e-mail: marcos@sel.eesc.usp.br são alunos do Programa de Doutorado em Eng. Elétrica da EESC, USP. Aluizio F.R. Araújo, e-mail: aluizio@cin.ufpe.br, fone: 81-3271-8430, r. 4321, fax: 81-3271-8438 é docente do Centro de Informática, UFPE, Recife, PE. Amílcar C. César, e-mail: amilcar@sel.eesc.usp.br, fone: 55-16-273-9356 e Ben-Hur V. Borges, e-mail: benhur@sel.eesc.usp.br, fone: 16-273-9344, fax: 16-273-9372 são docentes do Depto. de Eng. Elétrica, EESC, USP, São Carlos, SP.

1345643
03/203



microondas quanto na de óptica. Recentemente, Nishino e Itoh [11] fizeram uso de AG para otimizar topologias de circuitos com base em um conjunto de parâmetros. Dispositivos passivos como filtros e divisor de potência são sintetizados a partir de especificações de função de transferência. Chen e Lihui [12] utilizaram GA para extrair parâmetros de RF de indutores *on-chip*, determinando então o circuito equivalente correspondente. Os autores demonstraram que o uso de AG pode superar limitações encontradas em métodos tradicionais de extração de parâmetros. Caorsi *et al.* [13] utilizaram AG para sintetizar um divisor de potência em 10 GHz em guia metálico de seção retangular. A solução do problema é otimizar a posição do diafragma, sua espessura e altura. Além disso, a característica de paralelismo intrínseco do AG é explorada em processo de otimização por meio de processamento paralelo.

A síntese de dispositivos auxiliada por AG para uso na faixa óptica começa a despertar interesse, principalmente quando se trata daqueles dispositivos que têm sido implementados com base em experiência de projetistas, ou processo de tentativas, dado o número de parâmetros a serem considerados. Por exemplo, Nikulin *et al.* [14] fizeram uso de otimização genética para projetar células Bragg. Também é o caso de Cormier *et al.* [15], que empregaram AG para projetar redes de Bragg para aplicações em sensor com fibra óptica.

Neste artigo, o projeto de um acoplador óptico não-recíproco é realizado com o auxílio de algoritmo genético. As constantes de propagação de um guia de onda óptico de cinco camadas são obtidas a partir da equação característica, que resulta da aplicação das condições de contorno nas interfaces dielétricas. A síntese é feita com base na otimização do valor da espessura da camada que separa os guias acoplados, fixados os valores dos índices de refração de todas as camadas e imposta uma restrição ao comprimento da região de acoplamento, de tal forma que satisfaça as condições de operação projetadas. A simulação do funcionamento do dispositivo é feita utilizando o método de propagação de feixe (BPM *beam-propagation method*). A simulação do dispositivo atesta desempenho adequado, podendo ser utilizado como isolador em sistemas de comunicações ópticas. Até aonde os autores puderam verificar, é a primeira vez que este dispositivo é projetado com o auxílio de AG.

II. GUIAS ÓPTICOS NÃO-RECÍPROCOS

A rotação de Faraday é o fenômeno que serve de base para o funcionamento dos isoladores e circuladores. O estado da polarização de uma onda eletromagnética linearmente polarizada é girado para um único lado, horário ou anti-horário, independentemente do sentido de propagação. O dispositivo analisado neste trabalho tem como fundamento de operação a diferença entre as constantes de propagação do modo magnético transversal (TM).

A. Expressões de campos e equação característica para os modos TM

Os materiais magnetoópticos são caracterizados na faixa óptica pelo tensor permissividade relativa, dado por:

$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & j\delta \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ -j\delta & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

na qual ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} são as permissividades relativas nas direções x , y e z , respectivamente. O efeito magnetoóptico de primeira ordem, responsável pela natureza não-recíproca da propagação, é representado por δ .

A Figura 1 mostra a seção longitudinal do guia óptico de 5 camadas e o sistema de coordenadas.

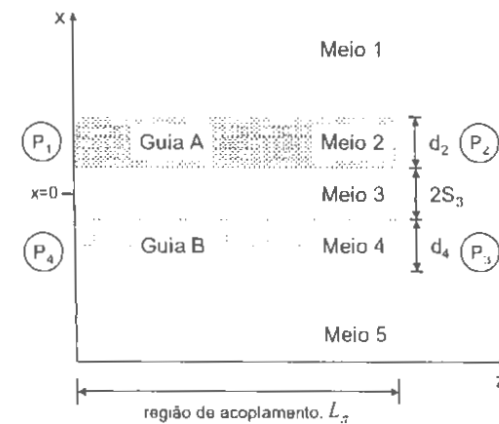


Figura 1. Vista da seção longitudinal de guia óptico de 5 camadas e sistema de coordenadas. Cada uma das camadas pode ser considerada magnetoóptica ou isotrópica. Neste último caso, $\delta = 0$ nas expressões de campo correspondentes. A e B são os guias acoplados e P1, P2, P3 e P4 são as denominações das portas do acoplador. Os meios 1 e 5 referem-se à cobertura e ao substrato, respectivamente, e se estendem infinitamente.

A propagação de luz é considerada na direção z e o campo magnético estático de polarização está aplicado na direção y . Supondo que não há variação de campo eletromagnético nesta direção, então $\partial/\partial y \equiv 0$. Desta forma, somente guia óptico planar é considerado neste trabalho.

Supondo uma variação harmônica no tempo de acordo com $\exp(j\omega t)$, na qual ω representa a frequência angular e t o tempo, as equações rotacionais de Maxwell podem ser escritas sob a seguinte forma:

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega\epsilon_0[\epsilon_r]\bar{E}, \quad (2)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu_0\bar{H}, \quad (3)$$

nas quais ϵ_0 e μ_0 representam a permissividade e permeabilidade do vácuo, respectivamente. Pela disposição adotada dos eixos cartesianos na Figura 1, os modos TM são constituídos pelas componentes H_y , E_x e E_z . Considerando que as soluções transversais de modos guiados apresentam um comportamento oscilatório nos núcleos e exponencial nas cascas, a expressão para a componente de campo magnético H_y , para cada camada da estrutura, pode ser escrita como:

$$H_y = A_1 \exp[-\gamma_1(x - S_1 - d_2)], \quad \text{para } x \geq S_1 + d_2$$

$$\begin{aligned}
H_1 &= A_2 \cos[\kappa_2(x - S_3 - d_2/2)] \\
&+ A_3 \sin[\kappa_2(x - S_3 - d_2/2)], \quad \text{para } S_3 + d_2 \geq x \geq S_3 \\
H_1 &= A_1 \exp[-\gamma_1 x] + A_5 \exp[\gamma_1 x], \quad \text{para } -S_3 \leq x \leq S_3 \\
H_1 &= A_6 \cos[\kappa_4(x + S_3 + d_4/2)] \\
&+ A_7 \sin[\kappa_4(x + S_3 + d_4/2)], \quad \text{para } -S_3 - d_4 \leq x \leq -S_3 \\
H_1 &= A_8 \exp[\gamma_4(x + S_3 + d_4)], \quad \text{para } x \leq -S_3 - d_4,
\end{aligned} \quad (4)$$

nas quais A_1 a A_8 são constantes a serem determinadas e os parâmetros κ_i e γ_i são dados por:

$$\kappa_i = \sqrt{k_0^2 - \frac{\xi_{xx}^{(i)} \beta^2}{\xi_{zz}^{(i)}}}, \quad i = 2, 4 \quad (5)$$

$$\gamma_j = \sqrt{\frac{\xi_{xx}^{(j)} \beta^2 - k_0^2}{\xi_{zz}^{(j)}}}, \quad j = 1, 3, 5, \quad (6)$$

sendo k_0 a constante de propagação no vácuo, $\xi_{xx} = \epsilon_{xx}/\Phi$ e $\xi_{zz} = \epsilon_{zz}/\Phi$, na qual $\Phi = \epsilon_{xx}\epsilon_{zz} - \delta^2$. A formulação permite que qualquer camada possa ser considerada magnetooptica. As outras componentes, E_x e E_z , podem ser obtidas utilizando (4):

$$\begin{aligned}
E_x &= \frac{1}{\epsilon_0} \left(\xi_{xx} \frac{\beta}{\omega} H_1 + j \frac{\xi_{zx}}{\omega} \frac{\partial H_1}{\partial x} \right), \\
E_z &= \frac{1}{\epsilon_0} \left(\xi_{zx} \frac{\beta}{\omega} H_1 - j \frac{\xi_{xx}}{\omega} \frac{\partial H_1}{\partial x} \right),
\end{aligned}$$

nas quais $\xi_{zx} = j\delta/\Phi$.

Aplicando as condições de contorno para as componentes H_1 e E_z em cada interface entre as camadas, resulta em um sistema de oito equações e oito incógnitas (A_1 a A_8), que pode ser escrito na forma matricial:

$$[M(\beta)][A] = 0, \quad (7)$$

na qual $[M(\beta)]$ é uma matriz 8×8 , que é função apenas de β . Os elementos não-nulos desta matriz são explicitados no Apêndice A. $[A]$ é a matriz dos coeficientes de campos. A constante de propagação, β , é determinada resolvendo-se $\text{Det}[M(\beta)] = 0$.

III. ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos transformam um conjunto (população) de objetos matemáticos individuais, cada um com um valor da função de aptidão (*fitness*), em uma nova população (a nova geração). Os AGs utilizam uma analogia direta com a evolução natural, pressupondo que uma solução potencial do problema é um indivíduo. A solução ótima obtida é o produto final, descendendo dos melhores elementos das gerações anteriores, onde os atributos do indivíduo mais apto tende a ser passado para as gerações seguintes [16].

A escolha da representação é um ponto-chave na operação dos AGs, pois estes algoritmos manipulam representação em

código do problema, e o esquema de representação pode limitar severamente a janela pela qual o sistema observa seu mundo. No algoritmo proposto, as constantes de propagação e a espessura de separação entre os guias são representadas por cromossomos. Cada gene que forma o cromossomo representa um valor decimal. O conjunto de todos os cromossomos compõem o indivíduo que representa uma política conforme ilustra a Figura 2.

β_a^-				β_b^-				β_a^+				β_b^+				$2S_3$			
c_{11}	...	c_{1M}	c_{21}	...	c_{2N}	c_{31}	...	c_{3M}	c_{41}	...	c_{4N}	c_{51}	...	c_{5M}	c_{61}	...	c_{6N}		

Figura 2. Representação de um indivíduo, formado por vários cromossomos. Cada gene que forma o cromossomo representa um valor correspondente à constante de propagação e/ou à espessura de separação.

na qual $0 \leq c_{ik} \leq 9$, $M = 15$ e $N = 4$ e β_a e β_b são as constantes de propagação dos modos simétricos e anti-simétricos da estrutura multicamada mostrada na Figura 1. Os índices (+) e (-) indicam o sentido de propagação.

Nos AGs, a função objetivo está relacionada com uma função de aptidão, e este valor reflete quão ajustado é o indivíduo para a solução do problema. Enquanto que um processo de otimização tenta encontrar uma única solução (tão exata quanto possível), uma busca baseada em AG pode resultar em várias soluções. Desta forma, é necessário encontrar a melhor solução em um intervalo de tempo aceitável para a resolução do problema. A função de aptidão total é calculada avaliando a solução do determinante para todas as constantes de propagação:

$$fit_{tot} = |\text{Det}[M(\beta_a^-)]| + |\text{Det}[M(\beta_b^-)]| + |\text{Det}[M(\beta_a^+)]| + |\text{Det}[M(\beta_b^+)]|, \quad (8)$$

na qual $\text{Det}[M(\beta)]$ representa o determinante da matriz M em (7).

A função de aptidão, (8), determina a adequação relativa ao dispositivo do conjunto de constantes de propagação para uma distância de separação entre guias acoplados, $2S_3$, isto é, apresenta o erro da função para o conjunto de valores. O objetivo é obter um conjunto que apresente o menor erro possível.

O AG proposto neste trabalho é o canônico que utiliza os operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação, juntamente com a estratégia de cruzamento em três pontos, política elitista e o mecanismo de inserção de imigrantes [16], compreendido como a inclusão de novos indivíduos à população.

IV. PROJETO DO DISPOSITIVO

O dispositivo proposto neste trabalho opera com um isolador óptico, conforme é mostrado na Figura 1.

A. Operação do isolador

O isolador óptico é projetado para operar da seguinte forma: o sinal injetado na porta de entrada (porta 1) é transferido para a porta de saída (porta 3) via campo evanescente. Esta estrutura é projetada de modo que a transferência de energia do guia A para o guia B seja máxima, o que deve ocorrer após a onda se propagar em um comprimento de acoplamento

L_{π} . Este comprimento de acoplamento é obtido por meio de

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{|\beta_a - \beta_b|}, \quad (9)$$

na qual β_a e β_b são as constantes de propagação dos modos equivalentes aos simétricos e anti-simétricos, respectivamente, da estrutura multicamada. Idealmente, toda a energia entregue na saída do dispositivo (porta 3) deveria ser transmitida para um outro dispositivo conectado à mesma, tal como uma fibra, por exemplo. No entanto, descasamento de impedâncias entre a porta de saída, a fibra e o meio que separa estes dois dispositivos produzem reflexões que são transmitidas de volta pela porta 3, podendo atingir a fonte óptica (laser). Esta realimentação óptica pode causar efeitos indesejáveis, como o deslocamento da frequência central do laser (*chirping*).

Se a estrutura utilizada para o acoplador da Figura 1 fosse baseada em materiais isotrópicos, qualquer reflexão proveniente da porta 3 seria acoplada diretamente à porta 1, já que, neste caso, o acoplador seria recíproco. Porém, com a utilização de materiais magnetoópticos, a condição de transferência de potência do guia B para o guia A (sentido reverso) é seriamente afetada. Isto se deve ao efeito não-recíproco produzido pelas camadas 1 e 5 que alteram as constantes de propagação dos modos simétricos e anti-simétricos. Conseqüentemente, o comprimento de máxima transferência de potência para o caso de propagação reversa será diferente do caso de propagação direta.

B. Modelagem do isolador

O primeiro passo para modelar o isolador consiste em determinar os valores das espessuras d_2 e d_4 que permitam produzir as constantes de propagação adequadas para a máxima transferência de potência no sentido direto.

Esta etapa pode ser grandemente simplificada se a estrutura da Figura 1 for dividida em dois guias de ondas não-recíprocos isolados de três camadas como mostra a Figura 3. Observar que isso será feito apenas para se determinar estas espessuras, as quais são calculadas de modo que as constantes de propagação destes guias de ondas sejam exatamente iguais no sentido direto. Uma vez obtidas as espessuras d_2 e d_4 , estes valores são transportados para a estrutura completa da Figura 1, a qual deverá ser resolvida integralmente. Vale lembrar que as constantes de propagação de um guia de ondas de 5 camadas são ligeiramente diferentes entre si pois, caso contrário, (9) não poderia ser aplicada.

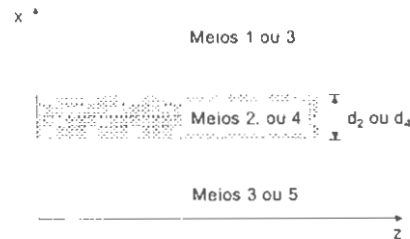


Figura 3. Vista da seção longitudinal de guias de ondas não-recíprocos de 3 camadas. Um dos guias de 3 camadas é definido pela estrutura 1, 2 e 3 e o outro por 3, 4 e 5.

C. Otimização de parâmetros do guia

Nesta etapa, o único parâmetro geométrico que ainda precisa ser otimizado é a separação entre os guias de ondas, $2S_3$. Esta separação é responsável pela intensidade do acoplamento de energia entre os guias de ondas. Quanto menor for esta separação, menor será o comprimento da região de acoplamento de energia. Esta etapa de otimização será realizada via algoritmo genético. A única imposição aqui é quanto ao comprimento de acoplamento em ambos os sentidos de propagação. Para que esta otimização seja possível, o AG necessita de uma figura de mérito apropriada. A figura de mérito neste caso é o determinante da matriz $[M(\beta)]$ descrita na Seção II, que representa a equação característica dos modos de um guia de ondas não-recíproco de 5 camadas. A tarefa delegada ao AG é encontrar a separação $2S_3$ que satisfaça o requisito $L_{\pi}^{-} = 2L_{\pi}^{+}$. Isto é possível porque as constantes de propagação em um guia de onda não-recíproco dependem da direção de propagação. No sentido reverso, o casamento de fase entre os guias de ondas não precisa ser totalmente satisfeito. Observar que, para o caso de propagação direta (+z), é adotado que a transferência de energia entre os guias A e B deve ser máxima. No sentido reverso, esse requisito não precisa ser necessariamente satisfeito, já que se deseja que qualquer reflexão proveniente da porta 3 seja transmitida para a porta 4, e não para a porta 1. No caso desta estrutura, esse requisito acaba sendo duplamente satisfeito. Primeiro, porque se o comprimento de acoplamento no sentido reverso é $L_{\pi}^{-} = L_{\pi}^{+}/2$, parte da energia poderá ser transmitida para o guia A, mas será novamente acoplada para o guia B chegando integralmente à porta 4. Segundo, como a condição de casamento de fase não é totalmente satisfeita no sentido reverso, a quantidade de energia acoplada ao guia A será consideravelmente menor, reduzindo ainda mais o risco de *chirping* no laser.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados numéricos comentados a seguir mostram o desempenho do algoritmo genético e do isolador.

A. Parâmetros do guia óptico utilizados na otimização

Os parâmetros do guia óptico utilizados na simulação são mostrados na Tabela 1. Embora o AG possa otimizar um conjunto de parâmetros, os autores optaram nesta primeira abordagem por fixar os valores do índice de refração das camadas e otimizar o valor da largura da região de acoplamento. Os índices de refração adotados para os materiais são valores típicos divulgados na literatura.

TABELA 1. PARÂMETROS FÍSICOS E GEOMÉTRICOS DO ISOLADOR ÓPTICO (FIGURA 1) UTILIZADOS. O COMPRIMENTO DE ONDA É $\lambda = 1.32 \mu m$.

Meio	Índice de Refração	Espessura (μm)	Constante magnetoóptica, δ
n_1	2.23	z	0.019
n_2	2.26	1.0	0
n_3	2.00	A ser otimizada	0
n_4	2.26	1.03	0
n_5	2.23	z	0.019

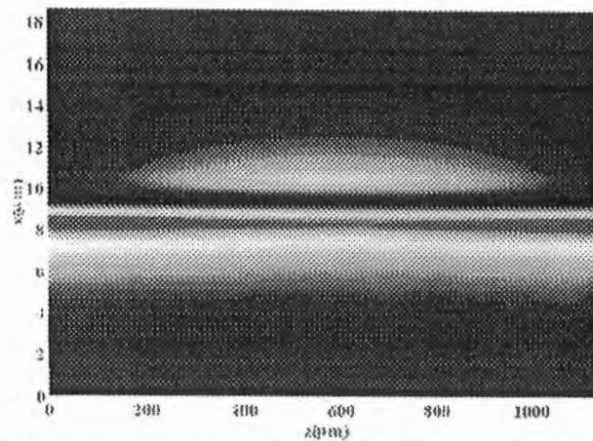


Figura 6. Propagação de luz no sentido $-z$ simulada por meio de BPM. Se houver reflexão de sinal na porta 3, guia B, este se propaga até a porta 4, mantendo a porta 1, guia A, isolada.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, o projeto de um acoplador óptico não-recíproco é realizado com o auxílio de algoritmo genético. A síntese é feita com base na otimização do valor da espessura da camada que separa os guias acoplados. A simulação do dispositivo via BPM atesta desempenho adequado, podendo ser utilizado como isolador em sistemas de comunicações ópticas.

APÊNDICE A

Elementos não-nulos da matriz $[M(\beta)]$, Equação (7):

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= 1; \quad M_{12} = -\cos(\kappa_2 d_2 / 2); \quad M_{13} = -\sin(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{21} &= -j \xi_{zx}^{(1)} \beta - \gamma_1 \xi_{zz}^{(1)} \\
 M_{22} &= j \xi_{zx}^{(2)} \beta \cos(\kappa_2 d_2 / 2) - \kappa_2 \xi_{zz}^{(2)} \sin(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{23} &= j \xi_{zx}^{(2)} \beta \sin(\kappa_2 d_2 / 2) + \kappa_2 \xi_{zz}^{(2)} \cos(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{32} &= \cos(\kappa_2 d_2 / 2); \quad M_{33} = -\sin(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{34} &= -\exp[-\gamma_3 S_3]; \quad M_{35} = -\exp[\gamma_3 S_3] \\
 M_{42} &= -j \xi_{zx}^{(2)} \beta \cos(\kappa_2 d_2 / 2) - \kappa_2 \xi_{zz}^{(2)} \sin(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{43} &= j \xi_{zx}^{(2)} \beta \sin(\kappa_2 d_2 / 2) - \kappa_2 \xi_{zz}^{(2)} \cos(\kappa_2 d_2 / 2) \\
 M_{44} &= (j \xi_{zx}^{(3)} \beta - \xi_{zz}^{(3)} \gamma_3) \exp[-\gamma_3 S_3]; \quad M_{45} = (j \xi_{zx}^{(3)} \beta + \xi_{zz}^{(3)} \gamma_3) \exp[\gamma_3 S_3] \\
 M_{54} &= \exp[\gamma_3 S_3]; \quad M_{55} = \exp[-\gamma_3 S_3] \\
 M_{56} &= -\cos(\kappa_4 d_4 / 2); \quad M_{57} = -\sin(\kappa_4 d_4 / 2) \\
 M_{61} &= -(j \xi_{zx}^{(3)} \beta - \xi_{zz}^{(3)} \gamma_3) \exp[\gamma_3 S_3] \\
 M_{65} &= -(j \xi_{zx}^{(3)} \beta + \xi_{zz}^{(3)} \gamma_3) \exp[-\gamma_3 S_3] \\
 M_{66} &= j \xi_{zx}^{(4)} \beta \cos(\kappa_4 d_4 / 2) - \xi_{zz}^{(4)} \kappa_4 \sin(\kappa_4 d_4 / 2) \\
 M_{67} &= j \xi_{zx}^{(4)} \beta \sin(\kappa_4 d_4 / 2) + \xi_{zz}^{(4)} \kappa_4 \cos(\kappa_4 d_4 / 2) \\
 M_{76} &= \cos(\kappa_4 d_4 / 2); \quad M_{77} = -\sin(\kappa_4 d_4 / 2); \quad M_{78} = -1 \\
 M_{86} &= -j \xi_{zx}^{(4)} \beta \cos(\kappa_4 d_4 / 2) - \xi_{zz}^{(4)} \kappa_4 \sin(\kappa_4 d_4 / 2) \\
 M_{87} &= j \xi_{zx}^{(4)} \beta \sin(\kappa_4 d_4 / 2) - \xi_{zz}^{(4)} \kappa_4 \cos(\kappa_4 d_4 / 2) \\
 M_{88} &= j \xi_{zx}^{(5)} \beta + \xi_{zz}^{(5)} \gamma_5
 \end{aligned}$$

nas quais os sobrescritos entre parênteses representam a camada da estrutura, conforme ilustra a Figura 1.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FAPESP (procs. 00/06304-1 e 00/09180-1) e CNPq (proc. RD-300834/97-7) pelo apoio parcial a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] E.A.C. Gonçalves, R. S. Flaminio, B.-H.V. Borges e A.C. César, "Método da Propagação de Feixe de Ângulo Largo para Análise de Guias de Onda com Materiais Magnetoópticos Usando Diferenças Finitas", Anais do 19º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT 2001, Fortaleza, CE, 3 a 6 de setembro de 2001, CD-Rom.
- [2] E.A. C. Gonçalves, B.-H.V. Borges e A.C. César, "Análise de Dispositivos Ópticos Não-recíprocos Usando FD-BPM", Anais do IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo-CBMag 2000, pp. 90-94, Natal, RN, 19 a 22 de novembro de 2000.
- [3] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, MI: Univ. Michigan Press, 1975.
- [4] Y. Rahmat-Samii e E. Michielssen, editores, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, NY, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [5] C. Y. Ngo and V. O. K. Li, "Fixed channel assignment in cellular radio networks using a modified genetic algorithm", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 47, no. 1, pp.163-172, February 1998.
- [6] Marcos A.C. de Lima, Aluizio F.R. Araújo e Amílcar C. César, "Alocação dinâmica de canais em sistemas de comunicações móveis utilizando algoritmo genético", Anais do 19º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBrT 2001, 3 a 9 de setembro de 2001, Fortaleza, CE, CD-ROM.
- [7] B.S. Park, J.G. Yook, H.K. Park, "Genetic approach to base station placement from pre-defined candidate sites for wireless communications", IEICE Trans. on Commun., vol. E86B, no. 3, pp. 1153-1156, março de 2003.
- [8] L.L. Wang, D.G. Fang, W.X. Sheng, "Combination of genetic algorithm (GA) and fast fourier transform (FFT) for synthesis of arrays", Microwave and Opt. Techn. Lett., pp. 56-59, vol. 37, no. 1, 5 de abril de 2003.
- [9] D. Saha, M. D. Purkayastha and A. Mukherjee, "An approach to wide area WDM optical network design using genetic algorithm", Computer Communications, vol. 22, no. 2, pp. 156-172, January 1999.
- [10] C. Vijayanand, M. S. Kumar, K. R. Venugopal and P. S. Kumar, "Converter placement in all-optical networks using genetic algorithms", Computer Communications, vol. 23, pp. 1223-1234, 2000.
- [11] T. Nishino e T. Itoh, "Evolutionary generation of microwave line-segment circuits by genetic algorithms", IEEE Trans. On Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 9, pp. 2048-2055, setembro de 2002.
- [12] C. Zhen e G. Lihui, "Application of genetic algorithm in modeling RF on-chip inductors", IEEE Trans. On Microwave Theory Tech., vol. 51, no. 2, pp. 342-346, fevereiro de 2003.
- [13] S. Caorsi, M. Donelli, A. Massa e M. Raffetto, "A parallel implementation of an evolutionary-based automatic tool for microwave circuit synthesis: preliminary results", Microwave and Opt. Tech. Lett., vol. 35, no. 3, pp. 169-172, novembro de 2002.
- [14] V.V. Nikulin, V.A. Skormin, T.E. Busch, "Genetic algorithm optimization for Bragg cell design", Optical Engineering, pp. 1767-1773, vol. 41, no. 8, agosto de 2002.
- [15] G. Cormier, R. Boudreau, S. Theriault, "Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis", J. of The Optical Soc. of America B-Opt. Phys., pp. 1771-1776, vol. 18, no. 12, dezembro de 2001.
- [16] Kim-Fung Man, Kit-Sang Tang and Sam Kwong, "Genetic Algorithms: Concepts and Designs", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43, no. 5, pp. 519-534, outubro de 1996.
- [17] L. D. Alcantara, F. L. Teixeira, A.C. César, and B.V. Borges, "An improved wide-angle FD-BPM for nonlinear and nonreciprocal waveguides", IEEE Trans. Mag., vol. 39, no. 3, pp. 1223-1226, maio de 2003.