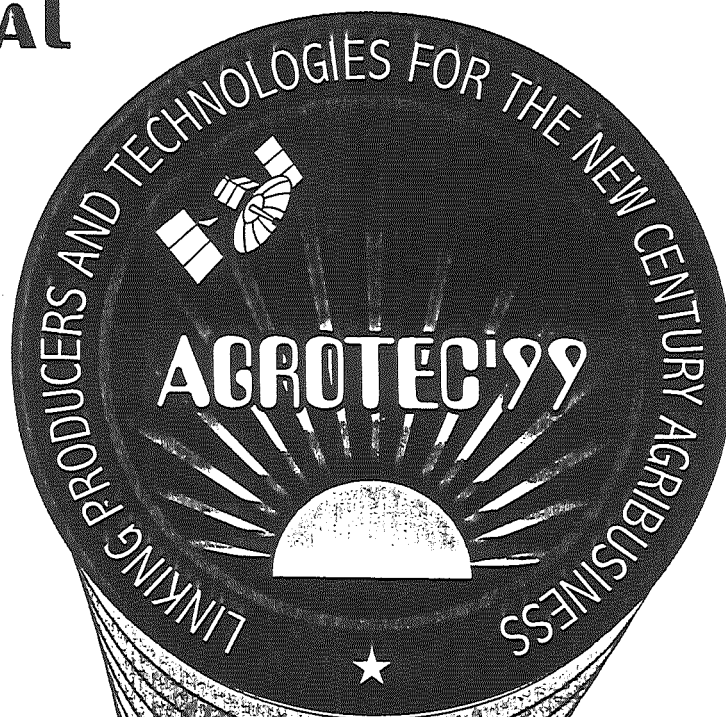


5E  
02/02/00

# INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGROPOLES AND AGRO-INDUSTRIAL TECHNOLOGICAL PARKS

**15 - 21 NOVEMBER 1999**

**SHOPPING CENTER BARRETOS  
BARRETOS - SÃO PAULO - BRAZIL**



## PROCEEDINGS ANAIS

REALIZATION:



**AnproTec**

ORGANIZATION:



[www.ibt-barretos.org.br/agrotec99](http://www.ibt-barretos.org.br/agrotec99)

# Análise de Guias de Ondas Não-Lineares Através do Método BPM de Ângulo Largo

6732 a

Ben-Hur V. Borges e Amílcar C. Cesar

**Resumo** — Este trabalho aborda a análise de guias de ondas ópticos não-lineares por meio do Método de Propagação de Feixe de ângulo largo (WA-BPM). A técnica de modelagem implementada neste trabalho baseia-se na utilização de Aproximantes de Padé para a solução da Equação de Helmholtz o que nos permite o estudo de estruturas onde o ângulo de propagação seja maior que  $50^\circ$  bem como a utilização de materiais com elevado degrau de índice de refração. A extensão deste extraordinário método para limites mais amplos de análise fornece uma ferramenta extra para a investigação de propagação óptica em geometrias mais complexas.

**Palavras Chave** — Guias não-lineares, aproximantes de Padé, FD-BPM, elementos finitos.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de um aumento cada vez maior da capacidade de transmissão de informações tem sido um fator impulsionador no desenvolvimento de sistemas de comunicações. Neste contexto, um fator limitante tem sido a velocidade das operações de chaveamento a qual é restringida, em grande parte, pelos componentes eletrônicos convencionais. Portanto, o desenvolvimento de sistemas puramente ópticos torna-se de importância crucial neste cenário de demanda crescente de capacidade de transmissão [1].

Chaveamento puramente óptico é possível com a utilização de guias de ondas ópticos fabricados em materiais não-lineares. Estes dispositivos podem ser utilizados não só em sistemas de comunicações ópticas como também em computação óptica [2]. Em se tratando de materiais não-lineares, o efeito físico que pretendemos utilizar a nosso favor é conhecido como efeito Kerr [3]. Este efeito quadrático permite que o índice de refração do material varie em função da potência óptica aplicada. As possibilidades que podem ser exploradas, em termos de dispositivos, com materiais que exibem este fenômeno são inúmeras, tais como: acopladores direcionais, junções Y, estruturas Mach-Zehnder, etc [4] [10].

Como pôde ser observado acima, a variedade de aplicações deste material em óptica integrada é muito grande. Entretanto, a análise destes dispositivos tem se restringido à solução da Equação de Helmholtz em seu limite paraxial, ou seja, onde a propagação do feixe dentro do dispositivo é suposta ser praticamente paralela ao eixo longitudinal  $z$ . Isto limita o grau de liberdade no desenvolvimento de tais dispositivos, principalmente quando estruturas tipo Mach-Zehnder são envolvidas. Estas estruturas, normalmente com um "rib" (ou elevação) em sua parte

superior, apresentam uma dupla junção Y como mostrado na Fig. 1.

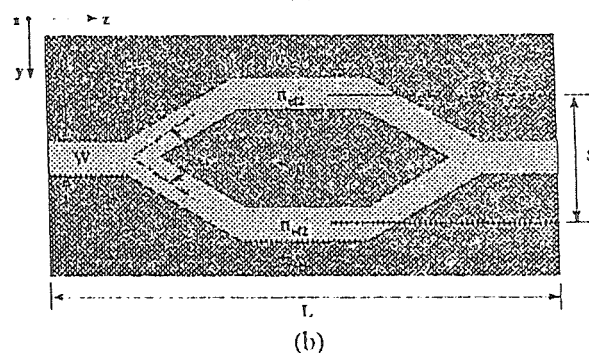
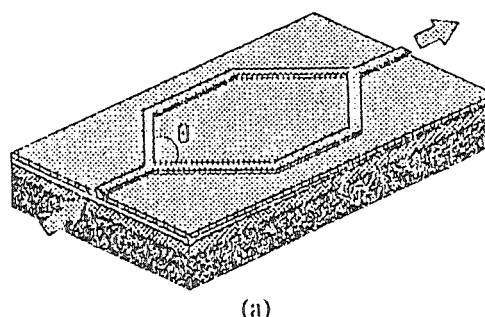


Fig. 1: (a) Vista tridimensional de uma estrutura Mach-Zehnder tipo "rib", (b) forma reduzida (bi-dimensional) da estrutura em (a) obtida após aplicação do método do índice efetivo. Em guias de ondas convencionais o ângulo de abertura,  $\alpha$ , comumente utilizado é de  $1/100$ rd.

A solução paraxial não admite uma grande abertura deste ângulo além de restringir a diferença de índices de refração entre guia e casca (limite de guiamento fraco). A análise destas estruturas segue o seguinte princípio: 1) aplica-se o método do índice efetivo à estrutura da Fig. 1(a). Dois índices efetivos são então obtidos, um para a região que compreende o "rib",  $n_{eff2}$ , e outro para a região fora do "rib",  $n_{eff1}$  ( $n_{eff2} < n_{eff1}$ ). O guia de onda tridimensional é então reduzido a uma estrutura bidimensional como mostra a Fig. 1(b). Isto facilita enormemente a solução do problema pois não requer a operação com matrizes de grandes dimensões [11]; 2) aplica-se agora o método BPM convencional. Este procedimento é efetuado tanto para guias de ondas lineares como para não-lineares. Estas estruturas podem facilmente atingir comprimentos superiores a um centímetro a fim de manter as perdas por radiação nas junções Y o mais baixo possível [12]-[13]. Comprimentos menores implicam em ângulos de junção maiores e, consequentemente, maiores perdas.

O método de análise a ser investigado neste trabalho apresenta a vantagem de poder ser aplicado tanto a estruturas convencionais quanto a estruturas mais complexas, ou seja, estruturas onde grandes ângulos de abertura bem como alto degrau de índices de refração são requeridos. Isto será possível com a utilização do Método de Propagação de Feixe de Ângulo Largo (Wide-Angle Beam Propagation Method) [14]-[15]. Este método, ainda recente, vem sendo aplicado a uma grande variedade de problemas, mas exclusivamente em estruturas lineares. A sua utilização em guias de

Manuscrito recebido em 15 de Julho, 1999. Este trabalho foi financiado com recursos da FAPESP Processo No. 97/12996-9 e CNPq, Processo No. RD-300834/97-7.

Ben-Hur V. Borges e Amílcar C. Cesar, Depto. de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, São Carlos SP 13560-250 Brasil, tel: 55 16 273 - 9363, fax: 55 16 273 - 9372, e-mail: benhur@sel.eesc.sc.usp.br

|             |         |
|-------------|---------|
| SYSNO       | 1067758 |
| PROD        | 000921  |
| ACERVO EESC |         |

ondas não-lineares já vem sendo investigada por nossa equipe e tem se mostrado perfeitamente factível.

## II. TEORIA

Técnicas BPM de ângulo largo (WA-BPM) são implementadas com o auxílio de Aproximantes de Padé [14]-[15]. Esta técnica vem sendo utilizada com enorme sucesso inclusive para a análise de estruturas altamente assimétricas, ou seja, estruturas compostas de materiais de baixo índice de refração (vidros) sobre semicondutores [16]. Estruturas como estas não podem ser analisadas com a equação de Helmholtz no limite paraxial pois resultariam em um erro considerável. A Equação de Helmholtz para guias de ondas não-lineares pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial E}{\partial z} - i \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = i \frac{P}{2k} E$$

onde:

$k = k_0 n_0$  ( $k_0 = 2\pi/\lambda$ ) e  $n_0$  = índice de refração de referência

$$P = k_0^2 \left[ n^2(x, y, z) - n_0^2 + \alpha |E|^2 \right] + \nabla_{\perp}^2$$

$\alpha$  é o coeficiente de não-linearidade.

Os três principais Aproximantes de Padé são mostrados na Tabela I em termos do operador P. O Aproximante de Padé de ordem (1,1) possibilita a análise de estruturas com um ângulo de até 25° em relação ao eixo longitudinal z. Por outro lado, o Aproximante de ordem (2,2) permite que ângulos de até 50° sejam considerados. Finalmente, ângulos de até 55° em relação à longitudinal podem ser considerados com o Aproximante de Ordem (3,3).

## III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados mostrados nesta seção foram obtidos para a estrutura mostrada na Fig. 2, para o Aproximante de Padé de ordem (1,1). Estes resultados já representam uma grande melhoria sobre o limite paraxial, o qual é limitado a ângulos inferiores a 5°. A implementação dos Aproximantes de ordem (2,2) e (3,3) estão em andamento. O comprimento de onda utilizado é  $\lambda = 0,515 \mu\text{m}$ , o índice de refração da casca não-linear é  $n_c = 1,55$  e o termo não-linear  $n_{2c} = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{W}$ , o índice de refração do filme guia de onda  $n_f = 1,555$ . A espessura do filme  $d = 4 \lambda$ .

Tabela I: Aproximantes de Padé para a Equação de Helmholtz.

| Ordem | Expressão                                 |
|-------|-------------------------------------------|
| (1,1) | $\frac{P}{2k}$                            |
|       | $1 + \frac{P}{4k^2}$                      |
| (2,2) | $\frac{P}{2k} + \frac{P^2}{4k^3}$         |
|       | $1 + \frac{3P}{4k^2} + \frac{P^2}{16k^4}$ |

|       |                       |                     |                      |
|-------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| (3,3) | $\frac{P}{2k}$        | $\frac{P^2}{2k^3}$  | $\frac{3P^3}{32k^5}$ |
|       | $1 + \frac{5P}{4k^2}$ | $\frac{3P^2}{8k^4}$ | $\frac{P^3}{64k^6}$  |

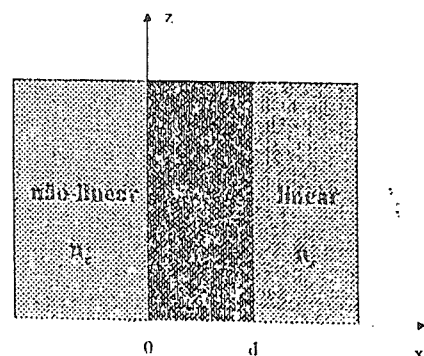


Fig 2: Guia de Onda planar não-linear.

O meio não-linear ( $n_c$ ) é suposto ser focalizante nestas simulações, ou seja, seu índice de refração aumenta à medida em que a potência óptica lançada aumenta. A Fig. 3 mostra a evolução da amplitude de campo para uma potência óptica lançada de 10mW/mm. Este nível de potência ainda é insuficiente para fazer com que o índice de refração do meio não-linear ultrapasse o índice de refração da região guia de onda, portanto, o campo óptico permanece confinado nesta camada. A evolução da campo para uma potência óptica de 30mW/mm é mostrada na Fig. 4. A potência lançada neste exemplo já é suficiente para fazer com que o índice de refração da região não-linear ultrapasse o índice de refração do filme guia de onda (linear). Assim, grande parte da energia lançada em  $z=0 \mu\text{m}$  é transferida para a região não linear. Uma pequena oscilação no campo é observada logo após sua divisão ( $z \approx 150 \mu\text{m}$ ) e deve-se ao acoplamento de potência entre os campos em ambas regiões. A Fig. 5 mostra a evolução da amplitude de campo desta vez para uma potência de 10mW/mm. Neste caso, o aumento do índice de refração na região não-linear é ainda mais significativo, o que provoca um *desprendimento* mais rápido do campo do filme linear para a casca não-linear.

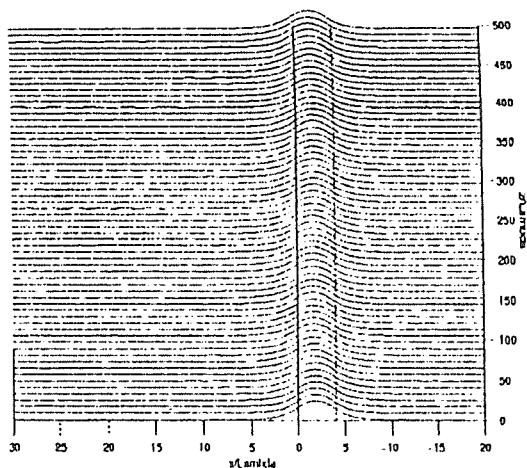


Fig. 3: Evolução da amplitude de campo para uma potência óptica de 10mW/mm.

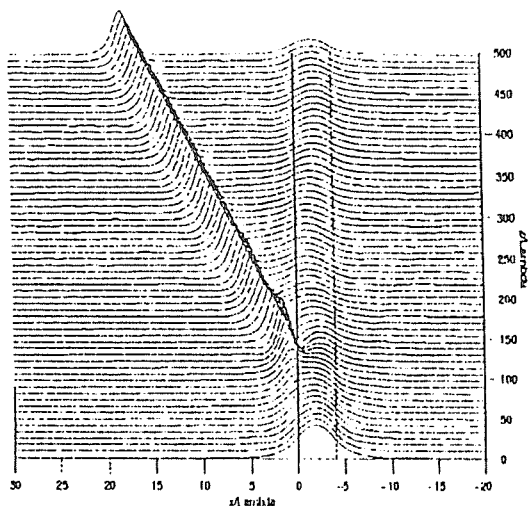


Fig. 4: Evolução da amplitude de campo para uma potência óptica de 30mW/mm.

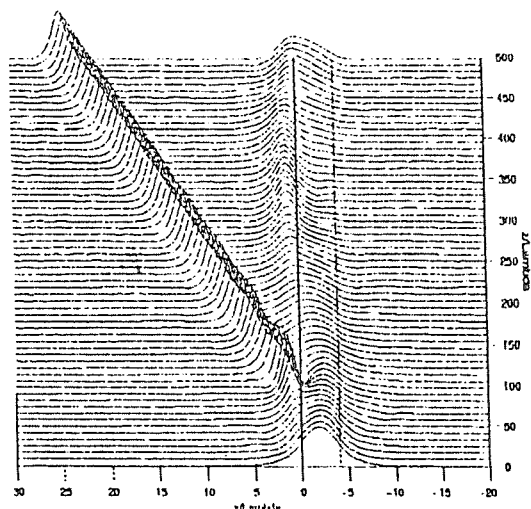


Fig. 5: Evolução da amplitude de campo para uma potência óptica de 40mW/mm.

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo propôs o estudo de guias de ondas ópticos não-lineares por meio do Método de Propagação de Feixe de ângulo largo em diferenças finitas (WA-FD-BPM). Este é o primeiro trabalho que utiliza este tipo de análise para materiais não-lineares. Esta técnica utiliza Aproximantes de Padé para estender a Equação de onda de Helmholtz para além do limite paraxial. Os resultados obtidos até o momento foram referem-se ao Aproximante de ordem (1,1). Os resultados obtidos demonstram que esta técnica é extremamente robusta e será estendida para Aproximantes de ordens mais elevadas para que um estudo de convergência e tempo de processamento possa ser realizado.

#### REFERÊNCIAS

- [1] G. I. Stegeman e C. T. Seaton, "Nonlinear integrated optics", *J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 12, pp. R57-R78, Dezembro 1985.
- [2] K. Uchima, "100 Gbit/s to 6.3 Gbit/s Demultiplexing Experiment Using Polarization-Independent Nonlinear Optical Loop Mirror", *IEEE Electronics Letters*, vol. 30, no. 11, pp. 873-875, Maio 1994.
- [3] R.G. Hunsperger, "Integrated optics: Theory and Technology", Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [4] H. Yokota, M. Hira, and S. Kurazono, "Iterative Finite Difference Beam Propagation Method Analysis of Nonlinear Optical Waveguide Problem", *Electron. and Commun. in Japan, Part 2*, vol. 78, no. 1, pp. 73-80, 1995.
- [5] K. Yasumoto, H. Maeda, and N. Maekawa, "Coupled-Mode Analysis of an Asymmetric Nonlinear Directional Coupler", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 628-633, Abril 1996.
- [6] F. Di Pasquale and H.E. Hernandez-Figueroa, "Improved All-Optical Switching in a Three-Slab Nonlinear Directional Coupler with Gain", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, no. 5, pp. 1254-1258, Maio 1994.
- [7] H.-Y. Liu and W.-S. Wang, "Beam Propagation Analysis of the Nonlinear Tapered Optical Waveguide", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 42-44, Fevereiro 1995.
- [8] W.S. Man, M. S. Demokan, and H. Tam, "All-Optical Routing Switch Using a Fiber Nonlinear Directional Coupler and Controlling Solitons", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 12, pp. 2793-2798, Dezembro 1996.
- [9] U. Langbein, F. Lederer, and H.-E. Ponath, "A New Type of Nonlinear Slab-Guided Waves", *Opt. Commun.*, vol. 46, no. 3,4, pp. 167-169, 1 Julho 1983.
- [10] J. Chrostowski and S. Chelkowsky, "Analysis of an Optical Rib Waveguide with a Nonlinear Substrate", *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 7, pp. 528-530, Julho 1987.
- [11] A. Tervonen, "Computer-Aided Design System for Optical Waveguide Devices", *Opt. Eng.*, vol. 34, no. 9, pp. 2543-2550, Setembro 1995.
- [12] K. Fischer, J. Muller, R. Hoffmann, F. Wasse and D. Salle, "Elasto-optical Properties of SiON Layers in an Integrated Optical Interferometer Used as a Pressure Sensor", *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 163-169, Janeiro 1994.
- [13] C. Wagner, J. Frankenberger, and P.P. Deimel, "Optical Pressure Sensor Based on a Mach Zehnder Interferometer Integrated with a Lateral a-Si:H p-i-n Photodiode", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 10, pp. 1257-1259, Outubro 1993.
- [14] G.R. Hadley, "Wide-Angle Beam Propagation Using Padé Approximant Operators", *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 20, pp. 1426-1428, Outubro 15, 1992.
- [15] I. Ilic, R. Scarmozzino, and R.M. Osgood, Jr., "Investigation of the Padé Approximant-Based Wide-Angle Beam Propagation Method for Accurate Modeling of Waveguiding Circuits", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 12, pp. 2813-2822, Dezembro 1996.
- [16] M. Siegert, M. Löken, Ch. Glingener, and Ch. Buchal, "Efficient Optical Coupling Between a Polymeric Waveguide and an Ultrafast Silicon MSM Photodiode", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 4, no. 6, pp. 970-974, Novembro/Dezembro 1998.