

**VII SIMPÓSIO
BRASILEIRO DE
MICROONDAS E
OPTOELETRÔNICA**

**XIV SIMPÓSIO
BRASILEIRO DE
TELECOMUNICAÇÕES**

**CURITIBA
22 a 25 de julho/96**

**EQUITEL
Walter José Kallmow
Walter Godoy Júnior**

ANNAIS

VOL. 2



Apoio:

equitel
Telecomunicações



ANÁLISE DE GUIAS NRD ACOPLADOS POR INTERMÉDIO DE

SUBSTRATO ANISOTRÓPICO

C421a

Amílcar Careli César 515795

Departamento de Engenharia Elétrica - EESC - USP

C. P. 359, 13560-250 São Carlos SP

e-mail: amilcar@peterpan.sel.eesc.sc.usp.br

Resumo

O efeito da anisotropia dieletrica biaxial sobre as características de propagação de onda eletromagnética em guia NRD com duas lâminas isotrópicas acopladas por intermédio de substrato anisotrópico é investigado. As expressões do campo eletromagnético e as equações características dos modos simétrico e antissimétrico são determinadas. Resultados numéricos para alguns materiais uni e biaxiais são apresentados. A utilização de substrato anisotrópico pode melhorar o desempenho de acopladores direcionais NRD.

Abstract

The effect of the biaxial dielectric anisotropy on the electromagnetic wave propagation in NRD couplers is investigated. The couplers are based on two isotropic slabs coupled by means of an anisotropic substrate. The electromagnetic field components and the characteristic equations for the even and odd modes are obtained. Numerical results for some common dielectric uniaxial and biaxial materials are presented. It's shown that the use of an appropriate anisotropic substrate can improve the performance of the NRD-guide directional couplers.

1. Introdução

A investigação do efeito da anisotropia dos materiais sobre as características de propagação de onda eletromagnética em guias de onda tem sido recentemente objeto de grande interesse. Materiais até então tratados como isotrópicos, como alumina e PTFE, podem exibir certo grau de anisotropia. O efeito acentuado de anisotropia que determinados materiais exibem pode proporcionar propriedades interessantes aos guias e dispositivos. Especialmente em freqüências elevadas, o efeito da anisotropia sobre as características de propagação de onda em guias deve ser precisamente avaliado. Vários tipos de guias de onda para altas freqüências, como microfita [1] e linha de fenda [2] utilizando materiais anisotrópicos, têm sido analisados. Dentre os dispositivos, os acopladores de sinais são amplamente utilizados e construídos nas mais diversas tecnologias. Empregando materiais anisotrópicos, tais dispositivos podem ter algumas de suas características melhoradas, como a equalização das velocidades de fase correspondentes aos modos simétrico e antissimétrico [3].

O guia dielétrico não radiativo (NRD) é uma técnica disponível de construção de dispositivos para a faixa de ondas milimétricas, e vários tipos de acopladores direcionais construídos com esta técnica e empregando dielétricos isotrópicos já foram propostos [4].

Recentemente, as características de propagação de onda em guias NRD construídos com materiais exibindo anisotropia dielétrica e magnética foram analisadas [5]. As características de guias NRD acoplados utilizando materiais exibindo anisotropia uniaxial já foram também analisadas [6].

SYSNO	918596
PROD	001688
ACERVO EESC	

As características de propagação de onda em guias NRD acoplados constituídos por duas lâminas de material isotrópico separadas por uma região exibindo anisotropia dielétrica biaxial são analisadas neste trabalho. Diagramas de dispersão dos modos simétrico e antissimétrico, diagramas do coeficiente de acoplamento e distribuição de campo são apresentados para alguns materiais uni e biaxiais.

2. Teoria

A seção transversal do guia NRD com lâminas retilíneas acopladas é mostrada na Fig. 1. Os planos metálicos são considerados condutores perfeitos e são separados por uma distância $h < \lambda_0/2$. Esta separação é que garante ao guia a característica não radiativa. As lâminas acopladas (regiões 2 e 4) são de material isotrópico caracterizado por ϵ_r . Todos os materiais são considerados sem perdas. A região 3 é ocupada por um material que exibe anisotropia dielétrica biaxial representada pelo tensor permissividade elétrica, dado por:

$$\epsilon_{\text{r},\epsilon_r} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 1}$$

onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo. O campo eletromagnético é suposto proporcional ao fator $\exp(i\omega t - \beta z)$, onde ω é a freqüência angular do sinal aplicado e β é a constante de propagação da onda.

A simetria da estrutura em relação a $x=0$ permite a análise em termos das excitações simétrica (par) e antissimétrica (ímpar). A suposição da existência de uma parede elétrica em $x=0$ define o modo simétrico e a de uma parede magnética o modo antissimétrico.

As componentes dos campos elétrico e magnético podem ser escritas em função das componentes de campo elétrico E_y e E_z . Para satisfazer as condições de contorno nos planos condutores, estas componentes podem ser escritas como:

$$E_y = \begin{cases} (u_1 + u_2) \cos(k_y y), & 0 \leq x \leq \frac{d}{2} \\ [E \cos(rx) + F \sin(rx)] \cos(k_y y), & \frac{d}{2} \leq x \leq b + \frac{d}{2} \\ P \exp\{-p[x - (b + \frac{d}{2})]\} \cos(k_y y), & x \geq b + \frac{d}{2} \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

$$E_z = \begin{cases} j(q_1 u_1 + q_2 u_2) \sin(k_y y), & 0 \leq x \leq \frac{d}{2} \\ j[G \cos(rx) + H \sin(rx)] \sin(k_y y), & \frac{d}{2} \leq x \leq b + \frac{d}{2} \\ jQ \exp\{-p[x - (b + \frac{d}{2})]\} \sin(k_y y), & x \geq b + \frac{d}{2} \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

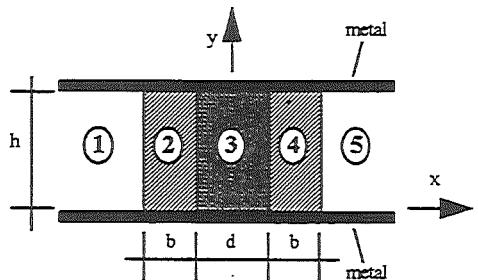


Fig. 1. Seção transversal de acoplador NRD. As regiões 2 e 4 são as lâminas isotrópicas acopladas; a região 3 é o substrato anisotrópico, e as regiões 1 e 5 são de ar.

As funções u_1 e u_2 no substrato anisotrópico são definidas como:

$$u_{1,2} = A, C \cos(\alpha_1 x) + B, D \sin(\alpha_2 x)$$

Eq. 4

e devem satisfazer as equações de onda modificadas:

$$\frac{d^4 u_{1,2}}{dx^4} + f_1 \frac{d^2 u_{1,2}}{dx^2} + f_2 u_{1,2} = 0 \quad \text{Eq. 5}$$

onde $k_y = m\pi/h$, $m = 1, 2, 3, \dots$, e os valores de q_1 , q_2 , α_1 , α_2 , r e p podem ser determinados substituindo-se a Eq. 2 e Eq. 3 nas correspondentes equações de onda nas 3 regiões. A , B , C , D , E , F , G , H , P e Q são constantes determinadas pela aplicação das condições de contorno nas interfaces dielétricas. Os parâmetros f_1 e f_2 são os mesmos determinados em [1], com α naquele trabalho substituído por k_y .

A duas equações características correspondentes aos modos simétrico e antissimétrico são determinadas pela aplicação das condições de contorno nas interfaces dielétricas localizadas em $x = d/2$ e $x = b+d/2$. No caso do modo simétrico, $A = C = 0$, e no do modo antissimétrico, $B = D = 0$. Os modos guiados possuem as 6 componentes do campo eletromagnético e são classificados como $E_{l-m,n}^z$ (LSM no limite isotrópico) e $H_{l-m,n}^z$ (LSE no limite isotrópico), onde $n = 1, 2, 3, \dots$ representa a ordem da raiz da equação característica correspondente. Neste trabalho, somente o modo NRD fundamental, $E_{l=1,n=1}^z$, é analisado.

3. Resultados numéricos

A solução das equações características dos modos acoplados em função dos parâmetros dos materiais utilizados e da geometria dos guias fornece os resultados numéricos que permitem avaliar as características da estrutura analisada. A Fig. 2 mostra a comparação entre as constantes de propagação normalizadas dos modos simétrico e antissimétrico de 3 diferentes estruturas NRD acopladas, em função do espaçamento normalizado, d/λ_0 . A estrutura 1 corresponde à analisada neste trabalho, na qual o substrato é de nitreto de boro ($\epsilon_{xx}=3,4$ e $\epsilon_{yy}=5,12$) [1] e as lâminas isotrópicas acopladas de alumina ($\epsilon_r = 9,5$). A estrutura 2 corresponde a duas lâminas isotrópicas de alumina acopladas e separadas por uma região de ar (estrutura NRD acoplada convencional [4]). A estrutura 3 corresponde a duas lâminas de nitreto de boro acopladas e separadas por uma região de ar [6]. As constantes de propagação normalizadas são definidas por

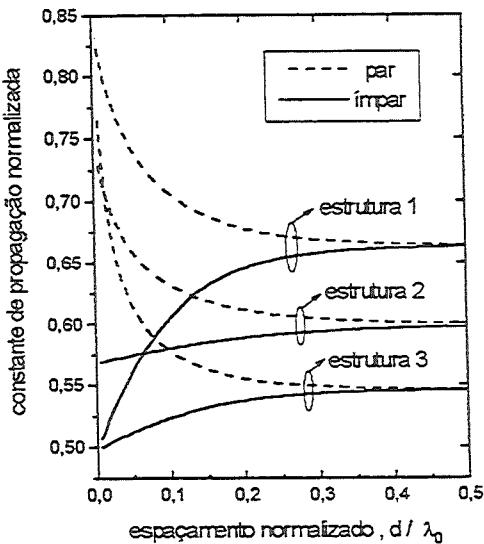


Fig. 2. Comparação entre as constantes de propagação normalizadas de 3 diferentes estruturas NRD acopladas. Estrutura 1: lâminas de alumina (isotrópica) acopladas por intermédio de substrato de nitreto de boro (uniaxial); estrutura 2: lâminas de alumina (isotrópica) acopladas e separadas por região de ar; e estrutura 3: lâminas de nitreto de boro acopladas e separadas por região de ar.

$$\beta_{n,\text{simétrico},\text{antissimétrico}} = \frac{\beta_{\text{simétrico},\text{antissimétrico}}}{\sqrt{\varepsilon_r k_0}},$$

onde $k_0 = 2\pi/\lambda_0$. As 3 estruturas foram analisadas considerando a separação normalizada entre os planos metálicos $h/\lambda_0 = 0,45$ e fator de forma $ff = \frac{b}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_r - 1} = 0,57$. A comparação

mostra que os valores das constantes de propagação são bem distintos e que a utilização de material anisotrópico uniaxial amplia a diferença entre eles, especialmente para valores pequenos do espaçamento normalizado. Neste caso, se um substrato uniaxial é utilizado, a diferença entre as constantes de propagação é a mais elevada entre elas. O coeficiente de acoplamento normalizado é definido como

$$C\lambda_0 = \pi \sqrt{\varepsilon_r} \Delta\beta_n, \quad \text{onde}$$

$\Delta\beta_n = |\beta_{n,\text{simétrico}} - \beta_{n,\text{antissimétrico}}|$. Como o coeficiente de acoplamento é diretamente proporcional a $\Delta\beta_n$, a estrutura com substrato anisotrópico (estrutura 1) exibe valores maiores de coeficiente de acoplamento, para a maior parte da faixa de valores de espaçamento normalizado considerada. Estes resultados são mostrados na Fig. 3, para as mesmas estruturas da Fig. 2. No caso da estrutura 3, substituir ε_r por ε_{xx} nas expressões do fator de forma e coeficiente de acoplamento. Embora o coeficiente de acoplamento exibido pela estrutura com substrato uniaxial seja mais elevado que as demais estruturas, isto significa que as velocidades de fase dos modos simétrico e antissimétrico são menos equalizadas. Nesta situação, as aplicações deste tipo de estrutura ficam limitadas aos casos em que um valor maior de coeficiente de acoplamento é mais interessante, mantendo as mesmas dimensões geométricas do guia.

A Fig. 4 mostra a variação do coeficiente e da largura de acoplamento com o espaçamento normalizados, para o caso em que duas lâminas de alumina (isotrópica) são acopladas por intermédio

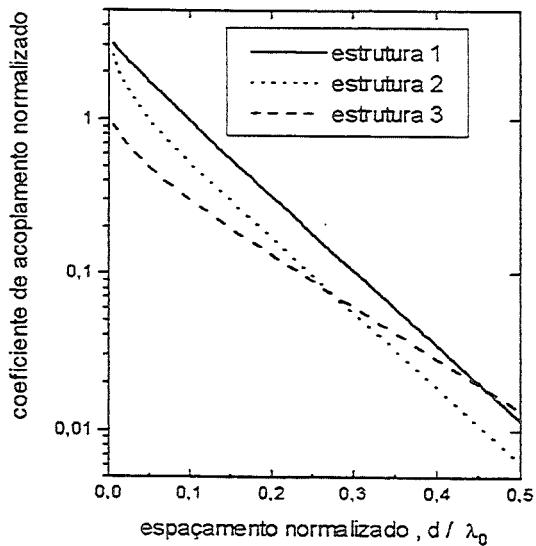


Fig. 3. Coeficiente de acoplamento normalizado vs. espaçamento normalizado para as 3 estruturas da Fig. 2. O fator de forma do guia e a separação entre os planos metálicos também são os mesmos.

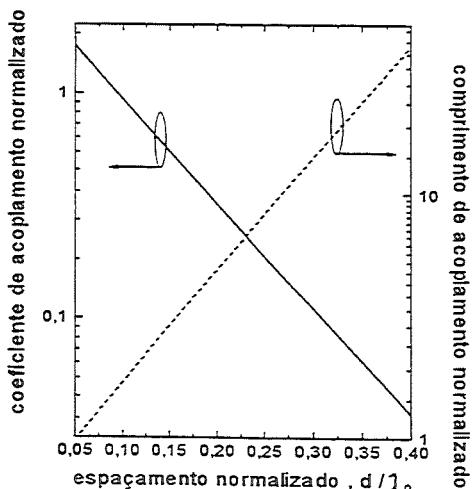


Fig. 4. Fator e comprimento de acoplamento normalizados vs. espaçamento normalizado de acoplador NRD com 2 lâminas de alumina (isotrópica) separadas por um substrato de PTFE exibindo anisotropia dielétrica biaxial

de um substrato de PTFE ($\epsilon_{xx}=2,45$; $\epsilon_{yy}=2,89$; $\epsilon_z=2,95$). A separação normalizada entre os planos metálicos é 0,45 e o fator de forma 0,5. O comprimento de acoplamento é definido por $L=\pi/\Delta\beta_n$.

A Fig. 5 mostra a distribuição da componente na direção x do vetor densidade de fluxo elétrico. O acoplador NRD é aquele da Fig. 4, onde a espessura normalizada do substrato é $d/\lambda_0 = 0,1$; $\beta_{nsimétrico} = 0,6633$ e $\beta_{n,antissimétrico} = 0,5665$. Como a componente principal do campo elétrico é E_x , a componente considerada do vetor densidade de fluxo elétrico é contínua através das interfaces dielétricas. A distribuição é esboçada para a condição $z=0$ e $z=L$. Em $z=0$ o campo E_x está praticamente todo na lâmina situada à esquerda do substrato, e em $z=L$ ocorre praticamente transferência completa para a outra lâmina. Quando os modos simétrico e antissimétrico fundamentais se superpõem não é possível haver um cancelamento perfeito em um dos guias. Há uma pequena porcentagem de campo residual no guia oposto. Este fenômeno já foi observado por Marcuse [7] em guias ópticos.

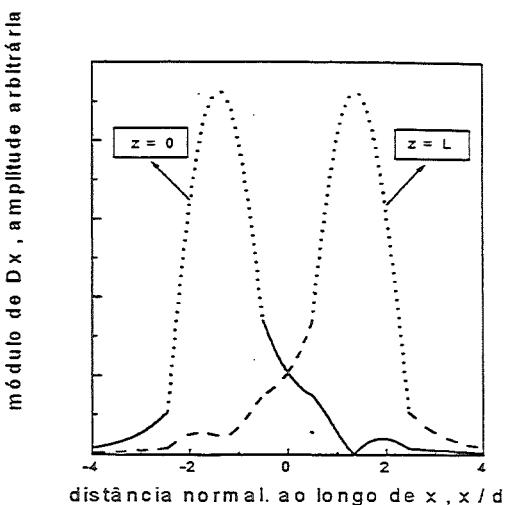


Fig. 5. Distribuição da componente x do vetor densidade de fluxo elétrico ao longo da direção x para o acoplador da Fig. 4. L é o comprimento de acoplamento. (...): região das lâminas acopladas.

4. Conclusões

Guias NRD com lâminas retilíneas de material isotrópico acopladas por intermédio de substrato de material exibindo anisotropia dielétrica biaxial foram analisados neste trabalho. As expressões dos campos elétrico e magnético e as equações características dos modos simétrico e antissimétrico foram obtidas. Resultados numéricos da constante de propagação dos modos, do coeficiente de acoplamento e diagrama de campos, em função de parâmetros dos materiais e geometria dos guias foram apresentados. Os resultados deste trabalho mostram que a utilização de material anisotrópico pode melhorar o desempenho de acopladores NRD. O exato conhecimento do comportamento da propagação de ondas é importante, principalmente em projetos de dispositivos na faixa de onda milimétrica.

5. Referências

1. T. Q. HO e B. BEKER, "Spectral-domain analysis of shielded microstrip lines on biaxially anisotropic substrates", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-39, pp. 1017-1021, junho de 1991.
2. Y. CHEN e B. BEKER, "Analysis of complementary unilateral slot and strip resonators printed on anisotropic substrates", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-43, pp. 1605-1607, julho de 1995.
3. K. C. GUPTA, R. GARG, e I. J. BAHAL, Microstrip lines and slotlines, Dedham, MA: Artech House Inc., pp. 351, 352, 1979.

4. T. YONEYAMA, "Nonradiative dielectric waveguide", em Infrared and millimeter waves, vol 11, K. J. BUTTON, editor. New York: Academic Press, 1984.
5. A. C. CÉSAR e R. F. SOUZA, "Dielectric and magnetic anisotropy effect on the nonradiative dielectric (NRD) waveguide dispersion", *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Anais da SBMO/IEEE MTT-S, vol. 2, pp. 834-836, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, julho de 1995.
6. C. CÉSAR, "Análise de guia dielétrico não-radiativo (NRD) com dupla lâmina de material exibindo anisotropia dielétrica uniaxial", *VI Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, Anais da SBMO, pp. 98-101, Belém, PA, junho de 1994.
7. D. MARCUSE, "Directional couplers made of nonidentical asymmetric slabs". Part I: synchronous couplers", *Journal of Lightwave Tech.*, vol LT-5, nº 1, pp. 113-118, janeiro de 1987.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências CNPq e FAPESP.