

CÁLCULO DAS PERDAS DE PROPAGAÇÃO EM GUIAS DE ONDAS ÓPTICOS  
TIPO RIB PELA ANÁLISE DE ONDA ESCALAR

BEN-HUR VIANA BORGES  
e  
MILSON TADEU CAMARGO SILVA

Departamento de Engenharia Elétrica  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo  
13560 - São Carlos - SP

**Resumo**

Este trabalho apresenta um estudo das perdas de propagação em guias de ondas ópticos tipo rib à partir da Análise de Onda Escalar. Os seguintes sistemas de ligas foram utilizados neste estudo : n<sup>-</sup> Si / n<sup>+</sup> Si, p<sup>-</sup> Si / p<sup>+</sup> Si, GaAs / Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As, e In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> / InP. O comprimento de onda é de 1.3 μm.

**I - Introdução**

Com o avanço na tecnologia de sistemas de comunicações ópticas, tem se verificado um grande aumento no número de funções desempenhadas pelos Circuitos Integrados Opto Eletrônicos (CIOE). Nestes circuitos, os guias de ondas ópticos tornam-se elementos de importância crucial para as ligações ópticas entre os vários componentes integrados monoliticamente [1]. Entre as várias configurações de guias de ondas encontradas, tais como planar, canal enterrado, fita de carregamento, etc., a configuração tipo "RIB" é a que mais tem encontrado aplicações práticas, por ser de fácil fabricação e principalmente por apresentar baixas perdas de propagação [2]. As perdas observadas neste tipo de guia de onda surgem principalmente das perdas materiais ( absorção devido aos portadores livres ) e à dispersão causada por imperfeições na superfície. Neste artigo serão abordadas estruturas fabricadas com os seguintes sistemas de ligas : n<sup>-</sup> Si / n<sup>+</sup> Si, p<sup>-</sup> Si / p<sup>+</sup> Si, GaAs / Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As, e In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub> / InP. Perdas de propagação menores que 0.2 dB/cm tem sido observadas experimentalmente para estes sistemas de ligas [3-5]. O método empregado, Análise de Onda Escalar, utiliza a Análise de Rede Equivalente de Micro-ondas juntamente com a Técnica da Ressonância Transversal, o que permite obter expressões matemáticas mais simples e consideravelmente precisas para uma grande variedade de estruturas guias de ondas [6].

0836582

## II - Método para o Cálculo das Perdas de Propagação

Para atender à crescente necessidade de se obter um modelamento de guias de ondas cada vez mais próximos da realidade, várias técnicas de análise tem surgido nos últimos anos. Entre essas técnicas podemos citar : Método do Índice Efetivo [7], Método dos Elementos Finitos [8], etc. Esses métodos constituem ferramentas realmente poderosas para a análise de guias de ondas ópticos, mas devido à complexidade de suas formulações matemáticas e o tempo de processamento requerido, torna-se conveniente a sua implementação em computadores de grande porte. A Análise de Onda Escalar [6] aplicada a guias de ondas ópticos tipo rib tem fornecido resultados extremamente satisfatórios quando comparada aos métodos citados acima. Outra vantagem deste método está no fato de poder ser implementado em um microcomputador padrão IBM PC XT/AT ou compatível. A fig. 1 mostra a geometria do guia de onda rib juntamente com sua rede equivalente de microondas. De acordo com essa figura temos :  $n_0$ ,  $n_1$  e  $n_2$  representando os índices de refração do ar, camada guiante e substrato, respectivamente. Esse guia de onda de largura  $W$ , espessura da camada guiante  $t_1$ , e altura do rib  $t_2$ , suporta ondas tendo duas configurações de campo possíveis, denominadas modos  $E_{pq}^x$  e  $E_{pq}^y$  [9]. Nessa notação, os subscritos  $p$  e  $q$  representam o número de máximos do campo elétrico ou magnético nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente. Na fig. 1b, os parâmetros da rede equivalente se referem à impedância modal característica  $Z_q^{(1)}$ , o número de onda de propagação na direção  $x$ ,  $k_q^{(1)}$ , e a taxa de transformação  $N_q$ , onde  $i = 1,2$  representa as regiões 1 e 2 do guia de onda, e  $q$  o número do modo guiado. Da Técnica da Ressonância Transversal é sabido que [10] :

$$\leftarrow \quad \rightarrow \\ Z(T) + Z(T) = 0 \quad (1)$$

$\Rightarrow$

onde  $Z(T)$  é a impedância vista à esquerda e direita de um plano de referência  $T$ , plano este que pode se situar em qualquer ponto da rede equivalente da fig. 1b.

A aplicação da Técnica da Ressonância Transversal à rede equivalente resulta na seguinte relação de dispersão para a constante de propagação longitudinal  $K_z$  :

$$N_q^2 \{k_q^{(1)}\}^2 \sqrt{k_z^2 - \{k_q^{(2)}\}^2} = \{k_q^{(2)}\}^2 \sqrt{\{k_q^{(1)}\}^2 - k_z^2} .$$

$$\begin{cases} \tan \\ -\cot \end{cases} \sqrt{\{k_q^{(1)}\}^2 - k_z^2} \frac{W}{2} \quad \begin{array}{l} \text{simétricos} \\ \text{assimétricos} \end{array} \quad (2)$$

onde :  $k_q^{(1)}$  é o número de onda da estrutura equivalente que é

uniforme ao logo de  $z$ ,  $k_z$  é o número de onda na direção  $z$ ,  $N_q$  a taxa de transformação e  $W$  a largura do rib. Todo o equacionamento para o cálculo de  $N_q$  e  $k_q^{(1)}$  está contido em [6]. Para que se possa efetuar o estudo das perdas de propagação em guias de ondas ópticos tipo rib, torna-se necessário introduzir a parte imaginária dos índices de refração. Isso significa que o cálculo dos parâmetros envolvidos na obtenção de (2) tem que ser efetuado no plano complexo.

### III - Resultados

Nos exemplos mostrados nesta seção o comprimento de onda utilizado é de  $1.3 \mu\text{m}$ . A parte real dos índices de refração para os guias de Si ( $n^-/n^+$ ,  $p^-/p^+$ ) bem como a sua variação com a concentração de portadores foi obtida de [11], a parte imaginária, o coeficiente de extinção, foi obtida de [12]. Para os guias de  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , a parte real foi calculada numericamente de [13], e a parte imaginária de [5,14]. Por último, para a liga  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{P}_{y_1-y}/\text{InP}$  os índices de refração foram calculados numericamente de [15] e a parte imaginária foi obtida de [16].

Na fig. 2 são mostradas as perdas de propagação para o guia de onda porposto por [11], utilizando a liga  $n^- \text{Si}/n^+ \text{Si}$ . Os dados geométricos para essa estrutura são, com relação à fig. 1a :  $t_1 = 8.6 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 2.8 \mu\text{m}$  e  $W = 10.0 \mu\text{m}$ . Os resultados foram obtidos em função da concentração de portadores livres no substrato tendo a espessura  $t_1$  como parâmetro. A diminuição das perdas com o aumento da concentração de portadores e principalmente com a espessura da camada guia de onda  $t_1$  pode ser explicada da seguinte forma : à medida que a concentração de portadores aumenta no substrato, há uma consequente diminuição do índice de refração desta camada, isso faz com que haja um maior confinamento de campo óptico na camada de índice  $n_1$ , diminuindo, assim, as perdas de propagação. O aumento na espessura  $t_1$  também diminui a penetração de campo óptico no substrato, mas força o aparecimento de modos de ordens mais altas, o que nem sempre é desejado. O uso de grandes valores para as espessuras nesse guia de onda se deve ao fato deste apresentar um fraco guiamento óptico. A fig. 3 mostra as perdas de propagação em função da espessura  $t_1$ , com a concentração de portadores livres no substrato como parâmetro para o guia de onda  $p^- \text{Si}/p^+ \text{Si}$ . O guia de onda apresenta uma altura de rib  $t_2 = 0.666 t_1$  e uma largura  $W = 2.381 t_1$ . Três concentrações de portadores no substrato foram estudadas, 2.8, 5.0 e  $12.0 (\times 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$  cujos coeficientes de extinção  $k$  são respectivamente  $3.107$ ,  $20.1$  e  $55.65 (\times 10^{-5})$ . Para a camada guiana, o coeficiente de extinção  $k = 8.2761 \times 10^{-7}$ . A análise das perdas mostradas nessa figura é similar ao exemplo anterior.

A Fig. 4 mostra as perdas de propagação para o guia de onda  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.90}\text{Al}_{0.10}\text{As}$  em função da espessura  $t_1$ , com a concentração de portadores na camada  $n_1$  como parâmetro. O guia apresenta uma altura de rib  $t_2 = 1.0 \mu\text{m}$  e uma largura  $W = 6.0 \mu\text{m}$ . Três concentrações diferentes de portadores são utilizadas, sendo elas  $10^{14}$ ,  $10^{15}$  e  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  na camada guia de onda. Isso corresponde a uma parte imaginária de  $5.7 \times 10^{-9}$ ,  $59.8 \times 10^{-8}$  e  $602.0 (\times 10^{-9})$ , respectivamente. Para o substrato, cuja concentração de portadores  $N = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , temos  $k = 2.18 \times 10^{-6}$ . Pode-se ver pelo gráfico que as perdas também diminuem com o aumento da espessura da camada guiana e com a diminuição da concentração de portadores livres. A fig. 5 mostra as perdas de propagação para a liga  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  em função da espessura da camada guiana com a concentração de Al como parâmetro. Essa estrutura apresenta ainda  $t_2 = 0.25 \mu\text{m}$  e  $W = 6.0 \mu\text{m}$ . Tanto a camada guiana quanto o substrato apresentam uma concentração de portadores livres de  $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . As concentrações de Al foram  $x = 0.05, 0.15, 0.25$  e  $0.30$  correspondendo às seguintes partes imaginárias para o substrato :  $1.29, 6.05, 27.3$  e  $60.5 (\times 10^{-6})$ , e para a camada guiana  $6.0 \times 10^{-7}$ . Como se pode ver, a concentração de alumínio exerce uma grande influência sobre as perdas de propagação.

Na fig. 6 são mostradas as perdas de propagação para o guia de onda fabricado no sistema de liga  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{AsP}_{y1-y}/\text{InP}$ . Nesse caso as perdas são obtidas em função da concentração de portadores na camada guia de onda tendo a concentração de As como parâmetro. O guia apresenta a seguinte característica geométrica :  $t_1 = 1.22 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 0.23 \mu\text{m}$  e  $W = 4.0 \mu\text{m}$ . Três concentrações de As foram utilizadas, sendo elas  $0.40, 0.45$  e  $0.50$ . A parte imaginária do índice de refração, como se sabe, é fortemente dependente da concentração de portadores livres. Uma vez que a camada guia de onda está sendo dopada mantendo-se fixa a concentração de portadores no substrato de InP, as perdas para esse guia de onda aumentam consideravelmente. Pode-se observar também que a concentração de As influencia na magnitude dessas perdas de propagação.

#### IV - Conclusões

As perdas de propagação para guias de ondas tipo rib foram estudadas teoricamente através da Análise de Onda Escalar, que utiliza o Método da Rede Equivalente de Microondas juntamente com a Técnica da Ressonância Transversal. As perdas foram calculadas para estruturas baseadas nos sistemas de ligas Si ( $n^-/n^+$ ,  $p^-/p^+$ ),  $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , e  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{AsP}_{y1-y}/\text{InP}$  para um comprimento de onda de  $1.3 \mu\text{m}$ . Os resultados obtidos comprovam que a Análise de Onda Escalar é uma excelente aproximação para o estudo das perdas de propagação em guias de ondas ópticos tipo rib.

## V - Referências

- [1] A. SUZUKI et alii, J. Light. Tech., LT-5, 10, 1479-1487, Oct. 1987.
- [2] H. YNOUE et alii, J. Light. Tech., LT-3, 6, 1270-1275, Dec. 1985.
- [3] H. INOUE et alii, IEEE Trans. Elect. Dev., 32 2662-2668, 1985.
- [4] R. J. DERI et alii, Appl. Phys. Lett., 51, 789-791, 1987.
- [5] Y. S. KIM et alii, Appl. Phys. Lett., 56(9), 2 Feb 1990.
- [6] M. KOSHIBA et alii, Radio Science, 17, 99-107, 1982.
- [7] H. FURUTA et alii, Appl. Opt., 13, 322-326, 1974.
- [8] C. YEH et alii, J. Appl. Phys., 46, 2125-2129, 1975.
- [9] E. A. J. MARCATILI, Bell Syst. Tech. J., 48, 2071-2102, 1969.
- [10] B-H. V. BORGES, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, EESC-USP, São Carlos - SP.
- [11] R. A. SOREF et alii, Elect. Lett., 21(21), 953-954, 10 Oct 1985
- [12] P. E. SCHMID, Phys. Rev. B, 10(23), 5531-5536, 15 May 1981.
- [13] S. ADACHI, J. Appl. Phys., 58(3), R1-R29, 1 Aug 1985.
- [14] J. S. BLAKEMORE, J. Appl. Phys., 53(10), R123-R181, Oct 1982.
- [15] B. BROBERG et alii, J. Appl. Phys., 55(9), 3376-3381, 1 May 1984.
- [16] F. FIEDLER at alii, Solid-State Electr., 30, 73-83, 1987.

## Legenda das Figuras

Figura 1 : (a) Geometria do guia de onda tipo rib, (b) Rede Equivalente de Microondas de (a).

Figura 2 : Perdas de propagação versus concentração de portadores ( $N$ ) no substrato com  $t_1$  como parâmetro para a liga  $n^-$  Si /  $n^+$  Si.

Figura 3 : Perdas de propagação versus espessura  $t_1$  com a concentração de portadores (P) no substrato como parâmetro para a liga  $p^-$  Si /  $p^+$  Si.

Figura 4 : Perdas de propagação versus espessura  $t_1$  com a concentração de portadores livres na camada guiente como parâmetro para o sistema de liga GaAs /  $Ga_{0.90}Al_{0.10}As$ .

Figura 5 : Perdas de propagação versus espessura  $t_1$  com a concentração de Al como parâmetro para o sistema de liga GaAs /  $Ga_{1-x}Al_xAs$ .

Figura 6 : Perdas de propagação versus concentração de portadores livres na camada guiente tendo a concentração de As como parâmetro para o sistema de liga  $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$  / InP.

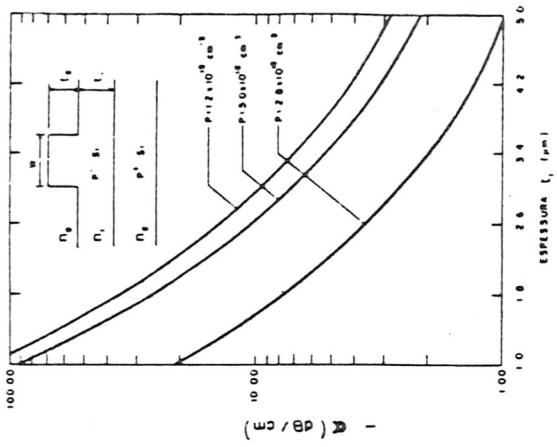


Fig. : 2

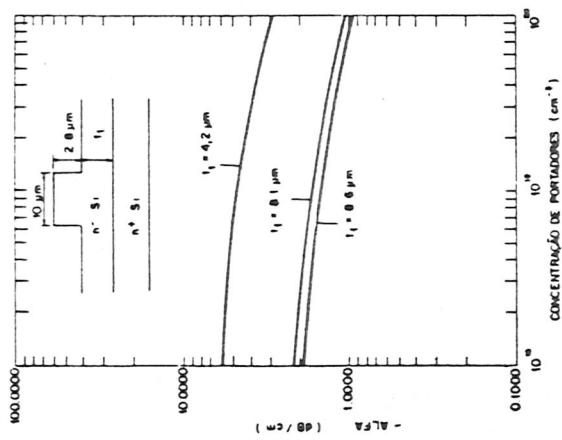


Fig. : 1

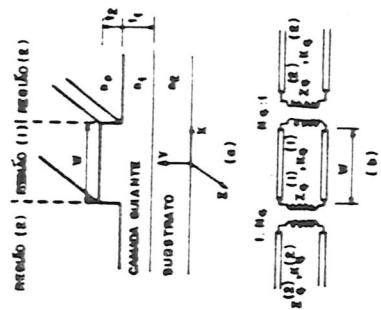


Fig. : 1

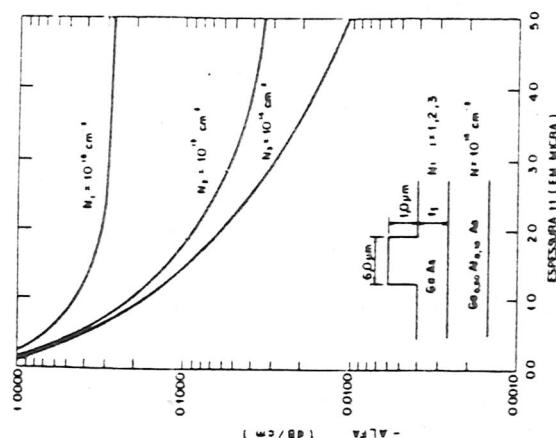


Fig. : 4

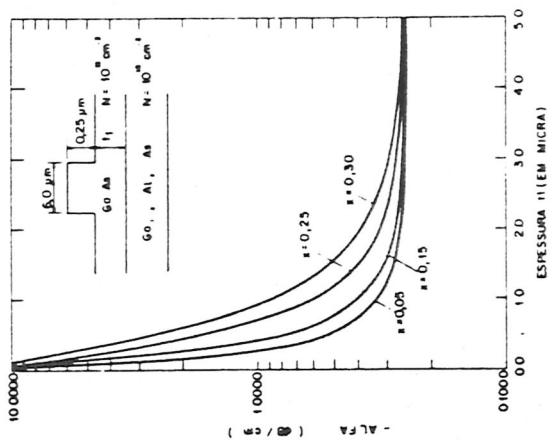


Fig. : 3

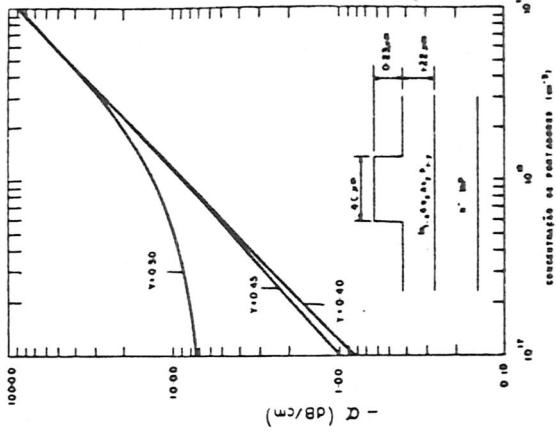


Fig. : 5