

LINHAS DE FENDAS, DE MICROFITAS E DE LÂMINAS COM CAMADAS SEMICONDUTORAS

Olivier Gbegan
 Idalmir de Souza Queiroz Jr.
 Augusto César Rebouças de Brito
 Paulo Eduardo Gomes de Araújo
 Humberto César Chaves Fernandes, PhD

Departamento de Engenharia Elétrica
 Centro de Tecnologia
 Universidade Federal do Rio Grande do Norte
 59072 - Natal-RN, Brasil, Cx. Postal 1583
 FAX: (084) 231 9048

RESUMO

São desenvolvidas as teorias e programas computacionais para auxiliarem na análise de linhas de fendas, linhas de microfítas e linhas de lâminas contendo substratos semicondutores. Nas análises teóricas, é usado o método exato da Linha de Transmissão Transversa no domínio da transformada de Fourier, que conduz a expressões matemáticas bastante concisas, juntamente com o método dos momentos. Os programas computacionais foram então elaborados na linguagem estruturada FORTRAN 77, para uso em microcomputadores, fornecendo uma convergência rápida na determinação da constante de propagação das estruturas. Resultados numéricos são apresentados para a constante dielétrica efetiva, para a constante de atenuação e para a impedância característica destas linhas planares contendo substratos semicondutores, com comprovações.

1. INTRODUÇÃO

As teorias e programas computacionais de linhas de fendas, linhas de microfítas e linhas de lâminas contendo camadas de substratos semicondutores, são desenvolvidos.

As linhas de fenda e as linhas de microfítas são estruturas planares, usadas nas frequências de microondas para linhas de transmissões e dispositivos em frequências de até 15 GHz [1]-[2]. As linhas de lâminas são usadas como linha de transmissão e na fabricação de dispositivos na faixa de frequências de ondas milimétricas, acima de 30 GHz, [3]-[4].

Para estas estruturas, são determinadas a constante de propagação, que envolve a constante dielétrica efetiva e a constante de atenuação, e a impedância característica. Nas análises teóricas, são usados o método exato da Linha de Transmissão transversa (LTT) no domínio da transformada de Fourier e o método dos momentos, que conduzem a cálculos diretos e concisos [3].

A presença de substratos semicondutores nestas estruturas é caracterizada pela condutividade finita que produz perdas, e também permite as suas aplicações em dispositivos ativos, linhas de atraso, chaves opto-eletrônicas, antenas e dispositivos híbridos do estado sólido. O uso do método LTT é aplicado pela primeira vez a linhas de microfítas e a linhas de fendas sobre camadas semicondutoras.

Os programas computacionais, desenvolvidos para o projeto destas linhas planares, foram elaborados na linguagem FORTRAN 77 para uso em microcomputadores, fornecendo uma rápida convergência na determinação da constante de propagação, quando da extração das raízes da equação transcendental complexa, [5].

Resultados numérico-computacionais são apresentados para a constante dielétrica

efetiva, constante de atenuação e impedância característica, em função da frequência e outros parâmetros dimensionais destas estruturas, contendo substratos semicondutores, tipo Arseneto de Gálio. Comprovações destes resultados são efetuadas quando a condutividade do semicondutor tende a zero, tornando o material sem perdas, com outros resultados apresentados na literatura especializada.

2. DESENVOLVIMENTOS TEÓRICOS

As seções transversais das estruturas de linhas de fendas, linhas de microfítas e linhas de lâminas unilaterais sobre substratos semicondutores são mostradas na figura 1.a, b e c, respectivamente, onde se verifica que no sistema de coordenadas indicado, a direção y é transversal às interfaces dielétricas.

No procedimento do método da Linha de Transmissão Transversa-LTT, os campos elétricos e magnéticos nas direções x e z, são obtidos em termos das componentes transversais E_y e H_x , do FTD.

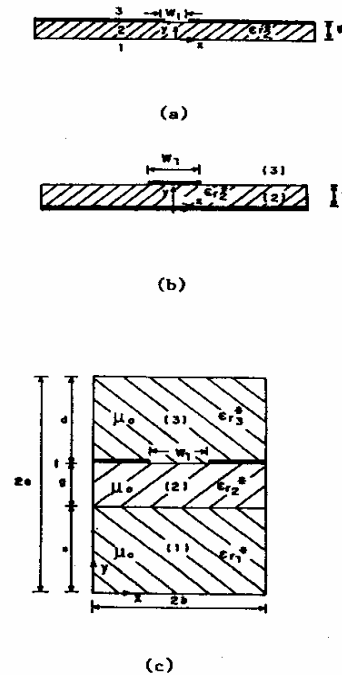


Fig. 1 - Seções transversais de a) linha de fenda; b) linha de microfita e; c) linha de lâmina sobre substratos semicondutores.

No caso geral das i -ésimas regiões estarem preenchidas com materiais semicondutores, a permissividade dielétrica relativa é complexa [3] da forma $\epsilon_{ri} = \epsilon_{ri} - j\sigma_i/\omega\epsilon_0$, que devido a condutividade finita σ_i , conduz a uma constante de propagação completa $\Gamma = \alpha + j\beta$, onde α é a constante de atenuação, β é a constante de fase, ω é a frequência angular, ϵ_0 é a permissividade do espaço livre e ϵ_{ri} é a permissividade relativa. Desta forma, obtém-se para as expressões gerais dos campos em função das componentes y_1 , por exemplos para as componentes E_{xi} e H_{xi} :

$$E_{xi} = \frac{1}{\gamma_i^2 + K_i^2} \left[-\Gamma \frac{\partial E_{yi}}{\partial y} - \omega\mu_0 \alpha_n \hat{n}_y y_i \right] \quad (1)$$

$$\hat{n}_{xi} = \frac{1}{\gamma_i^2 + K_i^2} \left[-j\alpha_n \frac{\partial \hat{H}_{yi}}{\partial y} + j\omega \epsilon_r E_{yi} \right] \quad (2)$$

onde, $K_i^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{ri}^*$ é o número de onda, e $\gamma_i = (\alpha_n^2 - \Gamma^2 - K_i^2)^{1/2}$ é a constante de propagação na direção y . α_n é a variável espectral, que é igual a $n\pi/2b$ para as linhas de lâminas, e, para as linhas de fendas e para as linhas de microfítas, $2b$ é da ordem de 15 a 30 vezes a largura W_1 da fenda ou da fita, respectivamente, correspondente a paredes elétricas distantes.

As soluções das equações de ondas para E_{xi} e H_{xi} são da forma exponencial para regiões abertas e externas, e, hiperbólicas para as regiões internas e fechadas das estruturas. As constantes desconhecidas são eliminadas através das aplicações das condições de contorno às interfaces dielétricas e às paredes metálicas, obtendo-se os campos em função dos campos nas fendas para as linhas de fendas e linhas de lâminas, e, em função das densidades de correntes, para as linhas de microfítas. Com novas aplicações de condições de contorno magnéticas da forma $\hat{H}_{xi+1} - \hat{H}_{xi-1} = \hat{J}_x$ e $\hat{H}_{xi+1} - \hat{H}_{xi-1} = -\hat{J}_x$, nas interfaces onde existem as fendas e as fitas, obtém-se equações não homogêneas da forma $[Y][E]=[J]$, para estruturas com fendas e $[Z][J]=[E]$, para linhas de microfítas. Como exemplo para a linha de fenda da fig. 1.a, obtém-se,

$$\begin{bmatrix} Y_{xx} & Y_{xz} \\ Y_{zx} & Y_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{xg} \\ E_{zg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xg} \\ J_{zg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde,

$$Y_{xx} = -j \left\{ \frac{1}{\alpha_n^2 - \Gamma^2} \left[\left(\frac{\omega \epsilon_1 \alpha^2}{a} + \frac{\Gamma^2 \gamma_1}{\omega \mu_0 b} \right) b_2 + \left(\frac{\omega \epsilon_2 \alpha^2 \gamma_1}{a \gamma_2} + \frac{\Gamma^2 \gamma_2}{\omega \mu_0 b} \right) a_2 \right] + \frac{(k_3^2 - \Gamma^2)}{\omega \mu_0 \gamma_3} \right\} \quad (4)$$

$$Y_{xz} = Y_{zx} = - \left\{ \frac{\Gamma \alpha_n}{\alpha_n^2 - \Gamma^2} \left[\left(\frac{\gamma_1}{\omega \mu_0 b} + \frac{\omega \epsilon_1}{a} \right) b_2 + \left(\frac{\gamma_2}{\omega \mu_0 b} + \frac{\omega \epsilon_2 \gamma_1}{a \gamma_2} \right) a_2 \right] + \frac{\Gamma \alpha_n}{\omega \mu_0 \gamma_3} \right\} \quad (5)$$

$$Y_{zz} = +j \left\{ \frac{1}{\alpha_n^2 - \Gamma^2} \left[\left(\frac{\omega \epsilon_1 \Gamma^2}{a} + \frac{\alpha_n^2 \gamma_1}{\omega \mu_0 b} \right) b_2 + \left(\frac{\omega \epsilon_2 \Gamma^2 \gamma_1}{a \gamma_2} + \frac{\alpha_n^2 \gamma_2}{\omega \mu_0 b} \right) a_2 \right] - \frac{(k_3^2 - \alpha_n^2)}{\omega \mu_0 \gamma_3} \right\} \quad (6)$$

$$\text{onde: } a = \gamma_1 b_2 + \gamma_2 \frac{\epsilon_1 a_2}{\epsilon_2} \quad (7)$$

$$b = b_2 + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} a_2 \quad (8)$$

$$a_2 = \sinh(\gamma_2 g); \quad b_2 = \cosh(\gamma_2 g) \quad (9)$$

Expandindo-se os campos em (3) para as linhas de fendas e as densidades de correntes para microfítas em termos de funções bases conhecidas e, aplicando-se o método dos momentos [6]-[7], obtém-se equações homogêneas, cujos determinantes fornecem as constantes de fases, β , e de atenuação, α . A constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , é igual a $(\beta/K_0)^2$, onde K_0 é o número de onda no espaço livre.

Para as estruturas de linhas de fendas e de lâminas, a impedância característica é obtida pela relação entre a voltagem e a potência transportada na fenda [4], e para a microfita, esta impedância é obtida pela relação entre a potência e a corrente transportada na fita [2].

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados numéricos são apresentados, usando-se programas computacionais na linguagem FORTRAN 77, para a constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , a constante de atenuação, α , e para a impedância característica, Z_c , de estruturas planares de linhas de fendas, linhas de lâminas e linhas de microfítas.

Para o cálculo de ϵ_{ef} e α , os programas são desenvolvidos usando-se números complexos, e, portanto, subrotinas [5], para as extracções de raízes de equações transcendentais não lineares, para β e para α , através de métodos iterativos. Para a determinação de Z_c , um somatório dos termos espectrais nas expressões da impedância é necessário, após o conhecimento de β .

Na fig. 2 são apresentados resultados da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , em função da frequência, para uma linha de lâmina unilateral com perdas, com $\sigma_2=1,0$ (Ωm)⁻¹, e sem perdas, com $\sigma_2=0$, que concordam com outros resultados publicados anteriormente para materiais isotrópicos sem perdas [9]. É usado um guia de onda WR-28 ($2a=7,112$ mm e $2b=3,556$ mm), espessura da camada (2) $g=0,254$ mm e da camada (1) $s=3,429$ mm, $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r3}=1,0$, $\epsilon_r=2,22$ e $\sigma_1=\sigma_2=0$. Nas figs 3 e 4 são mostradas curvas da constante de atenuação, α , e da impedância característica, Z_c , em função da frequência, para a mesma linha de lâmina da fig. 2. Na fig. 4, quando $\sigma_2=0$, os resultados concordam com a teoria apresentada em [9].

Na fig. 5 são mostradas curvas da constante dielétrica efetiva, ϵ_{ef} , em função da frequência, para uma estrutura de linha de fenda com substrato semicondutor de GaAs ($\epsilon_r=12,0$), de espessuras $g=1,0$ e $3,0$, e largura de fenda $W_1=3,0$ mm. No limite, quando a condutividade é zero, os resultados concordam com aqueles apresentados para o caso sem perdas na referência [9].

Na fig. 6 são mostradas curvas da constante de atenuação em função da frequência, para a linha de fenda da fig. 5.

4. CONCLUSÕES

As teorias foram desenvolvidas com a elaboração de programas computacionais para linhas de fendas, de microfítas e linhas de lâminas sobre substratos semicondutores, para uso em microondas e ondas milimétricas. Na análise, usou-se a teoria exata da linha de Transmissão Inversa no FTD.

Resultados numéricos foram apresentados para algumas destas estruturas, consi-

derando-se a constante dielétrica efetiva, a constante de atenuação e a impedância característica, em função da frequência, da largura de fenda, e para diferentes substratos. Resultados foram comprovados com outros existentes na literatura especializada, quando o substrato é tornado sem perdas, encontrando-se uma concordância dos mesmos.

Os programas computacionais foram desenvolvidos de forma otimizada, na linguagem estruturada FORTRAN 77, obtendo-se rápida convergência nos resultados.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SPINELLI, R.M.R., "Análise de linhas de fendas e um estudo de descontinuidade de linhas de lâminas pelo método de onda completa LTT", Tese de Mestrado, PPGEE, UFRN, Natal-RN, 73 p., 1987, Orientador: Humberto C.C. Fernandes.
- [2] GUPTA, K.C., GARG, R. & BAHL, I.J., "Microstrip Lines and Slotlines", U.S.A., 1979.
- [3] FERNANDES, H.C.C., OLIVEIRA, J.R.S. & GIAROLA, A.J., "Dispersion in finlines on semiconductor and the S-parameters of a step discontinuity", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, Plenum Press, U.S.A., Vol. 12, nº 5, pp. 505-519, maio 1991.
- [4] OLIVEIRA, J.R.S., FERNANDES, H.C.C. & GIAROLA, A.J., "Analysis of finlines on semiconductor and lossless dielectric substrates and the effect of a step discontinuity", Int. Microwave Conference/Brazil, Rio de Janeiro, RJ, Conf. Proc. pp. 308-311, Jul. 1991.
- [5] Subrotinas NAG, FORTRAN, Oxford, Inglaterra, 1976.
- [6] FERNANDES, H.C.C. & OLIVEIRA, J.R.S., "Teoria e resultados de linhas de lâminas unilaterais com semicondutor", 9º Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, São Paulo, SP, anais 9.4.1-9.4.5, Set. 1991.
- [7] HARRINGTON, R.F., "Field Computation by Moment Methods", Macmillan, N.Y., U.S.A., 229 p., 1968.
- [8] OLIVEIRA, J.R.S., "Caracterização de linhas de lâminas com substrato semicondutor e análise de descontinuidade", Tese de Mestrado, PPGEE, UFRN, Natal-RN, Jan. 1991, 169 p., Orientador: Humberto C.C. Fernandes.
- [9] GIAROLA, A.J., SOUZA, R.F., MENDONÇA, L.M., SPINELLI, R.M.R. & FERNANDES, H.C.C., "The use of the TTL for calculation of dispersion in slot lines and trielectric unilateral finlines", Proc. 1987 Int. Microwave Symposium - Brazil, Vol. 1, Conf. Proc. pp. 405-411, Jul. 1987.

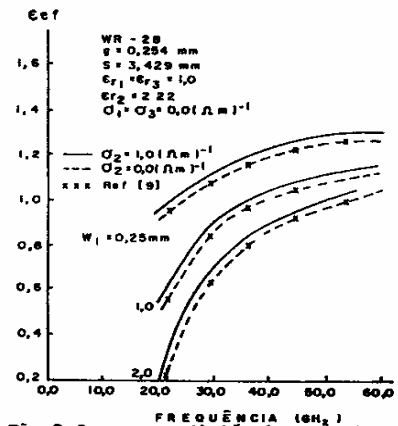


Fig. 2 - Constante dielétrica efetiva versus frequência de linha de lâmina unilateral com material sem perdas ($\sigma_2 = 0,0(\Omega m)^{-1}$) e com perdas ($\sigma_2 = 1,0(\Omega m)^{-1}$) na região 2.

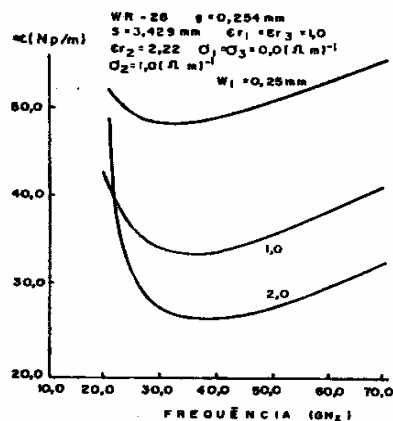


Fig. 3 - Constante de atenuação versus frequência de linha de lâmina unilateral com material dielétrico com perdas ($\sigma_2 = 1,0(\Omega m)^{-1}$) na região 2.

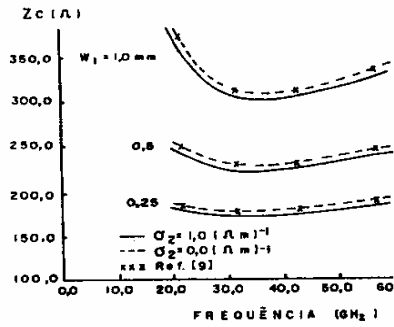


Fig. 4 - Impedância característica versus frequência de linha de lâmina unilateral com material dielétrico sem perdas, $\sigma_2 = 0,0(\Omega m)^{-1}$, e com perdas, $\sigma_2 = 1,0(\Omega m)^{-1}$, na região 2, associada a ϵ_{ef} da figura 2.

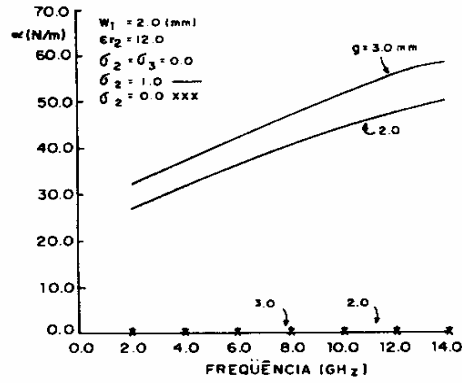


Fig. 6 - Curvas da constante de atenuação em função da frequência, para a linha de fenda da Fig. 5

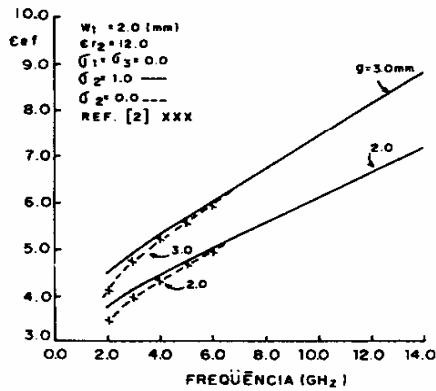


Fig. 5 - Curvas da constante dielétrica efetiva em função da frequência, de linhas de fendas com substrato de GaAs



Humberto César Chaves Fernandes, nasceu em Martins-RN, Brasil, em 11 de outubro de 1955. Obteve o título de Engenheiro Eletricista em 1977, na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Em 1980, obteve o título de Mestre e, em 1984, obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica (PhD), na Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, em Campinas, São Paulo-Brasil. Realizou um curso de Pós-doutoramento na UNICAMP, em 1986-1987. Tem realizado inúmeras pesquisas com mais de uma centena de publicações nacionais e internacionais na área de Telecomunicações, com interesses em Microondas, ondas milimétricas e semicondutores. Prof. Humberto trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica da UFRN, desde janeiro de 1978. É sócio fundador efetivo da Sociedade Brasileira de Microondas - SBMO e da Sociedade Brasileira de Telecomunicações - SBT.

Os outros autores deste trabalho são alunos do Prof. Humberto, desenvolvendo trabalhos de pesquisa e de mestrado na UFRN.