

PROGRAMA PARA CÁLCULO DE ELEMENTOS PASSIVOS A PARÂMETROS CONCENTRADOS PARA APLICAÇÕES EM CIRCUITOS INTEGRADOS DE MICROONDAS

Marcelo H.C.M. Mascarenhas, Marcos V. Batistuta, Osiris Y. Hernández Ayala,
Renata C. Dalmaso, Ricardo C. Macedo, José Camargo da Costa
Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 04591
70919 - Brasília - DF, Brasil

RESUMO

Apresenta-se o desenvolvimento de um programa para microcomputador IBM PC XT ou compatível, orientado para auxílio ao projeto de circuitos integrados de microondas.

Neste programa, dadas as dimensões do elemento, as características do substrato e a frequência de operação, obtém-se uma avaliação do componente, tal como: faixa de valores em relação às dimensões, fator de mérito e outros. Esses resultados são apresentados por meio de gráficos.

ABSTRACT

In this paper a software that helps the design of passive lumped components for microwave integrated circuits is presented. From given component physical dimensions, substrate characteristics and frequency of operation the program determines a range of accepted values for the characteristic parameter of the component, as well as its merit factor. The results are presented in graphical form.

INTRODUÇÃO

O programa CPCM é uma ferramenta de auxílio ao projeto de circuitos integrados de microondas. Através dele é possível fazer uma avaliação preliminar do desempenho dos componentes passivos empregados em realizações em tecnologia microstrip, embora com um grau de precisão relativamente baixo (70%). A complexidade das equações envolvidas em projetos de circuitos integrados de microondas torna necessária a utilização de um CAD, de modo a obter resultados com rapidez. O propósito deste trabalho não é realizar um projeto, entretanto obter uma primeira aproximação das dimensões de um componente com relação a seu valor, bem como fornecer uma ferramenta de aplicação didática a baixo custo. Para cálculos mais precisos faz-se necessário utilizar simulações com processos numéricos apropriados e dados relativos à tecnologia de fabricação.

Neste trabalho foram coletadas, de diversos autores, fórmulas fechadas para síntese de indutores, capacitores e resistores em tecnologia microstrip. Para se trabalhar com elementos concentrados, deve-se ter em mente que as dimensões destes devem ser muito menores que o comprimento de onda de operação, o que em microondas resulta em dimensões da ordem de milímetros ou microns. Com as técnicas de fotolitografia e filme fino, a fabricação destes elementos concentrados com as dimensões requeridas pode ser obtida, sendo que estes são especialmente adequados para circuitos de microondas em tecnologia monolítica e para circuitos híbridos de banda larga.

Os circuitos que utilizam elementos concentrados desse tipo são fabricados em substratos dielétricos, sendo o propósito do substrato principalmente servir de suporte físico ou isolante entre os diferentes elementos, contudo as condições de contorno dentro do substrato devem ser consideradas,

por isso deve-se ter um baixo valor de tangente de perdas.

São analisados neste programa capacitores, indutores e resistores, levando-se em consideração ainda capacitâncias e indutâncias parasitas e resistências intrínsecas que a geometria do elemento possa gerar devido às propriedades do substrato, as quais podem provocar o aparecimento de ressonância em frequências elevadas.

Neste programa foram implementados os seguintes tipos de elementos passivos:

- capacitor de placas paralelas retangulares,
- capacitor de placas paralelas circulares,
- capacitor interdigital,
- indutor espiral circular,
- indutor espiral quadrado,
- indutor em fita,
- resistor em fita,
- resistor espiral circular.

CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA CPCM

O programa é acessado através do comando CPCM, sendo executável em microcomputador IBM PC XT ou compatíveis, com capacidade gráfica requerendo monitor CGA compatível. Após o comando CPCM é apresentada a tela de entrada do programa e a seguir a tela contendo o menu principal, onde pode ser selecionado o componente que se deseja projetar. As telas de projeto de componentes, que são mostradas nas Figuras 1 e 2, são subdivididas em quatro campos, compostos por: quadro de dados de entrada, circuito equivalente do elemento, desenho da estrutura em tecnologia microstrip e quadro contendo o gráfico de saída, o qual pode ser o valor do elemento ou o fator de mérito em função das dimensões, entre outros.

EQUAÇÕES DE PROJETO

As expressões a seguir, utilizadas no programa, assumem que o comprimento de onda é bem maior que a maior das dimensões envolvidas no projeto. O dimensionamento desses elementos envolve técnicas de cálculo em tecnologia microstrip e considerações de dispersão.

Impedância Característica

Segundo Gupta et.al.¹ e Bahl et.al.², as equações para impedância característica de uma linha microstrip de permissividade relativa ϵ_r , altura do substrato h , espessura da tira w , garantem uma precisão de 2% para o seguinte conjunto de parâmetros: $0 \leq t/h \leq 0.2$; $0.1 \leq w/h \leq 20$; $\epsilon_r \leq 16$.

Dispersão

A variação da impedância característica com a frequência, i.e., sua dispersão, deve ser levada em consideração.

Segundo Gupta et.al.¹, Edwards et.al.³ e Getsinger⁴ temos:

$$e_{\text{reff}}(f) = e_r - \frac{e_r - e_{\text{reff}}}{1 + \frac{G f^2}{f_p^2}}$$

$$Z_o(f) = Z_{ot} - \frac{(Z_{ot} - \bar{Z}_o)}{1 + \frac{G f^2}{f_p^2}}$$

$$\text{onde: } f_p = \frac{\bar{Z}_o}{2 \mu_o h} \text{ e } G = \left(\frac{\bar{Z}_o - 5}{60} \right)^{1/2} + 0.004 \bar{Z}_o$$

Z_{ot} é a impedância característica da linha stripline, onde a altura do substrato é dada por $b = 2h$ e \bar{Z}_o é a impedância da linha microstrip sem considerar a dispersão.

Capacitores

Capacitor de Placas Paralelas Retangulares, utiliza-se a expressão^{1,5}:

$$C(\text{pF}) = \frac{\epsilon_o \epsilon_r w l}{h} + 2C_{e1} + 2C_{e2}$$

onde C_{e1} e C_{e2} são capacitâncias⁶ em função da velocidade de fase e impedância característica da linha microstrip.

Capacitor de Placas Paralelas Circulares, utiliza-se, para $r_o > 10$, a expressão^{1,5}:

$$C(\text{pF}) = \frac{\epsilon_o \epsilon_r \pi r_o^2}{h} \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi r_o} \left[\ln \left(\frac{\pi r_o}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}$$

Capacitor Interdigital, utiliza-se a expressão^{7,8}:

$$C(\text{pF}) = l (\epsilon_r + 1) + (N - 3) (A_1 + A_2) \times 10^{-12}$$

A_1 e A_2 representam a contribuição⁹ dos dedos internos e dos dois dedos externos, respectivamente.

O programa calcula o fator de mérito (Q) do capacitor informando ao usuário se o mesmo está dentro de limites aceitáveis.

O programa permite a escolha da resistência de folha R_s para metalizações em cobre ou ouro.

Indutores

Indutor Espiral Circular, utiliza-se a expressão¹:

$$L(\text{nH}) = 0.01 \pi n^2 a \left\{ d + \frac{c^2}{24a^2} \left(d + 3.583 \right) - \frac{1}{2} \right\}$$

onde a e c dependem dos diâmetros interno e externo do indutor e $d = \ln(8a/c)$.

O programa faz o cálculo da resistência associada ao indutor e a análise do fator de mérito do circuito.

Indutor Espiral Quadrado, a equação que fornece o valor desta indutância é a mesma do caso do indutor espiral circular. A aproximação foi considerada válida^{1,4}, isto é, o diâmetro do indutor em espiral circular é equivalente ao lado do indutor em espiral quadrado. No entanto, a resistência resultante é maior, já que o indutor em espiral quadrado possui arestas que devem ser consideradas.

Indutor em Tira, utiliza-se a equação¹ da indutância para o espaço livre:

$$L(\text{nH}) = 5.08 \times 10^{-3} l \left\{ \ln(d) + 1.193 + 0.3232 \frac{l}{d} \right\}$$

$$\text{onde } d = \frac{l}{w+t}$$

Nesse cálculo não foram considerados o efeito pelicular e a perda por irradiação. O programa determina ainda a resistência série do indutor.

Resistores

Resistor em Tira, utiliza-se a expressão^{1,7}:

$$R = \frac{K R_s l}{2(w+t)}$$

K é o fator de correção que leva em consideração o acúmulo de corrente nas bordas da fita e R_s é a resistência de folha do metal.

O programa calcula o valor da capacitância espúria associada, prevenindo o usuário quando o fator de mérito resultante não é satisfatório.

Resistor Espiral Circular, utiliza-se a expressão^{1,10}:

$$R = \frac{K^2 R_s \pi n a}{w}$$

K^2 é o fator de correção para levar em consideração o acúmulo de corrente nas bordas da fita, considerado igual a 2, e R_s é a resistência de folha.

O programa calcula o valor da indutância espúria associada, prevenindo o usuário quando o fator de mérito resultante não é satisfatório.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Como exemplo de aplicação do programa vê-se nas Figuras 1 e 2 as telas de projeto de um capacitor interdigital. Destaca-se no campo superior esquerdo das Figuras 1 e 2, respectivamente, o gráfico contendo a variação do valor do elemento e a variação do fator de mérito.

Utilizando os dados de entrada¹ apresentados nas Figuras 1 e 2, onde, l_1 e l_2 correspondem aos comprimentos inicial e final dos dedos, ϵ_r e h as características do substrato, N é o número de dedos, X é a espessura dos dedos e espaçamento entre eles, R_s a resistência de folha e F é a frequência de operação obteve-se com o programa um valor de capacitância igual a 2.72pF e fator de mérito igual a 624. Em Gupta et.al.¹ encontra-se para esse capacitor um valor de capacitância igual a 2.83pF e fator de mérito igual a 677, portanto, verifica-se que os resultados diferem em, aproximadamente, 3.4% e 7.8%, respectivamente.

CONCLUSÕES

Com este programa tem-se uma ferramenta computacional de auxílio ao projeto para circuitos integrados de microondas, reunindo baixo custo e interface amigável com o usuário.

Considerando a precisão atribuída ao programa ($\pm 20\%$), verificou-se para o exemplo anteriormente citado que o erro cometido é plenamente aceitável, entretanto cabe realizar uma aferição exaustiva do programa no sentido de se obter maior confiabilidade.

Objetivando dar continuidade ao desenvolvimento do programa, a fim de melhorar sua precisão, faz-se necessário introduzir algoritmos que determinem analiticamente a influência de parasitários de indutância e capacitância na determinação do valor dos elementos.

REFERÊNCIAS

- 1) K. C. GUPTA, R. GARG e R. CHADHA, "Computer-aided design of microwave circuits", Ed.Artech House, 1981, capítulo 7.
- 2) I. J. BAHL e RAMESH GARG, "Simple and accurate formulas for a microstrip with finite strip thickness", Proceedings of the IEEE, novembro 1977, vol. 65, p. 1611-1612.
- 3) T. C. EDWARDS E R. P. OWENS, "2-18 GHz Dispersion measurements on 10-100 Ω microstrip lines on sapphire", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., agosto 1976, vol. MTT-24, p. 506-513.
- 4) W. J. GETSINGER, "Microstrip Dispersion Model", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., janeiro 1973, vol. MTT-21, p. 34-39.
- 5) I. WOLFF e N. KNOPPIK, "Rectangular and Circular Microstrip Disk Capacitors and Resonators", IEEE Trans. Microwave theory and Tech., vol. MTT-22 No 10, outubro 1974.
- 6) R. S. PENGELLY, D. C. RICKARD, "Design, Measurement and Application of Lumped Elements Up to J-band", 7th European Microwave Conference Proceedings, Copenhagen, Denmark, 1977, pp.460-464.
- 7) P. F. COMBES, J. GRAFFEUIL E J. F. SAUTEREAU, "Microwave Components, Device and Active Circuits", Ed. John Wiley & Sons Ltda, 1987, capítulo 2.
- 8) G. D. ALLEY, "Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-22, outubro 1974, pp. 857-864.
- 9) F. E. TERMAN, "Radio Engineer's Handbook", Ed. Mac-Graw-Hill, 1943, p. 51.

10) R. SOARES, "GaAs MESFET Circuit Design", cap. 9 p. 481-488, ed. Artech House, 1988.

11) F. W. GROVER, "Inductance Calculations", Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1946, Reprinted by Dover Publications, 1962.

BIOGRAFIA

Marcelo H. C. M. Mascarenhas, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília em outubro de 1990. Atualmente é pós-graduando de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Marcos V. Bastituta, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília em agosto de 1991. Atualmente é pós-graduando de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Osiris Y. Hernández Ayala, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo em janeiro de 1991. Atualmente é pós-graduanda de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Renata C. Dalmaso, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo em janeiro de 1991. Atualmente é pós-graduanda de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

Ricardo C. Macedo, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília em outubro de 1990. Atualmente é pós-graduando de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília.

José Camargo da Costa, obteve o bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília em dezembro de 1982. Obteve o grau de Mestre em Eletrônica e Comunicações na Universidade Estadual de Campinas em dezembro de 1982. Concluiu o Doutorado em Microeletrônica pelo Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, França em abril de 1988. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia da Universidade de Brasília.

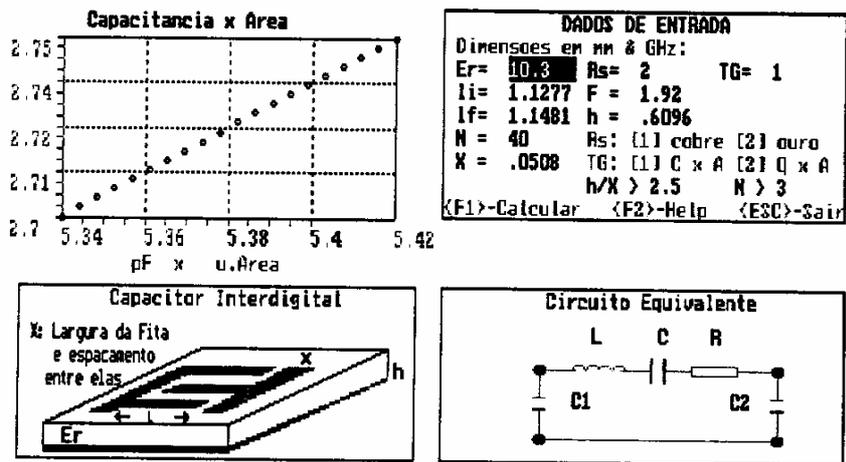


Figura 1 - Gráfico da CAPACITÂNCIA (pF) x ÁREA (mm²).

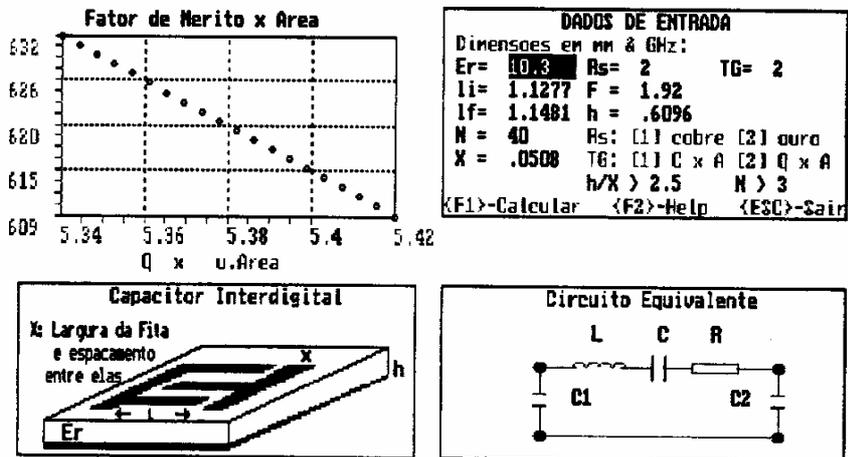


Figura 2 - Gráfico do FATOR DE MÉRITO x ÁREA (mm²).