

MODELAMENTO DE TRANSISTORES A EFEITO DE CAMPO PARA PEQUENOS SINAIS

Paulo Henrique P. De Carvalho
Luís Afonso Bermúdez

Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Elétrica
Caixa Postal 153041
70910 Brasília - DF - Brasil

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um programa de microcomputador do tipo IBM-PC, AT ou compatível para o cálculo e modelagem de transistores à efeito de campo em microondas através de um circuito equivalente em nível de pequenos sinais.

Tal programa se chamou MOLITEC (Modelamento Linear do Transistor à Efeito de Campo). Este programa tem grande aplicabilidade no projeto de dispositivos ativos de microondas em nível de pequenos sinais, principalmente na fase de análise do dispositivo em projeto.

O programa permite a obtenção de um circuito equivalente padronizado a partir da matriz espalhamento, [S] do T.E.C.. O circuito equivalente empregado é um dos mais utilizados na extensa bibliografia hoje disponível sobre o assunto.

O programa MOLITEC foi inteiramente desenvolvido em linguagem TURBO-BASIC, compilado com ou sem coprocessador numérico para aumentar a velocidade e a precisão de cálculo.

ABSTRACT

In this work an efficient computer aided procedure was developed to fit the FET linear equivalent circuit from the measured low signal scattering matrix.

The program called MOLITEC was write and compiled in Turbo-Basic for IBM-PC, AT or compatible with numerical coprocessor for increase the computation velocity and precision.

The FET linear model is the well know in the available bibliography about this subject but with an improvement in the used optimization routines.

The program is very useful in the active linear microwave circuits as amplifiers and oscillators and actually is used in the microwave courses at University of Brasília.

INTRODUÇÃO

A modelagem de componentes e dispositivos é uma ferramenta essencial nos dias atuais para qualquer tipo de concepção de circuitos seja em tecnologia monolítica ou em tecnologia híbrida.

A simulação dos transistores à efeito de campo sobre arseneto de gálio em microondas necessita de um bom conhecimento das características desse material. Numerosos estudos, tanto teóricos quanto experimentais, são disponíveis atualmente, [1] a [8]. As características principais do arseneto de gálio são bem conhecidas e não serão analisadas neste trabalho.

O transistor à efeito de campo sobre arseneto de gálio utilizado em microondas tem uma estrutura física que está esquematizada na Fig.1. O princípio de funcionamento é idêntico ao dos transistores à efeito de campo confeccionados com junções clássicas do tipo unipolares (JTEC), [3]. A descrição completa do funcionamento real de um TEC AsGa poderá ser encontrada facilmente na literatura atualmente disponível, [1] a [8].

MODELO LINEAR DO T.E.C. AsGa

Em microondas, de todos os parâmetros que caracterizam os quadripolos, os parâmetros ou matriz [S] são os mais adaptados para a descrição de circuitos já que nessa faixa de frequência utilizamos a noção de ondas incidentes, refletidas e transmitidas. Podemos, assim, representar os quadripolos por quatro parâmetros complexos S_{ij} que relacionam as ondas incidentes (a_i) com as ondas refletidas (b_i).

Um circuito equivalente do TEC, para pequenos sinais é muito útil a nível de concepção: a partir de um circuito equivalente de uma rede, pode-se obter a matriz [S] e através de um processo de otimização aproximá-la dos valores medidos dessa mesma rede.

A análise da estrutura do TEC AsGa mostrada na Fig.1 conduz a escolha de um circuito equivalente linear como o mostrado na Fig. 2. Sua estrutura é composta de treze elementos que representam o comportamento elétrico do dispositivo semicondutor. A Fig.3 indica a posição física aproximada de cada elemento do circuito equivalente. Este circuito equivalente é limitado em potência (pequenos sinais), [8]. E, as limitações em altas frequências dependem da geometria do dispositivo, para um dado material. Um dos principais fatores que limitam a resposta de frequência do TEC AsGa é o tempo de trânsito dos elétrons sobre a porta (gate) e a constante de tempo RC resultante da capacitância de entrada (C_{gs}) e da transcondutância gm.

MOLITEC

MOLITEC é um software desenvolvido para microcomputadores da linha 16 bits em linguagem TURBO-BASIC para a obtenção de circuito equivalente do TEC a partir da matriz espalhamento medida do transistor.

Ele está dividido em dois módulos, como indicado na Fig. 4:

- O primeiro módulo é utilizado para a criação e gerenciamento dos arquivos dos parâmetros espalhamento, obtidos experimentalmente e dos valores iniciais dos elementos que compõem o circuito equivalente escolhido.

- O segundo módulo, que é o mais importante, é o responsável pela rotina de otimização utilizada, [10], para a obtenção dos elementos do circuito equivalente otimizados bem como da matriz [S] final.

O gerenciamento de arquivos no MOLITEC é realizado da seguinte forma: o usuário deverá entrar com um nome de arquivo a partir do qual serão derivados todos os arquivos envolvidos na otimização dos elementos do circuito equivalente. Este nome deverá possuir no máximo sete letras ou números, sendo que o primeiro carácter deverá ser uma letra, mais a designação do drive no qual serão armazenados os arquivos criados. Deste nome chave surgem os seguintes arquivos:

- X:nome.MES , que é o arquivo dos parâmetros [S] medidos.
- X:nome.ELE , que é o arquivo dos elementos iniciais, propostos pelo usuário.
- X:nome.INI , que é o arquivo dos parâmetros [S] calculados através dos elementos iniciais.
- X:nome.OTS , que é o arquivo dos parâmetros [S] calculados através dos elementos otimizados.
- X:nome.ELO , que é o arquivo dos elementos do circuito equivalente otimizados para os valores medidos de parâmetros [S].

O usuário pode manipular os arquivos X:nome.MES e X:nome.ELE da seguinte forma:

- Introdução de dados que podem ser referentes a uma banda de frequência ou a uma única frequência.
- Alteração de dados.
- Deleção de dados que também podem ser referentes a uma banda de frequência ou a uma única frequência.
- Impressão de dados, tanto na tela do vídeo quanto na impressora.

Um exemplo de estrutura dos arquivos .MES , .ELE e .INI está mostrado na Fig. 5.

Após terem sido criados os arquivos referidos acima, MOLITEC passa para a fase de otimização dos dados. A técnica de otimização empregada está baseada no Método Quasi-Newton com uma Função-Objetivo do tipo quadrática. [10].

Nesta fase, são criados três arquivos: X:nome.INI, X:nome.OTS e X:nome.ELO.

Para que o processo de otimização tenha início, o usuário deverá informar ainda alguns parâmetros de controle para o processo chegar a seu termo. Como exemplo, os pesos para cada um dos parâmetros [S], se a otimização deverá ser feita apenas nos módulos, apenas nas fases ou em ambos, referentes aos parâmetros [S].

Alguns dados específicos da rotina de otimização ainda devem ser fornecidos como por exemplo a precisão requerida para os elementos e o número máximo de vezes que a rotina de otimização chamará a função objetivo.

A Fig. 6 mostra um exemplo típico de resultado obtido pelo programa MOLITEC para os elementos de um circuito equivalente, otimizados a partir de valores de medida de parâmetros [S].

CONCLUSÃO

MOLITEC mostrou-se uma excelente ferramenta computacional para a obtenção de circuitos equivalentes lineares de transistores à efeito de campo em arseneto de gálio utilizados para a análise e síntese de amplificadores e osciladores de microondas. [11].

Este programa tem sido utilizado nos cursos de graduação em microondas no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília e pode ser distribuído gratuitamente a quem se interessar pelo mesmo, bastando para isso contactar os autores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Soares, J. Graffeuil, J. Obregon, "Application des Transistors à Effect de Champ en Arseniure de Gallium", Eyrolles, 1984, France.
- [2] R.S. Pengelly, "Microwave Field Effect Transistors - Theory, Design and Applications" , RSC-John-Wiley, 1982, United Kingdom.
- [3] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices" , John-Wiley, 1969, U.S.A.
- [4] H. Fukui, (Ed.), "Low-noise Microwave Transistors & Amplifiers" , IEEE Press, 1981, U.S.A.
- [5] P. Wolf, "Microwave Properties of Schottky-Barrier Field Effect Transistors", IBM Journal Research Develop. , March, 1970, pp. 125-141.
- [6] R.J. Hamilton, Jr., N.K. Osbrink, "A GaAs FET Primer: Understanding These Vital Devices", MSN , October, 1982, pp. 115-142.
- [7] G.D. Vendelin, M. Omori, "Try CAD for Accurate GaAs MESFET Models", Microwaves , June, 1978, pp. 58-70.
- [8] H. Kondoh, "An Accurate FET Modelling From Measured S-Parameters", IEEE MTT-S Digest , 1988, pp. 377-380.

[9] W.R. Curtice, "A MESFET Model for use in the Design of GaAs Integrated Circuits". IEEE Trans. Microwave Theory Techn. , vol. MTT-28, No. 5, May, 1980, pp. 448-456.

[10] T.R. Cuthbert, "Optimization Using Personal Computers" , John Wiley, 1987, U.S.A.

[11] P.H.P de Carvalho, H. Abdalla Jr., L.A. Bermudez, "CAD para Projeto e Realizacao de Amplificadores para Microondas", Anales de IX JIEE , vol. 9, Junio 1989, Quito, Ecuador.

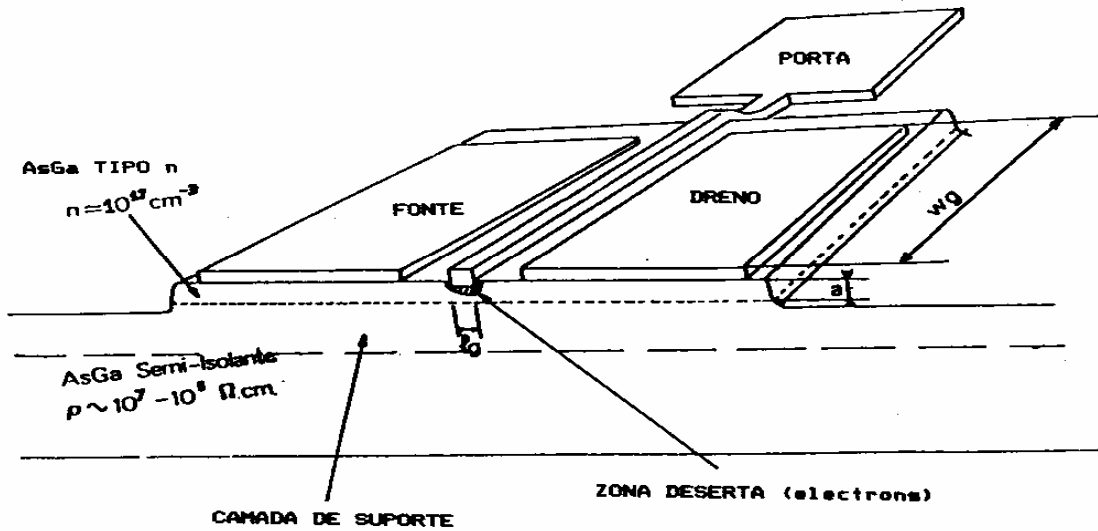


Fig. 1 : ESTRUTURA FÍSICA ESQUEMÁTICA DE UM TRANSISTOR À EFEITO DE CAMPO EM AsGa, (MESFET).

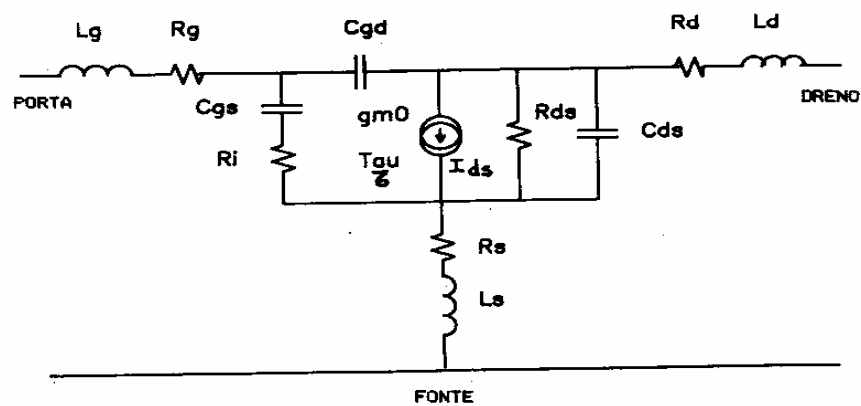


Fig. 2 : CIRCUITO EQUIVALENTE LINEAR DO T.E.C.

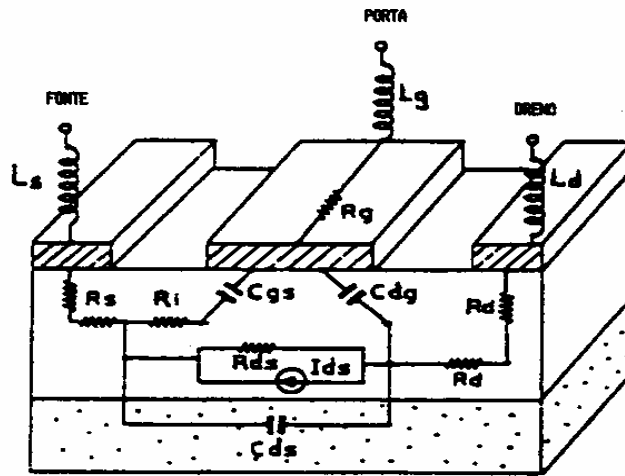


Fig. 3 : POSIÇÃO FÍSICA APROXIMADA DE CADA ELEMENTO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.

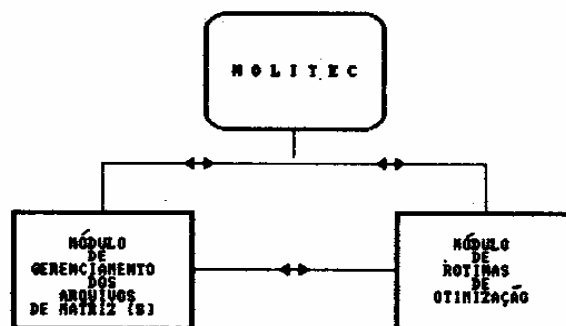


Fig. 4 : NOLITEC : ESTRUTURA BÁSICA.

```

rpk2004.RES
(Experimental)
POLARIZACAO : Vgs [V] = 0 , Vds [V] = 3 , Ids [mA] = 40
Fr [GHz] |S11| /S11 |S12| /S12 |S21| /S21 |S22| /S22
2.00 0.96 -36.00 0.04 66.00 4.15 149.00 0.68 -23.00
3.00 0.92 -52.00 0.06 56.00 3.85 135.00 0.65 -33.00
4.00 0.88 -66.00 0.07 47.00 3.52 122.00 0.63 -42.00
5.00 0.85 -79.00 0.08 40.00 3.20 111.00 0.61 -49.00
6.00 0.82 -90.00 0.08 33.00 2.91 101.00 0.59 -57.00
7.00 0.79 -99.00 0.09 28.00 2.65 92.00 0.58 -63.00
8.00 0.77 -107.00 0.09 24.00 2.41 83.00 0.57 -69.00
9.00 0.76 -115.00 0.09 20.00 2.21 76.00 0.57 -75.00
10.00 0.75 -121.00 0.09 16.00 2.04 68.00 0.57 -80.00
11.00 0.74 -127.00 0.09 14.00 1.88 61.00 0.57 -85.00
12.00 0.74 -132.00 0.08 11.00 1.74 55.00 0.58 -90.00
13.00 0.73 -137.00 0.08 10.00 1.62 49.00 0.58 -94.00
14.00 0.73 -141.00 0.08 8.00 1.51 43.00 0.59 -99.00
15.00 0.73 -146.00 0.08 8.00 1.41 37.00 0.60 -103.00
16.00 0.73 -149.00 0.07 7.00 1.32 31.00 0.62 -108.00
17.00 0.73 -153.00 0.07 8.00 1.24 26.00 0.63 -112.00
18.00 0.74 -156.00 0.07 8.00 1.17 21.00 0.64 -116.00
19.00 0.74 -160.00 0.06 10.00 1.10 15.00 0.65 -120.00
20.00 0.74 -163.00 0.06 12.00 1.03 11.00 0.66 -124.00
21.00 0.75 -166.00 0.06 15.00 0.97 6.00 0.68 -128.00
22.00 0.75 -169.00 0.06 18.00 0.92 1.00 0.69 -131.00

```

```

rpk2004.ELE
Dados iniciais
Lg [nH] = 0.07
Rg [ohm] = 2
Cgs [pF] = 0.4
Ri [ohm] = 3
Cdg [pF] = 0.04
Rs [ohm] = 0.8
Ls [nH] = 0.02
Gm0 [m mho] = 55
Tau [ps] = 5
Gds [m mho] = 40
Cds [pF] = 0.18
Rd [ohm] = 1.5
Ld [nH] = 0.07

```

```

rpk2004.INI
Calculo de [S] com os elementos iniciais
POLARIZACAO : Vgs [V] = 0 , Vds [V] = 3 , Ids [mA] = 40
Fr [GHz] |S11| /S11 |S12| /S12 |S21| /S21 |S22| /S22
2.00 0.98 -33.07 0.02 74.81 1.67 153.87 0.29 -174.92
3.00 0.95 -48.26 0.03 68.18 1.59 141.80 0.30 -173.39
4.00 0.93 -62.13 0.04 62.47 1.49 130.66 0.31 -172.57
5.00 0.90 -74.60 0.04 57.69 1.39 120.48 0.32 -172.30
6.00 0.88 -85.73 0.05 53.78 1.29 111.21 0.33 -172.38
7.00 0.86 -95.63 0.05 50.63 1.20 102.75 0.34 -172.69
8.00 0.84 -104.43 0.06 48.14 1.11 94.98 0.35 -173.14
9.00 0.83 -112.30 0.06 46.18 1.04 87.82 0.36 -173.67
10.00 0.81 -119.35 0.06 44.67 0.97 81.16 0.36 -174.24
11.00 0.80 -125.71 0.06 43.54 0.91 74.93 0.37 -174.85
12.00 0.80 -131.48 0.07 42.70 0.86 69.09 0.38 -175.49
13.00 0.79 -136.75 0.07 42.12 0.81 63.57 0.39 -176.16
14.00 0.79 -141.58 0.07 41.74 0.77 58.34 0.39 -176.84
15.00 0.78 -146.05 0.07 41.52 0.73 53.36 0.40 -177.56
16.00 0.78 -150.19 0.07 41.44 0.69 48.61 0.41 -178.30
17.00 0.78 -154.05 0.07 41.47 0.66 44.07 0.42 -179.07
18.00 0.78 -157.68 0.08 41.58 0.63 39.71 0.43 -179.86
19.00 0.77 -161.09 0.08 41.75 0.60 35.52 0.43 179.31
20.00 0.77 -164.31 0.08 41.96 0.58 31.50 0.44 178.44
21.00 0.77 -167.37 0.08 42.20 0.55 27.62 0.45 177.55
22.00 0.77 -170.29 0.08 42.45 0.53 23.88 0.46 176.62

```

Fig. 5 : EXEMPLO DE ARQUIVOS nome.RES , nome.ELE
E nome.INI PARA O T.E.C. RPK-2004 DA
RAYTHEON.

rpk2004.UTS
 OTIMIZADO

POLARIZACAO : Vgs [V] = 0 , Vds [V] = 3 , Ids [mA] = 40

Fr [GHz]	S11	/S11	S12	/S12	S21	/S21	S22	/S22
2.00	0.96	-39.90	0.06	65.74	0.49	140.48	0.37	-20.36
3.00	0.93	-57.48	0.08	55.37	0.46	122.89	0.37	-29.63
4.00	0.90	-72.96	0.10	46.50	0.44	107.23	0.38	-38.12
5.00	0.86	-86.39	0.11	39.03	0.41	93.47	0.38	-45.88
6.00	0.84	-98.00	0.12	32.79	0.39	81.41	0.40	-52.98
7.00	0.82	-108.05	0.12	27.56	0.37	70.84	0.41	-59.49
8.00	0.80	-116.81	0.12	23.17	0.35	61.55	0.42	-65.49
9.00	0.79	-124.50	0.12	19.49	0.33	53.33	0.44	-71.04
10.00	0.78	-131.32	0.12	16.40	0.31	46.03	0.45	-76.19
11.00	0.77	-137.41	0.12	13.84	0.30	39.53	0.47	-80.98
12.00	0.76	-142.91	0.12	11.75	0.28	33.72	0.49	-85.45
13.00	0.76	-147.91	0.12	10.08	0.27	28.50	0.50	-89.63
14.00	0.75	-152.49	0.12	8.81	0.26	23.83	0.52	-93.56
15.00	0.75	-156.73	0.11	7.92	0.25	19.64	0.54	-97.26
16.00	0.75	-160.66	0.11	7.39	0.24	15.88	0.55	-100.75
17.00	0.75	-164.33	0.11	7.22	0.22	12.54	0.57	-104.05
18.00	0.75	-167.79	0.10	7.39	0.21	9.58	0.58	-107.17
19.00	0.75	-171.05	0.10	7.90	0.20	6.99	0.59	-110.14
20.00	0.75	-174.14	0.10	8.73	0.19	4.75	0.61	-112.96
21.00	0.75	-177.09	0.09	9.88	0.18	2.86	0.62	-115.64
22.00	0.75	-179.90	0.09	11.30	0.17	1.31	0.63	-118.20

rpk2004.ELD

VALORES DOS ELEMENTOS OTIMIZADOS (Func. Objetivo= 49.42742156982422)

Lg [nH] = 7.666179537773132E-002
 Rg [ohm] = 3.163586139678955
 Cgs [pF] = .4934661388397217
 Ri [ohm] = 2.575178623199463
 Cdg [pF] = 6.755706667900085E-002
 Rr [ohm] = 1.683093070983887
 Lr [nH] = 2.020761370658875E-002
 Gso [a mho] = 7.915352821350098
 Tau [ps] = 6.603508472442627
 Gds [a mho] = 9.687863756678203
 Cds [pF] = .1481534987688065
 Rd [ohm] = 1.992457509040833
 Ld [nH] = 3.458699444308877E-003

Fig. 6 : EXEMPLO DE RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO OBTIDA POR "MOLITEC" PARA O T.E.C. RPK-2004 DA RAYTHEON.

PAULO H. P. CARVALHO

Nasceu no Rio de Janeiro, RJ, Brasil em Abril 1964. Obteve o Bacharelado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília, em 1988. Atualmente prepara tese de Doutorado no Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes, IRCOM, Université de Limoges, França. Sua área de pesquisa é a análise e síntese de circuitos ativos de microondas e na faixa milimétrica.

LUÍS A. BERNÚDEZ

Nasceu em Uruguaiana, RS, Brasil em Dezembro de 1953. Obteve o Bacharelado em Engenharia Eletrônica na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, Brasil, em 1977. É Mestre em Ciências pela Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, em 1980, na área de Microondas. Obteve o título de Doutor em Eletrônica, especialidade Comunicações Óticas e Microondas no Institut de Recherche en Communications Optiques et Microondes (IRCOM) da Universidade de Limoges, França, em 1987. Desde 1980 é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, Brasil. Suas áreas de pesquisa são os dispositivos ativos e passivos de microondas e na faixa milimétrica.