Implementação do Método Y-Function para a extração da mobilidade em transistores MOS

Gabriel Magalhães Cervi , Marcelo Antonio Pavanello
Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI
bielcervi@gmail.com, pavanello@fei.edu.br

Resumo: Neste projeto será realizada a implementação do Método da Função *Y* com o auxílio do programa MATLAB, com o intuito de automatizar o processo de extração da mobilidade dos portadores de carga em transistores MOS. A validação do método será realizada por meio de simulações com valores experimentais e simulados.

1. Introdução

Nos últimos anos, a indústria da microeletrônica tem investido maciçamente em novas tecnologias objetivando a fabricação de dispositivos com dimensões extremamente reduzidas e de escala nanométrica. A perda de controle sobre as cargas na região de canal em transistores curtos torna o uso de dispositivos MOS planares extremamente complexo em circuitos integrados digitais com altíssima escala de integração (*Ultra Large Scale Integration* - ULSI). Deste modo, tecnologias alternativas, como aquelas com arquitetura de múltiplas portas, têm ganhado interesse na comunidade científica e das indústrias de semicondutores.

Dentre os diversos parâmetros importantes para se averiguar o desempenho dos transistores MOS, um dos principais é a mobilidade dos portadores de carga. Entre os métodos disponíveis na literatura, um dos mais largamente utilizados é o Método da Função Y, o qual será implementado no MATLAB, por intermédio deste trabalho.

2. O Método da Função Y

A característica primordial deste método se dá pelo fato dele promover a extração dos parâmetros, independentemente da Resistência Série parasitária, coexistente no transistor. A seguir será representado uma descrição deste, com base no algoritmo recursivo para a implementação do programa, em conformidade com Sedra (2000) e Fleury (2008).

Inicialmente, para execução do programa, declaramos os valores de entrada:
- tox (espessura da camada de óxido de porta).
- V_{DS} (tensão de dreno).
- precisão requerida.
- L (comprimento da região do canal).
- W (largura de canal do transistor MOS).
- Ids (corrente de dreno).
- V_{GS} (tensão aplicada à porta).

Após isso, determinamos os valores da transcondutância (gm), os quais são obtidos a partir da derivada numérica da corrente de dreno, em relação à tensão de porta, conforme a equação (1):

$$gm = dI_{DS}/dV_{GS} \quad (1)$$

Tendo feito isso, pode-se confeccionar uma matriz M, a qual permite uma melhor análise dos dados a serem utilizados nos seguintes cálculos da Y- Function. Esta matriz é composta desta forma:
-V_{GS} (1ª coluna).
- I_{DS} (2ª coluna).
- gm (3ª coluna).

Nesta matriz, busca-se o valor de máximo de transcondutância ($gm_{Máx}$), uma vez que este será responsável por delimitar a região a ser estudada com o método proposto. Com isto, obtêm-se os pontos:
- ($V_{GS,}$, $gm_{Máx}$).
- ($I_{DS,}$ $gm_{Máx}$).

A seguir, realizam-se duas aproximações polinomiais:
- I_{DS} por um polinômio do 4º grau, após ($V_{GSS,}$ $gm_{Máx}$).
- gm por um polinômio do 3º grau, após (V_{GSS}, $gm_{Máx}$).

O próximo passo é aplicar o Y- Function, segundo a equação (2) :

$$Y = \frac{I_{DS}}{\sqrt{g_m}} = \sqrt{\beta V_{DS}} V_{GS} \quad (2)$$

Deste modo, pode-se obter fator de ganho (β) e a tensão de limiar do transistor MOS (V_{TH}), após minimizarem-se os erros, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1.

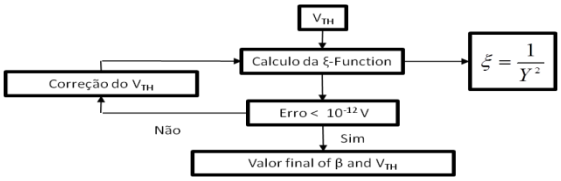

Figura 1 – Fluxograma para implementação da Função Y.

Para o fluxograma da Figura 1, tem-se as seguintes relações:

$$\xi = \frac{1}{Y^2} = \frac{1}{\beta V_{DS}} \left\{ \frac{1}{(V_{GT}^{*} + \varepsilon)^2} - \Theta_2 \right\} \quad (3)$$

$$V_{TH}^{*} = V_{G,M} - \frac{I_D(V_{Gt,M})}{\max(g_m)} - \frac{V_{DS}}{2} \quad (4)$$

Na equação (4), $I_D(V_{gt,M})$ é acorrente de dreno no ponto de transcondutância máxima, max(gm) é o valor da transcondutância máxima e $V_{G,M}$ é a tensão de porta em max(gm). Dessa forma, a cada passo desse algoritmo, o valor de erro que é adicionado à tensão de limiar estimada, que tende ao valor real. Com o valor de V_{TH} bem definido, pode-se extrair o valor de β, que também fica com valor mais preciso devido a precisão de V_{TH}.

Por decorrência das novas tecnologias, o efeito da rugosidade de superfície foi incluído nas equações, assim como os parâmetros de degradação da mobilidade (θ_1 e θ_2). Para obtermos estes valores, previamente precisamos da sobre tensão de porta (V_{GT}) obtida por:

$$V_{GT} = V_{GS} - V_{TH} - V_{DS}/2 \quad (5)$$

Assim, podemos reescrever a equação (2) com base nestes novos parâmetros, obtendo:

$$Y = \frac{I_{DS}}{\sqrt{g_m}} = \sqrt{\frac{\beta V_{DS}}{1-\Theta_2 V_{GT}^2}} V_{GT} \quad (6)$$

Da equação (6), torna-se possível obter os coeficientes de degradação da mobilidade e a variação da tensão de limiar (ΔV_{TH}). Seguem as equações destes:

$$\theta_2 = \Theta_2/(1-\Delta V_{TH}{}^2 * \Theta_2) \quad (7)$$

$$\theta_1 = \Theta_1/(1+\Delta V_{TH}{}^2 * \Theta_2) * 2 * \theta_2 * \Delta V_{TH} \quad (8)$$

$$\Delta V_{TH} = \{(\beta * V_{DS}/gm)^{1/2} - 1 - \Theta_1 * (Vg_{gm[Max]} - V_{TH} - V_{DS}/2)\} / 2 * \Theta_2 * (Vg_{gm[Max]} - V_{TH} - V_{DS}/2) \quad (9)$$

Por conseguinte, pode-se extrair o valor da mobilidade (μ_0) e obter-se um modelo completo para a corrente de dreno:

$$\mu_0 = \frac{\beta L_G t_{ox}}{W_{eff}\varepsilon_{ox}} \quad (10)$$

$$I_{DS} = \beta \frac{V_{DS} V_{GT}\left(1+\theta_2 \Delta V_{TH}^2\right)}{1+\theta_1 V_{GT} + \theta_2 (V_{GT} - \Delta V_{TH})^2} \quad (11)$$

Vale ressaltar, que na equação (10) W_{eff} e L_G correspondem respectivamente à largura do transistor (W) e ao comprimento do canal (L), declarados no início deste método.

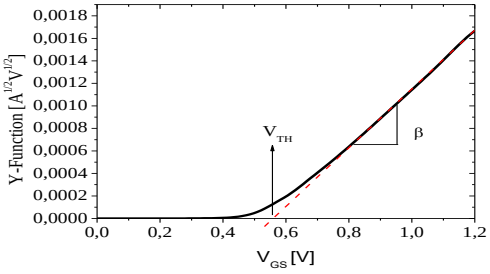

Figura 2 – Curva da função Y pela tensão aplicada a porta, com baixo valor de V_{DS}, para um transistor MOS.

A Figura 2 retrata a utilização da Função Y, a qual é dependente da tensão aplicada a porta (V_{GS}), a partir de resultados obtidos para um transistor nMOS. O método consiste na extrapolação da região linear do Y-Function, com a qual se pode obter o fator de ganho do transistor MOS (β), que corresponde à inclinação deste reta. Além disso, é possível obter-se a tensão de limiar do transistor (V_{TH}) no ponto de cruzamento com o eixo x da curva.

3. Resultados

A partir da implementação realizada obteve-se o modelo completo para a corrente dreno, o que permitiu a comparação desta curva com os valores inicialmente inseridos. A Figura 3 apresenta o gráfico do erro percentual obtido para uma simulação de um transistor PMOS, com L=180nm, W=240nm e V_{DS}=-0.025V.

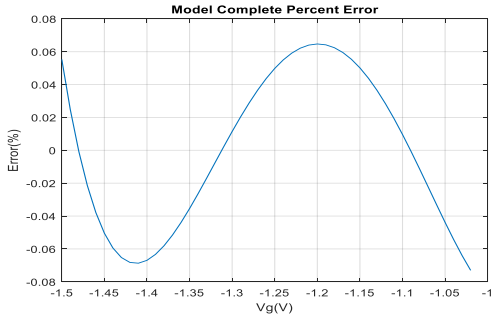

Figura 3 – Erro percentual entre o modelo completo para a corrente de dreno e os valores de I_{DS} inseridos.

Além disso, a partir de simulações feitas para transistores nMOS e pMOS, obtiveram-se os parâmetros presentes na Tabela 1. Vale ressaltar que para estes casos, utilizou-se: tox=4nm, Eox=3,45*10^{-13} F/cm e Vds=0.025V.

Dimensões		nMOS				pMOS			
L (µm)	W (µm)	Vt (V)	µ0	Θ1	Θ2	Vt (V)	µ0	Θ1	Θ2
0.18	0.24	0.6044	376.73	0.1602	0.1424	-0.5286	82.61	0.1364	0.2504
0.18	3	0.5477	339.50	0.3183	0.2418	-0.5743	94.36	-0.3586	0.1389
0.24	3	0.5090	323.35	0.2056	0.2123	-0.5368	87.59	-0.2794	0.1314
0.3	3	0.4958	308.63	0.1046	0.2116	-0.5176	83.42	-0.2132	0.1313
0.4	3	0.4792	302.87	0.0872	0.1954	-0.5219	85.41	-0.2316	0.1009
0.6	3	0.4424	294.43	0.0249	0.1799	-0.5043	82.39	-0.1735	0.1245
1	3	0.4097	296.71	0.0105	0.1648	-0.4910	83.24	-0.1660	0.1093
1	1	0.4063	288.75	-0.0036	0.1409	-0.4872	80.14	-0.0776	0.1341
1	0.5	0.4010	309.60	0.0227	0.1221	-0.4999	90.02	-0.1084	0.1042
1	0.3	0.3898	350.70	0.0954	0.0864	-0.5014	95.36	-0.0133	0.1134
1	0.24	0.3361	331.70	-0.0123	0.1334	-0.4655	89.35	0.1138	0.1766
10	10	0.3797	323.91	-0.0076	0.1484	-0.4714	80.50	-0.1478	0.1052

Tabela 1 - Parâmetros calculados pelo programa para transistores nMOS e pMOS.

Vale ressaltar que os resultados obtidos na Tabela 1 estão dentro do esperado teoricamente para estes transistores, o que denota a eficácia do programa.

4. Conclusão

Nesse trabalho foi apresentada a metodologia para a implementação do método da Função Y, com o intuito de extrair automaticamente a mobilidade e a corrente de dreno dos transistores MOS.
A utilização do MATLAB mostrou-se de grande importância, uma vez que permitiu a análise minuciosa dos dados, para a realização de cada uma das funções e interpolações, o que corroborou para a precisão na extração da mobilidade.
Vale ressaltar que esta ferramenta torna mais abrangente o estudo dos transistores MOS, possibilitando, em futuros trabalhos, o acréscimo do cálculo da tensão e sublimiar (S) e de outros modelos do Y-Function, como o parabólico.

5. Referências Bibliográficas

[1] Adel S. Sedra, Microeletrônica, 4ª edição, 2000.
[2] D. FLEURY et al. "New Y -Function-Based Methodology for Accurate Extraction of Electrical Parameters on Nano-Scaled MOSFETs", *IEEE Conference on Microelectronic Test Structures*, March 2008.

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por fomentar o desenvolvimento deste trabalho.
[1] Aluno de IC do Centro Universitário FEI, cuja pesquisa é fomentada pelo CNPq. Projeto cuja vigência foi de 08/18 a 08/19.