

# EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA MOBILIDADE E DA RESISTÊNCIA SÉRIE DE NANOFIOS TRANSISTORES MOS USANDO O MÉTODO Y-FUNCTION

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 Y-Function com o auxílio do programa Matlab, com o intuito de automatizar o processo de extração da mobilidade e da resistência série de transistores MOS, a partir das características elétricas e construtivas destes componentes eletrônicos. Para a validação da implementação realizada serão utilizados resultados de simulações numéricas e medidas experimentais.

## 1. Introdução

Em virtude dos avanços tecnológicos correlacionados aos componentes micro e nano-eletrônicos, os transistores MOS passaram a desempenhar um papel primordial na confecção de inúmeros circuitos, o que depreende a necessidade de realizar simulações e obtenções de parâmetros destes componentes.

Neste âmbito, a automatização da extração da resistência série e da mobilidade dos transistores MOS emerge como uma alternativa muito eficaz e de extrema funcionalidade para todos os seus possíveis usos, propiciando diversas aplicações e estudos cada vez mais precisos.

## 2. O Método do Y-Function e da Extração da Resistência Série

A característica primordial do Y-Function se dá pelo fato dele promover a extração dos parâmetros, independentemente da Resistência Série coexistente no transistor, a qual será obtida na sequência, através do equacionamento proposto. A seguir será representado uma descrição de ambos os métodos, baseando-se no algoritmo recursivo para a implementação do programa, em conformidade com Sedra (2000) e Fleury (2008).

A partir dos parâmetros construtivos e da corrente de dreno e tensão de porta aplicados, pode-se obter a transcondutância (gm), conforme a equação (1):

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

Um importante parâmetro para o cálculo e formalização do método é a tensão de limiar, a qual é dada pela equação (2):

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

Na equação (2),  $I_D(V_{gt,M})$  é a corrente de dreno no ponto de transcondutância máxima,  $\max(g_m)$  é o valor da transcondutância máxima e  $V_{G,M}$  é a tensão de porta em  $\max(g_m)$ . Com o valor de  $V_{TH}$  bem definido, pode-se extrair o valor de  $\beta$  (Figura 1), 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 ( $\theta_1$  e

$\theta_2$ ). Para obtermos estes valores, previamente precisamos da sobre tensão de porta ( $V_{GT}$ ) obtida por:

$$V_{GT} = V_{GS} - V_{TH} - V_{DS}/2 \quad (3)$$

Assim, podemos reescrever a modelagem do Y-Function como:

$$Y = \frac{I_{DS}}{\sqrt{g_m}} = \sqrt{\frac{\beta V_{DS}}{1 - \theta_2 V_{GT}^2}} V_{GT} \quad (4)$$

Da equação (4), torna-se possível obter os coeficientes de degradação da mobilidade e a variação da tensão de limiar ( $\Delta V_{TH}$ ). Seguem as equações destes:

$$\theta_2 = \theta_2 / (1 - \Delta V_{TH}^2 * \theta_2) \quad (5)$$

$$\theta_1 = \theta_1 / (1 + \Delta V_{TH}^2 * \theta_2) * 2 * \theta_2 * \Delta V_{TH} \quad (6)$$

$$\Delta V_{TH} =$$

$$\{(\beta * V_{DS}/gm)^{1/2} - 1 - \theta_1 * (V_{g_{m[Max]}} - V_{TH} - V_{DS}/2)\} / 2 * \theta_2 * (V_{g_{m[Max]}} - V_{TH} - V_{DS}/2) \quad (7)$$

Por conseguinte, pode-se extrair o valor da mobilidade ( $\mu_0$ ) e obter-se um modelo completo para a corrente de dreno:

$$\mu_0 = \frac{\beta L_{Gt}^t \epsilon_{ox}}{W_{eff} \epsilon_{ox}} \quad (8)$$

$$I_{DS} = \beta \frac{V_{DS} V_{GT} (1 + \theta_2 \Delta V_{TH}^2)}{1 + \theta_1 V_{GT} + \theta_2 (V_{GT} - \Delta V_{TH})^2} \quad (9)$$

Vale ressaltar, que na equação (9)  $W_{eff}$  e  $L_G$  correspondem respectivamente à largura do transistor ( $W$ ) e ao comprimento do canal ( $L$ ), declarados no início deste método.

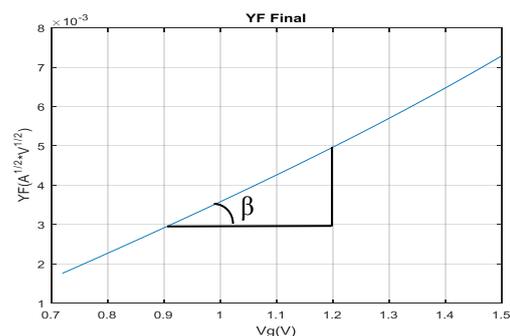


Figura 1 – Curva da função Y pela tensão aplicada a porta, com baixo valor de  $V_{DS}$ , para um transistor MOS.

A corrente que flui entre dreno e fonte de um transistor MOS, assumindo o modelo de degradação da mobilidade de primeira ordem, é expressa conforme a equação (10):

$$I_D = \mu W_{eff} \left[ C_{ox} V_{DS} \left( V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) \right] \left[ L_G [1 + \theta (V_{GS} - V_{TH})] \right]^{-1} \quad (10)$$

A resistência total de um transistor MOS, expressa como  $R_t = V_{DS}/I_D$ , representa a soma da resistência de canal (RCh) com as parasitárias existentes. Desprezando a influência de  $R_S$  na equação (10) e aplicando-se baixo  $V_{DS}$ , a resistência de canal pode ser descrita como:

$$R_{Ch} = \frac{V_{DS}}{I_D} = \frac{(1 + \theta(V_{GS} - V_{TH}))}{\beta(V_{GS} - V_{TH})} \quad (11)$$

Considerando então que  $R_t$  é a soma de RCh com  $R_S$ , isolando o termo  $(V_{GS} - V_{TH})$  e substituindo-o na equação (11),  $R_t$  pode ser obtido como descrito em (12):

$$R_t = \sqrt{\frac{V_{DS}}{\beta}} \frac{\sqrt{g_m}}{I_D} + \frac{\theta}{\beta} + R_S \quad (12)$$

Portanto, utilizando o gráfico de  $R_t$  em função de  $g_m^{0.5}/I_D$  (inverso da função Y) e realizando uma extrapolação linear, o termo da resistência parasitária pode ser extraído no ponto de intersecção com o eixo y, isto é, quando  $g_m^{0.5}/I_D = 0$ . Esse método foi proposto para nanofios transistores, com comprimentos de canal nanométricos. O valor extraído ( $R_{ext}$ ) inclui não apenas  $R_S$ , mas também um termo relacionado com  $\theta$  ( $R_{ext} = R_S + \theta/\beta$ ).

Como demonstrado na equação (9), em transistores nanométricos a mobilidade necessita de dois coeficientes de degradação pelo campo elétrico. Usando as equações (4), (9) e (12), a Resistência Total passa a ser descrita pela equação (13):

$$R_t = \frac{\theta}{\beta} + R_S + \frac{(\sqrt{g_m}/I_D)^2 V_{DS} \beta + 2\theta_2}{\beta \sqrt{(\sqrt{g_m}/I_D)^2 V_{DS} \beta + \theta_2}} \quad (13)$$

Expandindo-se a equação (13) utilizando a Série de Taylor obtém-se:

$$R_t = \sqrt{\frac{V_{DS}}{\beta}} \frac{\sqrt{g_m}}{I_D} + \frac{\theta}{\beta} + R_S + \frac{3\theta_2}{2\beta^{3/2} \sqrt{V_{DS}}} \frac{I_D}{\sqrt{g_m}} \quad (14)$$

Tanto a equação (12) quanto a (14) podem ser reescritas isolando-se os termos correspondentes ao Y-Function invertido ( $g_m^{0.5}/I_D$ ), de modo a se obter a resistência requerida.

### 3. Resultados

A partir da execução do código fonte para alguns transistores (nMOS, com  $t_{ox}=4nm$ ,  $E_{ox}=3,45*10^{-13}$  F/cm e  $V_{ds}=0.025V$ ), obtiveram-se os parâmetros da Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos.

Dimensões		Transistores nMOS				
L (µm)	W (µm)	Vt (V)	µ0 (cm²/V.s)	θ1	θ2	Rs (Ω)
0.18	3.00	0.5477	339.50	0.3183	0.2418	92.30
0.24	3.00	0.5090	323.35	0.2056	0.2123	233.96
0.30	3.00	0.4958	308.63	0.1046	0.2116	238.88

Além disso, tal como se esperava obter, o código desenvolvido, forneceu (para o transistor de  $L=180nm$  e  $W=300nm$ ) as seguintes curvas de 1ª e 2ª ordem para a obtenção da resistência série:

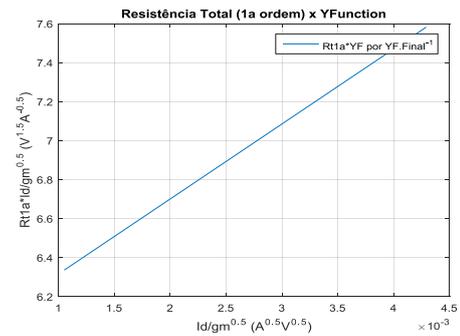


Figura 2–Resistência x Função Y, modelo de 1ª ordem.

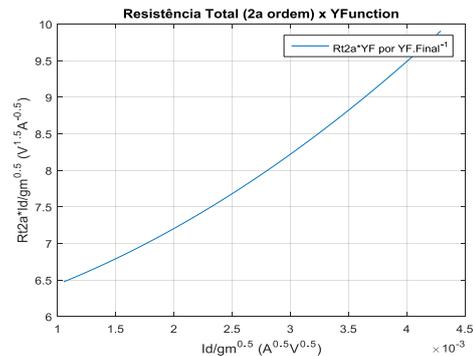


Figura 3–Resistência x Função Y, modelo de 2ª ordem.

Vale ressaltar que estas simulações correspondem aos valores experimentais para o chip EKV UMC 180nm.

### 4. Conclusões

Neste trabalho fora desenvolvida a extração automática da mobilidade e da resistência série dos transistores MOS, por intermédio de uma programação no Matlab, a qual corresponde a implementação direta das equações supracitadas.

Os resultados obtidos tanto na Tabela 1, quanto pelos gráficos das Figuras 2 e 3 estão coerentes com o esperado, pois, para os transistores simulados, esperavam-se medidas de 100 a 250 Ohms. Logo, nota-se a coerência do método e a eficácia da programação confeccionada, cumprindo os objetivos deste trabalho.

### 5. Referências

- [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.
- [3] Renan Trevisoli, Rodrigo Trevisoli Doria, Michelly de Souza, Sylvain Barraud, Maud Vinet, Mikaël Cassé, Gilles Reimbold, Olivier Faynot, Gérard Ghibaudo, Marcelo Antonio Pavanello, “A new method for series resistance extraction of nanometer MOSFETs”, IEEE Trans. Electron Dev., vol. 64, n. 7, pp. 2797-2803, 2017. DOI: 10.1109/TED.2017.2704928.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, a todos que sempre me incentivaram e a FEI por fomentar o desenvolvimento deste trabalho.

<sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 12/19 a 12/20.