

Extração Automática de Figuras de Mérito de Transistores MOS de Efeito de Campo

Paulo Henrique Rezende Bora¹, Michelly de Souza
Departamento de Elétrica, Centro Universitário FEI
uniepbora@fei.edu.br; michelly@fei.edu.br

Resumo: Esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta para realizar a extração automática dos principais parâmetros de transistores MOS, além de utilizar diversos métodos de extração para a tensão de limiar. Para isso, está sendo desenvolvido um programa em Python. A implementação realizada até o momento foi utilizada para a extração da tensão de limiar por diferentes métodos, usando resultados experimentais de um transistor fabricado em um processo comercial.

1. Introdução

Atualmente, os transistores de efeito de campo de metal-óxido-semicondutor (MOSFETs) [1] têm se tornado cada vez mais fundamentais em diversas aplicações, desde dispositivos eletrônicos de consumo até em circuitos para aplicações industriais avançadas. Esses transistores, que funcionam como chaves eletrônicas, controlam o fluxo de corrente em circuitos integrados e são essenciais para o desenvolvimento da microeletrônica moderna. Com o avanço das tecnologias, os MOSFETs têm atingido dimensões nanométricas, o que, por sua vez, aumenta a complexidade de sua análise e o número de parâmetros a serem extraídos para garantir um desempenho otimizado. Devido ao tamanho reduzido dos transistores e à complexidade envolvida em sua fabricação, é fundamental que os parâmetros elétricos dos MOSFETs, como a tensão de limiar (V_{TH}), a inclinação de sublimiar (SS), e a razão entre corrente de ativação (I_{ON}) e corrente de fuga (I_{OFF}), sejam avaliados com precisão. Estes parâmetros são cruciais para a caracterização do comportamento dos transistores e para o desenvolvimento de novos dispositivos que atendam às exigências cada vez maiores de eficiência e desempenho [2, 3].

Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta automatizada para o sistema operacional Windows, baseada em Python, destinada à extração de parâmetros fundamentais de MOSFETs a partir de curvas de corrente de dreno – tensão de porta ($I_d \times V_g$). A ferramenta permitirá a análise automática desses parâmetros utilizando diferentes métodos de extração, além de fornecer visualizações gráficas detalhadas dos resultados obtidos. Essa automação visa não apenas facilitar o processo de caracterização, mas também garantir maior precisão e consistência na análise de grandes volumes de dados, um requisito cada vez mais presente na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias avançadas de semicondutores.

2. Metodologia

Para dar início ao projeto, foi realizada uma extensa pesquisa sobre as principais figuras de mérito dos

transistores MOS. Inicialmente, foco especial foi dado para as diversas técnicas de extração da tensão de limiar (V_{TH}) [4]. Entre as várias abordagens estudadas, três métodos foram selecionados para a implementação da ferramenta que é o objetivo de desenvolvimento do projeto:

- 1) Método da segunda derivada (SD): Este é um dos métodos mais comuns para a extração de V_{TH} , que se baseia na análise da derivada da transcondutância ($gm = \frac{dI_d}{dV_g}$). O valor de V_{TH} é determinado no ponto em que gm atinge seu máximo. No entanto, este método é suscetível a ruídos, pois o processo de derivação numérica pode comprometer a precisão.
- 2) Método da corrente constante (CC): Neste método, a tensão de limiar é definida como a tensão de porta (V_g) correspondente a um valor pré-determinado de corrente de dreno (I_d), geralmente expresso como $I_d = \frac{W}{L} \times I_0$, onde L é o comprimento de canal efetivo, W é a largura do canal, e I_0 é um nível de corrente constante.
- 3) Método da Extrapolação Linear (LE): Esse método consiste em extrapolar a curva I_d - V_g na região linear até o ponto em que a corrente de dreno (I_d) é igual a zero. O valor de V_{TH} é determinado no ponto de interseção resultante dessa extrapolação.

Os três métodos de extração foram implementados em linguagem Python e, para validar a ferramenta implementada até o momento, foram utilizados transistores da tecnologia CMOS comercial da 180 nm da taiwanesa United Microelectronics Corp. (UMC), fabricados em uma colaboração científica entre grupos de pesquisa internacionais, incluindo a FEI. Foram utilizados os dados experimentais medidos em um transistor com largura de canal $W = 3 \mu m$ e comprimento $L = 180 nm$, com espessura de óxido de porta de 4 nm.

3. Resultados

A primeira etapa do desenvolvimento baseou-se na leitura e revisão bibliográfica a respeito do funcionamento dos transistores MOS e seus principais parâmetros elétricos. Após a seleção dos métodos de extração para a tensão de limiar, e implementação do código, deu-se início ao processamento dos dados experimentais disponíveis, culminando na geração de um gráfico preliminar. Essa visualização inicial da curva de corrente de dreno tem como principal objetivo facilitar a análise dos dados, servindo como uma base para futuras etapas do projeto. Um exemplo de gráfico de corrente gerado é apresentado na Figura 1.

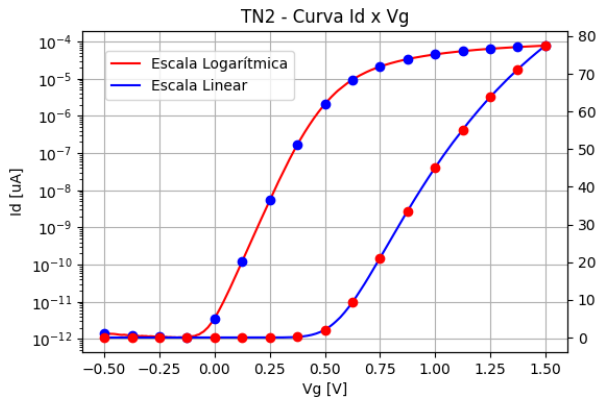


Figura 1 – Gráfico de $I_d \times V_g$ para um transistor CMOS com $W/L = 3 \mu\text{m} / 180 \text{nm}$.

Após essa etapa, foi dada continuidade código, para permitir que o usuário selecione o método de extração de sua preferência, dentre os três métodos implementados. Após a seleção do método, o código apresenta a curva utilizada no método, indicando o valor extraído.

A Figura 2 apresenta o gráfico utilizado para a extração pelo método da segunda derivada, enquanto as Figuras 3 e 4 apresentam os métodos da corrente constante e da extrapolação linear, respectivamente. Os resultados extraídos são sumarizados na Tabela I. Pode-se notar que os valores são aproximados.

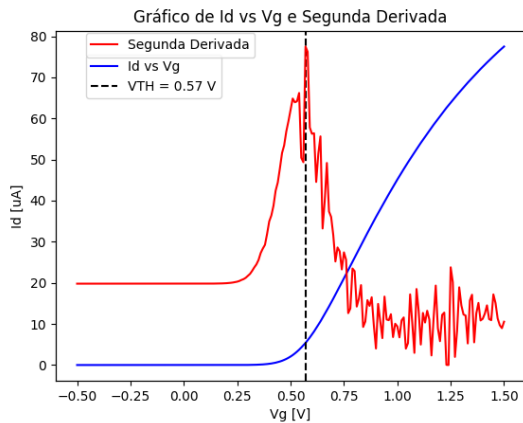


Figura 2 – Gráfico utilizado para extração de V_{TH} usando o método da segunda derivada (SD).

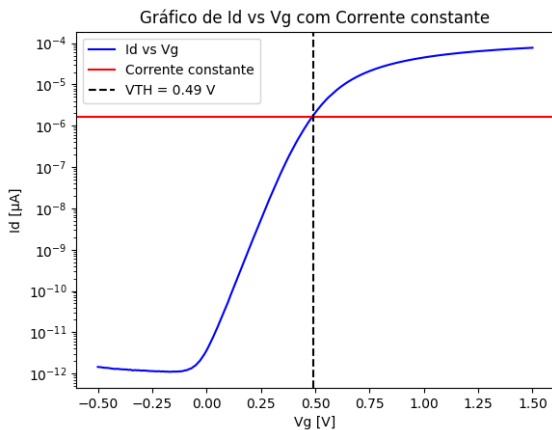


Figura 3 – Gráfico para extração de V_{TH} por meio do método da Corrente Contínua (CC).

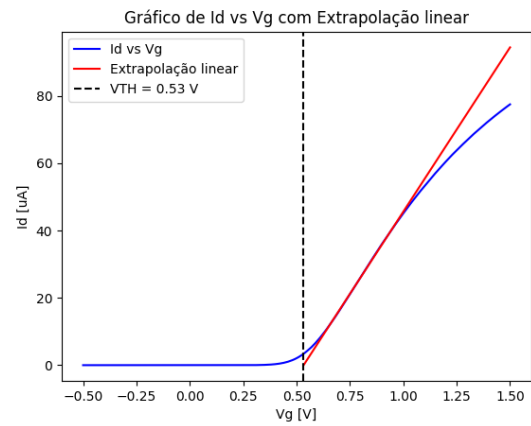


Figura 3 – Gráfico para extração de V_{TH} por meio da Extrapolação Linear (EL).

Tabela I – Valores de V_{TH} extraídos.

Método	V_{TH} (V)
SD	0,57
CC	0,49
EL	0,53

4. Conclusões

Até o presente momento, o projeto apresentou resultados satisfatórios, demonstrando sucesso na leitura dos dados coletados e na extração de um dos parâmetros propostos. Para a continuidade do projeto, diversos outros parâmetros e métodos de extração ainda serão implementados no código. Além disso, a implementação dos métodos de extração permanece como um código, sendo necessário adaptá-lo para uma ferramenta, com aplicação prática. Essa adaptação facilitará tanto a instalação quanto a interação com o usuário, tornando a ferramenta mais acessível e funcional.

5. Referências

- [1] SEDRA, A.S., SMITH, K. C.. Microeletrônica, 5ª edição. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 9788576050223.
- [2] MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS. São Paulo: Editora Thomson Learning, 2003.
- [3] ESPINEIRA, G. et al. FoMPy: A figure of merit extraction tool for semiconductor device simulations. 2018 Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS). Anais...IEEE, 2018.
- [4] ORTIZ-CONDE, A. et al. A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods. Microelectronics and reliability, v. 42, n. 4–5, p. 583–596, 2002.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 02/2024 a 01/2025.