

SIMULAÇÃO TCAD DE NANOFIO MOSFET OPERANDO EM TEMPERATURAS CRIOGÊNICAS

João Victor Luz da Silveira¹, Marcelo Antonio Pavanello²
^{1,2} Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI
 uniejossilveira@fei.edu.br, pavanello@fei.edu.br

Resumo: Esse trabalho apresenta um estudo de simulação TCAD de um nanofio transistor MOS, desde temperatura ambiente até criogênicas. Foram ajustados mecanismos de degradação de mobilidade, por meio dos parâmetros dos modelos de simulação. Os resultados indicam ótimo ajuste entre as curvas simuladas e experimentais, para todas as temperaturas, desde 300 K até 82 K, com o aparecimento do ponto ZTC bem definido até 30 K.

1. Introdução

A eletrônica compõe uma parte extremamente importante da grande área da engenharia elétrica. Transistores, introduzidos na forma de ponto de contato, passaram a serem construídos em lâminas de silício. Com o seu contínuo avanço, iniciou-se o estudo da miniaturização dos transistores de efeito de campo na tecnologia Metal Óxido Semicondutor (MOSFET) e dos efeitos causados em sua estrutura e características elétricas. Atualmente existem circuitos integrados com dezenas de bilhões de transistores cada e foram criadas ferramentas para auxiliar nos seus desenvolvimentos, como os simuladores *Technology Computer-Aided Design* (TCAD).

Esse projeto tem como objetivo estudar um nanofio transistor MOS tipo n, desde a temperatura ambiente até criogênicas, por meio do uso do simulador Sentaurus Device Simulator (SDevice), da Synopsys, além de realizar a calibração deste. Para isso, serão avaliadas características elétricas como mobilidade, corrente, transcondutância, tensão de limiar e inclinação de sublimiar a partir de resultados experimentais já obtidos.

2. Metodologia

O objeto de estudo se trata de um nanofio transistor MOS tipo n, de substrato *Silicon-On-Insulator* (SOI) e porta Ω . Suas principais dimensões são comprimento de canal (L) de 100 nm, largura do *fin* (W_{FIN}) de 10 nm, altura do *fin* (H_{FIN}) de 10 nm, comprimento da extensão de fonte/dreno (L_{ext}) de 10 nm, comprimento da sobreposição entre porta e eletrodo (L_{OV}) de 5 nm, espessura equivalente do óxido de porta (EOT) de 1,3 nm e espessura do óxido enterrado (t_{BOX}) de 145 nm. Para todas as simulações foi utilizada tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) de 40 mV.

A fim de calibrar o SDevice, foram alterados os valores dos parâmetros indicados na Tabela I. O parâmetro *mumax* influencia diretamente a mobilidade de baixo campo (μ_0) e, conseqüentemente, todos os mecanismos de degradação. O parâmetro *C* altera inversamente o espalhamento fônon e o parâmetro *Delta* afeta diretamente o espalhamento por rugosidade de superfície [1].

3. Resultados

A Tabela I apresenta os valores dos parâmetros alterados entre as simulações inicial e final, e a Figura 1 apresenta as curvas da transcondutância ($gm=dI_{DS}/dV_{GS}$, sendo I_{DS} a corrente entre dreno e fonte e V_{GS} a tensão entre porta e fonte) em função de V_{GS} experimental e para as duas simulações, e em temperatura ambiente.

Tabela I – Valores dos parâmetros alterados entre as simulações inicial e final.

Parâmetro	Simulação inicial	Simulação final
<i>mumax_B</i>	1E+02	0,925E+02
<i>mumax_As</i>	3E+02	2,775E+02
<i>mumax_P</i>	3E+02	2,775E+02
C “100” e ⁻	2,3448E+02	23,448E+02
C “110” e ⁻	8,7931E+02	23,448E+02
delta “100” e ⁻	3,58E+18	1,79E+15
delta “110” e ⁻	1,79E+18	1,79E+15

A curva da simulação final está consideravelmente mais próxima à experimental. Isso é resultado das reduções de μ_0 , espalhamento fônon e espalhamento por rugosidade de superfície, conseqüências das alterações nos parâmetros *mumax*, *C* e *delta*, respectivamente.

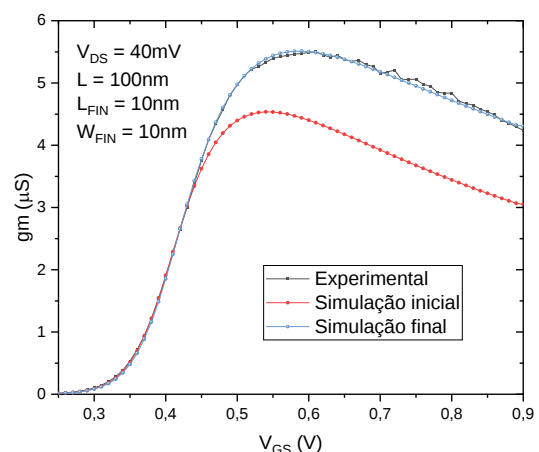


Figura 1 – gm em função de V_{GS} experimental e das simulações inicial e final em 300 K.

A Figura 2 apresenta gm em função de V_{GS} experimental e da simulação final nas temperaturas de 300 K, 150 K e 82 K. Calculando-se os coeficientes de correlação de Pearson, obtém-se 0,999, 0,992 e 0,985, respectivamente. Pode-se observar a calibração precisa para 300 K, como visto na Figura 1. Porém, para 150 K e 82 K, há um deslocamento horizontal. Tal diferença pode também ser vista na Figura 3, que apresenta a tensão de

limiar (V_{TH}) em função da temperatura (T) para as simulações final e extra. Esta segunda difere por seu valor de *Workfunction*, alterado de 4,56 eV para 4,58 eV e funciona como um incremento linear a V_{TH} . As curvas condizem com as relações direta do potencial de Fermi com V_{TH} e inversa com T .

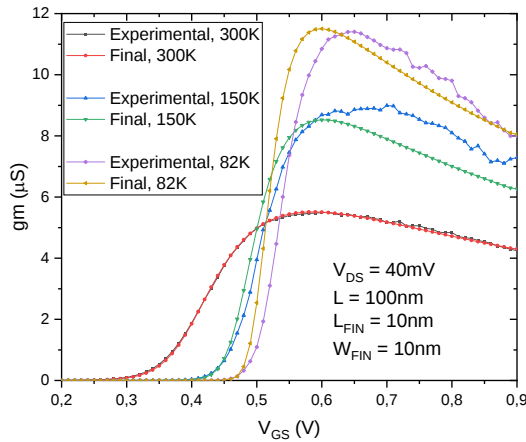


Figura 2 – gm em função de V_{GS} experimental e da simulação final em 300 K, 150 K e 82 K.

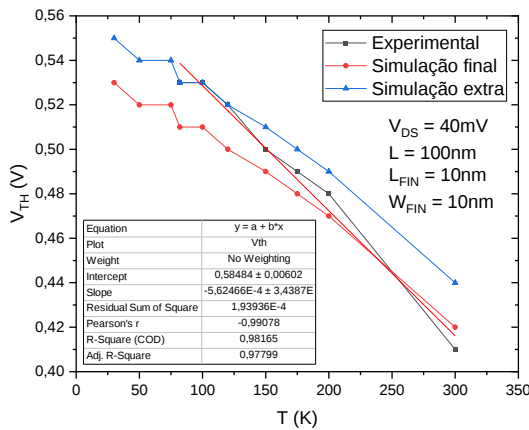


Figura 3 – V_{TH} em função de T experimental e das simulações final e extra.

Da Figura 3, fica evidente que a variação da tensão de limiar com a temperatura simulada está abaixo do esperado experimentalmente, sendo o coeficiente angular deste de $-0,563$ mV/K e das simulações de $-0,397$ mV/K. Nas curvas, V_{TH} foi obtido pelo método da segunda derivada.

A Figura 4 apresenta as curvas finais de I_{DS} em função de V_{GS} para diferentes temperaturas. Nela, é possível observar o ponto de *Zero Temperature Coefficient* (ZTC), aproximadamente em $I_{DS}=0,84$ μ A e $V_{GS}=0,59$ V. Nele, há o cancelamento mútuo dos efeitos da temperatura na mobilidade e tensão de limiar, e engloba todas as temperaturas apresentadas.

A Figura 5 apresenta a inclinação de sublimiar (SS) em função de T experimental e da simulação final. Dela, observa-se o comportamento linear de SS, que é esperado para temperaturas não criogênicas. Para as temperaturas mais baixas, porém, é esperado que a relação de $\ln(10) \cdot k \cdot T / q$ se torne imprecisa devido ao aumento da densidade efetiva de armadilhas [2].

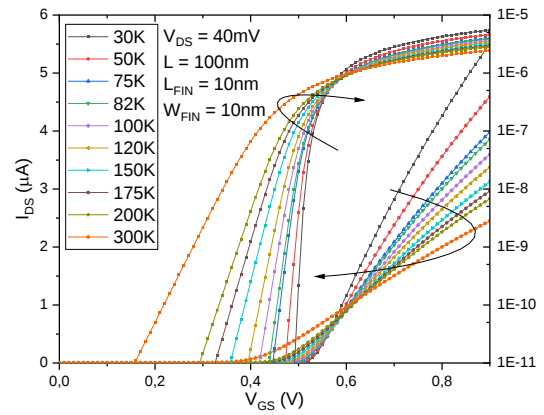


Figura 4 – I_{DS} em função de V_{GS} da simulação final para diferentes temperaturas.

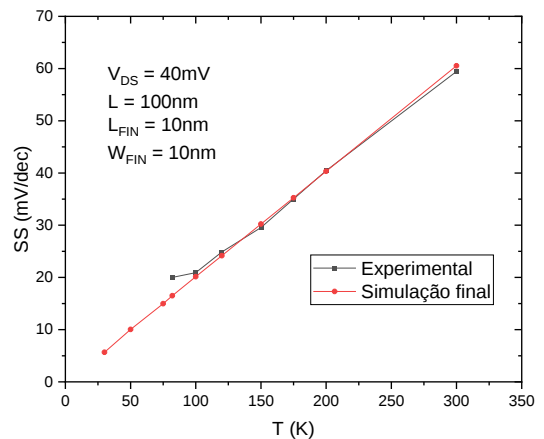


Figura 5 – SS em função de T experimental e da simulação final.

4. Conclusões

Este trabalho apresentou simulações TCAD tridimensionais de um nanofio transistor MOS, operando desde temperatura ambiente até 30 K. Os resultados de simulação para corrente de dreno e transcondutância demonstraram excelente ajuste comparados aos experimentais, desde 300 K até 82 K. Apresentaram também coeficiente de correlação de Pearson superior a 0,95. Além disso, foi possível seguir as simulações pós calibração até 30 K, obtendo o ponto de *Zero Temperature Coefficient* bem definido.

Por outro lado, obteve-se divergências em relação à manutenção do comportamento linear da inclinação de sublimiar para temperaturas inferiores a 100 K, e menor variação da tensão de limiar com a temperatura.

5. Referências

- [1] SYNOPSIS. Sentaurus Device User Guide: Version S-2021.6, 2021.
- [2] R. Trevisoli, R. T. Doria, M. de Souza, e M. A. Pavanello, "Extraction of the interface trap density energetic distribution in SOI Junctionless Nanowire Transistors", *Microelectronic Engineering*, vol. 147, p. 23–26, nov. 2015.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 08/2023 a 06/2024.