

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

EFEITOS DE TEMPERATURA EM DISPOSITIVOS MOSFETs

CAUAN G. FERREIRA¹, DENNIS L. TOUFEN^{2*}, SAULO G. ALBERTON², MATHEUS S. PEREIRA³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Guarulhos

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Câmpus Guarulhos

³Instituto de Física, Universidade de São Paulo (USP)

Graduando em Engenharia da Computação Bolsista PACTEC, IFSP, Câmpus Guarulhos, cauan.f@aluno.ifsp.edu.br.

Área de conhecimento: 30402050 SISTEMAS ELETRÔNICOS DE MEDIDAS E DE CONTROLE

RESUMO: Este trabalho analisa os efeitos da variação de temperatura no desempenho de MOSFETs, utilizando o *software* E.C.O.R.C.E., uma ferramenta TCAD (de elementos finitos). A ferramenta permite modelar parâmetros críticos como tensão limiar e corrente de fuga com uso de uma interface gráfica fácil permitindo definir o modelo gráfico e físico do dispositivo, analisando seu comportamento em diferentes condições. Neste trabalho foi modelado um transistor NMOS usando uma estrutura bidimensional. Os resultados obtidos foram comparados qualitativamente com os esperados e mostram boa capacidade de reproduzir o comportamento esperado do MOSFET. Os resultados mostram como a temperatura afeta o funcionamento do MOSFET aumentando a corrente de dreno mesmo sem variação da tensão de *gate*. Tais resultados mostram que o estudo sobre os efeitos de condições especiais em dispositivos eletrônicos é necessário e o uso de modelagem computacional é uma forma eficiente e econômica de auxiliar no entendimento deste comportamento. O trabalho realizado até o presente momento abre caminho para o estudo dos efeitos das radiações em MOSFETs usando essa ferramenta computacional.

Palavras-chave: Simulação TCAD; E.C.O.R.C.E.; MOSFETs; modelagem computacional;

TEMPERATURE EFFECTS on MOSFET DEVICES

Abstract: This work analyzes the effects of temperature variation on the performance of MOSFETs using the E.C.O.R.C.E. software, a TCAD (finite element) tool. The tool allows modeling critical parameters such as threshold voltage and leakage current through an easy-to-use graphical interface, enabling the definition of the device's physical and graphical model while analyzing its behavior under different conditions. In this study, an NMOS transistor was modeled using a two-dimensional structure. The results obtained were qualitatively compared with the expected outcomes and demonstrate a good ability to reproduce the expected behavior of the MOSFET. The results show how temperature affects the operation of the MOSFET, increasing the drain current even without variation in gate voltage. These findings highlight the need to study the effects of special conditions on electronic devices, and computational modeling is shown to be an efficient and cost-effective approach to better understand this behavior. The work carried out so far paves the

way for the study of radiation effects on MOSFETs using this computational tool.

Keywords: TCAD simulation; E.C.O.R.C.E.; MOSFETs; computational modeling;

INTRODUÇÃO

A invenção dos transistores, em 1947, possibilitou uma miniaturização e versatilidade suficiente para impulsionar um avanço tecnológico intenso na área da Eletrônica. Esse marco histórico foi a base para a utilização desses dispositivos eletrônicos em circuitos embarcados, microcontroladores e chips, hoje presentes em quase todos os setores da tecnologia, inclusive em ambientes como espaço sideral, equipamentos médicos e reatores nucleares, onde há radiação e variações extremas de temperaturas. Com crescente aplicações em situações cada vez mais complexas e aumento no número de circuitos integrados também cresce a ocorrência de falhas nesses sistemas causados pela temperatura que são poucos compreendidas e muitas vezes desconhecidas, exigindo estudos para garantir a segurança desses sistemas eletrônicos.

Os efeitos causados pela temperatura em espaçonaves e satélites podem transformar drasticamente suas características levando à perda de funcionalidade do sistema. Assim, a confiabilidade desses sistemas pode ser estudada pelo *software* E.C.O.R.C.E. (*Electronic Component Radiation Effects Simulation Environment*) que é projetado para simular o comportamento dos dispositivos eletrônicos sobre diversas condições como variações de temperatura. Portanto o uso do E.C.O.R.C.E. fornece uma abordagem segura e econômica para averiguar tais efeitos antes de testes experimentais, favorecendo pesquisadores a otimizar projetos e propor estratégias de proteção.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo é utilizado a ferramenta computacional E.C.O.R.C.E (MICHEZ, 2015), um *software* TCAD (*Technology Computer-Aided Design*). O *software* é baseado no método de volumes finitos e incorpora um processador gráfico, além de um gerador de malhas dinâmicas que ajusta dinamicamente durante as simulações. Ele permite modelar junções PN, transistores bipolares e transistores MOS em 1D, 2D e até 3D, possibilitando o estudo da dependência do funcionamento correto de MOSFETs em função da temperatura e dosagem de radiação. Essa abordagem fornece dados detalhados dos mecanismos físicos envolvidos durante os efeitos apresentados anteriormente.

Ferramentas como o E.C.O.R.C.E. integram modelos calibrados com dados de dispositivos reais (ex.: IRF450) utilizando o método acelerado de caracterização de armadilhas em óxidos proposto por Saigné et al. (1997), para simular efeitos cumulativos de radiação e temperatura, possibilitando uma redução drástica do tempo de teste. As figuras 1 e 2 mostram o modelo de um MOSFET e os resultados obtidos. Neste trabalho o autor conseguiu resultados para o MOSFET IRF450 que mostraram concordância com dados experimentais dentro de um erro menor que 6%.

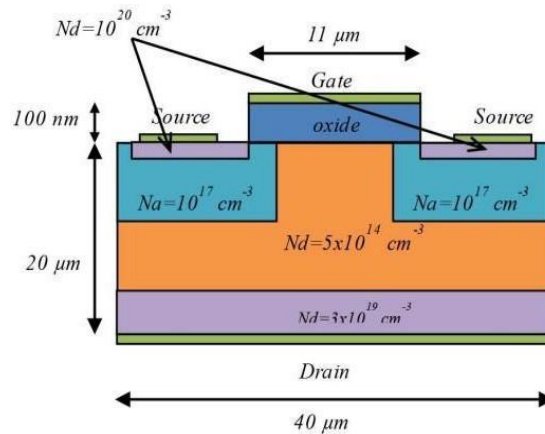


Figura 1: Foto da estrutura de um MOSFET de potência IRF450 usada para experimentos em temperatura de 300K em doses variadas. Fonte: (MICHEZ, 2015).

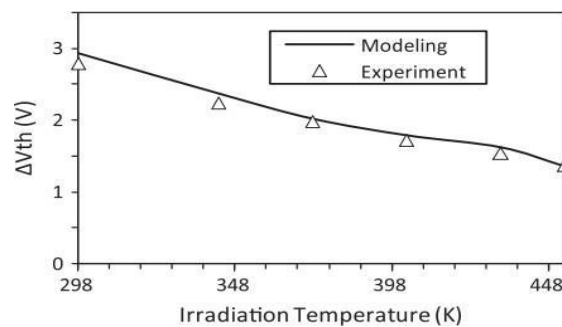


Figura 2: Comparação entre dados de experimentos (triângulo) e a modelagem do IRF450. Fonte: (MICHEZ, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram feitas a partir da representação esquemática da malha de simulação do modelo de MOSFET no E.C.O.R.C.E (figura 3), onde *Gate* (verde) é o eletrodo de controle do transistor. Alterações na tensão do *Gate* controlam o fluxo de corrente entre *Source* e *Drain* (nas extremidades superiores) que são regiões dopadas do semiconductor que permitem a entrada e saída de portadores de carga. *Substrate* (laranja) é o corpo do transistor, onde é inserido as regiões dopadas do transistor. Na figura 3, a distância entre dois pontos representa 100 nm.

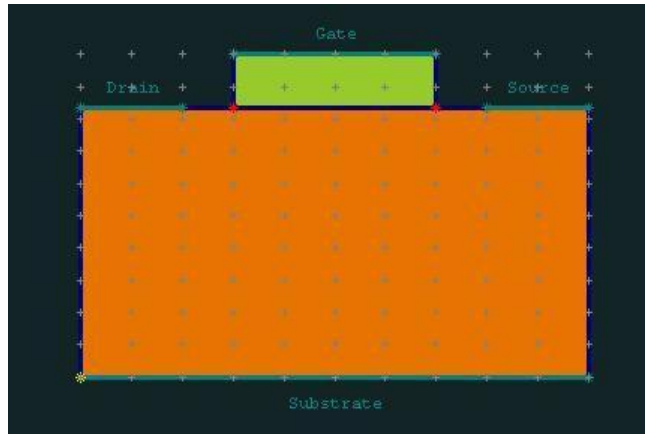


Figura 3: Modelo geométrico usado para simular o comportamento de um MOSFET. A distância entre os dois pontos representa 100 nm.

O que analisamos é o gráfico 3D do potencial elétrico (figura 4). Alterações, como as provocadas por temperaturas extremas, podem mudar essa característica, distorcendo o campo elétrico e afetando parâmetros críticos como corrente de fuga, tensão limiar e mobilidade.

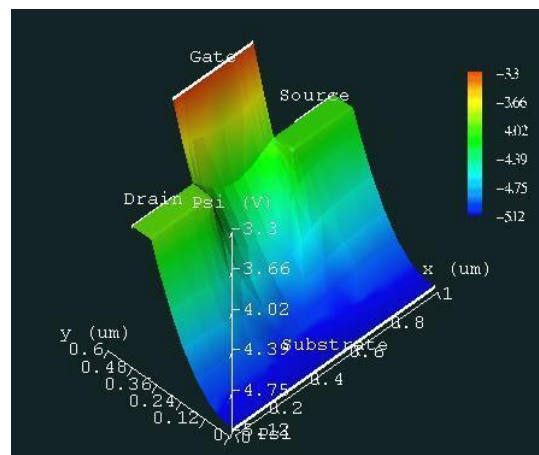


Figura 4: Representação 3D do funcionamento padrão de um modelo MOSFET.

Os gráficos abaixo representam a resposta elétrica do transistor simulado anteriormente antes e depois de um fenômeno degradante, sendo o eixo X ($Pot - V$) a tensão aplicada no *Gate* (V_g) e no eixo Y ($I_{ds} - A/\mu m$) a corrente total entre o dreno e a fonte (*drain-source*) por unidade de largura do canal ($A/\mu m$), ou seja, densidade de corrente no dispositivo.

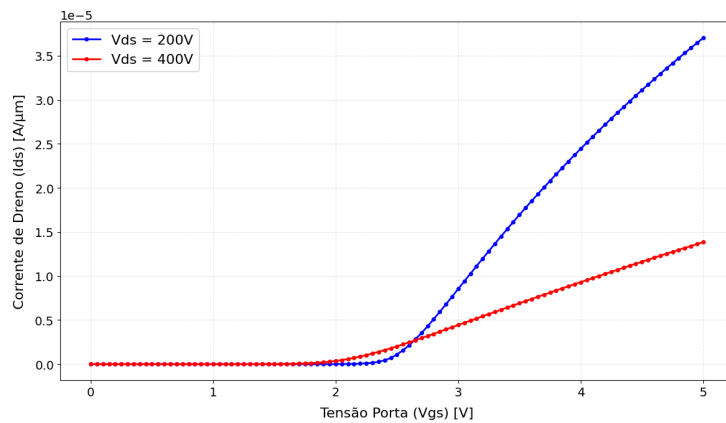


Figura 5: Curvas de corrente total de dreno (I_{ds}) em função do potencial aplicado na porta (V_{gs}) para 200K (azul) e 400K (vermelho).

A figura 5, mostra que a tensão limiar (V_{th}) para 200K é aproximadamente 2,5V e a corrente máxima de $3,7 \times 10^{-5} A/\mu m$. Já para 400K a tensão limiar (V_{th}) é aproximadamente 2,0 V e corrente máxima de $1,38 \times 10^{-5} A/\mu m$. Com redução de condutividade de 7,4 S/m para 2,8 S/m para $V_{gs}=5V$.

Em seguida, na figura 6, é possível analisar um gráfico da corrente de dreno normalizada (I_{totc} , em $A/\mu m$) em função da temperatura (T , em Kelvin) para um transistor MOSFET. Este gráfico revela como a temperatura afeta a eficiência do dispositivo. Nota-se que o MOSFET aumenta em muitas ordens de grandeza sua corrente pelo efeito da temperatura e passa a uma condução equivalente a aplicação de uma tensão de *gate* acima do limiar.

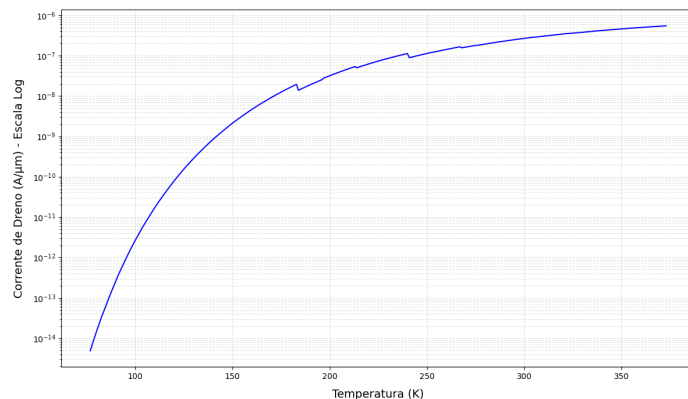


Figura 6: Corrente de Dreno (I_{totc}) em função da temperatura (T) em MOSFET.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram uma clara dependência do funcionamento correto de um MOSFET em relação à temperatura, conforme previsto nos objetivos iniciais. A mudança nos valores da corrente I_{totc} de $3,7 \times 10^{-5} A/\mu m$ para temperatura igual a 200 K e $1,38 \times 10^{-5} A/\mu m$ para temperatura igual a 400 K, evidenciando uma redução da condução à medida que aquecimento progride, mostrando que o *software* otimiza o cálculo teórico e auxilia a experiência do pesquisador. Sendo assim, a redução da condução é um efeito gradual que prejudica a eficiência do dispositivo, já

a diminuição da tensão limiar tem um impacto mais crítico, pois pode levar o MOSFET a conduzir indevidamente, comprometendo a confiabilidade do circuito e causando falhas em sistemas sensíveis.

Portanto, os resultados permitem quantificar precisamente o impacto da temperatura na performance do dispositivo, estabelecer a faixa ótima de operação em termos de eficiência energética e identificar os limites para futuras aplicações

Os dados obtidos favorecem o desenvolvimento de modelos mais precisos na previsão de desempenho em diferentes condições ambientais, cumprindo os objetivos centrais da pesquisa e abrindo caminho para a consistência das múltiplas medições valida a metodologia utilizada e confirma a confiabilidade das conclusões apresentadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Apoio à Ciência e Tecnologia do IFSP (PACTEC) pelo custeio deste projeto, que tornou possível a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALBERTON, Saulo Gabriel Pereira Nascimento. Efeitos destrutivos de radiação em dispositivos eletrônicos. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-08112019-144426/>. Acesso em: 13 ago. 2025.

F. Saigné et al., "Experimental validation of an accelerated method of oxide-trap-level characterization for predicting long-term thermal effects in MOS devices," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 44, no. 6, pp. 2001-2006, Dec. 1997. [Online]. Disponível em: [CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code | IEEE Journals & Magazine](#). Acessado: 13 Aug. 2025.

MA, T. P.; DRESSENDORFER, P. V. *Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits*. New York: Wiley-Interscience, 1989. Disponível: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Z6jyidJL7Q8C&oi=fnd&pg=PR13&ots=H2BbjxeZZs&sig=Uu3A2fOxbGPiOFQYQtemntp6V0M&redir_esc=y#v=onepage\q\ f=false. Acesso em: 13 ago. 2025.

MICHEZ, A. et al. Modeling dose effects in electronics devices: Dose and temperature dependence of power MOSFET. *Microelectronics Reliability*, v. 53, n. 9-10, p. 1306-1310, 2013. Disponível em: [Modeling dose effects in electronics devices: Dose and temperature dependence of power MOSFET - ScienceDirect](#). Acesso em: 13 ago. 2025.