

# SIMULAÇÃO DO AUTO-AQUECIMENTO EM TRANSISTORES NANOFIOS MOS

Felipe Rodrigues Garé Carnielli<sup>1</sup>, Marcelo Antonio Pavanello<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI  
<sup>1</sup>felipe.gare@hotmail.com, <sup>2</sup>pavanello@fei.edu.br

**Resumo:** Este projeto apresenta um estudo sobre o efeito de auto-aquecimento que ocorre em nanofios transistores fabricados na tecnologia SOI MOS, de dimensões reduzidas, com o intuito de efetuar a caracterização da elevação da temperatura do transistor através de uma estrutura vizinha, adjacente, compartilhando do mesmo metal de porta. Através do monitoramento da corrente reversa do diodo PIN adjacente, foi possível estimar a elevação da temperatura do transistor.

## 1. Introdução

Neste artigo apresenta-se um estudo sobre a caracterização do auto-aquecimento que ocorre em nanofios transistores MOS. Os transistores revolucionaram a indústria eletrônica em todo o mundo de diversas maneiras. Em especial, o mais utilizado atualmente é o que tem seu mecanismo baseado em efeito de campo, mais conhecido como MOSFET.

Em busca do constante escalamento das dimensões dos transistores MOS, a tecnologia vem avançando segundo uma tendência exponencial, conhecida como lei de Moore, na qual o número de transistores em chips dobra a cada 2 anos [1] e, por conta disso, atualmente temos transistores MOS da ordem de 10 nanômetros em chips comerciais. Com dimensões reduzidas às dezenas de nanômetros, diversos efeitos secundários surgem e prejudicam seu desempenho, ou até inviabilizam o funcionamento. Uma das primeiras evoluções da tecnologia MOS se deu com a adoção da tecnologia *Silicon-On-Insulator* (SOI), que basicamente faz a adição de uma camada de óxido (*Buried Oxide*), separando o substrato da região ativa (canal) do transistor, possibilitando a diminuição dos efeitos de canal curto [2]. Posteriormente, uma das tecnologias implementadas para resolver alguns dos problemas causados pelo constante escalamento dos transistores, foi a implantação de múltiplas portas. Inicialmente, o chamado FinFET possuía duas portas, possibilitando dois canais de condução melhorando o controle eletrostático do transistor, posteriormente a quantidade de portas foi aumentando para outras possibilidades, porém, a mais comum é o transistor de porta tripla [3].

Dentre todos os efeitos indesejados, um de difícil solução é o auto-aquecimento. Este efeito ocorre por conta da passagem de corrente em um meio com resistência não nula, fenômeno mais conhecido como Efeito Joule e, com o aquecimento da estrutura do transistor, ocorre uma degradação relativamente expressiva na corrente fornecida, implicando em uma diminuição da eficiência. Por conta do constante escalamento, há uma redução na área do transistor, que se torna insuficiente para dissipação de calor gerado. Adicionalmente, uma das alternativas tecnológicas implementadas para reduzir

alguns efeitos indesejados decorrentes da diminuição do transistor é o confinamento da região ativa do silício entre óxidos do silício. O óxido de silício tem uma condutividade térmica cerca de 10 vezes menor que a do silício dopado [3], portanto, um confinamento pode causar o agravamento do auto-aquecimento. Existem diversas formas utilizadas para a caracterização da temperatura de transistores de dimensões tão reduzidas, porém, as alternativas mais utilizadas, como uma estrutura especial de porta [2] ou medidas de correntes pulsadas [3], são de difícil aplicação e apresentam erros.

Diodos do tipo PIN, já foram provados excelentes sensores de temperatura para baixa potência [4]. Isso se dá por sua excelente sensibilidade em relação a variação da temperatura, devida a dependência exponencial da corrente reversa com a temperatura.

## 2. Metodologia

Para realização deste estudo, utilizou-se de um simulador numérico tridimensional, para criar uma estrutura de testes, através de processos parecidos com os reais de fabricação (*Sentaurus Process*), que continha um diodo PIN adjacente a um transistor trigate nMOS. Durante a fabricação, por conta do processo utilizado, é difícil dizer exatamente os tamanhos e espessuras reais da estrutura, porém, utilizou-se espessura de óxidos de aproximadamente 3 nanômetros e largura e altura de fin de aproximadamente 10 nanômetros. A região de canal tipo P do transistor, assim como no diodo, é mantida a concentração intrínseca do silício, implicando em uma dopagem leve do tipo P. O transistor, quando polarizado, possibilita a passagem de corrente fazendo com ele aqueça (*Self-Heating Effect*) e sirva como uma fonte de calor para a estrutura. O diodo PIN lateral compartilha dos metais e óxidos de porta do transistor que, apesar de não serem necessários no diodo, agem como canais de condução de calor. Com o intuito de aumentar a quantidade de resultados com uma mesma polarização, a temperatura dos arredores foi variada, portanto, possibilitando um aumento da quantidade de calor confinado. A figura 1 apresenta uma renderização da estrutura conjugada do diodo com o transistor.

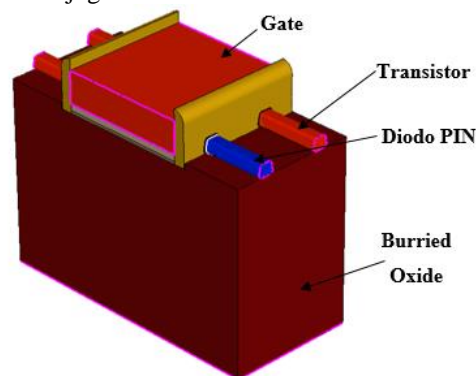


Figura 1 – Estrutura conjugada simulada.

### 3. Resultados

As duas estruturas apresentadas na figura 1 tem dimensões idênticas e reduzidas, tendo uma largura e altura de fim de aproximadamente 10 nm, além de uma largura de canal de aproximadamente 10 nm.

Inicialmente, foi necessária a simulação de uma estrutura separada, apenas com o diodo PIN, que tinha o intuito de calibrar o sensor em diversas situações de temperaturas conhecidas com tensão reversa de 1V. A figura 2 demonstra a corrente reversa no diodo PIN em função da temperatura. Pode-se observar o aumento exponencial dessa corrente com a temperatura.

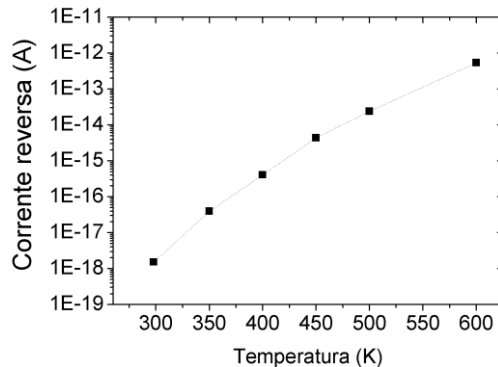


Figura 2 – Curva de calibração do diodo PIN.

Ao fim da simulação da polarização do transistor, os valores de corrente reversa do diodo podem ser extraídos da estrutura. Através de uma simples interpolação numérica é possível encontrar a temperatura em que o diodo lateral atingiu. Entretanto, devido a distância entre o transistor (fonte de calor) e o diodo PIN (sensor), é necessária a determinação da função de transferência obedecida entre os dispositivos, possibilitando que a temperatura medida no sensor represente a do transistor. Como citado anteriormente diversas referências foram fixadas nos arredores para atingir valores mais elevados de temperatura, aumentando também a quantidade de resultados. A função pode ser facilmente encontrada utilizando as maiores temperaturas (caso crítico) dos dois componentes, que são fornecidas após o fim da simulação. A correlação entre a temperatura de referência no diodo e no transistor pode ser vista na figura 3. Observa-se uma função de transferência quase linear, possibilitando encontrar a temperatura do transistor apenas utilizando uma constante referente às diferenças de temperatura dos componentes ao valor interpolado do sensor. Para este caso de polarização, a constante média é de aproximadamente 20,12.

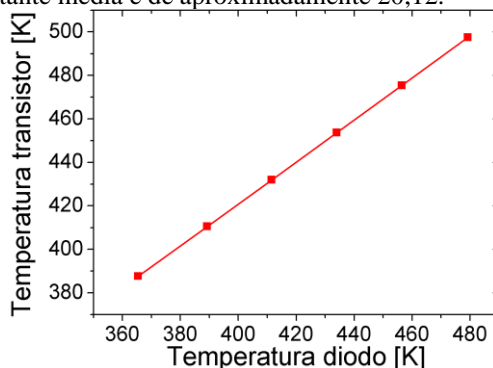


Figura 3 – Temperaturas internas após simulação.

Por fim, é possível fazer uma reconstrução do gráfico da figura 3 através do diodo sensor, onde utiliza-se da calibração para chegar na temperatura do diodo e a função de transferência para encontrar enfim a temperatura do transistor. O gráfico resultante pode ser observado na figura 4 praticamente sobreposto ao anterior.

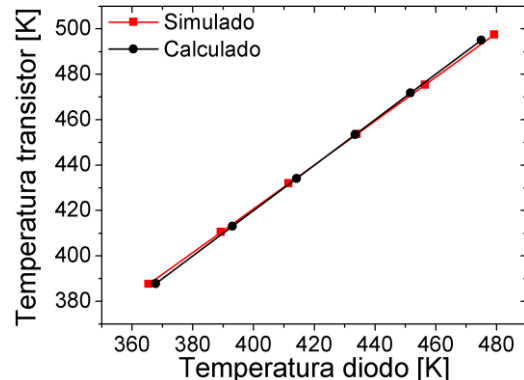


Figura 4 – Temperaturas do transistor calculada.

É evidente na figura 4, a excelente precisão obtida utilizando este tipo de componente como sensor de temperatura. A maior diferença absoluta entre as temperaturas simuladas e calculadas do transistor foi de aproximadamente 3,63 K, o que implica em um maior erro percentual obtido de 0,76%. Uma possível dificuldade pode surgir em relação à ordem de grandeza obtida nas correntes reversas, que podem se tornar um problema em medições reais do sensor. Porém, em um transistor real, é mais provável que o mesmo aqueça mais que esta simulação, isso porque, na simulação não foi usado uma camada de óxido recobrimo a estrutura, o que confinaria muito mais a quantidade de calor gerada pelo componente.

### 4. Conclusões

A utilização do diodo PIN como sensor de temperatura se mostrou muito eficiente e precisa, uma vez que o maior erro obtido foi muito baixo em relação aos outros métodos utilizados atualmente para caracterização de temperatura de um transistor com dimensões nanométricas. Portanto, é possível concluir que o diodo PIN é um excelente sensor de temperatura para monitoramento do efeito de auto-aquecimento.

### 5. Referências

- [1] PRASAD, C., "A Review of Self-Heating Effects in Advanced CMOS Technologies". IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 66 no. 11, 2019.
- [2] MARINIELLO, G. "Efeitos do autoaquecimento em transistores soi-mos". Centro Universitário FEI. São Bernardo do Campo, p. 1-160. 2016.
- [3] BERGAMASCHI, F. E. "Caracterização elétrica e simulação dos efeitos sh". Centro Universitário FEI. São Bernardo, p. 1-140. 2018.
- [4] M. de Souza, et. al., "Thermal sensing performance of lateral SOI PIN diodes in the 90–400 K range". IEEE International SOI Conference, Foster City, CA, 2009.

<sup>1</sup> Aluno de IC do CNPq. Projeto (PBIC117/19) com vigência de 08/19 a 07/20.