

# SIMULAÇÃO DE EVENTOS DE EFEITOS ISOLADOS EM TRANSISTORES MOS UTILIZANDO O LTSPICE

Jonathan Fellipe Francisco Batista<sup>1</sup>, Renato Camargo Giacomini<sup>2</sup>, Ricardo Germano Stolf<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI

<sup>2</sup> Engenharia Elétrica, Centro Universitário FEI

uniejobatista@fei.edu.br, rstolf@fei.edu.br, renato@fei.edu.br.

**Resumo:** Este projeto tem como objetivo estudar o impacto do evento SEE em transistores MOSFETs comerciais. Para tal fim, foram analisadas curvas experimentais oriundas do acelerador de partículas Pelletron (LAFN/USP) utilizando o software matemático MATLAB, modelando-as de acordo com o modelo teórico de duplas exponenciais. Obtidas as equações do modelamento, estas foram implementadas no simulador LTSPICE, buscando-se analisar o efeito desta radiação nos transistores MOS convencionais.

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, houve um enorme crescimento no uso de transistores MOSFET (Transistores de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor) nas áreas de computação, armazenamento de dados e eletrônica em geral, propiciando o aprimoramento de circuitos digitais e analógicos através do aumento de performance e densidade de integração destes sistemas. Com o aumento no desempenho e a diminuição do tamanho destes dispositivos, também aumentou o desafio dos fabricantes em garantir a confiabilidade de tais sistemas através de componentes e circuitos cada vez menos suscetíveis a falhas, ocasionadas principalmente de fatores externos, como a radiação. [1]

Atualmente, circuitos com transistores MOS robustos a radiações possuem extrema importância em aplicações nas áreas de aviação e tecnologias aeroespaciais.

Sabe-se que o impacto de uma partícula ionizada em transistores MOSFET pode ocasionar um evento SEE (Single Event Effects) [2], caracterizado pela geração de pares de portadores (elétron-lacunas) ao longo da trajetória do íon incidente, promovendo assim, o surgimento de um pulso de corrente elétrica no dispositivo quando este estiver polarizado.

## 2. Modelamento dos pulsos oriundos do SEE

Os sinais decorrentes da incidência de 7 feixes iônicos de <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O, <sup>19</sup>F, <sup>28</sup>Si, <sup>35</sup>Cl, <sup>63</sup>Cu e <sup>107</sup>Ag, cujas grandezas de transferência linear de energia (LET) valem, respectivamente, 45MeV, 52.5MeV, 42MeV, 66MeV, 75MeV, 82MeV e 107.5MeV em um transistor PMOS 3N163 no acelerador de partículas Pelletron [3] resultaram, em 7 matrizes, uma para cada íon, no qual as linhas representam o número de pontos de cada curva. A quantidade de curvas depende de cada íon incidente e da sua energia, no qual todas as curvas foram alinhadas de acordo com seu pico máximo [4].

Para que o modelamento seja efetuado, extraiu-se as curvas médias de cada íon através das matrizes experimentais. Somando os valores de cada evento e

dividindo pelo número total de eventos de cada íon, obtém-se o evento médio de tensão. Uma vez que a resistência de dreno no momento do experimento era de 50Ω, divide-se cada valor médio pelo valor da resistência para encontrar o valor convertido em corrente. Repetindo-se o processo para cada íon, obtém-se as curvas médias extraídas das curvas experimentais. A figura 1 abaixo exhibe as curvas médias de cada íon, plotadas através do MATLAB assim como sua grandeza de transferência linear de energia, LET [MeV].

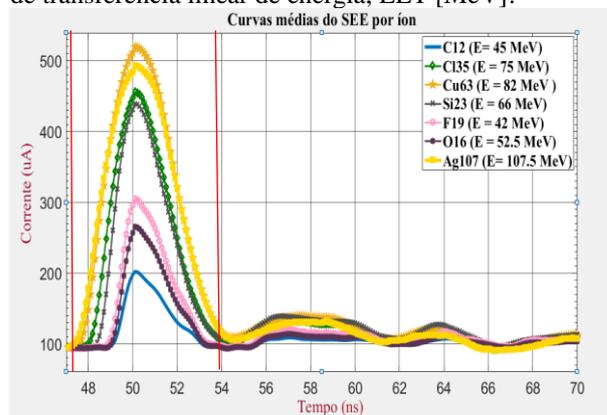


Figura 1 – Curvas médias do SEE obtidas no MATLAB a partir das curvas experimentais.

O principal modelo que simula, analiticamente, o pulso de corrente gerado pelo SEE é dado por um conjunto de duplas exponenciais [5], dado pela equação 1:

$$I(t) = I_0 \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_\alpha}} - e^{-\frac{t}{\tau_\beta}} \right) \quad (1)$$

Onde,  $I_0$  é o parâmetro da corrente, que por sua vez depende da carga máxima coletada durante o evento. As constantes  $\tau_\alpha$ ,  $\tau_\beta$  são as constantes de tempo relacionadas ao estabelecimento da trajetória do íon no dispositivo [5]. Portanto, isolando cada pulso de corrente presente na figura e delimitados pelas retas verticais, localizados em grande maioria entre os instantes 48 e 54ns, e utilizando comandos de fitting curves no MATLAB, obteve-se a equação do pulso para cada íon. A equação 2 abaixo exhibe um dos resultados do modelamento: a equação do pulso modelado para o íon carbono:

$$I(t) = 3,708 \cdot 10^{-4} \left( e^{-\frac{t}{31,63}} - e^{-\frac{t}{6,51}} \right) \quad (2)$$

A figura 2 a seguir exhibe o modelo usando a aproximação de duplas exponenciais de três dos sete íons obtidos, em relação às suas respectivas curvas experimentais. Na legenda, encontram-se seus coeficientes de Pearson ( $r^2$ ), no qual expressa a correlação entre os dados experimentais e os dados

modelados. Quando mais próximo da unidade, maior a correlação entre as duas matrizes de dados e, portanto, melhor é a qualidade de modelamento.

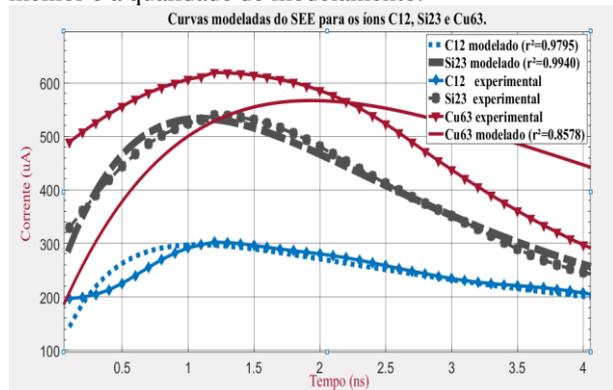


Figura 2 – Curvas modeladas SEE para os íons C12, Cu63 e Si23, plotadas em conjunto com os pulsos experimentais.

### 3. Simulação do SEE no LTSpice

O LTSpice é um software de simulação de circuitos elétricos e digitais desenvolvido pela Analog Devices. Capaz de simular circuitos de alta complexidade, o LTSpice conta com diversos tipos de simulação e possibilidades de modelo, visando assim oferecer uma análise detalhada e minuciosa ao usuário. A análise utilizada para a simulação do SEE é a análise transiente, no qual é obtida o comportamento temporal das formas de onda do circuito. Para simular o SEE é utilizada a excitação exponencial através de uma fonte de corrente [6]. As figuras 3 e 4 exibem, respectivamente, o circuito no qual foi utilizado o transistor PMOS 3N163, cujo modelo Schichman-Hodges foi ajustado com base em curvas do fabricante e valores já conhecidos. O transistor encontra-se polarizado na região de triodo, com  $V_{GS} = -2.6V$  e  $V_{DS} = -3.595V$ . A corrente de dreno do MOSFET e a tensão no resistor de  $50\Omega$  foram ajustadas em  $100\mu A$  e  $50 mV$  respectivamente.

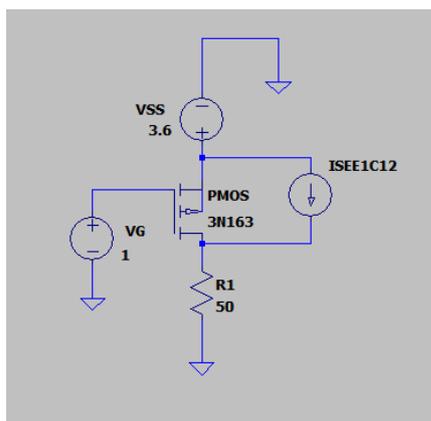


Figura 3 – Circuito utilizado para implementação de dupla exponencial, com  $V_{GS} = -2.6V$  e  $V_{DS} = -3.595V$ .

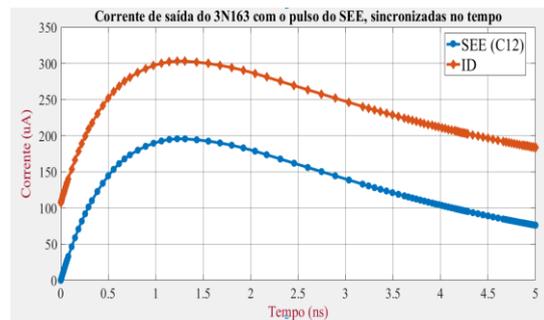


Figura 4 – Corrente de dreno no 3N163 com a incidência do sinal de SEE.

Conforme pode-se observar na figura 4 acima, a incidência do sinal de SEE ocasiona no transistor o surgimento de uma corrente cujo comportamento está correlato com o formato de onda incidente proveniente da radiação, acrescido, em seu valor inicial, do corrente de polarização intrínseca do circuito sem a radiação (no caso da simulação presente na figura 4,  $100\mu A$ ). Observa-se também, que duas das três características da dupla exponencial se mantêm, as constantes de tempo. Somente o parâmetro  $I_0$  é alterado, devido à corrente de polarização do circuito.

### 4. Conclusão

Através dos modelamentos realizados, pôde-se observar a boa correlação entre o modelo teórico de duplas exponenciais com os dados experimentais oriundos do Pelletron, com os coeficientes de Pearson na ordem de 0,85 a 0,99, possibilitando sua implementação no simulador SPICE de forma a possibilitar a análise e futuras conclusões referentes ao impacto do SEE em transistores MOS.

### 5. Referências

- [1] WANG, F.; AGRAWAL, V. D. Single event upset: An embedded tutorial. Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, p. 429–434, 2008.
- [2] BALEN, T. R. Efeitos da radiação em dispositivos analógicos programáveis (FPAs) e técnicas de proteção. UFRS, p. 206, 2010
- [3] ANDRÉ, F. Análise dos sinais da radiação ionizante de efeitos de eventos isolados (SEE) em transistores MOSFET. SICFEI, 2016
- [4] STOLF, R. G. Efeitos da radiação ionizante em dispositivos CMOS, 2016 – Exame de Qualificação para obtenção do título de Doutor apresentado no Centro Universitário da FEI
- [5] MESSENGER, G. C. A summary review of displacement damage from high energy radiation in semiconductors and semiconductor devices, 1991. RADECS 91., First European Conference on, v. 39, n. 3, p. 35–40, 1991.
- [6] MEHL, E. L. Simulação de circuitos elétricos em computadores. UFPR, 1996.

### 6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro do Centro Universitário FEI.

<sup>1</sup> Aluno de IC do Centro Universitário FEI Projeto com vigência de 12/18 a 11/19.