

MODELANDO O IMPACTO DE EFEITOS TRANSIENTES CAUSADOS POR RADIAÇÃO EM PORTAS LÓGICAS CMOS

BRUNO T. FERRAZ; HENRIQUE C. KESSLER; VINÍCIUS V. A. CAMARGO;

Universidade Federal de Pelotas – {btferraz; hckessler; vvacamargo}@inf.ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

O escalonamento tecnológico de transistores proporcionou circuitos integrados (CIs) complexos e com altas frequências de operação. Acompanhado destes benefícios, o escalonamento também levou a uma redução das capacitâncias internas dos CIs, aumentando a sensibilidade a efeitos de radiação como *Single Event Transients* (SETs), que se tornou um dos principais problemas de confiabilidade modernos (FERLET-CAVROIS, 2013). A capacidade de simular este efeito eletricamente é essencial para que sistemas tolerantes a radiação sejam projetados e tenham sua confiabilidade avaliada.

Um SET acontece quando uma partícula energizada (ion pesado, próton, nêutron, etc.) entra em contato com uma região sensível do circuito e faz com que a lógica dele seja alterada durante um determinado período. O impacto de um SET em um circuito pode ser medido precisamente através de simulações TCAD *Mixed-Mode*, mas estas têm alto custo computacional (ANDJELKOVIC, 2017). Modelos analíticos em nível de circuito são desenvolvidos visando viabilizar a realização de estudos mais amplos. O modelo proposto por Messenger (1982) é amplamente usado pela sua facilidade de implementação e calibração, mas é impreciso para simulações em que a energia da partícula é grande (SAYIL, 2016). O modelo proposto por Black (2015) busca corrigir esse problema. Neste trabalho é mostrada uma limitação deste modelo, em casos que a partícula é injetada em nós internos de uma rede CMOS.

Dito isso, neste trabalho é proposto um modelo elétrico para a simulação de SETs com complexidade semelhante aos dois modelos citados, mas sem as limitações de condição de operação mencionadas. O resto desse resumo se divide como segue. Na seção 2, é apresentado o modelo proposto. Na seção 3, são mostrados resultados de simulações SPICE baseadas nos modelos de Messenger (1982), Black (2015) e o modelo proposto neste resumo. Na seção 4, são apresentadas conclusões a respeito do modelo e possíveis aplicações nas quais a utilização dele se faz necessária.

2. METODOLOGIA

Quando um SET ocorre, acontece um processo de coleta de carga que resulta em um pulso de corrente (CUMMINGS, 2010) que pode mudar a lógica da célula. Neste trabalho é proposto um modelo em que essa corrente é descrita por duas fontes de corrente de comportamento exponencial duplo em paralelo, nomeadas I_{prompt} e I_{hold} . A função de I_{prompt} é provocar um pico de tensão no nó onde a partícula é injetada. Já I_{hold} serve para que essa tensão não ultrapasse a tensão nominal ou V_{SS} . A largura de I_{hold} é determinada pela quantidade de carga coletada (Q_{coll}). As duas fontes podem ser descritas em simulações elétricas via SPICE pela Equação (1). A Figura 1 mostra formatos de onda característicos das duas fontes.

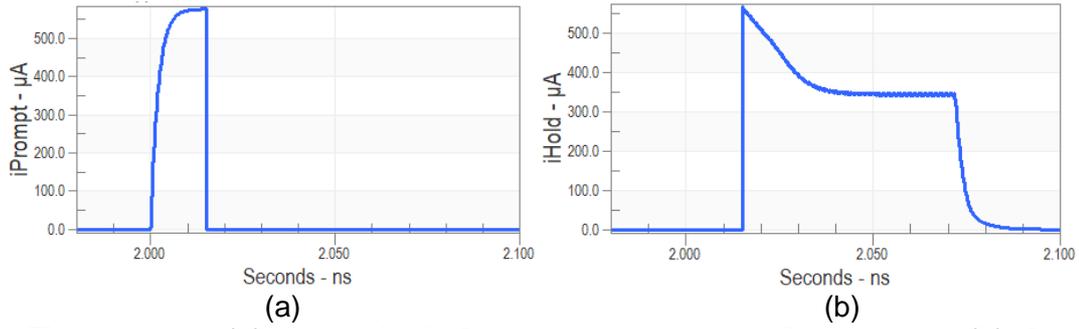


Figura 1: em (a), exemplo de I_{prompt} , que tem duração curta; em (b), I_{hold} , com duração dependente de carga coletada;

$$I(t) = \begin{cases} 0; & t < t_{d1} \\ I_p \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_{d1})}{\tau_r}\right) \right); & t_{d1} < t < t_{d2} \\ I_p \left(1 - \exp\left(-\frac{(t-t_{d2})}{\tau_f}\right) \right); & t > t_{d2} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo I_p a amplitude da onda, t_{d1} e t_{d2} os instantes de tempo de subida e descida, e τ_r e τ_f as constantes de tempo de subida e descida, respectivamente. Para I_{prompt} , se deve definir $(t_{d2,prompt} - t_{d1,prompt})$ baseado em simulações *Mixed-mode* ou dados experimentais. Já os parâmetros de tempo $\tau_{f,prompt}$ e $\tau_{r,hold}$ devem tender a zero, além de $t_{d2,prompt}$ e $t_{d1,hold}$ serem iguais, isso para que I_{hold} comece a atuar no mesmo instante de tempo que I_{prompt} acabe.

Para cada lugar de injeção da partícula em uma porta lógica, é necessária uma primeira simulação SPICE para determinar $I_{p,prompt}$ baseado em um valor de Q_{coll} . Caso Q_{coll} seja grande o bastante para que a tensão no nó afetado ultrapasse V_{DD} ou V_{SS} , é preciso outro passo de simulação para definir I_{hold} e impedir que isso aconteça. O parâmetro $I_{p,hold}$ depende da soma das correntes que entram e saem do nó afetado. $(t_{d2,hold} - t_{d1,hold})$ é dado pela Equação (2).

$$Q_{hold} = I_{peak,h} \times (\tau_{f,h} + (t_{d2,h} - t_{d1,h})) \quad (2)$$

Como o valor de Q_{prompt} é fixo, Q_{hold} pode ser definido pela equação abaixo:

$$Q_{coll} = Q_{prompt} + Q_{hold} \quad (3)$$

Neste trabalho o modelo proposto será comparado com os modelos de Messenger e Black em dois cenários críticos em uma porta NAND3. Os cenários escolhidos foram quando uma partícula atinge o nó de saída com alta energia e quando um nó interno é atingido. Os resultados serão obtidos através de simulações SPICE baseadas na tecnologia *Predictive Technology Model (PTM)* 90 nm. Para se obter um ambiente de simulação mais realista, será utilizada a convenção de *Fan-Out 4*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, o modelo apresentado é comparado com os outros citados anteriormente. A figura 2 apresenta esquemáticos da NAND3 baseados em cada um dos modelos considerados no estudo de caso.

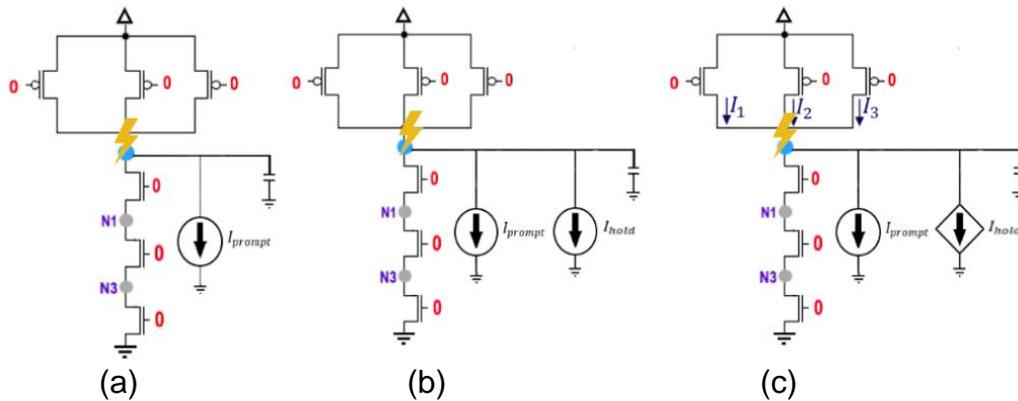


Figura 2: em (a), esquemático de uma NAND3 com o modelo para geração de SET proposto por Messenger; em (b), modelagem proposta por Black; em (c), modelagem proposta neste trabalho.

Na Figura 2, é considerado o caso em que uma partícula energizada atinge o nó de saída da célula. Desse modo, a incidência da partícula faz com que o capacitor da saída seja descarregado por um período. Em (a), a modelagem se baseia em apenas uma fonte de corrente exponencial dupla. Em (b), são duas fontes de corrente exponenciais duplas independentes. Já em (c), são duas fontes exponenciais duplas, mas I_{hold} é controlada pelas correntes I_1 , I_2 e I_3 .

A Figura 3 mostra o resultado de simulações SPICE baseadas nas três modelagens consideradas neste resumo. O valor para Q_{coll} escolhido foi $25 fC$.

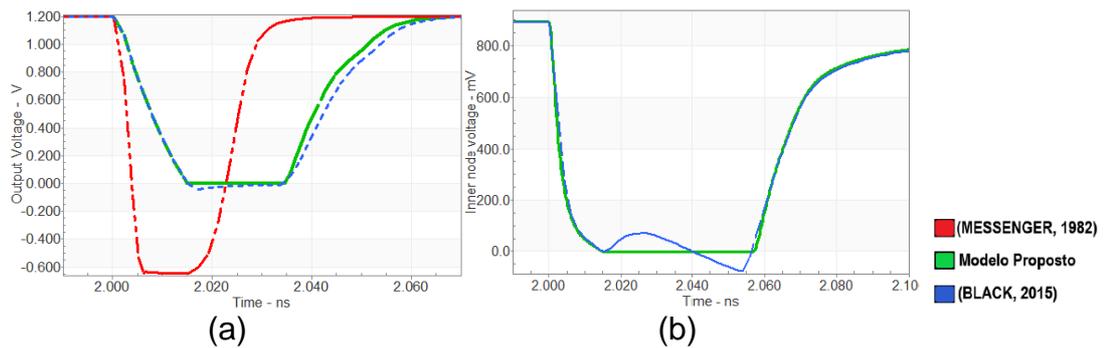


Figura 3: (a) e (b) mostram pulsos de tensão em nós da NAND3 no intervalo de atuação do SET. Em (a), o nó afetado é a saída; em (b), nó interno N1.

No caso (a) fica evidente que o modelo de Messenger não é adequado para valores altos de Q_{coll} (no caso, $25 fC$). Enquanto isso, os outros dois modelos garantem o efeito de saturação esperado, por consequência da atuação de I_{hold} .

Já no caso (b), em que a partícula ataca um nó interno da célula, o modelo de Black não garante o efeito de saturação. Sendo assim, o modelo se mostra inadequado para simulações que considerem nós internos. Em contrapartida, a modelagem proposta consegue obter o resultado esperado. Isso acontece porque

a amplitude de I_{hold} é controlada pela soma das correntes que atuam no nó, enquanto o modelo de Black considera esse parâmetro como constante.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposto um modelo analítico para simular o efeito de SETs em portas lógicas CMOS, que pode ser replicado para outras tecnologias de transistores utilizando apenas simulações SPICE. Os resultados gerados a partir do estudo de caso sugerem que os modelos de Messenger e Black possuem limitações, gerando resultados incorretos quando a partícula atinge nós intermediários. O modelo proposto aprimora o modelo de Black permitindo a análise em qualquer nó de um circuito CMOS digital. O modelo proposto viabiliza o estudo da sensibilidade de portas lógicas com *stack* de transistores maior do que as convencionais, possibilitando uma medição do real impacto de SETs em portas lógicas complexas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ferlet-Cavrois, V., Massengill, L. W., & Gouker, P. (2013). Single event transients in digital CMOS—A review. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60(3), 1767-1790.

Andjelkovic, M., Ilic, A., Stamenkovic, Z., Krstic, M., & Kraemer, R. (2017, October). An overview of the modeling and simulation of the single event transients at the circuit level. In *2017 IEEE 30th International Conference on Microelectronics (MIEL)* (pp. 35-44). IEEE.

Messenger, G. C. (1982). Collection of charge on junction nodes from ion tracks. *IEEE Transactions on nuclear science*, 29(6), 2024-2031.

Sayil, S. (2016). **Soft error mechanisms, modeling and mitigation**. Springer International Publishing.

Black, D. A., Robinson, W. H., Wilcox, I. Z., Limbrick, D. B., & Black, J. D. (2015). Modeling of single event transients with dual double-exponential current sources: Implications for logic cell characterization. *IEEE Transactions on nuclear science*, 62(4), 1540-1549.

Cummings, D. J. (2010). **Enhancements in CMOS device simulation for single-event effects**. University of Florida.

W. Zhao, Y. Cao, "New generation of Predictive Technology Model for sub-45nm early design exploration," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53, no. 11, pp. 2816-2823, November 2006.