

ANÁLISE DO IMPACTO DO EFEITO DE BTI EM CIRCUITOS OSCILADORES EM ANEL

MAIRON SCHNEIDER CARDOSO¹;
ALAN CARLOS JUNIOR ROSSETTO²

¹Universidade Federal de Pelotas – maironschneider@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – alan.rossetto@inf.ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica ocorrida majoritariamente no último século é em grande parte uma resposta do avanço tecnológico na indústria de microeletrônica. Novos materiais e técnicas de processo, possibilitaram conceber dispositivos eletrônicos com nível superior de desempenho e otimização de consumo. O principal responsável por esse ganho de performance e economia de energia foi o processo de miniaturização dos dispositivos conhecidos como transistores.

Os transistores são construídos de um material semicondutor, geralmente silício ou germânio que tem como propósito amplificar a corrente elétrica que passa sobre ele ou impedir a passagem da mesma corrente elétrica. Atualmente a indústria é dominada pelos dispositivos denominados transistores de campo de metal óxido semicondutor (MOSFET). Transistores MOSFETs podem ser de dois tipos, sendo eles o transistor do tipo P ou tipo N (PMOS e NMOS). A estrutura básica da tecnologia MOSFET adota metais condutores nos seus terminais, onde nesse caso, o terminal denominado porta é responsável por determinar a passagem ou não de corrente entre os terminais denominados dreno e fonte, além disso, o terminal de porta é separado do material semicondutor do tipo P ou N por uma camada dielétrica, como o dióxido de silício, que oferece o isolamento do terminal de porta com o semicondutor. A interface entre semicondutor e dielétrico não é totalmente isenta de defeitos e tais defeitos (armadilhas) podem eventualmente implicar na captura de portadores, afetando o canal de fluxo de corrente do dispositivo. Esse efeito é ainda mais evidente na presença de maior temperatura no dispositivo (resultado do efeito Joule), ou na presença de campo elétrico intenso, ou ambos, devido a essas características esse efeito recebe o nome de *Bias Temperature Instability* ou BTI.

O efeito de BTI foi observado pela primeira vez em 1966, no entanto, a perda de confiabilidade não era significativa, porém, com a redução periódica do tamanho dos dispositivos e otimização do consumo de potência, as armadilhas impactaram cada vez mais, tornando-se extremamente problemáticas (MIURA, 1966), uma vez que, o impacto em um transistor com dimensões menores é mais significativo quando comparamos com um outro transistor com uma maior razão de aspecto, visto que, dispositivos de tamanhos reduzidos possuem como característica o aumento da intensidade do campo elétrico quando relacionamos com um transistor de escala maior. O BTI é causado pelo aprisionamento de portadores em ligações quebradas no dielétrico, entretanto, o efeito de BTI também é dependente do ciclo de trabalho (*duty factor*), tal dependência é observada através dos fenômenos de recuperação ou relaxação. O BTI é caracterizado por uma etapa de estresse, isto é, quando o circuito está sobre tensão e as armadilhas estão capturando portadores, nessa etapa, a tensão de limiar do transistor (tensão necessária para garantir o funcionamento do transistor) gradativamente precisa ser incrementada para

garantir o funcionamento linear do circuito. Outra etapa é denominada relaxação que é quando o estresse é diminuído, fazendo com que as armadilhas liberem os portadores. O fenômeno de relaxação ocorre quando a tensão de estresse é retirada ou diminuída, fazendo com que a tensão limiar do transistor seja parcialmente recuperada. O efeito de BTI afeta tanto transistores PMOS quanto NMOS, entretanto, seu impacto é mais relevante quando tratamos de transistores PMOS, recebendo o nome de *Negative Bias Temperature Instability* (NBTI) (SCHRODER, 2007).

O impacto do efeito de BTI é visto tanto em circuitos analógicos, quanto em circuitos digitais e mistos, dentre estes, podemos destacar seu impacto nos osciladores em anel. Osciladores em anel são construídos a partir de células inversoras que utilizam transistores. Osciladores usualmente são empregados em *Phase-Locked Loops* (PLL) que é um sistema de controle amplamente utilizado para síntese de frequência, modulação de frequência, demodulação e geração de *clock*. O PLL faz com que o haja sincronia entre um sinal de referência (entrada) e um sinal de realimentação vindo dos osciladores. Portanto, os osciladores tem um importante papel para garantir a sincronia de um determinado sistema de controle, e para isso, é imprescindível garantir o funcionamento interrupto do mesmo.

Por essa razão, a avaliação quantitativa acerca dos efeitos de NBTI em circuitos amplamente difundidos na bibliografia é de extrema relevância para reconhecer os impactos da degradação de maneira a obter o resultado empírico em circuitos e compará-los com resultados teóricos já explorados na literatura. Deste modo, o objetivo do presente estudo é quantificar o impacto da atividade de armadilhas na frequência de saída de uma topologia de um oscilador em anel através de um estudo conduzido por simulação elétrica via software.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como base a simulação de dispositivos através de uma ferramenta de simulação de circuitos denominada NGSPICE. O NGSPICE é uma ferramenta de código aberto que permite que sejam descritos circuitos em linguagem SPICE, além disso, é possível que novas especificações de projetos sejam consideradas nas simulações por meio da edição do código fonte do simulador elétrico, adicionando equações que descrevem diferentes efeitos de degradação. Deste modo, a quantização do efeito de BTI em transistores é feita levando em consideração a metodologia determinística para avaliar o impacto de BTI em transistores (FURTADO, 2017), que emprega as distribuições estatísticas que avaliam a probabilidades de uma *trap* estar ocupando uma carga no dielétrico ou na interface do dielétrico. Essa metodologia permite com que seja possível avaliar o impacto de um determinado circuito estipulando um determinado tempo de estresse, sem ter que efetivamente manter o circuito ligado por várias horas. Portanto, para certificar-se que o modelo de transistor empregado na simulação é compatível com o simulador, foi utilizada a tecnologia de 50nm da HP, cuja razão de aspecto respeita a curva de consumo e frequência máxima, encontrando um valor ideal para garantir a escolha mais eficiente. Tal extração foi feita aplicando uma tensão de alimentação igual a 1 Volt em um oscilador em anel com 11 estágios.

Para mensurar o efeito de BTI, foram executadas um conjunto de simulações, visando emular diferentes tempos de estresse (em escala logarítmica) em um circuito estudo de caso, onde para cada tempo de estresse, eram simulados um conjunto de 10 circuitos nas mesmas condições, obtendo 190 valores distintos de

períodos e consequentemente frequência, na tentativa de obter um valor médio com um menor erro associado.

O critério de seleção para escolha da topologia de oscilador em anel controlado por tensão, que será usado como base para o estudo de casos, foi feito levando em consideração as métricas de emprego na indústria, uma vez que os osciladores implementados através da topologia *current starved* são utilizados como métrica para estimar o impacto de BTI na indústria de semicondutores, além disso, por ser uma topologia clássica, é possível traçar paralelos bastante sólidos, visto que o conhecimento acerca desse tipo de circuito na área científica é vasto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através das simulações permitem-nos compreender o impacto do efeito de BTI em termos da degradação da frequência do oscilador em anel. Através das simulações foi possível observar transições abruptas em relação a frequência de saída do oscilador em anel, como mostrado na Figura 2, as quais são devidas ao processo de captura/emissão proveniente da existência de armadilhas. Como o BTI é um fenômeno que é previsto pela estatística, diferentes simulações estimam as possibilidades de degradação pelo efeito de BTI, como é possível observar através das amostras subsequentes a 190, onde o circuito é afetado de uma forma diferente, quando comparados às suas simulações anteriores ou posteriores, além disso, observamos que, apesar de tempos curtos de estresse o circuito ainda será afetado pelo BTI.

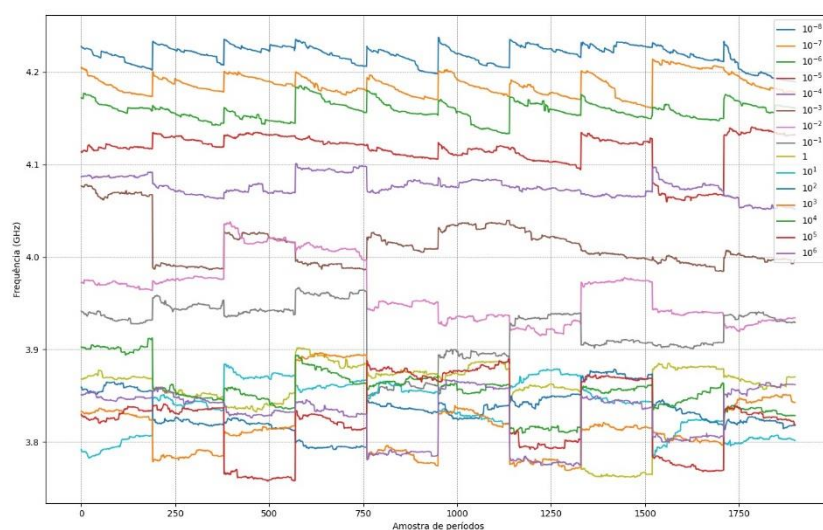


Figura 1: Simulação de circuitos idênticos para diferentes tempos de estresse. Onde as variações abruptas de frequência do circuito são reflexos do comportamento da armadilha.

Outra característica do simulador é possibilitar estudar a degradação do circuito após um longo período deste em funcionamento, sem a necessariamente de testar o circuito por grandes períodos de tempo. Tal fator pode ser observado quando analisamos a literaturas que abrangem circuitos osciladores e BTI, respeitando a percentagem média de degradação do circuito (KISHIDA, 2019). As amostras recolhidas através das simulações permitem que seja possível prever a degradação da frequência em osciladores em função do tempo, no qual o circuito está estressado. A frequência média demonstra que o efeito é consideravelmente severo para pequenos tempos de estresse (Figura 3), entretanto, após

efetivamente estressado, vemos que a variação do circuito tende a uma média sólida.

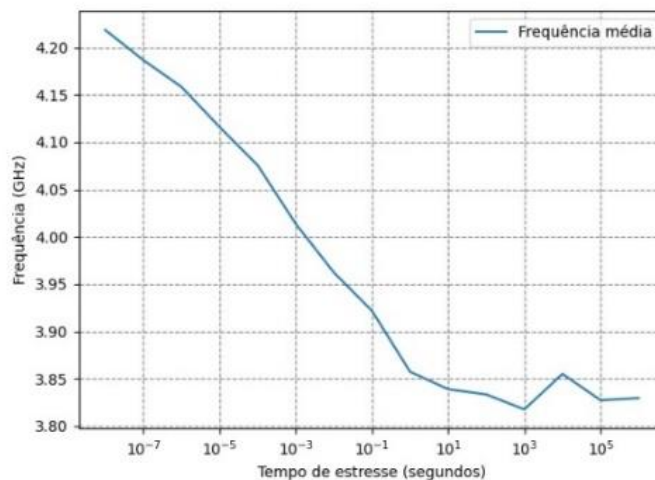


Figura 2: Impacto médio da degradação de um oscilador em anel em termos de frequência.

Portanto, a partir da comprovação do funcionamento coerente do simulador, é possível estimar um número maior de simulações, além disso, com a ambição de dimensionar o efeito de BTI empiricamente utilizando-se de métodos estatísticos, como o de Monte Carlo, por exemplo, será possível em trabalhos futuros prever o impacto direto nesse tipo de circuito assim como expandir o estudo para outras topologias de circuitos.

4. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho conseguimos concluir que o efeito de BTI afeta negativamente a frequência de oscilação de osciladores em anel, a atividade de chaveamento de armadilhas, provoca variações abruptas na frequência instantânea do circuito, o que é indesejável e que pode comprometer a confiabilidade do circuito ou do sistema no qual ele está inserido. Nesse contexto, foi observado também que o efeito de BTI se torna severo conforme maior tempo de estresse, isto é, maior tempo em que o circuito está funcionando e a partir de 10^0 segundos a degradação aparenta atingir um patamar de estabilidade.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Y. MIURA, Y. MATUKURA, "Investigation of Silicon-Silicon Dioxide Interface Using MOS Structure," in Japanese Journal of Applied Physics, v.5, p. 180, 1966. doi: 10.1143/jjap.5.180.

SCHRODER, D.K. et al., "Negative bias temperature instability: What do we understand?", Microelectronics Reliability, v.47, n.6, p. 841-852, Junho 2007.

R. Kishida, T. Asume, J. Furuta and K. Kobayashil, "Extracting BTI-induced Degradation without Temporal Factors by Using BTI-Sensitive and BTI-Insensitive ring Oscillators," 2019 IEEE 32nd International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS), 2019, pp. 24-27, doi: 10.1109/ICMTS.2019.8730967.