

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
LEONARDO NAVARENHO DE SOUZA FINO

**EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X NO SOI nMOSFET COM  
GEOMETRIA DE PORTA OCTOGONAL**

São Bernardo do Campo

2017

LEONARDO NAVARENHO DE SOUZA FINO

**EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X NO SOI  $n$ MOSFET COM  
GEOMETRIA DE PORTA OCTOGONAL**

Tese apresentada ao Centro Universitário FEI,  
como parte dos requisitos necessários para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Salvador  
Pinillos Gimenez.

São Bernardo do Campo

2017

Fino, Leonardo Navarenho de Souza.

EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X NO SOI  
nMOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA OCTOGONAL / Leonardo  
Navarenho de Souza Fino. São Bernardo do Campo, 2017.

206 f. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Salvador Pinillos Gimenez.

1. LCE / PAMDLE / DEPAMBBRE. 2. Dose Total Ionizante. 3.  
Geometria de Porta Octogonal. 4. Tolerância as Radiações Ionizantes. I.  
Gimenez, Salvador Pinillos, orient. II. Título.

**Aluno:** Leonardo Navarenho de Souza Fino

**Matrícula:** 512209-8

**Título do Trabalho:** Efeitos das radiações ionizantes de raios-X no SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal.

**Área de Concentração:** Dispositivos Eletrônicos Integrados

**Orientador:** Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

**Data da realização da defesa:** 07/02/2017

**ORIGINAL ASSINADA**

Avaliação da Banca Examinadora

---

---

---

---

---

São Bernardo do Campo, 07 / 02 / 2017.

<b>MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA</b>	
Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez	Ass.: _____
Prof. Dr. Renan Trevisoli Doria	Ass.: _____
Prof. Dr. Roberto Baginski Batista Santos	Ass.: _____
Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Carmen Cecília Bueno	Ass.: _____
Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Carolina Davanzo Gomes dos Santos	Ass.: _____

A Banca Examinadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

**VERSÃO FINAL DA TESE**

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS  
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho a todos aqueles que estão  
em busca da verdade...

## AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço ao Grande Arquiteto do Universo, por nos dar a oportunidade de aperfeiçoamento.

Ao orientador e amigo, professor Doutor Salvador Pinillos Gimenez, por acreditar e lutar para que um curso “*strictu sensu*” de Mestrado e, principalmente, de Doutorado, fossem realizados por pessoas inseridas nas empresas brasileiras, na tentativa, mesmo que a longo prazo, de viabilizar as parcerias entre a academia e a indústria. Caro Prof. Salvador, muito obrigado por acreditar não só no MOSFET do tipo Octogonal, mas também em minha capacidade, mesmo que em alguns momentos limitada, mas que, com sua ajuda, foi equilibrada. Parabéns pelo respeito, ética e preocupação com o nível de formação dos seus orientandos, pois sei que para você nós somos mais do que meros alunos, somos praticamente filhos, e que levaremos as sementes da pesquisa para outros lugares.

Aos professores Dr. Marcelo Antonio Pavanello, Dr. Carlos Eduardo Thomas, Dr. Agenor de Toledo Fleury, Dr. Marcelo Bellodi, Dr. Renato Camargo Giacomini, Dra. Paula Ghedini Der Agopian, Dra. Michelly de Souza, Dr. Rodrigo Trevisoli Doria, Dr. Renan Trevisoli Doria, Dr. Paulo Eduardo Batista de Mello, Dra. Marcilei Aparecida Guazzelli da Silveira e Dr. Rodrigo Magnabosco, pelas excelentes “aulas” em salas, laboratórios, corredores e durante alguns cafezinhos. Ao professor Denis Flandre e engenheiro Christian Renaux da *Université Catholique de Louvain* (UCL) pelos valorosos ensinamentos durante os muitos *papers* que desenvolvemos em conjunto.

À Dra. Carmen Cecília Bueno e ao Dr. Victor Sonnenberg, por contribuírem profundamente em minha banca de qualificação de doutorado.

A minha querida e amada esposa e também doutoranda, Patrícia Fino, pelo amor, carinho e incondicional compreensão pelas minhas ausências. A minha querida e amada filha, Maria Eduarda, que com seu um ano e pouquinho, possa não ter sentido a minha ausência.

Aos amigos da secretaria, Adriana, Ricardo e Márcia, pela excepcional competência na condução de vossas atividades.

Aos meus pais Antonio Eduardo de Souza e Solange Isabel Navarenho de Souza, pelo incentivo e amor. Aos meus irmãos Vinícius, Rafael e Felipe, pela participação indireta neste trabalho, apoiando e discutindo em momentos importantes.

A General Motors do Brasil, pelo apoio a concretização desta jornada.

Aos amigos de graduação, pós-graduação, mestrado e doutorado, pelo respeito e contribuição a minha formação. A todos os irmãos...

## RESUMO

Este trabalho explora as aplicações analógicas e digitais de leiautes não convencionais para Transistores de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors*, MOSFETs) fabricados na tecnologia Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) sob a ação das radiações ionizantes de raios-X. Neste sentido, é realizado um estudo comparativo experimental dos efeitos das Doses Ionizantes Totais (*Total Ionizing Dose*, TID) nos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal (*Octogonal SOI nMOSFET*, OSM), convencional retangular (*Conventional SOI nMOSFET*, CSM) e hexagonal (*Diamond SOI nMOSFET*, DSM). Todos os SOI nMOSFETs foram projetados pelo grupo de pesquisa em MOSFETs avançados do Centro Universitário FEI e fabricados com a tecnologia SOI de 0,5  $\mu\text{m}$  da Universidade Católica de Louvain. O OSM, devido a sua geometria de porta octogonal, produz um campo elétrico longitudinal superior ao do CSM equivalente, devido aos Efeitos de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE) e devido ao efeito da Associação Paralela de MOSFETs com Diferentes Comprimentos de Canal (*Parallel Connection of MOSFETs with Different Channel Length Effect*, PAMDLE). O OSM também é capaz de minimizar a influência dos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro em ambientes de radiações ionizantes de raios-X, pois as linhas de campo elétrico longitudinal são curvas nessas regiões. Este efeito foi intitulado de Desativação dos MOSFETs Parasitários das Regiões de Bico de Pássaro (*Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect*, DEPAMBBRE). A configuração dos OSMs que obteve os melhores resultados após os efeitos da TID em todas as condições de polarização dos MOSFETs durante os procedimentos de raios-X, foi a com fator de corte "c" de 25% e ângulo " $\alpha$ " de 53,1°. Considerando-se as polarizações dos SOI nMOSFETs durante o procedimento de irradiação de raios-X, na condição passiva, o OSM obteve resultados superiores ou similares ao do CSM equivalente em 92% dos parâmetros analisados. Ao considerar a polarização de estado ligado (condição na qual potencializa-se o campo elétrico vertical), o OSM obteve resultados superiores e/ou similares ao do CSM equivalente em 83% dos parâmetros analisados. Ao considerar a polarização de estado desligado (condição na qual potencializa-se o campo elétrico longitudinal), o OSM obteve resultados superiores e/ou similares ao do CSM equivalente em 75% dos parâmetros analisados. Estes resultados sugerem a aplicação do OSM principalmente para aplicações de circuitos integrados (CIs) Metal-Óxido-Semicondutor Complementar (CMOS) analógicos. As tolerâncias dos parâmetros elétricos em relação aos efeitos da TID dos OSMs em relação aos CSMs equivalentes diminuem à medida que o campo elétrico longitudinal dos OSMs são intensificados em função das condições de polarização adotadas durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, sendo o pior caso a condição de polarização de estado desligado. Isto é justificado devido aos efeitos LCE e PAMDLE presentes nos OSMs. Mesmo assim o OSM continua sendo mais tolerante aos efeitos da TID em decorrência das radiações ionizantes de raios-X para todas as condições de polarização estudadas.

Palavras-chave: LCE. PAMDLE. DEPAMBBRE. Dose total ionizante. Geometria de porta octogonal. Tolerância as radiações ionizantes.

## ABSTRACT

This work explores the analog and digital applications of unconventional layouts for Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFETs) manufactured in Silicon-On-Insulator Technology (SOI) under a X-ray ionizing radiation effects. On this way, an experimental comparative study of the effects of Total Ionizing Doses (TID) on the main electrical parameters and merit figures of the SOI nMOSFETs with octagonal (Octagonal SOI nMOSFET, OSM), conventional rectangular (Conventional SOI nMOSFET, CSM) and (Diamond SOI nMOSFET, DSM). All SOI nMOSFETs were designed by the Advanced MOSFETs research group at FEI University Center and manufactured using 0.5  $\mu\text{m}$  SOI technology from the Catholic University of Louvain. OSM, due to its octagonal gate geometry, produces a higher longitudinal electric field to the equivalent CSM due to the Longitudinal Corner Effects (LCE) and due to the effect of the *PARallel Conection of MOSFETs with Different Channel Lenght Effect* (PAMDLE). The OSM is also able to minimize an influence of parasitic transistors from the bird's beak regions in X-ray ionizing radiation environments, since the longitudinal electric field lines are curved in these regions. This effect was titled *Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect* (DEPAMBBRE). The configuration of the OSMs that obtained the best results after the effects of the TID in all bias conditions of the MOSFETs during the X-ray procedure, was the device with a cut factor "c" equal 25% and angle " $\alpha$ " equal 53, 1°. Considering the different bias of the SOI nMOSFETs during the X-ray irradiation procedure, in the passive or floating condition, the OSM obtained higher or similar results to the CSM equivalent in 92% of the parameters analyzed. Considering the on state bias (condition that potentiates the vertical electric field), OSM obtained higher or similar results in 83% of the analyzed parameters than the equivalent CSM. Furthermore, adopting the off-state bias (condition that maximizes the horizontal electric field), OSM obtained higher or similar results in 75% of the analyzed parameters than the equivalent CSM. These results suggest the application of OSM mainly for applications of analog Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) integrated circuits (ICs). The tolerance of the OSM considering each electrical parameters in function of TID when compared with equivalent CSM decreases as the longitudinal electric field of the OSM is intensified as a function of the bias condition adopted during x-ray procedures. The worst case is the off-state condition. This is justified due to LCE and PAMDLE effects found in the OSM structure. Even so, the OSM continues to be more tolerant to the TID effects due to x-ray radiation than the equivalent CSM considering all bias conditions.

Keywords: LCE. PAMDLE. DEPAMBBRE. Total ionizing dose. Octagonal gate design. Ionizing radiation robustness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Foto ampliada do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal.....	28
Figura 2 - Representação simplificada da estrutura de MOSFETs com tecnologia convencional ( <i>Bulk</i> ), SOI PD e SOI FD .....	33
Figura 3 - Representação dos transistores parasitários em um SOI MOSFET.....	35
Figura 4 - Vista superior do SOI MOSFET do tipo Diamante.....	36
Figura 5 - Estrutura 3D do SOI MOSFET do tipo Octogonal.....	38
Figura 6 - Representação do leiaute do SOI MOSFET do tipo Octogonal .....	40
Figura 7 - Representação do LEFs presentes no SOI MOSFET do tipo Octogonal .....	40
Figura 8 - Representação dos componentes vetoriais dos campos elétricos longitudinais do SOI nMOSFET do tipo octogonal, sem interação (a) e com interação entre elas (b) obtidas por simulação numérica tridimensional .....	41
Figura 9 - Região de porta do SOI nMOSFET do tipo octogonal, dividida em infinitas partes (a), e o seu devido circuito elétrico equivalente (b) .....	43
Figura 10 - Representação da infinitesimal largura de canal de uma geometria octogonal ....	44
Figura 11 - Representação do campo elétrico longitudinal em uma das regiões de bico de pássaro de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular (a), de um SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (b), e uma vista ampliada de uma das regiões de bico de pássaro de um SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (c).....	45
Figura 12 - Primeira e segunda derivada da curva $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ , ilustrando a obtenção da tensão de limiar, considerando-se $V_{DS}$ baixo.....	49
Figura 13 - Representação de duas curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GT}$ , de um OSM e um CSM em escala logarítmica, onde é possível obter os valores de suas inclinações de sublimiar .....	51
Figura 14 - Representação da curva $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ para obtenção de $I_{ON}$ e $I_{OFF}$ : (a) em escala linear e (b) em escala logarítmica .....	54
Figura 15 - Gráfico ilustrativo contendo a representação de um chaveamento de um MOSFET ideal, um chaveamento de um MOSFET ( <i>Bulk</i> ) e o chaveamento de um SOI MOSFET .....	55
Figura 16 - Ilustração da operação linear de um SOI MOSFET de canal $n$ na região Triodo considerando-se três valores de $V_{GS}$ ( $V_{GS1}$ , $V_{GS2}$ e $V_{GS3}$ , onde $V_{GS3} > V_{GS2} > V_{GS1}$ ) .....	56
Figura 17 - Comportamento na região de estrangulamento ( <i>pinch-off</i> ) do canal de um MOSFET para $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$ (a) e para $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ (b) .....	58

Figura 18 - Método de extração da tensão Early pela extrapolação da região linear da região de saturação da curva $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ de um MOSFET até o cruzamento com o eixo das abscissas ( $V_{DS}$ ) .....	59
Figura 19 - Exemplo de uma curva de $g_m/I_{DS}$ em função de $I_{DS}/(W/L)$ de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular .....	60
Figura 20 - Curvas do $A_V$ e da $f_T$ em função de $I_{DS}/(W/L)$ de um MOSFET.....	62
Figura 21- Representação do cinturão das radiações ionizantes do planeta Terra .....	65
Figura 22 - Raios cósmicos terrestre .....	66
Figura 23 - Indicação da SAA (a), e da trajetória do telescópio espacial Hubble (b) .....	67
Figura 24 - Classificação dos efeitos das radiações ionizantes espaciais em função de suas respectivas fontes irradiantes.....	69
Figura 25 - Efeitos das radiações ionizantes em função do material alvo e da energia do fóton .....	71
Figura 26 - Efeitos das radiações ionizantes no óxido de porta .....	72
Figura 27 - Influência das radiações ionizantes nas características elétricas do MOSFET, devido às cargas positivas armadilhadas no óxido de porta (a), devido às cargas positivas armadilhadas na interface $SiO_2$ que é a região do silício onde é formado o canal do MOSFET (b) .....	73
Figura 28 - Representação do armadilhamento de cargas positivas nas regiões de bico de pássaro .....	75
Figura 29 - Orientação do campo elétrico em um SOI nMOSFET em função das condições de polarização utilizadas durante os procedimentos de radiações ionizantes: regime passivo “floating”(a), condição de estado ligado “on-state” (b), condição de estado desligado “off-state” (c) .....	76
Figura 30 - Imagens dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal considerando os diferentes fatores de corte e ângulos.....	79
Figura 31 - Imagem do CI CMOS fabricado na UCL com os diferentes OSMs, DSMs e CSMs equivalentes que foram utilizados para a realização deste estudo comparativo experimental .	81
Figura 32 - Esquema elétrico do encapsulamento da pastilha.....	82
Figura 33 - Equipamentos utilizados para as caracterizações elétricas dos SOI nMOSFETs: microprovador Cascade Microtech (a) e analisador de dispositivos semicondutores modelo 4200, da Keithley Instruments Inc. (b).....	83
Figura 34 - Analisador de dispositivos semicondutores portátil da Keithley modelo 2636A (a), e o acessório de teste (b).....	84

Figura 35 - Difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 (a) e equipamento de aquisição de dados (computador com programa dedicado) (b).....	87
Figura 36 - Difratômetro: vista interna (a), e o posicionamento do dispositivo de teste contendo o CI CMOS para ser irradiado (b).....	88
Figura 37 - Resultados experimentais dos comportamentos das $V_{THS}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e desligado, (valores absolutos, Fig. 37.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 37.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 01 .....	93
Figura 38 - Resultados experimentais dos comportamentos das $V_{THS}$ em função das TIDs de raios-X decorrentes das radiações ionizantes de raios-X para o OSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos, Fig. 38.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 38.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 2 .....	97
Figura 39 - Resultados experimentais dos comportamentos das $V_{THS}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 39.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 39.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 3 .....	99
Figura 40 - Resultados experimentais dos comportamentos das $V_{THS}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 40.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 40.b, d), respectivamente e considerando o Grupo 4.....	101
Figura 41 - Resultados experimentais dos comportamentos das $V_{THS}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 41.a, e c valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 41.b e d), respectivamente e considerando o Grupo 5.....	103
Figura 42 - Resultados experimentais do comportamento das SSs em função das doses TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 42.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores da condição de “Pré-rad”, Fig. 42.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 1 .....	106
Figura 43 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TIDs de raios-X para os OSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado,	

(valores absolutos, Fig. 43.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 43.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 2.....	109
Figura 44 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TIDs de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 44.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 44.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 3 .....	111
Figura 45 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TID de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 45.a e c valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 45.b e d), respectivamente e considerando o Grupo 4 .....	113
Figura 46 - Resultados experimentais do comportamento das SSs em função das TIDs de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 46.a e c e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 46.b e d), respectivamente e considerando Grupo 5.	115
Figura 47 - Resultados experimentais do comportamento das curvas da $g_m/(W/L)$ em função da tensão de porta, considerando as TIDs de raios-X para os, DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva ( <i>floating</i> ) (Fig. 47.a.), de estado ligado, (Fig. 52.b.) e de estado desligado, (Fig. 52.c.), respectivamente .....	117
Figura 48 - Resultados experimentais do comportamento das $g_{mMAXs}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 48.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 48.b, d, f), respectivamente .....	119
Figura 49 - Resultados experimentais do comportamento das $g_{mMAX}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do fator de corte “c”, Fig. 49.a, c, e., e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 49.b e f), respectivamente .....	123
Figura 50 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{ON}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 50.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 50.b, d, f), respectivamente, considerando $V_{GS}=V_{DS}=4V$ em todos os casos .....	127

Figura 51 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{ON}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 51.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 51.b e f), respectivamente, considerando $V_{DS}=V_{GS}= 4V$ em todos os casos .....	130
Figura 52 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{OFF}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 52.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 52.b, d, f), respectivamente .....	133
Figura 53 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{OFF}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 53.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 53.b, f), respectivamente, considerando $V_{DS}=+4V$ .....	137
Figura 54 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{LEAK}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos: Fig. 54.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 54.b, d, f), respectivamente, considerando $V_{DS}= 4 V$ e $V_{GS}= -3,5 V$ .....	140
Figura 55 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{LEAK}/(W/L)$ em função das doses TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 55.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 55.b, f), respectivamente, considerando $V_{DS} = 4V$ e $V_{GS} = -3,5V$ .....	143
Figura 56 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{ON}/I_{OFF}$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 56.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 56.b, d, f), respectivamente .....	146
Figura 57 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{ON}/I_{OFF}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 57.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 57.b, f), respectivamente .....	149
Figura 58 - Resultados experimentais do comportamento das $I_{DS}/(W/L)$ vs $V_{DS}$ em função das TIDs de raios-X dos DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 58. a), de estado ligado, (Fig. 58.b) e de estado desligado, (Fig. 58.c), considerando um $V_{GS}=1 V$ em todos os casos .....	152

Figura 59 - Resultados experimentais do comportamento das $R_{ONs}$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 59.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 59.b, d, f), respectivamente, considerando um $V_{GS}=1$ V em todos os casos.....	154
Figura 60 - Resultados experimentais do comportamento das $R_{ONs}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 60.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 60.b, f), respectivamente, considerando um $V_{GS}=1$ V .....	157
Figura 61 - Resultados experimentais do comportamento das $V_{EAs}$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos, Fig. 61.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 61.b, d, f), respectivamente, considerando um $V_{GS}=1$ V.....	160
Figura 62 - Resultados experimentais do comportamento das $V_{EAs}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 62.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 62.b, f) respectivamente, considerando um $V_{GS}=1$ V .....	163
Figura 63 - Resultados experimentais do comportamento da $g_m/I_{DS}$ vs $I_{DS}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM, e CSM, nas condições de polarizações passiva (Fig. 63.a), de estado ligado, (Fig. 63.b) e de estado desligado, (Fig. 63.c), considerando um $V_{GS}=0,1$ V .....	166
Figura 64 - Resultados experimentais do comportamento das $g_m/I_{DS}$ vs $I_{DS}/(W/L)$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, nas condições de polarizações passiva (Fig. 64.a), de estado ligado, (Fig. 64.b) e de estado desligado, (Fig. 64. c), considerando um $V_{GS}=0,1$ V.....	168
Figura 65 - Curvas experimentais do comportamento das $f_T$ considerando as TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 65.a), de estado ligado, (Fig. 65.b) e de estado desligado, (Fig. 65.c) .....	171
Figura 66 - Resultados experimentais do comportamento das $f_{T(Max)}$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 66.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 66.b, d, f), respectivamente, considerando um $V_{DS}=1$ V em todos os casos.....	173

Figura 67 - Resultados experimentais do comportamento das $f_{Ts(max)}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 67.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 67.b e f), respectivamente .....	176
Figura 68 - Resultados experimentais do comportamento das $A_{Vs}$ considerando as TIDs de raios-X para os SOI DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 68.a), de estado ligado, (Fig. 68.b) e de estado desligado, (Fig. 68.c) .....	179
Figura 69 - Resultados experimentais do comportamento das $A_{Vs}$ em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM, todos operando na inversão forte, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 69.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.b, para $I_{DS}=1 \times 10^{-4} A$ ), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 69.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.d, para $I_{DS}=6 \times 10^{-5} A$ ) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 69.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.f, para $I_{DS}= 1 \times 10^{-4} A$ ), considerando $V_{DS} = 1 V$ .....	181
Figura 70 - Resultados experimentais do comportamento das $A_{Vs}$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, todos operando na inversão moderada, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 70.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.b, para $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ ), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 70.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.d, para $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ ) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 70.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.f, para $I_{DS}= 1 \times 10^{-7} A$ ) .....	184
Figura 71 - Resultados experimentais do comportamento das $A_V$ em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, todos operando na inversão fraca, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 71.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.b, para $I_{DS}=1 \times 10^{-9} A$ ), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 71.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.d, para $I_{DS}=1 \times 10^{-9} A$ ) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 71.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.f, para $I_{DS}= 1 \times 10^{-9} A$ ) .....	187

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dimensionais dos SOI nMOSFETs utilizados neste trabalho, onde W é igual a 30 $\mu\text{m}$ para todos os transistores .....	80
Tabela 2 - Características dimensionais dos SOI nMOSFETs com geometrias de porta octogonal (TR46, TR20, TR18, TR5 e TR4) e retangular (TR3) utilizados nos ensaios para as obtenções das $g_{m\text{MAX}}/(W/L)$ .....	122
Tabela 3 - Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos parâmetros elétricos estudados dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e retangular equivalente nas condições de polarizações passiva (floating), de estado ligado e de estado desligado, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios X, parte 01.....	191
Tabela 4 - Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos parâmetros elétricos estudados dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e retangular equivalente nas condições de polarizações passiva (floating), de estado ligado e de estado desligado, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, parte 02 .....	192

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{\text{CSM}}$	Área de porta do CSM ( $\mu\text{m}^2$ )
$A_{\text{DSM}}$	Área de porta do DSM ( $\mu\text{m}^2$ )
$A_G$	Área de porta ( $\mu\text{m}^2$ )
$A_V$	Ganho de tensão de malha aberta (dB)
$b$	Menor comprimento de canal ( $\mu\text{m}$ )
$B$	Maior comprimento de canal ( $\mu\text{m}$ )
$B'$	Comprimento de Canal do DSM que resultará no comprimento de canal do OSM ( $\mu\text{m}$ )
$c$	Fator de corte do OSM (%)
$C_{\text{eff}}$	Capacitância de saída (F)
$C_L$	Capacitância de carga (F)
$C_{\text{ox}}$	Capacitância do óxido de porta do transistor MOS por unidade de área ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$C_{\text{ox}2}$	Capacitância do óxido de porta do SOI MOSFET por unidade de área ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$C_{\text{ox}2}$	Capacitância do óxido enterrado do SOI MOSFET por unidade de área ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$C_{\text{Si}}$	Capacitância da camada de silício por unidade de área ( $\text{F}/\text{cm}^2$ )
$e^+$	Pósitron
$e^-$	Elétron
$f$	Frequência de operação do dispositivo (Hz)
$f_T$	Frequência de ganho de tensão unitário (Hz)
$g_D$	Condutância de Saída (S)
$g_m$	Transcondutância (S)
$g_{m\text{-MAX}}$	Transcondutância máxima (S)
$I_{\text{DS}}$	Corrente de dreno (A)
$I_{\text{LEAK}}$	Corrente de fuga de dreno (A)
$I_{\text{OFF}}$	Corrente entre dreno e fonte de estado desligado (A)
$I_{\text{ON}}$	Corrente entre dreno e fonte de estado ligado (A)
$k$	Constante de Boltzmann ( $1,38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )
$L$	Comprimento do canal (nm)
$L_{\text{eff}}$	Comprimento efetivo do canal (nm)
$L_{\text{EQ}}$	Comprimento equivalente do canal do OSM considerando que existe um MOSFET do tipo convencional retangular equivalente com a mesma área de porta (nm)
$N_A$	Concentração de impurezas aceitadoras em um semiconductor ( $\text{cm}^{-3}$ ).
$n_i$	Concentração intrínseca de portadores em um semiconductor ( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_{\text{IT}}$	Cargas armadilhadas na interface ( $\text{eV}^{-1}/\text{cm}^{-2}$ )

$N_{OT}$	Cargas armadilhadas no óxido ( $eV^{-1}/cm^{-2}$ )
$P_{OFF}$	Potência estática dissipada por um MOSFET (W)
$P_{ON}$	Potência dissipada por um MOSFET no chaveamento (W)
$P_{ON1}$	Potência dissipada por um MOSFET na condição de estado ligado (W)
$q$	Carga elementar do elétron ( $1,6 \times 10^{-19} C$ )
$Q_{INV1}$	Densidade de carga de inversão por unidade de área na primeira interface ( $C/cm^2$ )
$Q_{OX}$	Densidade de carga fixa no óxido de porta do transistor MOS convencional ( $C/cm^2$ )
$Q_n$	Quantidade total de elétrons ao longo do canal (adimensional)
$Q_{S2}$	Densidade de carga de inversão ou acumulação na segunda interface do transistor ( $C/cm^2$ )
$R_{ON}$	Resistência de estado ligado do transistor ( $\Omega$ )
SS	Inclinação de sublimiar (mV/década)
$SiO_2$	Óxido de silício
T	Temperatura absoluta (K)
$t_{ox}$	Espessura do óxido de porta (nm)
$t_{oxb}$	Espessura da camada de óxido enterrado (nm)
$t_{Si}$	Espessura da camada de silício (nm)
$V_{DD}$	Tensão de alimentação (V)
$V_{BG}$	Tensão de polarização do substrato (V)
$V_{DS}$	Tensão entre dreno e fonte (V)
$V_{DSAT}$	Tensão entre dreno e fonte de saturação(V)
$V_{EA}$	Tensão Early (V)
$V_{FB}$	Tensão de faixa plana (V)
$V_{G1}$	Tensão aplicada a primeira porta (V)
$V_{G2}$	Tensão aplicada ao substrato (V)
$V_{GS}$	Tensão aplicada à porta do SOI MOSFET (V)
$V_{GT}$	Sobretensão de porta ( $V_{GT} = (V_{GS} - V_{TH})$ ) (V)
$V_{TH}$	Tensão de limiar (V)
W	Largura do canal (nm)
$W_R$	Largura da parte retangular do hexágono da região de canal do DSM (nm)
$W_T$	Largura da parte trapezoidal do hexágono da região de canal do DSM (nm)
W/L	Fator geométrico ou razão de aspecto
$x_{dMÁX}$	Profundidade máxima da região de depleção ( $\mu m$ )
A	Ângulo da junção metalúrgica do DSM ou OSM ( $^\circ$ )

$\alpha'$	Fator de acoplamento capacitivo do MOSFET
B	Fator de ganho do transistor
E	Campo elétrico (V/cm)
$\epsilon_{\text{si}}$	Permissividade do silício ( $1,06 \times 10^{-12}$ F/cm)
$\Delta I_{\text{DS}}$	Varição da corrente de dreno (A)
$\Delta V_{\text{in}}$	Varição da tensão de entrada de um MOSFET (V)
$\Delta V_{\text{out}}$	Varição da tensão de saída de um MOSFET (V)
$\Phi_{\text{F}}$	Potencial de Fermi (V)
$\Phi_{\text{MS}}$	Diferença de função trabalho entre metal de porta e semiconductor (V)
$\Phi_{\text{MS1}}$	Diferença de função trabalho entre metal e semiconductor na primeira interface do transistor SOI (V)
$\Phi_{\text{MS2}}$	Diferença de função trabalho entre metal e semiconductor na segunda interface do transistor SOI (V)
$\Phi_{\text{S1}}$	Potencial de superfície na primeira interface do transistor SOI (V)
$\Phi_{\text{S2}}$	Potencial de superfície na segunda interface do transistor SOI (V)
$\mu_{\text{n}}$	Mobilidade efetiva dos elétrons na região do canal ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
$\mu^-$	Partícula fundamental muon de carga negativa
$\pi^-$	Partícula fundamental pión de carga negativa
$\pi^+$	Partícula fundamental pión de carga positiva

## LISTA DE ABREVIATURAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
BBR	Região de Bico de Pássaro ( <i>Bird's Beak Region</i> )
BJT	Transistor de Junção Bipolar ( <i>Bipolar Junction Transistor</i> )
CAST	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial ( <i>Chinese Academic Space Technology</i> )
CBERS	Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres ( <i>China Brazil Earth Resource Satellites</i> )
CC	Corrente Constante ( <i>Constant Current</i> )
CI	Circuito Integrado
CITAR	Circuitos Integrados Tolerantes a Radiação
CMOS	Metal-Óxido-Semicondutor Complementar ( <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> )
CSM	SOI nMOSFET com formato de porta retangular (convencional)
CsrTR	Razão da Corrente de Dreno pela Raiz Quadrada da Transcondutância ( <i>Current to square root Transconductance Ratio</i> )
CTI	Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer
DD	Defeitos por deslocamento ( <i>Displacement Damage</i> )
DEPAMBBRE	Efeito da desativação dos MOSFETs parasitários da região do bico de pássaro ( <i>Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect</i> )
DGA	Porta Fictícia( <i>Dummy Gate Assisted</i> )
DSM	SOI nMOSFET do tipo Diamante (geometria de porta hexagonal)
ELT	MOSFET de leiaute fechado ( <i>Enclosed Layout Transistor</i> )
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMC	Compatibilidade Eletromagnética ( <i>Electromagnetic Compatibility</i> )
ESD	Descarga eletrostática ( <i>ElectroStatic Discharge</i> )
FBC	Memória de Corpo Flutuante ( <i>Floating Body Cell</i> )
FD	Totalmente depletado ( <i>Fully Depleted</i> )
FET	Transistor de Efeito de Campo ( <i>Field Effect Transistor</i> )
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FinFET	Transistor de Efeito de Campo do tipo "Fin" ( <i>Fin Field Effect Transistor</i> )
GAA	Porta Circundante ( <i>Gate All Around</i> )
GEO	Órbita Geosíncrona ( <i>Geosynchronous Orbit</i> )
HBD	Robustez pelo Estilo de Leiaute ( <i>Hardening-by-Design</i> )

HGG	Geometria de Porta Hexagonal ( <i>Hexagonal Gate Geometry</i> )
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IFUSP	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LCE	Efeito de Canto Longitudinal ( <i>Longitudinal Corner Effect</i> )
LE	Extrapolação da Região Linear ( <i>Linear Extrapolation</i> )
LEF	Campo Elétrico Longitudinal ( <i>Longitudinal Electric Field</i> )
LEO	Satélites de Órbita Baixa ( <i>Low Earth Orbit</i> )
LET	Transferência Linear de Energia ( <i>Linear Energy Transfer</i> )
LOCOS	Oxidação de Silício Local ( <i>Local Oxidation of Silicon</i> )
MEO	Satélites de Órbita Média ( <i>Medium Earth Orbit</i> )
MOS	Metal-Óxido-Semicondutor ( <i>Metal-Oxide-Semiconductor</i> )
MOSFET	Transistor de efeito de campo Metal-Óxido-Semicondutor ( <i>Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> )
NFD	Quase totalmente depletado ( <i>Near Fully Depleted</i> )
OGG	Geometria de Porta Octogonal ( <i>Octogonal Gate Geometry</i> )
OSM	SOI nMOSFET do tipo octogonal (porta em formato octogonal)
OTA	Amplificador Operacional de Transcondutância
PAMDLE	Efeito da Associação Paralela de MOSFETs com Diferentes Comprimentos de Canal ( <i>Parallel Connection of MOSFETs with Different Channel Lengths effect</i> )
PD	Parcialmente depletado ( <i>Partially Depleted</i> )
PEL	Pares elétrons-lacunas
RF	Radio Frequência ( <i>Radio Frequency</i> )
SAA	Anomalia Magnética do Atlântico Sul ( <i>South Atlantic Anomaly</i> )
SCE	Efeito de Canal Curto ( <i>Short Channel Effect</i> )
SD	Segunda Derivada ( <i>Second Derivative</i> )
SEB	Evento único de queima ( <i>Single Event Burnout</i> )
SEE	Efeitos de evento único ( <i>Single Event Effects</i> )
SEGR	Evento de ruptura de porta ( <i>Single Event Gate Rupture</i> )
SHE	Erro único fatal ( <i>Single Hard Error</i> )
SEL	Evento de travamento único ( <i>Single Event Latchup</i> )
SET	Evento transiente único ( <i>Single Event Transient</i> )

SEU	Evento perturbante único ( <i>Single Event Upset</i> )
STI	Isolação do tipo trincheira ( <i>Shallow-Trench Isolation</i> )
SOI	Silício-Sobre-Isolante ( <i>Silicon-On-Insulator</i> )
TCR	Razão da Transcondutância pela Corrente de Dreno ( <i>Transconductance-to-Current-Ratio</i> )
TID	Dose total ionizante ( <i>Total Ionizing Dose</i> )
UCL	Universidade Católica de Louvain ( <i>Université catholique de Louvain</i> )
ULSI	Integração em Alta Escala ( <i>Ultra Large Scale Integration</i> )
USP	Universidade de São Paulo
UTB	Corpo Ultra Fino ( <i>Ultra Thin Body</i> )
UTBB	Corpo e Óxido Enterrado Ultra Finos ( <i>Ultra Thin Body and BOX</i> )
UTBOX	Óxido Enterrado Ultra Fino ( <i>Ultra Thin BOX</i> )
UV	Raios ultravioleta
<i>Wave</i>	MOSFET com formato do canal similar a letra “S”

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.2 OBJETIVOS .....	29
<b>2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	31
2.1 SOI MOSFET.....	31
2.2 SOI nMOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA HEXAGONAL E OCTOGONAL .....	35
<b>2.2.1 Efeito LCE</b> .....	39
<b>2.2.2 Efeito PAMDLE</b> .....	42
<b>2.2.3 Efeito DEPAMBBRE</b> .....	44
2.3 TENSÃO DE LIMIAR.....	45
2.4 INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR.....	49
2.5 TRANSCONDUTÂNCIA .....	51
2.6 CORRENTE DE ESTADO LIGADO, CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO E CORRENTE DE FUGA.....	52
2.7 RAZÃO DA CORRENTE DE ESTADO LIGADO PELA CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO.....	55
2.8 RESISTÊNCIA DE ESTADO LIGADO .....	55
2.9 TENSÃO EARLY.....	57
2.10 RAZÃO DA TRANSCONDUTÂNCIA PELA CORRENTE DE DRENO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO NORMALIZADA PELO FATOR GEOMÉTRICO .....	59
2.11 CONDUTÂNCIA DE SAÍDA .....	61
2.12 FREQUENCIA DE GANHO DE TENSÃO UNITÁRIO DO MOSFET .....	61
2.13 GANHO DE TENSÃO INTRÍNSECO DO SOI MOSFET.....	61
<b>3 EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES EM SOI MOSFETS</b> .....	63
3.1 DOSE TOTAL IONIZANTE.....	69
3.2 TENSÃO DE LIMIAR.....	74
3.3 CORRENTE DE FUGA.....	75
3.4 Técnicas de polarizações dos MOSFETs durante o procedimento de IRradiação com Raios-x.....	76
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	78

4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DOS SOI nMOSFETS UTILIZADOS NESTE TRABALHO .....	78
4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	82
<b>4.2.1 Procedimentos das Caracterizações Elétricas dos SOI nMOSFETs .....</b>	<b>83</b>
<b>4.2.2 Procedimentos das Radiações Ionizantes de Raios-X nos SOI NMOSFETs.....</b>	<b>86</b>
<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS PARÂMETROS ELÉTRICOS E FIGURAS DE MÉRITO DOS SOI nMOSFETs.....</b>	<b>91</b>
5.1 TENSÃO DE LIMIAR DOS SOI nMOSFETS IRRADIADOS POR RAIOS-X.....	91
5.2 INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR (SS).....	105
5.3 TRANSCONDUÇÃO ..... 116	116
5.4 CORRENTE DE ESTADO LIGADO, CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO E CORRENTE DE FUGA.....	126
5.5 RAZÃO ENTRE A CORRENTE DE ESTADO LIGADO PELA CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO.....	145
5.6 RESISTÊNCIA DE ESTADO LIGADO .....	150
5.7 TENSÃO EARLY.....	159
5.8 RAZÃO DA TRANSCONDUÇÃO PELA CORRENTE DE DRENO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO NORMALIZADA PELO FATOR GEOMÉTRICO .....	164
5.9 FREQUÊNCIA DE GANHO DE TENSÃO UNITÁRIO .....	169
5.10 GANHO DE TENSÃO INTRÍNSECO DO TRANSISTOR .....	177
<b>6 QUADRO COMPARATIVO EXPERIMENTAL GERAL CONSIDERANDO OS EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X .....</b>	<b>189</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>195</b>
<b>8 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>197</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>198</b>
<b>APÊNDICE A –PUBLICAÇÕES .....</b>	<b>205</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de fabricação de dispositivos semicondutores tolerantes às radiações ionizantes no Brasil é tratada como assunto estratégico, em que os principais interessados são o Ministério da Defesa, a Agência Espacial Brasileira e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Como exemplo, podemos citar o acordo entre o Brasil e a China, assinado em seis de julho de 1988 e vigente até os dias atuais, envolvendo o INPE e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST). Este acordo foi materializado pelo programa denominado Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (*China Brasil Ebert Resource Satellites*, CBERS) [1]. Os avanços científicos desta parceria já foram atestados por diversas instituições brasileiras, dentre elas o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (Embrapa), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Petrobras, a Vale do Rio Doce e o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). Esta parceria foi assertiva, principalmente ao considerarmos a nova regulamentação do governo norte-americano que impõe barreiras na exportação de componentes eletrônicos tolerantes às radiações ionizantes [2]. O programa intitulado “Circuitos Integrados Tolerantes a Radiação” (CITAR) é outro exemplo de projeto Brasileiro nesta área. Este projeto é financiado pela Agência Brasileira de Inovação (FINEP) e é executado pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) em parceria com outras instituições de pesquisa e ensino brasileiras, representadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Agência Espacial Brasileira (AEB), o Instituto de Física da USP (IFUSP), o Instituto de Estudos Avançados do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (IEAv-DCTA), o Instituto Mauá de Tecnologia, a Pontifícia Universidade Católica do Rio grande do Sul (PUCRS) e o Centro Universitário FEI [3], no qual fazemos parte deste projeto.

Em aplicações espaciais é mandatório que os circuitos integrados (CIs) implementados com a tecnologia de fabricação do tipo Metal-Óxido-Semicondutor Complementar (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*, CMOS) possuam uma maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes, para garantir o perfeito funcionamento dos equipamentos eletrônicos. Devido a sua maior estabilidade elétrica ou robustez, estes tipos de CIs CMOS também acabam sendo utilizados em aplicações nas quais os efeitos da Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose*, TID) são menos significativas, ou seja, não afetam ou quase não afetam as características elétricas dos transistores, como por exemplo, em equipamentos eletrônicos destinados a voos intercontinentais, automóveis, computadores, celulares e marca-passos [4].

A evolução dos equipamentos eletrônicos e conseqüentemente da microeletrônica exigem transistores cada vez menores e que ainda mantenham a tolerância aos efeitos das radiações ionizantes. No entanto, com as reduções dimensionais dos transistores, surgiram efeitos secundários indesejados, como os efeitos de canal curto, o aumento da resistência parasitária de fonte e dreno, a perfuração MOS, a injeção de portadores quentes e o aumento da corrente de fuga [5]–[8]. A comentada redução dimensional, também incorpora uma maior predisposição a falhas dos MOSFETs ao considerarmos as incidências das radiações ionizantes e os efeitos da TID, em que tem-se como resultado a alteração da tensão de limiar ( $V_{TH}$ ), um aumento da corrente de fuga ( $I_{LEAK}$ ), e até a degradação da inclinação de subliminar (SS) [9]. Estas alterações nos parâmetros elétricos ocorrem pela indução e armadilhamento de cargas positivas nas camadas isolantes (óxidos) dos transistores de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET) decorrentes das radiações ionizantes [4], [10], [11].

Neste cenário, a tecnologia de Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) foi introduzida para aumentar a tolerância dos MOSFETs, aos efeitos das radiações ionizantes relacionadas aos efeitos de evento único (*Single Event Effects*, SEE), possibilitar sua operação em altas temperaturas, aumentar a sua transcondutância, melhorar a sua inclinação de subliminar, reduzir as suas capacitâncias parasitárias e eliminar o tiristor parasitário PNPN associado a sua estrutura [7], [12].

De maneira geral, são três as iniciativas para reduzirem os efeitos das radiações ionizantes nos MOSFETs e conseqüentemente nos CIs CMOS:

- a) **Modificação do processo de manufatura dos CIs CMOS:** tem por objetivo alterar as características elétricas dos MOSFETs. Um exemplo é a implantação iônica de cargas negativas, como alumínio, no óxido de porta para neutralizar os efeitos do armadilhamento de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes [13]–[15]. Outra técnica utilizada visa reduzir a corrente de fuga localizada nas regiões de bico de pássaro dos MOSFETs, para tal finalidade alteram-se os níveis de dopagem nestas regiões, criando-se uma isolação entre o transistor principal e os transistores parasitários das regiões de bico de pássaro, e portanto dificultando o aparecimento da corrente de fuga induzida pelas radiações ionizantes [16].
- b) **Utilização de novas tecnologias de fabricação de CIs CMOS (*Hardening-By-Technology*):** Considerando-se a tecnologia de fabricação de CIs CMOS e com as sucessivas reduções nas dimensões dos MOSFETs, verifica-se a redução da

sensibilidade dos MOSFETs aos efeitos das radiações ionizantes. A redução das espessuras das camadas de óxido, por exemplo, deixa os transistores mais tolerantes quanto aos efeitos da TID [9], ou seja, tem-se uma dependência direta do desvio da tensão de limiar em função da espessura do óxido de porta [17], em que espessuras menores dos óxidos de porta resultarão em um menor armadilhamento de cargas elétricas no óxido, que por sua vez terão uma baixa influência na tensão de limiar [9]. Para promover uma maior tolerância dos MOSFETs aos efeitos parasitários, uma das técnicas é o uso da tecnologia SOI MOSFET totalmente depletada (*Fully Depleted*, FD), visto que esta estrutura isola o substrato da região de operação ativa do MOSFET através de um óxido enterrado (*Buried Oxide*, BOX). Adicionalmente, esta estrutura também é capaz de eliminar o efeito de *latch-up*, de reduzir os efeitos de canal curto (*Short Channel Effects*, SCE), de reduzir os efeitos de evento único, entre outros [7]. As configurações de MOSFETs sejam parcialmente ou totalmente depletadas foram estudadas em função dos efeitos da TID, no entanto, devido às cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes no óxido enterrado (BOX) de um SOI MOSFET, os resultados não foram promissores [18], [19]. A utilização de MOSFETs de múltiplas portas, especialmente utilizando-se a tecnologia SOI de duas portas, apresenta uma restrição que cabe aqui ser ressaltada, que é dada pelo desalinhamento das suas máscaras durante o processo de fabricação [20]. Esta restrição é superada com a utilização do MOSFET de porta circundante (*Gate-All-Around*, GAA), no qual é capaz de aumentar a tolerância a TID em decorrência das radiações ionizantes [20]. Recentemente foram introduzidos os FinFETs, em substituição a tecnologia CMOS planar [21], em que os FinFETs com aletas estreitas em um substrato SOI são aptos a aumentar a tolerância ao SEE e ao TID, considerando o pior caso de operação (configuração de estado ligado, ou seja, terminal de porta com a tensão de alimentação e os demais terminais aterrados durante os procedimentos de radiações ionizantes) [20]–[22]. Além dessas soluções e atendendo as expectativas da miniaturização dos MOSFETs, especialmente para as dimensões de comprimento de canal abaixo de 20nm, surgem novas estruturas MOSFETs tais como: a) SOI MOSFET de corpo ultra fino (*Ultra Thin Body*, UTB), que é capaz de reduzir os efeitos de canal curto; b) SOI MOSFET com óxido enterrado ultra fino (*Ultra Thin Buried Oxide*, UTBOX); c) SOI MOSFET com o corpo e o óxido enterrado ultra finos (*Ultra*

*Thin BOX and Body*, UTBB), que permitem um baixo consumo de potência e um maior controle da corrente entre fonte e dreno, potencializado por meio da polarização do substrato, que funciona como uma segunda porta (*back-gate*) [23], [24]. Estes MOSFETs apresentaram resultados interessantes para aplicações espaciais [25], [26].

**c) Técnicas de leiaute (*Hardening-By-Design*, HBD):** por meio de novos estilos de leiautes para MOSFETs é possível mitigar os efeitos das radiações ionizantes da TID, considerando-se tanto as tecnologias *Bulk* ou SOI CMOS. Alguns trabalhos mostram que esta abordagem pode potencializar a tolerância aos efeitos das radiações ionizantes dos MOSFETs quanto aos efeitos da TID como no caso dos transistores de leiaute fechado (*Enclosed Layout Transistors*, ELTs) [27]. Os ELTs possuem a capacidade de minimizar a corrente de fuga induzida pelas radiações ionizantes nas regiões de bico de pássaro (*Bird's Beak Regions*, BBRs) [28], dado que neste leiaute o terminal de fonte ou dreno (dependendo da configuração de polarização de dreno/fonte) é totalmente envolto pela região de porta, eliminando o canal parasitário induzido pelo acúmulo de cargas na região dos BBRs [29]. Vale a pena ressaltar que para os pMOSFET (MOSFET de canal tipo p) não ocorrem as inversões das BBRs, dispensando a utilização da técnica de ELT [30].

Esta abordagem de leiaute possui uma limitação, que é dada pela sua razão de aspecto ou pelo seu fator geométrico ( $W/L$ , onde  $W$  e  $L$  são respectivamente a largura e o comprimento de canal), uma vez que não é possível obter valores menores que 2,26. Como consequência, o seu uso está limitado principalmente para as aplicações de CIs CMOS analógicos. Além disto, este tipo de dispositivo ocupa uma área de CI CMOS superior àquela dos MOSFETs de porta retangular equivalente [31], [32]. Os ELT podem ser projetados com anéis de guarda ao seu redor, para impedir a fuga de corrente elétrica entre os MOSFETs [17], [32]. Outro exemplo é apresentado pelo estilo de leiaute “Osso de Cachorro” ou em inglês “*Dogbone*”, cujo nome é uma alusão ao seu leiaute, que a priori pode ser implementado em todos os nós tecnológicos e processos de fabricação de CIs CMOS planares. O *Dogbone* apresenta uma simetria entre as áreas de fonte e dreno, mas em contrapartida apresenta uma maior área ocupada de silício quando comparado ao MOSFET de geometria de porta retangular [33].

Na tentativa de superar as limitações do ELT, foi proposto um novo MOSFET chamado *Dummy-Gate-Assisted* (DGA) [31]. Este conceito baseia-se em adicionar mais duas portas fictícias (*dummy*) no leiaute do MOSFET juntamente com uma camada metálica, de forma que este conjunto de máscaras possa isolar a fonte e o dreno de possíveis correntes de fuga pelas regiões de bico de pássaro (óxidos das paredes laterais). Como resultado final dessa abordagem temos também um aumento da área do CI CMOS [31].

Desenvolver transistores e consequentemente CIs CMOS que combinem um maior desempenho elétrico e uma maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes, quando comparado com as tecnologias vigentes é reconhecida como um dos maiores desafios da indústria de dispositivos semicondutores e de CIs CMOS. Agora, desenvolver e produzir este tipo de tecnologia aproveitando-se do atual processo de fabricação de CIs CMOS, sem adicionar qualquer custo adicional e ainda sem aumentar a área final da lâmina de silício, é uma tarefa deveras complicada [4].

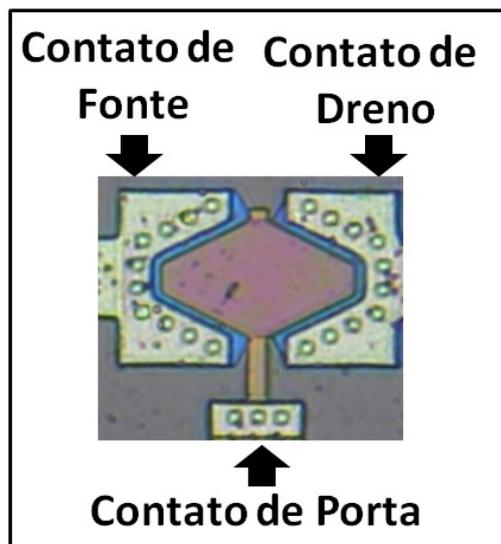
O primeiro transistor da série de MOSFETs com geometrias não convencionais, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em MOSFETs avançados do Centro Universitário FEI, sob a supervisão do Prof. Doutor Salvador Pinillos Gimenez, foi o MOSFET produzido com o estilo de leiaute de porta hexagonal, denominado de “Diamante”. Este transistor pode ser fabricado tanto na tecnologia *Bulk* CMOS como também na SOI CMOS e ainda em qualquer outra tecnologia planar de fabricação de CIs CMOS. Dentre os leiautes ELT e DGA propostos anteriormente, o MOSFET do tipo Diamante, surge como uma alternativa para aumentar o desempenho elétrico dos MOSFETs, quando comparado aos MOSFETs com geometria de porta retangular [34], e para fabricá-los, não é necessário agregar qualquer custo adicional ao processo de fabricação e também ele não aumenta a área de um CI CMOS. Adicionalmente, ele é capaz de aumentar a tolerância aos efeitos da TID devido ao “Efeito da Desativação dos MOSFETs Parasitários das Regiões de Bico de Pássaro” (*Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird’s Beak Regions Effect*, DEPAMBBRE).

O MOSFET com geometria de porta hexagonal deu origem a outras três novas opções de transistores, sendo o primeiro deles o MOSFET com geometria de porta octogonal, que será abordado e estudado nesta tese, utilizando-se da tecnologia de fabricação de CIs SOI CMOS. O segundo é o SOI MOSFET com geometria de porta elipsoidal [35], e o terceiro, o SOI MOSFET do tipo FISH [36].

Focando os estudos no SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (Figura 1), este nasceu da necessidade de aumentar a tolerância das descargas eletrostáticas (*Electrostatic discharge*, ESD) e aumentar a tensão de ruptura do MOSFET do tipo Diamante [37].

A Figura 1 ilustra um exemplo de um SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal com as devidas regiões de dreno, porta e fonte.

Figura 1 - Foto ampliada do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal



Fonte: Autor

Tanto o formato hexagonal como o formato octogonal da região de porta, são capazes de introduzir três efeitos elétricos distintos e que ocorrem de forma simultânea. O primeiro deles é o Efeito de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE) [34], o segundo é o do Efeito da Conexão Paralela de MOSFETs com Diferentes Comprimentos de Canal (*Parallel Connections between MOSFETs with different Channel Lengths Effect*, PAMDLE) [34], [37], e o terceiro efeito é o ocasionado devido ao da Desativação dos MOSFETs parasitários das regiões de bicos de pássaro, ou também conhecido como *Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect* (DEPAMBBRE) [38].

Recentes estudos com o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal mostraram que este inovador estilo de leiaute para implementar MOSFETs, contribui não só para o aumento do seu desempenho elétrico, quando comparado ao seu equivalente SOI nMOSFET com geometria de porta retangular, em termos da corrente de dreno de saturação,  $I_{DS-sat}$  (146% superior), da corrente de dreno de estado ligado,  $I_{ON}$  (145%), da corrente de dreno de estado desligado,  $I_{OFF}$  (39%), da transcondutância,  $g_m$  (137% superior), da resistência de estado

ligado,  $R_{ON}$  (51% inferior), da frequência de ganho de tensão unitário,  $f_T$  (128% superior), e do ganho de tensão intrínseco,  $A_V$  no regime de inversão forte do canal (similar), [39], mas também eles são aptos para aumentar a tolerância a TID, em decorrência das radiações ionizantes de raios-X [40].

Analisando-se o comportamento do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal sob os efeitos das radiações ionizantes de raios-X, observa-se um novo efeito elétrico ressaltado após o armadilhamento de cargas positivas no óxido enterrado [10], [18] em que ocorreu a desativação dos MOSFETS parasitários na região de bico de pássaro (efeito DEPAMBBRE), dado que as linhas de campo elétrico longitudinal nas bordas da região do canal são curvas [38], [40].

O efeito DEPAMBBRE presente no SOI nMOSFET com geometria octogonal foi o responsável pela motivação deste trabalho de pesquisa, no qual o seu principal objetivo é o de realizar uma análise comparativa experimental dos efeitos da TID em decorrência das radiações ionizantes de raios-X entre os SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e retangular equivalentes. Pelo fato do OSM não adicionar custos extras ao processo produtivo, combinado com a tecnologia SOI de CIs CMOS, onde exige-se baixa potência, baixa tensão, baixo custo de fabricação e alta integração, eles são aptos para serem aplicados como por exemplo em radiofrequência (transceptores), conversores de corrente contínua (DC) para DC (DC/DC), entre outros, principalmente devido aos menores valores de  $R_{ON}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal em relação aos equivalentes de geometria de porta retangular [41]. Adicionalmente, os SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal podem ser escalados para aplicações espaciais, aeroespaciais, aviônicas, aceleradores de partículas e equipamentos médicos de CIs CMOS [38].

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta tese é estudar os efeitos da Dose Ionizante Total (TID) nos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito do SOI nMOSFET de geometria de porta octogonal em relação aos do SOI nMOSFETs de geometria de porta retangular, considerando-se três diferentes condições de polarizações dos transistores durante os procedimentos de radiações de raios-X: passiva (*floating*), estado ligado (*on-state*) e estado desligado (*off-state*).

Como base para este estudo foram utilizados transistores inovadores previamente patenteados pelo professor doutor Salvador Pinillos Gimenez e especialmente projetados (elaboração do leiaute) pelo grupo de pesquisa em dispositivos avançados do Centro

Universitário FEI. Os SOI nMOSFETs foram fabricados em parceria com a UCL (Bélgica). Os procedimentos das radiações ionizantes de raios-X foram planejados para simular diferentes condições de operações dos SOI nMOSFETs, ou seja, passiva (condição *floating*, como por exemplo, para simular a condição de equipamentos de *backup* nas missões espaciais), estado desligado (que devido às condições de polarização, intensifica o campo elétrico longitudinal durante o procedimento de radiações ionizantes de raios-X) e estado ligado (que devido às condições de polarização, intensifica o campo elétrico vertical durante o procedimento de radiações ionizantes de raios-X), ambas focando nas aplicações de CIs CMOS digitais, levando-se em conta diferentes TIDs.

As comparações e análises foram realizadas entre os principais parâmetros elétricos e figuras de mérito digitais e analógicos dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e dos seus devidos equivalentes SOI nMOSFETs com geometria de porta retangular, sob as mesmas condições, de polarização elétrica e exposição aos raios-X, o que permite uma análise gráfica direta. Este trabalho também busca identificar a topologia octogonal ideal em função do fator de corte e ângulo  $\alpha$  em ambientes radioativos.

## 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo visa apresentar o princípio de funcionamento de um SOI MOSFET com geometria de porta retangular (CSM), hexagonal (DSM) e octogonal (OSM) e a influência das radiações ionizantes em sua estrutura e conseqüentemente em seu comportamento elétrico que resultam nos desvios dos seus parâmetros elétricos e figuras de mérito.

### 2.1 SOI MOSFET

Os SOI MOSFETs surgiram como uma alternativa natural aos MOSFETs com tecnologia convencional de fabricação de CIs CMOS (*Bulk*), objetivando principalmente o aumento da escala de integração, focando na Escala de Integração Ultra Larga (*Ultra Large Scale Integration*, ULSI) e a redução dos efeitos parasitários desses transistores. A tecnologia SOI CMOS baseia-se na fabricação de MOSFETs e circuitos integrados em uma fina camada de silício, que por sua vez ficam separados do restante do substrato por uma camada de material isolante (óxido enterrado). Esta isolação elétrica entre a região ativa do transistor e o substrato proporciona a redução, ou em alguns casos, a completa eliminação, de muitos efeitos parasitários presentes na tecnologia de fabricação de CIs CMOS (*Bulk*), decorrentes principalmente devido às reduções dimensionais destes transistores. Dentre as vantagens da tecnologia SOI CMOS frente à do *Bulk*, podemos citar: eliminação do efeito do tiristor parasitário (*latch-up*), menores capacitâncias parasitárias, que contribui para o aumento da velocidade de chaveamento, menor corrente de fuga ( $I_{LEAK}$ ), menor inclinação de sublimiar (aproximadamente 60 mV/dec. em temperatura ambiente), maior mobilidade dos portadores de carga móveis no canal, total compatibilidade com o processo de fabricação de CIs CMOS convencional (*Bulk*) e com melhores características de integração [7].

As vantagens dos SOI MOSFETs traduzem-se como, por exemplo, na fabricação de microprocessadores de alto desempenho, devido a sua baixa potência consumida, tanto no modo estático, como no modo dinâmico, além de uma maior tolerância aos erros não destrutivos (ocasionados pelas radiações ionizantes) representados principalmente pela alteração de um nível lógico em um circuito eletrônico, descrito como erros suaves (*soft errors*) [42]. Outro ponto de destaque que podemos citar é a de que a maioria dos *supercomputadores* atuais e dispositivos de baixa potência e baixa tensão (*low power & low voltage*) são implementados com a tecnologia SOI CMOS. Esta tecnologia também se mostrou extremamente vantajosa para as aplicações em memória, devido a sua melhor

integração e menor área ocupada, visto que por volta de 70% da área de um processador é ocupada pela célula de memória. Inclusive aproveitando-se do efeito de corpo flutuante dos SOI MOSFETs Parcialmente Depletado (PD), foram desenvolvidas as células de memória de corpo flutuante (*floating body cell*, (FBC) *memory*), uma vez que este efeito determina um dos estados lógicos da célula de memória, que resulta na remoção de uma série de capacitores do CIs CMOS, simplificando tanto o processo de fabricação como o da litografia. Complementarmente, as “*FBC memories*” apresentam um controle adicional que é feito através da polarização da segunda porta do SOI MOSFET, que acaba se formando entre o corpo de silício e o óxido enterrado, desde que este último seja suficientemente fino [7].

Alternativamente, as aplicações de alta frequência ou de rádio frequência (RF), também se tornam vantajosas ao utilizar a tecnologia de fabricação de CIs SOI CMOS, dada a completa isolamento proporcionada pelo óxido enterrado aos ruídos induzidos pelo substrato [7]. Os SOI MOSFETs também apresentam um desempenho superior, quando comparados aos MOSFETs fabricados com a tecnologia convencional (*Bulk*), nas aplicações que envolvam altas temperaturas e/ou altas tensões (características recorrentes em aplicações automotivas), já que o SOI MOSFET é estruturalmente isolado dos demais transistores [43]. Além disso, um fato que merece ser ressaltado, é a de que em uma mesma lâmina de silício SOI, pode-se compartilhar CIs CMOS de potência, analógicos e digitais com uma proteção significativa contra os ruídos induzidos por cada tipo de circuito, além de uma melhor compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility* – EMC), ou seja, não é necessário o uso de cabos ou chicotes de conexões eletrônicas com proteções contra ruídos [43].

O SOI MOSFET também apresenta uma menor resistência de estado ligado, quando comparada ao do MOSFET convencional (*Bulk*). Esta característica reflete em um melhor gerenciamento térmico do transistor, ou seja, quanto menor a resistência de estado ligado menor será a perda de calor associada à potência de saída, em que dependendo do projeto, os dissipadores térmicos poderiam ser reduzidos ou eliminados [43].

A Figura 2 ilustra de forma simplificada as diferenças entre um MOSFET implementado com tecnologia CMOS convencional (*Bulk*) (Figura 2.a), um SOI MOSFET Parcialmente Depletado (Figura 2.b) e um SOI MOSFET Totalmente Depletado (Figura 2.c). A letra “P” representa a região de porta (ou *gate*), a letra “F” representa a região de fonte (ou *source*) e a letra “D” representa a região de dreno (ou *drain*) [7].

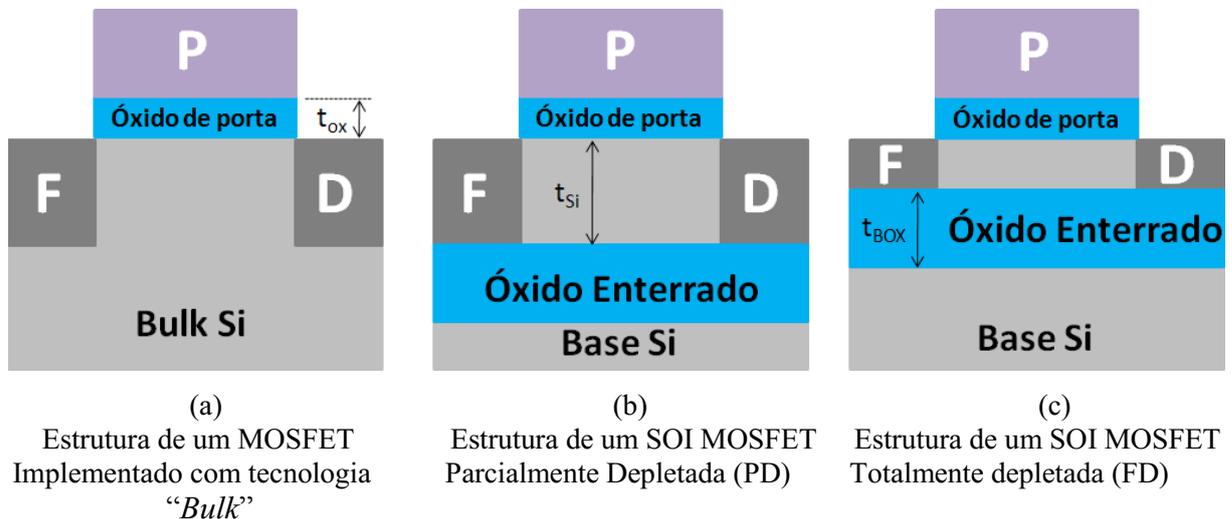
Analisando a Figura 2, fica clara a compatibilidade entre os processos de fabricação de CIs CMOS convencional (*Bulk*) e o do SOI MOSFET. São estruturas muito similares, em que no caso do SOI, tem-se uma camada isolante [7].

A característica de funcionamento de um SOI MOSFET depende da espessura da camada de silício, da concentração de dopantes e da temperatura de operação, em que todas estas características influenciam diretamente na extensão da camada de depleção presente no transistor quando polarizado [7].

A variação da espessura da camada de silício, representada na Figura 2 pela cota  $t_{Si}$ , categoriza o SOI MOSFET da seguinte maneira:

- SOI MOSFET PD, representado na Figura 2.b;
- SOI MOSFET FD, representado na Figura 2.c.

Figura 2 - Representação simplificada da estrutura de MOSFETs com tecnologia convencional (*Bulk*), SOI PD e SOI FD



Fonte: Autor

No SOI MOSFET FD, o filme de silício  $t_{Si}$  é suficientemente fino, possibilitando que a zona de depleção ao longo do filme de silício da região de porta, se estenda por todo o canal até o óxido enterrado. No SOI MOSFET PD, a zona de depleção não ocupa todo o filme de silício, e portanto existe uma região neutra [44]. Devido à maior espessura do filme de silício, não ocorre a interação entre as regiões de depleção, com o aparecimento de região neutra. Esta região pode ser definida por um contato elétrico, e caso este seja aterrado, o SOI MOSFET PD apresentará um comportamento similar ao do MOSFET convencional "Bulk" [44].

Complementarmente tem-se o SOI MOSFET quase totalmente depletado (*Near Fully Depleted SOI, NFD*), em que dependendo da tensão aplicada ao substrato, as regiões de depleção provenientes das primeiras e segundas interfaces podem ou não entrar em contato,

ou seja, o SOI MOSFET NFD poderá comportar-se como um SOI MOSFET PD ou um SOI MOSFET FD [7].

A ordem de grandeza das espessuras do filme de silício para classificar um transistor como SOI MOSFET PD ou FD, variam muito em função dos avanços tecnológicos e os novos comprimentos de canais dos MOSFETs. Porém para efeito comparativo e para se ter uma ordem de grandeza dimensional, enquanto um SOI MOSFET FD apresenta uma espessura da camada de silício da ordem de 80 nm, o SOI MOSFET PD possui uma espessura da camada de silício da ordem de 200 nm, considerando as concentrações de dopantes no substrato de  $1 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  e na fonte e dreno de  $1 \times 10^{20} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$  [45]. Porém, de uma forma teórica, pode-se dizer que para o SOI MOSFET PD, a espessura da camada de silício deve ser maior que o dobro da profundidade máxima de depleção ( $x_{dm\acute{a}x}$ ), enquanto para o SOI MOSFET FD, a espessura da camada de silício deve ser menor que ( $x_{dm\acute{a}x}$ ) [7].

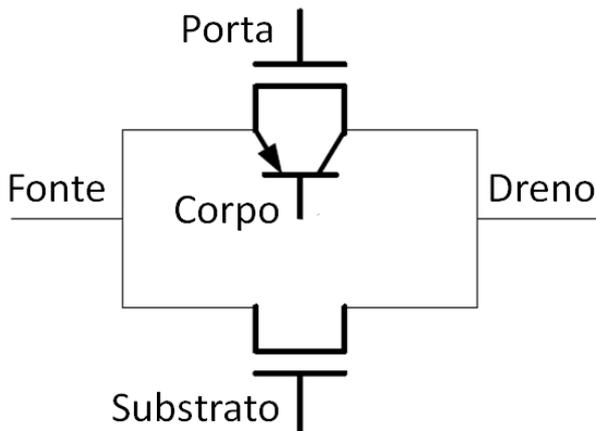
Adicionalmente, os SOI MOSFETs, possuem dois modos de funcionamento, modo enriquecimento e modo acumulação. No modo enriquecimento, o fluxo de corrente entre as regiões de fonte e dreno ocorre pela inversão dos portadores de carga na região do canal, ou na interface entre óxido de porta e a camada de silício [7]. Já no modo acumulação, o fluxo de corrente entre as regiões de fonte e dreno ocorre com a acumulação dos portadores de carga na região do canal. Vale ressaltar que na região de canal, a dopagem do semiconductor é menor que nas regiões de dreno e fonte [7].

Por outro lado, o SOI MOSFET apresenta algumas limitações, como por exemplo, uma baixa tensão de ruptura de dreno, ocasionada pela ativação de um transistor bipolar parasitário associado a estrutura SOI MOSFET PD, o efeito da elevação abrupta da corrente de dreno na saturação (efeito kink) e a baixa tolerância aos efeitos da Dose Ionizante Total, devido ao armadilhamento de cargas positivas, principalmente no óxido enterrado. Neste sentido, para garantir a evolução dos transistores, o desafio concentra-se em criar novas topologias que sejam capazes de potencializar as vantagens dos SOI MOSFETs [46].

As técnicas de leiaute que conferem aos transistores uma maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes são chamadas de *Hardening-by-Design* (HBD).

Para ilustrar alguns dos efeitos parasitários no SOI MOSFET, temos o transistor parasitário associado na segunda porta, e um transistor bipolar parasitário (somente no SOI PD), conforme está ilustrado na Figura 3. Estes transistores parasitários podem ser formados e acionados como reflexo aos efeitos das radiações ionizantes [33].

Figura 3 - Representação dos transistores parasitários em um SOI MOSFET



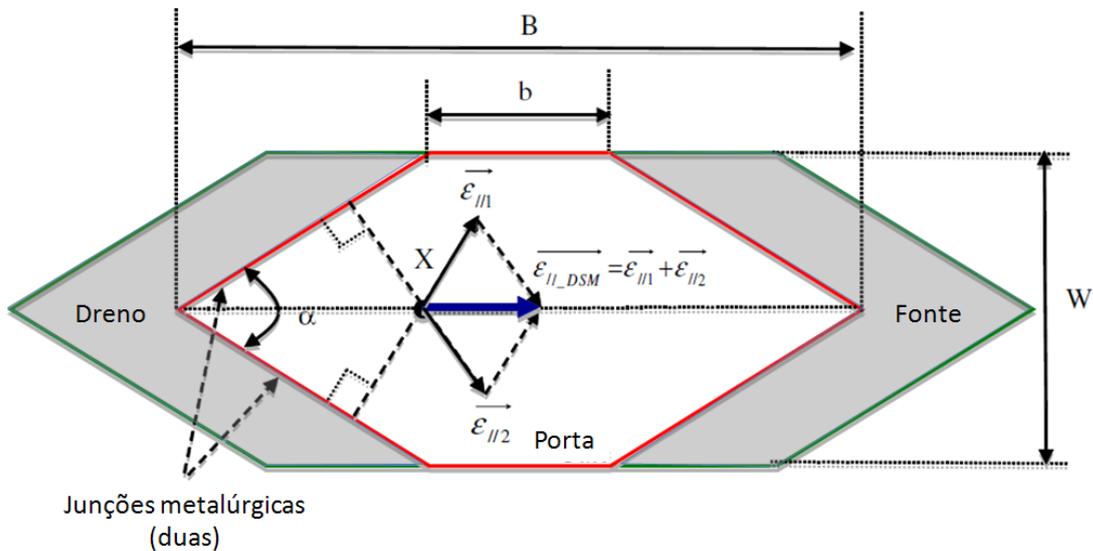
Fonte: Autor

## 2.2 SOI NMOSFET COM GEOMETRIA DE PORTA HEXAGONAL E OCTOGONAL

A mudança proposta através do SOI MOSFET do tipo Diamante baseia-se na alteração da geometria da região de canal de um formato retangular (formato do dispositivo convencional) para um formato hexagonal (*hexagonal gate geometry*, HGG) [47]. Desta maneira ocorre a melhoria de alguns parâmetros elétricos, tais como: a corrente de dreno, a transcondutância e a resistência de estado ligado quando comparados com os dos SOI MOSFET com geometria de porta retangular equivalente, considerando que os transistores apresentem as mesmas áreas de porta ( $A_G$ ), e as mesmas condições de polarização. Benefícios estes, obtidos sem a necessidade de nenhum custo extra ao processo de fabricação de CIs CMOS planares [34], [48]. Este fato deve-se ao efeito de canto na direção longitudinal do canal em decorrência da aplicação da polarização entre fonte e dreno ( $V_{DS}$ ), que aumenta o campo elétrico longitudinal resultante. No SOI MOSFET com geometria de porta hexagonal, os cantos são partes inerentes da estrutura física do transistor, e o Efeito de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE), surge assim que o transistor é polarizado.

A Figura 4 ilustra o leiaute de um SOI MOSFET com geometria de porta hexagonal. As letras  $b$  e  $B$  representam respectivamente a base menor e a base maior do trapézio, que compõe a sua região hexagonal da região de porta, o ângulo  $\alpha$  representa o ângulo formado pela junção metalúrgica entre a fonte e a região do filme de silício nas extremidades do canal. Alterações no ângulo  $\alpha$ , resultam em comportamentos elétricos distintos já que a corrente de dreno do SOI MOSFET com geometria de porta hexagonal é modelada em função do ângulo  $\alpha$  [34].

Figura 4 - Vista superior do SOI MOSFET do tipo Diamante



Fonte: Autor

Na Figura 4 os campos elétricos longitudinais do MOSFET com geometria de porta hexagonal são representados pelos vetores  $\overline{\varepsilon_{//1}}$  e  $\overline{\varepsilon_{//2}}$ , que são perpendiculares às junções metalúrgicas entre as regiões de dreno e de canal que dependem da polarização entre dreno e fonte. A interação entre eles é representada pelo vetor de campo elétrico resultante ( $\overline{\varepsilon_{//DSM}}$ ) que é dado pela soma vetorial, ou seja,  $\overline{\varepsilon_{//DSM}} = (\overline{\varepsilon_{//1}} + \overline{\varepsilon_{//2}})$  [34].

Já o comprimento equivalente do canal ( $L_{EQ}$ ) do SOI MOSFET com geometria de porta hexagonal, é dado pela equação (1) [49]:

$$L_{EQ} = \frac{B - b}{\ln\left(\frac{B}{b}\right)} \quad (1)$$

A interação entre o vetor de campo elétrico resultante com o comprimento equivalente do canal do SOI MOSFET do tipo Diamante (geometria de porta hexagonal) resulta em um campo elétrico longitudinal na região de canal superior ao do SOI MOSFET convencional (geometria de porta retangular) equivalente, considerando a mesma área de porta, o mesmo fator geométrico, assim como as mesmas condições de polarização [34].

Devido à alteração geométrica da região de canal do SOI MOSFET do tipo Diamante, surge uma nova corrente de dreno resultante, tanto na região Triodo como na região de saturação. Os novos valores de corrente elétrica são obtidos a partir do modelo de primeira

ordem da corrente do SOI nMOSFET convencional. Para o SOI MOSFET convencional tem-se [7]:

$$I_{DS_{CSM-TRIODO}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{(V_{DS})^2}{2} \right] \quad (2)$$

$$I_{DS_{CSM-SATURACAO}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ \frac{(V_{GS} - V_{TH})^2}{2} \right] \quad (3)$$

Onde  $I_{DS_{CSM-TRIODO}}$  representa a corrente de dreno do SOI MOSFET convencional na região Triodo,  $I_{DS_{CSM-SATURACAO}}$  representa a corrente de dreno do SOI MOSFET convencional na região de saturação,  $I_{DS\_CSM}$  representa a corrente de dreno do SOI MOSFET convencional seja na região Triodo ou saturação,  $\mu_n$  representa a mobilidade dos elétrons,  $C_{OX}$  a capacitância do óxido de porta por unidade de área e  $V_{GS}$  a diferença de potencial entre porta e fonte.

E para o MOSFET com geometria de porta hexagonal tem-se:

$$I_{DS_{DSM}} \cong \left[ \sqrt{2(1 + \cos \alpha)} \right] I_{DS\_CSM} \quad \text{para } 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (4)$$

$$I_{DS_{DSM}} \cong \left[ \sqrt{2 + \cos \alpha} \right] I_{DS\_CSM} \quad \text{para } 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \quad (5)$$

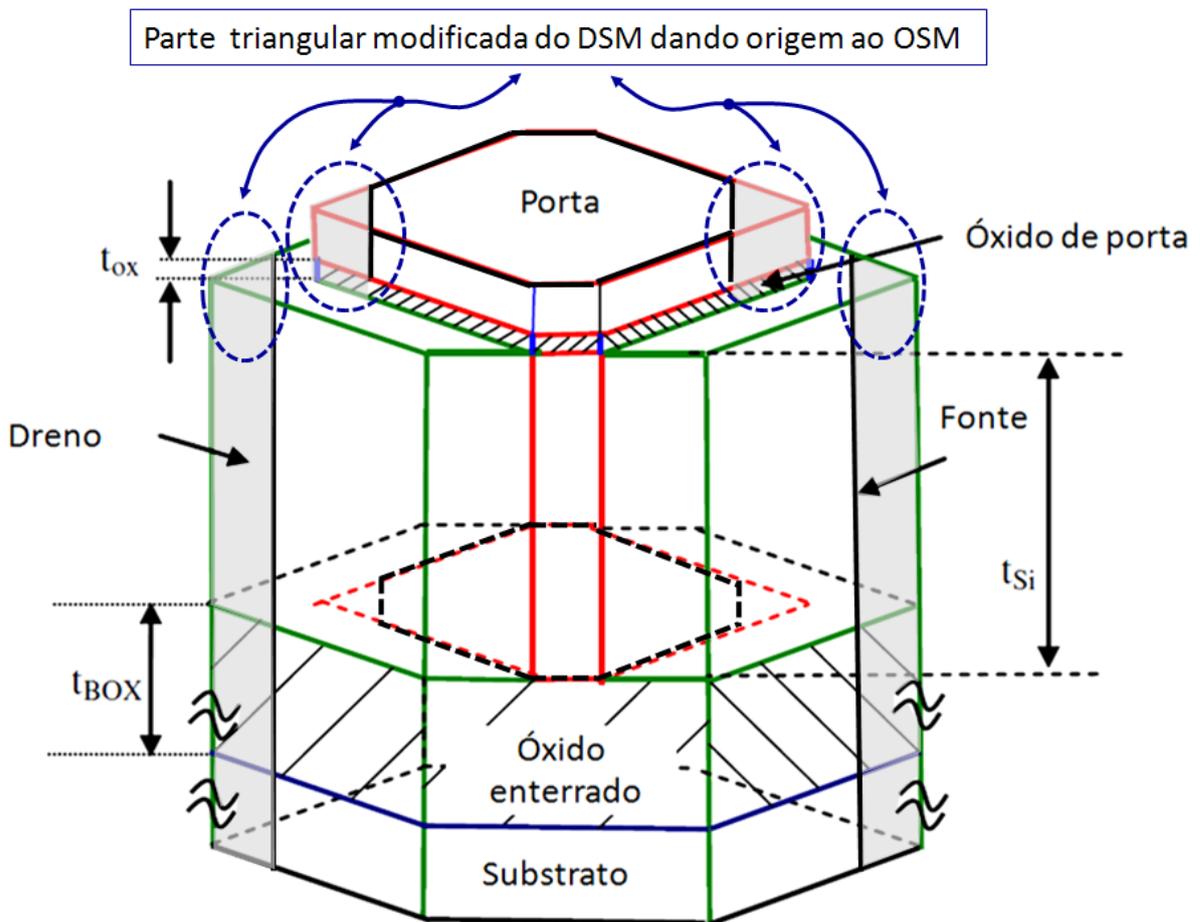
Analisando a equação (4), trigonometricamente tem-se que quando o ângulo  $\alpha$  tende a 0, o valor do fator de ajuste tende a 2, ou seja,  $I_{DS_{DSM}} = 2I_{DS_{CSM}}$ , dado que as somas das componentes dos campos elétricos longitudinais ocorrem em toda a região do canal. Esse comportamento não ocorre para  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  devido a uma menor sobreposição das linhas de campo elétrico [34].

As utilizações dos SOI MOSFETs com geometria de porta hexagonal (DSM) podem seguir duas abordagens distintas. A primeira delas baseia-se em substituir os SOI MOSFETs com geometria de porta retangular (CSM) pelos DSMs, para potencializar os ganhos elétricos, enquanto a segunda abordagem parte do princípio que o circuito eletrônico já está bem dimensionado e neste caso podemos selecionar o DSM que forneça a mesma corrente elétrica de dreno  $I_{DS}$  que o CSM, o que resultará em uma redução significativa da área ocupada previamente pelos SOI MOSFET com geometria de porta retangular. [34].

Os transistores DSMs podem ser utilizados em circuitos integrados analógicos devido a sua maior transcondutância e similar tensão Early (no caso para  $\alpha=110^\circ$ ). Como desvantagem, o transistor do tipo diamante, apresenta um alto valor de corrente de estado desligado  $I_{OFF}$  quando comparado ao CSM, o que o torna menos atrativo para aplicações em circuitos integrados digitais [34].

A topologia da estrutura octogonal é representada na Figura 5. A partir dela fica evidenciada a sua concepção, por meio de um simples corte das extremidades. Como já demonstrado para a estrutura do tipo Diamante, as espessuras dos óxidos de porta, da camada de silício e do óxido enterrado são dadas por  $t_{ox}$ ,  $t_{Si}$  e  $t_{BOX}$ , respectivamente.

Figura 5 - Estrutura 3D do SOI MOSFET do tipo Octogonal



Fonte: Autor

Na Figura 5, as espessuras dos óxidos de porta, da camada de silício e do óxido enterrado são dadas por  $t_{ox}$ ,  $t_{Si}$  e  $t_{BOX}$ , respectivamente.

Assim como para o SOI nMOSFET com geometria de porta hexagonal (DSM), o SOI MOSFET com geometria de porta octogonal (OSM) possibilita três efeitos, sendo eles:

- a) efeito de Canto Longitudinal (*longitudinal corner effect*, LCE);
- b) conexão paralela de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*Parallel Connection of MOSFETs with Different Channel Lengths Effect*, PAMDLE);
- c) desativação dos MOSFETs parasitários nas regiões de Bico de Pássaro (*Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect*, DEPAMBBRE).

A interação entre estes três efeitos elétricos confere ao OSM um melhor desempenho elétrico quando comparado ao DSM e ao CSM.

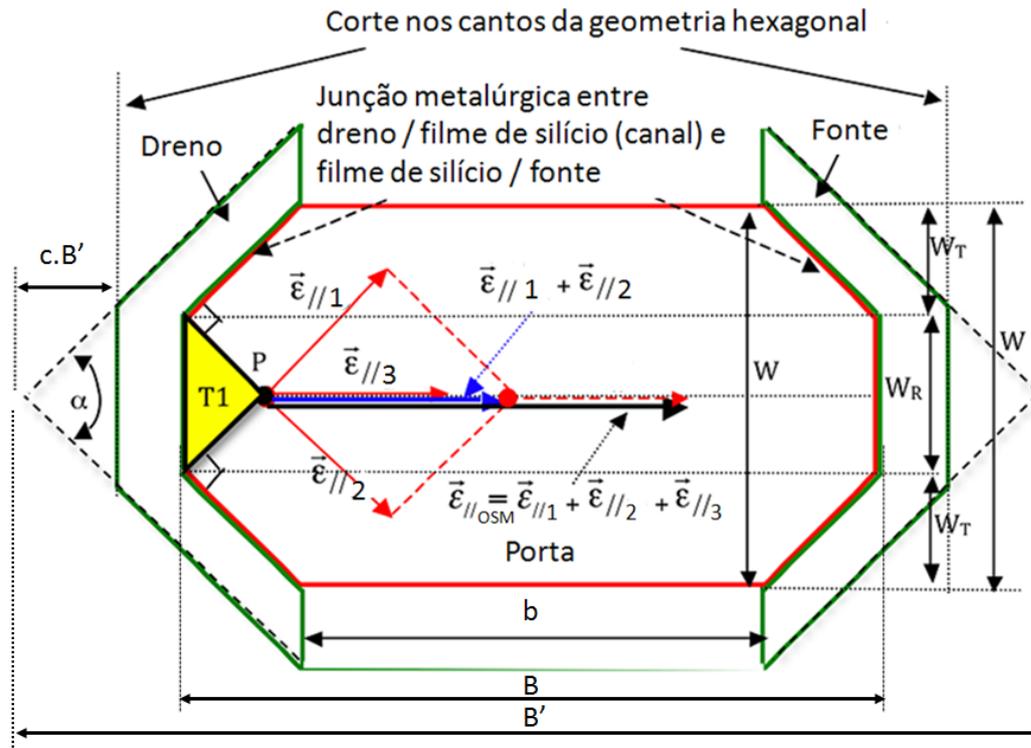
### 2.2.1 Efeito LCE

A Figura 6 representa a vista superior da topologia octogonal de um nMOSFET, resultante dos cortes na estrutura hexagonal. Ao polarizarmos o OSM, origina-se um novo vetor de campo elétrico longitudinal, quando comparado com a estrutura hexagonal. Este terceiro vetor é representado na Figura 6, por  $\overrightarrow{\varepsilon_{//3}}$ . Também estão presentes na estrutura outros dois vetores representados na Figura 6, que são  $\overrightarrow{\varepsilon_{//1}}$  e  $\overrightarrow{\varepsilon_{//2}}$ , respectivamente, que da mesma forma, são comuns à estrutura do MOSFET do tipo Diamante. Desta maneira, o campo elétrico resultante é dado pela soma vetorial dos três campos elétricos citados, ou seja,  $\overrightarrow{\varepsilon_{//OSM}} = (\overrightarrow{\varepsilon_{//1}} + \overrightarrow{\varepsilon_{//2}} + \overrightarrow{\varepsilon_{//3}})$ , resultando assim na melhoria dos valores de corrente de dreno e da transcondutância quando comparadas ao do DSM equivalente, considerando a mesma área de porta ( $A_G$ ), o mesmo fator geométrico ( $W/L$ ) e as mesmas condições de polarização [34].

Ainda analisando a Figura 6, “W” representa a largura de canal, “b” e “B” indicam o menor e maior comprimentos de canal (respectivamente), B’ é o comprimento de canal do nMOSFET do tipo Diamante que dá origem a estrutura octogonal, “c” é o fator de corte que indica a redução percentual aplicada nas extremidades da geometria hexagonal para obter a estrutura octogonal, “ $\alpha$ ” indica o ângulo de projeto do OSM. A região “T1”, indicado na área amarela, representa a região de canal na qual temos a influência de apenas um campo elétrico longitudinal ( $\overrightarrow{\varepsilon_{//3}}$ ). Complementarmente, a região de canal octogonal pode ser dividida em

três regiões: duas com uma geometria trapezoidal com largura “ $W_T$ ” e uma com geometria retangular com largura “ $W_R$ ”.

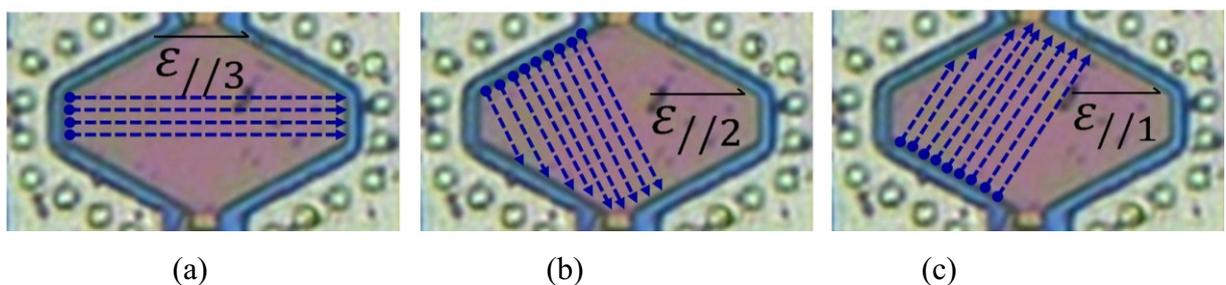
Figura 6 - Representação do leiaute do SOI MOSFET do tipo Octogonal



Fonte: Autor

O comportamento de cada campo elétrico longitudinal (*longitudinal electric Field*, LEF) é ilustrado na Figura 7. O LEF ocorre perpendicularmente a cada junção *pn* entre a região de dreno e região de canal, no caso da geometria octogonal temos a formação de três LEFs (Figura 7.a, Figura 7.b e Figura 7.c).

Figura 7 - Representação do LEFs presentes no SOI MOSFET do tipo Octogonal



Fonte: Autor

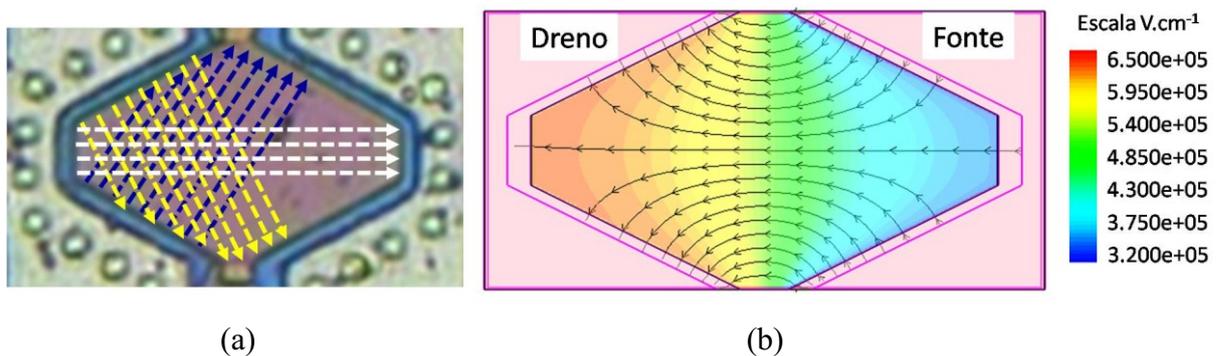
A corrente elétrica  $I_{DS}$  é dada pelo campo elétrico resultante e é mensurado pela equação (6);

$$I_{DS} = Q_n \times \mu_n \times \varepsilon_{//} \quad (6)$$

Onde “ $Q_n$ ” representa a densidade de cargas de elétrons ao longo do canal, “ $\mu_n$ ” a mobilidade do elétron e  $\varepsilon_{//}$  o campo elétrico longitudinal resultante, decorrente da aplicação da polarização entre dreno e fonte.

Vale ressaltar que os campos elétricos longitudinais não ocorrem de forma isolada, e a devida interação entre os mesmos dá origem ao campo elétrico longitudinal resultante. A representação de cada um deles ao longo da região de canal do SOI nMOSFET é mostrada na Figura 8 (a) enquanto a interação entre elas é indicada na Figura 8 (b).

Figura 8 - Representação dos componentes vetoriais dos campos elétricos longitudinais do SOI nMOSFET do tipo octogonal, sem interação (a) e com interação entre elas (b) obtidas por simulação numérica tridimensional



Fonte: Autor

Analisando a Figura 8 (a) fica claro que temos três regiões distintas ao longo do canal. A primeira delas representa a área onde temos a influência de apenas uma LEF, na segunda região temos a influência de duas LEFs, ou seja, sobreposição das linhas amarela com as linhas brancas, as linhas brancas com as linhas azuis e as linhas azuis com as linhas amarelas, enquanto na terceira região temos a influência de todos os LEFs, ou seja, sobreposição de todas as linhas de campo elétrico longitudinal.

A interação entre elas, inclusive com a influência do efeito PAMDL, é indicada na Figura 8 (b), que foi obtida através de uma simulação numérica 3D de uma estrutura octogonal. A simulação foi realizada no simulador Sentaurus, considerando os seguintes modelos: modelo unificado Phillips para degradação da mobilidade devido a dopagem e concentração de portadores, modelo Lombardi para degradação da mobilidade nas interfaces

com o óxido, modelo de Canali para saturação, o modelo de Shockley-Read-Hall para o tempo de vida dos portadores em função da dependência com a dopagem e o modelo do estreitamento da banda (antigo modelo Sloopboom). Já a estrutura simulada foi construída com as seguintes espessuras: 40 nm para a camada de silício, 145 nm para o óxido enterrado, 2,5 nm para o óxido de porta, com “W” de 900 nm, “b” e “B” com 150 nm e 1500 nm, respectivamente, e com concentrações na região de canal e dreno e fontes iguais a  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  e  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente.

Na Figura 8 (b), nota-se que o LEF é perpendicular próximo à junção *pn* (nas três bordas) e quase retilíneo no centro do comprimento de canal devido a interação das três LEFs pelo efeito de LCE. A intensidade do LEF resultante é alta na proximidade da região de dreno (representada pela cor laranja com aproximadamente  $6,25 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$ ) e vai decrescendo ao longo do comprimento de canal até atingir a região de fonte (representada pela cor azul com aproximadamente  $3,7 \times 10^5 \text{ V cm}^{-1}$ ).

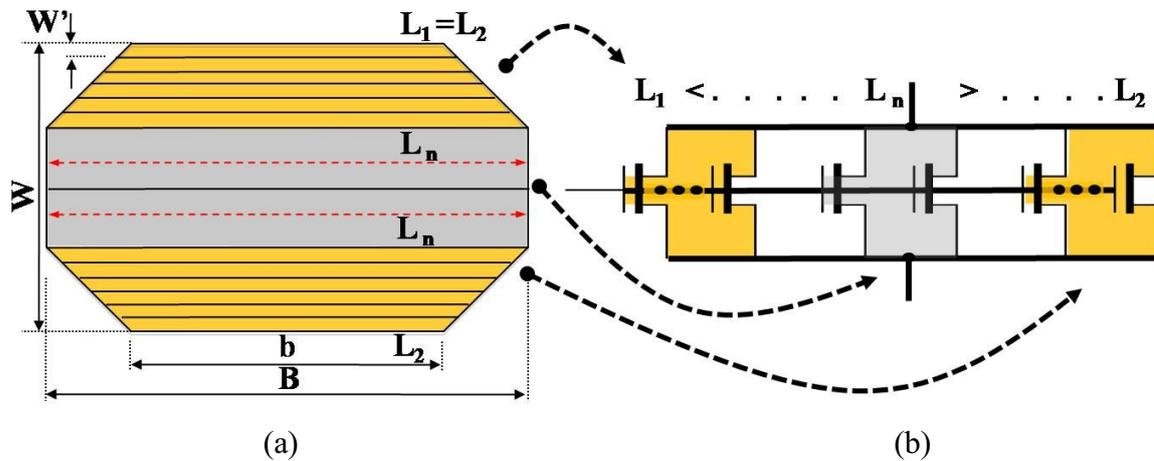
Devido a ocorrência destes efeitos, o campo elétrico resultante da estrutura octogonal é superior ao observado na estrutura convencional, se considerado que eles apresentam as mesmas áreas de porta e as mesmas condições de polarização.

### 2.2.2 Efeito PAMDLE

Para projetarmos um CSM com a mesma área de porta que a do OSM, é necessário que o comprimento de porta (*L*) do CSM seja igual a  $(b+2B)/3$  [34]. Este valor de *L* é usado para normalizar os resultados e assim garantir a eliminação do fator geométrico.

Aliada a esta característica, a Figura 9, descreve estruturalmente o efeito PAMDLE, onde é possível observar que a região de porta do SOI MOSFET do tipo octogonal é dividida em infinitas partes que se aproximam das características de um SOI MOSFET com geometria de porta retangular, conforme apresentado pela Figura 9 (a). A devida representação elétrica é ilustrada na Figura 9 (b). Nesta figura, verifica-se que a representação elétrica dos infinitos nMOSFETs é dada pela conexão paralela dos mesmos, considerando que eles apresentam a mesma largura de canal dada por “ $W' = W/n$ ”, onde “*n*” tende ao infinito, mas com diferentes comprimentos de canal, que variam de “*b*” até “*B*”, ou seja,  $b \leq L_n \leq B$  [50].

Figura 9 - Região de porta do SOI nMOSFET do tipo octogonal, dividida em infinitas partes (a), e o seu devido circuito elétrico equivalente (b)



Fonte: Autor

Na Figura 9,  $L_1$  e  $L_2$  são os menores comprimentos de canal do nMOSFET do tipo octogonal.

Os transistores com menor comprimento de canal estão nas extremidades e identificados com a cor laranja, enquanto os transistores com maior comprimento de canal estão localizados no centro e identificados com a cor cinza. Esta característica induz a corrente elétrica entre dreno e fonte a fluir mais pelas extremidades, resultando no efeito PAMDLE [50] do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal.

Desta maneira, a partir da Figura 9 (a), o comprimento efetivo de canal é dado pela equação (7);

$$\frac{W}{L_{eff}} = \frac{W'/n}{L_1} + \frac{W'/n}{L_2} + \dots + \frac{W'/n}{L_n} = \sum_{i=1}^n \frac{W'/n}{L_i} \quad (7)$$

A Figura 9 pode ser redefinida pela Figura 10, onde de fato o “ $n$ ” tende ao infinito. Sendo assim a equação (7) pode ser reescrita pela equação (8).

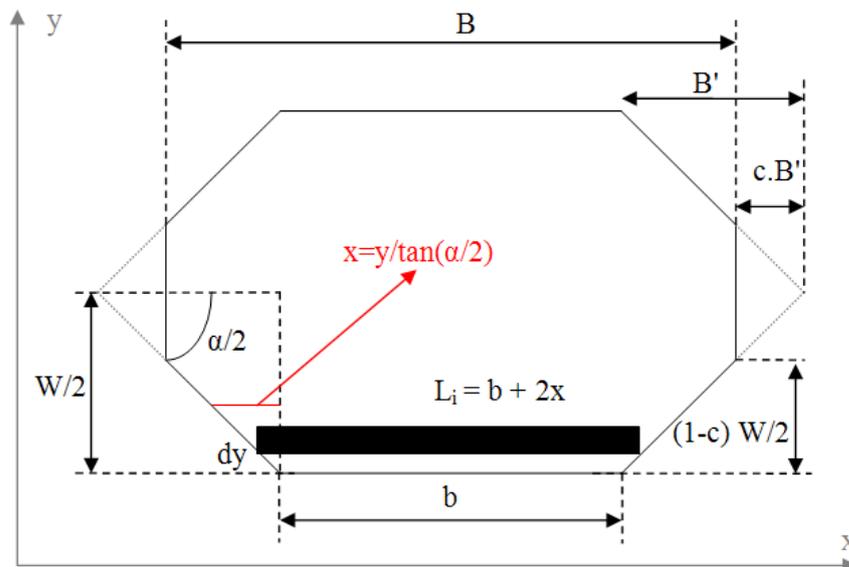
$$\frac{W}{L_{eff}} = 2 \int_0^{(1-c)W/2} \frac{dy}{L_i} + 2 \int_{(1-c)W/2}^{W/2} \frac{dy}{B} \quad (8)$$

Pela resolução da equação (8), determinamos o comprimento efetivo de canal da estrutura octogonal, conforme apresentado pela equação (9).

$$L_{eff} = \frac{1}{\frac{1-c}{B} \ln\left(\frac{B}{b}\right) + \frac{c}{B}} \quad (9)$$

Em outras palavras, a Figura 10 representa o SOI MOSFET do tipo octogonal com sua infinitesimal largura de canal ( $dy$ ), conectado paralelamente para compor a região de canal.

Figura 10 - Representação da infinitesimal largura de canal de uma geometria octogonal



Fonte: Autor

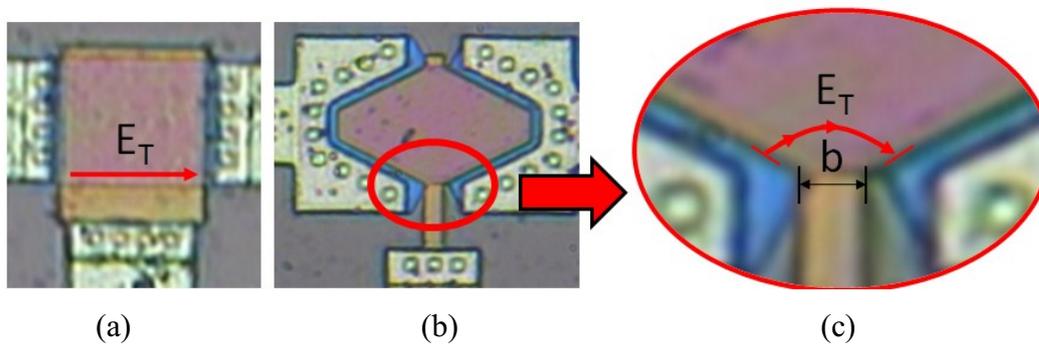
Desta maneira, o efeito PAMBLE é capaz de reduzir o comprimento efetivo de canal de um SOI MOSFET com geometria de porta octogonal quando comparado com o seu equivalente SOI MOSFET com geometria de porta retangular, resultando em uma maior corrente elétrica de dreno na topologia octogonal.

### 2.2.3 Efeito DEPAMBRE

O efeito DEPAMBRE é ocasionado em decorrência do fato de que as linhas do campo elétrico longitudinal resultante nas regiões dos bicos de pássaro do SOI nMOSFET com geometria octogonal, ao invés de serem retas (conforme indicada na Figura 11 (a) para o

CSM), serem curvas na região indicada pela Figura 11(b). Este fato se deve ao perfil do campo elétrico da estrutura octogonal, conforme indicado na Figura 8 (b). Assim, devido à interação entre os campos elétricos longitudinais, as linhas do campo elétrico resultante assumem um perfil curvado, conforme representação na Figura 11 (c).

Figura 11 - Representação do campo elétrico longitudinal em uma das regiões de bico de pássaro de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular (a), de um SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (b), e uma vista ampliada de uma das regiões de bico de pássaro de um SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (c)



Fonte: Autor

Note que para um CSM, as linhas de campo elétrico longitudinal são paralelas, e consequentemente os transistores parasitários associados às regiões de bico de pássaro estarão eletricamente ativados devido à polarização de dreno. É importante ressaltar que os transistores parasitários associados às regiões dos bicos de pássaros não são desejados, dado que eles são responsáveis por aumentar a corrente de fuga nos SOI nMOSFETs principalmente quando eles operam em ambientes de radiações ionizantes, onde ocorre o efeito da Dose Ionizante Total [50].

### 2.3 TENSÃO DE LIMIAR

A tensão de limiar é definida como a mínima tensão elétrica que deve ser aplicada à porta de um MOSFET que seja capaz de induzir uma quantidade suficiente de portadores minoritários na região de canal, formando assim, uma camada de inversão suficiente para que haja a condução de corrente elétrica entre fonte e dreno [7].

Para os MOSFETs e SOI MOSFETs PD, a tensão de limiar é determinada pela equação (10):

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{qN_A x_{dMÁX}}{C_{OX}} \quad (10)$$

onde  $V_{FB}$  é a tensão de faixa plana (*flat band voltage*),  $\phi_F$  é o potencial de Fermi,  $q$  é a carga elementar do elétron,  $N_A$  é a concentração de impurezas aceitadoras do substrato,  $x_{dMÁX}$  é a profundidade máxima da região de depleção e  $C_{OX}$  é a capacitância do óxido de porta por unidade de área.

A  $V_{FB}$  é determinada pela equação (11) [7].

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} \quad (11)$$

onde  $\phi_{MS}$  é a diferença da função trabalho entre o metal de porta e o silício e  $Q_{OX}$  é a densidade efetiva de cargas fixas no óxido por unidade de área.

Considerando um MOSFET convencional (*Bulk*), a profundidade máxima de depleção é determinada pela equação (12) [7];

$$x_{dMÁX} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_{Si}\phi_F}{qN_A}} \quad (12)$$

onde  $\varepsilon_{Si}$  é a permissividade do silício.

O potencial de Fermi é determinado pela equação (13) [7];

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (13)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta e  $n_i$  é a concentração intrínseca de portadores.

Já para os SOI nMOSFETs FD, a tensão de limiar pode ser descrita pelo modelo de Lim & Fossum [51]. O sistema baseia-se em um conjunto de equações, em que a tensão aplicada na primeira porta ( $V_{G1}$ ) influenciará o potencial de superfície da segunda interface

( $\phi_{S2}$ ), assim como a tensão aplicada no substrato ( $V_{G2}$ ), influenciará o potencial de superfície da primeira interface ( $\phi_{S1}$ ). Esta relação é representada pelas equações (14) e (15), respectivamente.

$$V_{G1} = \phi_{MS1} - \frac{Q_{ox1}}{C_{ox1}} + \left(1 + \frac{C_{Si}}{C_{ox1}}\right) \times \phi_{S1} - \frac{C_{Si}}{C_{ox1}} \times \phi_{S2} - \frac{\frac{1}{2}Q_D + Q_{inv1}}{C_{ox1}} \quad (14)$$

$$V_{G2} = \phi_{MS2} - \frac{Q_{ox2}}{C_{ox2}} + \left(1 + \frac{C_{Si}}{C_{ox2}}\right) \times \phi_{S2} - \frac{C_{Si}}{C_{ox2}} \times \phi_{S1} - \frac{\frac{1}{2}Q_D + Q_{S2}}{C_{ox2}} \quad (15)$$

Onde  $C_{Si}$  é a capacitância da camada de silício por unidade de área,  $\phi_{MS1}$  é a diferença de função trabalho entre a porta e a camada de silício,  $\phi_{MS2}$  é a diferença da função trabalho entre o substrato e a camada de silício,  $\phi_{S1}$  e  $\phi_{S2}$  são os potenciais de superfície da primeira e da segunda interface respectivamente,  $Q_{inv1}$  e  $Q_{S2}$  são a carga de inversão por unidade de área na primeira interface e a carga de inversão ( $Q_{S2} < 0$ ) ou acumulação ( $Q_{S2} > 0$ ) por unidade de área na segunda interface, respectivamente e por fim  $Q_D$  é a carga total de depleção na camada de silício por unidade de área.

As equações acima se alteram em função da condição de polarização da segunda interface da seguinte maneira:

1 – Quando a segunda interface estiver acumulada ( $\phi_{S1} = 2\phi_F$ ,  $\phi_{S2} = 0$  e  $\phi_{inv1} = 0$ ), tem-se definido  $V_{T1,acc2}$  pela equação (16):

$$V_{T1,acc2} = \phi_{MS1} - \frac{Q_{ox1}}{C_{ox1}} + \left(1 + \frac{C_{Si}}{C_{ox1}}\right) \times 2\phi_F - \frac{Q_D}{2C_{ox1}} \quad (16)$$

2 – Quando a segunda interface estiver invertida ( $\phi_{S1}$  e  $\phi_{S2} = 2\phi_F$  e  $\phi_{inv1} = 0$ ), tem-se definido  $V_{T1,inv2}$  pela equação (17):

$$V_{T1,inv2} = \phi_{MS1} - \frac{Q_{ox1}}{C_{ox1}} + 2\phi_F - \frac{Q_D}{2C_{ox1}} \quad (17)$$

3 – Quando a segunda interface estiver em depleção ( $0 < \phi_{S2} < 2\phi_F$  e  $Q_{S2} = 0$ ), tem-se definido  $V_{T1,depl2}$  pela equação (18):

$$V_{T1,depl2} = V_{T1,acc2} - \frac{C_{Si}C_{ox2}}{C_{ox1}(C_{Si} + C_{ox2})} (V_{G2} - V_{G2,acc2}) \quad (18)$$

Sendo,

$$V_{G2,acc2} = \phi_{MS2} - \frac{Q_{ox2}}{C_{ox2}} + \frac{qN_A t_{Si}}{2C_{ox2}} - \left( \frac{C_{Si}}{C_{ox2}} \right) 2\phi_F \quad (19)$$

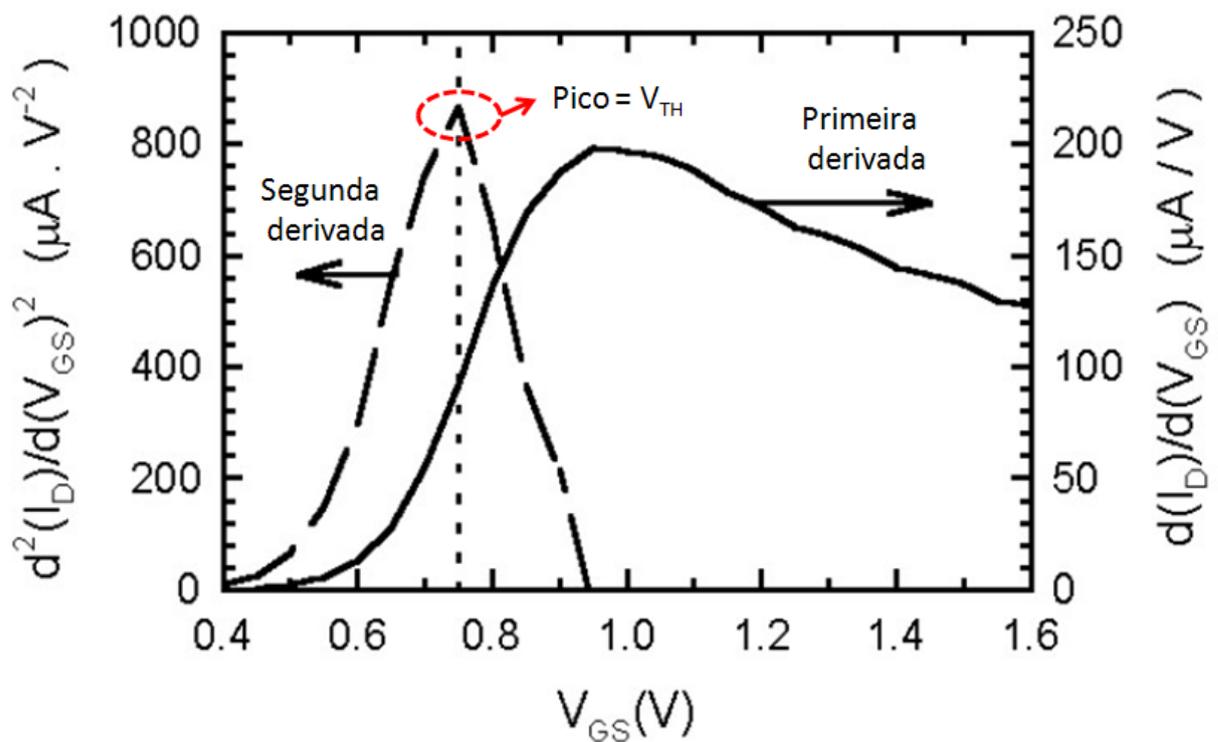
Estas expressões são válidas somente quando a espessura da camada de inversão e acumulação forem bem menores que a espessura da camada de silício, já que os transistores de filme fino são influenciados pelos efeitos quânticos [52].

Dada a importância da tensão de limiar, métodos de extração mais precisos continuam sendo estudados principalmente para aumentar a confiabilidade para baixas tensões de alimentação. Alguns destes métodos são listados abaixo[53]:

- a) pela extrapolação da região linear (*Linear Extrapolation – LE*) (para baixos valores de  $V_{DS}$ );
- b) pela razão da corrente de dreno pela raiz quadrada da transcondutância (*Current to square root Transconductance Ratio – CsrTR*) (para baixos valores de  $V_{DS}$ );
- c) pelo pico da segunda derivada de  $I_{DS}$  em função  $V_{GS}$  (*second derivative - SD*) (para baixos valores de  $V_{DS}$ ) [54];
- d) pelo nível de corrente constante – (*constant current - CC*) –  $I_{DS} = 10^{-7}(W/L)$ ;
- e) pela razão da transcondutância pela corrente de dreno (*transconductance-to-current-ratio – TCR*);

Para este trabalho, o método escolhido para a obtenção da tensão de limiar foi o SD (*second derivative*), ou seja, valor do pico da segunda derivada da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  (para  $V_{DS}=10$  mV), conforme a Figura 12 [55].

Figura 12 - Primeira e segunda derivada da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$ , ilustrando a obtenção da tensão de limiar, considerando-se  $V_{DS}$  baixo



Fonte: Autor, “adaptada de”[55]

## 2.4 INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR

A inclinação de sublimiar (SS) é dada pelo inverso da inclinação da curva do logarítmico de  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  no regime de sublimiar, cuja unidade é expressa em milivolts por década (mV/dec.) [7].

Este parâmetro é especialmente importante para aplicações de CIs CMOS digitais, dado que, quanto menor este valor, maior a velocidade de chaveamento do transistor. No entanto, este valor está atrelado à tecnologia do transistor e ao modo de funcionamento do mesmo, em que não podemos “ajustá-la” para o referido ganho de velocidade [7].

A sua representação é dada pela equação (20) [44]:

$$SS = \frac{1}{\frac{d(\log I_{DS})}{dV_{GS}}} \quad (20)$$

Desprezando-se as armadilhas da interface, a SS é dada pela equação (21) [44];

$$SS = \frac{kT}{q} \ln(10) (1 + \alpha') \quad (21)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta, “q” é a carga elementar e  $\alpha'$  é obtido conforme as relações indicadas abaixo:

a) considerando um MOSFET implementado com tecnologia *Bulk* ou SOI MOSFET PD [44]:

$$\alpha' = \frac{C_D}{C_{ox1}} \quad (22)$$

b) considerando um SOI MOSFET FD com a segunda interface acumulada [44]:

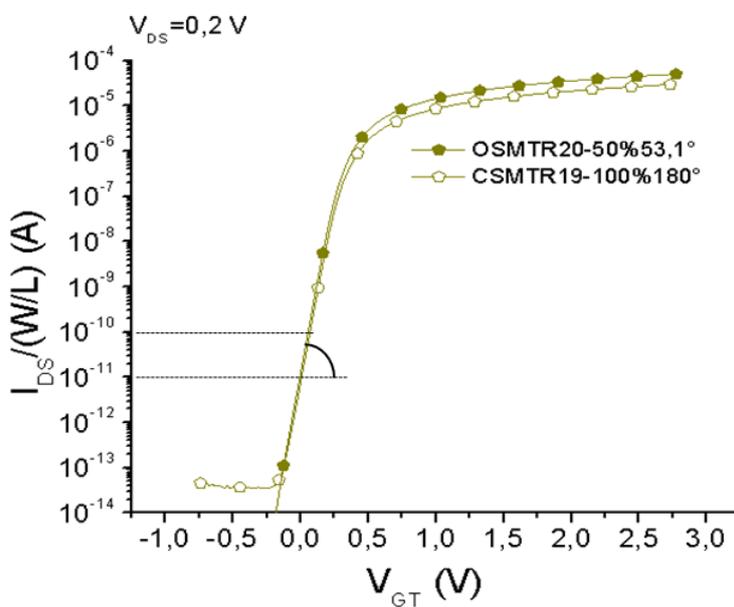
$$\alpha' = \frac{C_{Si}}{C_{ox1}} \quad (23)$$

c) considerando um transistor SOI MOSFET FD com a segunda interface depletada [44]:

$$\alpha' = \frac{C_{Si}C_{ox2}}{C_{ox1}(C_{Si} + C_{ox2})} \quad (24)$$

A Figura 13 apresenta exemplos de duas curvas dos logaritmos de  $I_{DS}/(W/L)$  em função da sobretensão de porta ( $V_{GT}=V_{GS}-V_{TH}$ ), para  $V_{DS}$  igual a 0,2 V de dois SOI nMOSFETs, sendo um com geometria de porta convencional e outro com geometria de porta octogonal.

Figura 13 - Representação de duas curvas  $I_{DS}/(W/L)$  em função de  $V_{GT}$ , de um OSM e um CSM em escala logarítmica, onde é possível obter os valores de suas inclinações de sublimiar



Fonte: Autor

O valor de SS de um SOI nMOSFETs FD, aproxima-se do limite teórico de 60 mV/década em temperatura ambiente. Já os transistores MOSFETs apresentam valores na faixa de 80 mV/década até 120 mV/década [44].

## 2.5 TRANSCONDUTÂNCIA

A transcondutância ( $g_m$ ) representa a conversão da tensão de porta em corrente de dreno, ou em outras palavras, é a medida da eficácia do controle da corrente de dreno pela tensão de porta. Por esta razão, a transcondutância é um parâmetro muito importante para as aplicações de CIs CMOS analógicos, e ela é determinada pela equação (25) [7].

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \quad (25)$$

Assim como na inclinação de sublimiar, a transcondutância também varia em função das condições de polarização da segunda interface. Neste caso considerando o MOSFET convencional (*Bulk*) ou um SOI MOSFET na região de saturação, a transcondutância é dada pela equação (26):

$$g_m = \frac{\mu_n C_{OX1} W}{(1 + \alpha') L} (V_{GS} - V_{TH}) \quad (26)$$

Desde que a tensão de dreno seja maior que a tensão de dreno na saturação ( $V_{DS} > V_{DSAT}$ ).

Outra figura de mérito muito importante para os CIs CMOS analógicos, é a razão da transcondutância pela corrente de dreno ( $g_m/I_{DS}$ ), que descreve a eficiência em transformar corrente elétrica (potência elétrica) em transcondutância (velocidade de processamento), além de indicar as regiões dos diferentes regimes de inversão do canal, como pode ser observado pela equação (27), que define o ganho de tensão ( $A_V$ ) para um SOI MOSFET [44]:

$$A_V = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{\Delta I_{DS}}{g_{ds}} \cdot \frac{1}{\Delta V_{in}} = \frac{g_m}{g_{ds}} = \frac{g_m}{I_{DS}} \cdot V_{EA} \quad (27)$$

Onde  $\Delta V_{out}$  representa a variação da tensão de saída de um SOI MOSFET,  $\Delta V_{in}$  representa a variação da tensão de entrada,  $\Delta I_{DS}$  representa a variação da corrente de dreno,  $g_m$  representa a transcondutância,  $g_{ds}$  representa a condutância de saída de dreno e  $V_{EA}$  é a tensão Early [44].

## 2.6 CORRENTE DE ESTADO LIGADO, CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO E CORRENTE DE FUGA

Com a evolução da microeletrônica e com a redução contínua das dimensões dos MOSFETs, o consumo de energia elétrica e a dissipação de energia elétrica associada a esses dispositivos são de extrema importância para as aplicações de CIs CMOS. Ela pode acontecer por dois modos: estático e dinâmico. Considerando-se o comportamento dinâmico, tanto o consumo de energia elétrica como a devida dissipação de energia elétrica ocorrem durante o chaveamento do transistor, ou seja, quando ocorre o carregamento e o descarregamento das capacitâncias dos CIs CMOS digitais. No caso do comportamento estático (*off-state*), o consumo de energia elétrica e a dissipação de energia elétrica ocorrem devido à corrente de fuga [56]. As baixas correntes de fuga e de estado desligado são mandatórias para CIs CMOS *low-power & low voltage*.

A potência dissipada durante o chaveamento ( $P_{ON}$ ) é diretamente proporcional a capacitância efetiva do próximo estágio do CI CMOS, do quadrado da tensão de alimentação e da frequência de operação do CI CMOS digital e é determinada pela equação (28) [56].

$$P_{ON} = C_{eff}(V_{DD})^2 f \quad (28)$$

Onde  $C_{eff}$  representa a capacitância do próximo estágio do CI CMOS digital,  $V_{DD}$  a tensão de alimentação e  $f$  a frequência de operação do CI CMOS.

Similarmente, a potência estática ( $P_{OFF}$ ) é dada pela equação (29) [56].

$$P_{OFF} = W_{TOT}V_{DD}I_{OFF} \quad (29)$$

Onde  $W_{TOT}$  representa a largura total do transistor.

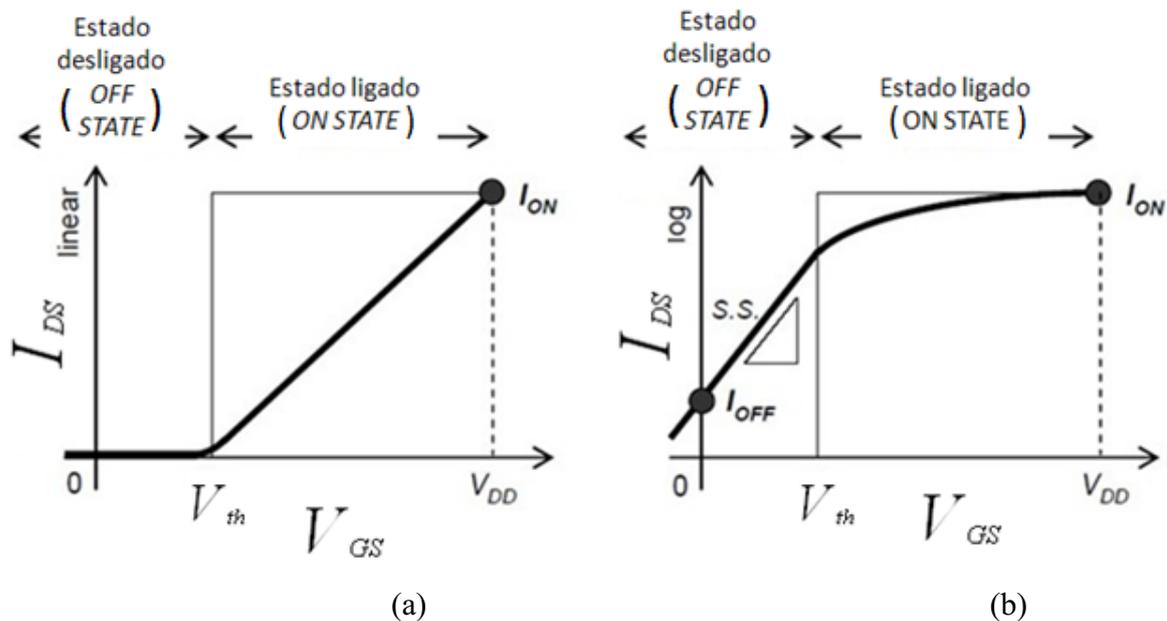
A corrente de estado desligado ( $I_{OFF}$ ) é influenciada pela tensão de limiar e pela inclinação de sublimiar, enquanto que a corrente de estado ligado está relacionada com a tensão de limiar e ao fator de ganho  $\beta = \mu C_{OX} \frac{W}{L}$  do transistor. Na região de estado ligado, observa-se uma elevada condutância de saída e está relacionada com o fator geométrico do transistor, ou seja, a razão  $W/L$  [57].

O valor da corrente de dreno quando  $V_{GS}$  é igual a 0 e  $V_{DS}$  é igual a  $V_{DD}$ , é definido como corrente de estado desligado (*off-state current*,  $I_{OFF}$ ), [58]. Por outro lado, o valor da

corrente de dreno quando  $V_{GS}$  é igual a  $V_{DS}$  que é igual a  $V_{DD}$ , é definido como corrente de estado ligado (*on-state current*,  $I_{ON}$ ) [58].

A Figura 14 apresenta  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  (Fig. 14a.) e o logaritmo de  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  (Fig. 14.b), indicando as regiões de estado ligado e desligado [59].

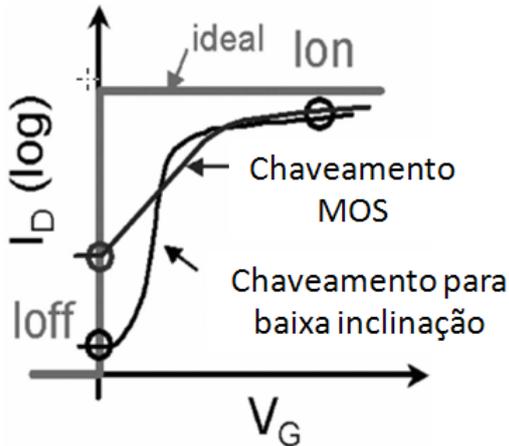
Figura 14 - Representação da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  para obtenção de  $I_{ON}$  e  $I_{OFF}$ : (a) em escala linear e (b) em escala logarítmica



Fonte: Autor, “adaptado de” [59]

As comparações entre as transições de chaveamento de um SOI MOSFET do estado ligado para o desligado estão relacionadas à figura de mérito dada pela razão  $I_{ON}/I_{OFF}$ , e são utilizadas para verificar a capacidade dos CIs CMOS que estão relacionados com a velocidade de processamento. Quanto menor é a inclinação de sublimiar, mais abrupta é a transição do estado desligado para o estado ligado, isto é, tem-se um comportamento do SOI MOSFET, mais próximo de um chaveamento ideal, resultando em um menor consumo de energia [60]. A Figura 15 ilustra apenas de caráter informativo as correntes de estado desligado, para um chaveamento ideal, para o chaveamento de um MOSFET e para o chaveamento de um SOI MOSFET [60].

Figura 15 - Gráfico ilustrativo contendo a representação de um chaveamento de um MOSFET ideal, um chaveamento de um MOSFET (Bulk) e o chaveamento de um SOI MOSFET



Fonte: Autor "adaptado de" [60]

Cabe aqui ressaltar que a corrente de fuga é potencializada principalmente quando os SOI MOSFETs estão sujeitos a altas temperaturas ou sobre os efeitos das radiações [7].

## 2.7 RAZÃO DA CORRENTE DE ESTADO LIGADO PELA CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO

A partir das correntes de estado desligado e ligado, obtém-se a razão  $I_{ON}/I_{OFF}$ . Esta razão está diretamente relacionada com o desempenho em alta frequência e consumo de energia do MOSFET [61]. Quanto maior for a razão  $I_{ON}/I_{OFF}$ , melhor é o desempenho elétrico em alta frequência e o consumo de energia do MOSFET. A razão  $I_{ON}/I_{OFF}$  também é capaz de quantificar a capacidade de leitura de uma célula de memória [61].

## 2.8 RESISTÊNCIA DE ESTADO LIGADO

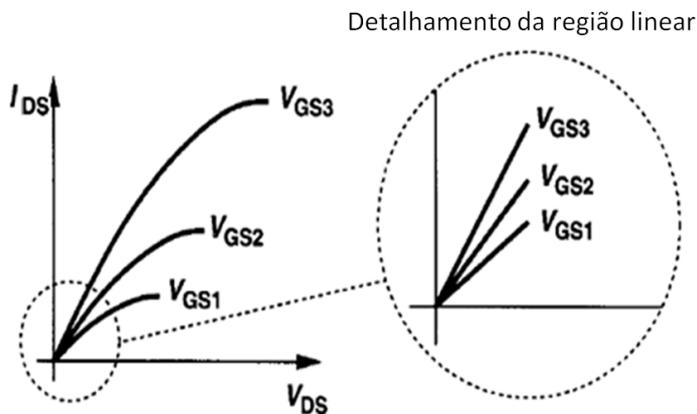
Baixa resistência série de estado ligado, alta potência dissipada e alta frequência de chaveamento são pontos-chaves para os CIs CMOS de potência de alta eficiência. Os novos processos visam atender as demandas quanto a redução do consumo de energia elétrica, assim como a do aumento da velocidade de chaveamento dos CIs CMOS digitais [59]. Dentro deste contexto, a redução do parâmetro elétrico  $R_{ON}$  dos SOI MOSFETs é de suma importância para

viabilizar e garantir a evolução tecnológica, pois é responsável por minimizar as perdas e o aquecimento por efeito Joule dos CIs CMOS [62].

Na região Triodo, a corrente de dreno apresenta uma dependência linear com a tensão  $V_{DS}$  (para baixos valores de  $V_{DS}$ ). Como pode ser visualizada pela Figura 16, cada curva dada por  $I_{DS}$  em função de  $V_{DS}$  pode ser aproximada para uma linha reta na condição de baixo  $V_{DS}$ . Esta região linear da curva de  $I_{DS}$  em função de  $V_{DS}$  representa o comportamento elétrico de um resistor ( $R_{ON}$ ) e é dado pela equação (30), na qual o MOSFET opera como um resistor controlado pela sobretensão de porta ( $V_{GT} = V_{GS} - V_{TH}$ ) (considerando  $V_{DS} \ll 2(V_{GS} - V_{TH})$ ) [63].

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})} \quad (30)$$

Figura 16 - Ilustração da operação linear de um SOI MOSFET de canal  $n$  na região Triodo considerando-se três valores de  $V_{GS}$  ( $V_{GS1}$ ,  $V_{GS2}$  e  $V_{GS3}$ , onde  $V_{GS3} > V_{GS2} > V_{GS1}$ )



Fonte: Autor

A potência dissipada na condição de estado ligado denominada de “*on-state*” ( $P_{ON1}$ ) em função da resistência série de estado ligado ( $R_{ON}$ ), e é dada pela equação (31) [64].

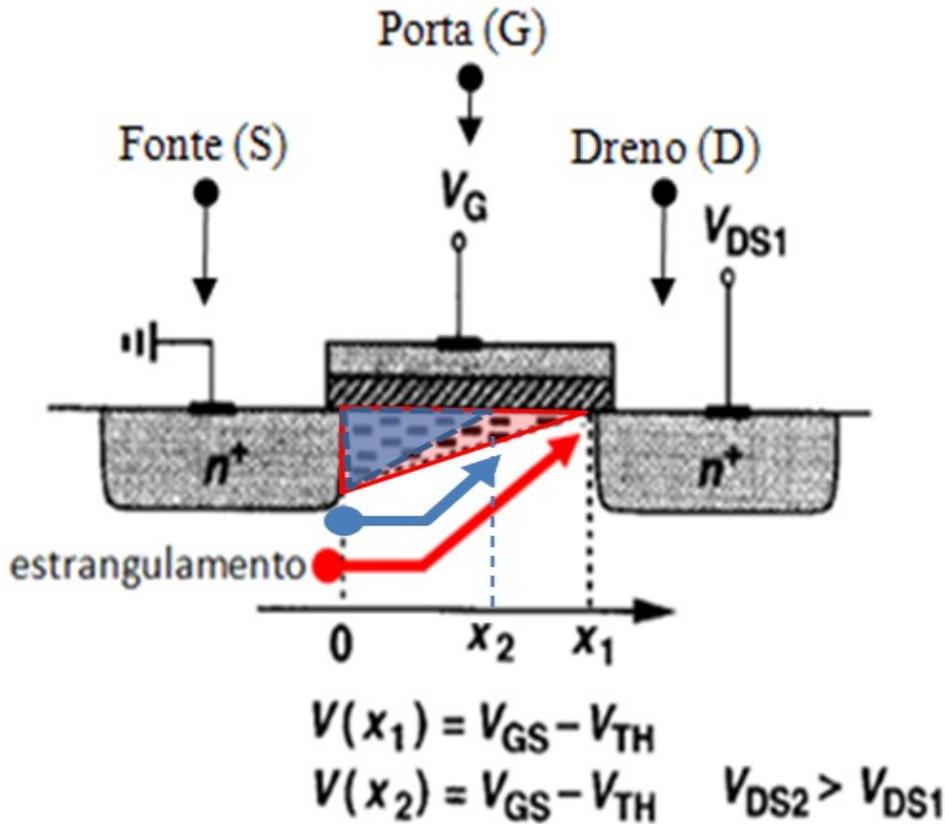
$$P_{ON1} = I_{DS}^2 R_{DS-ON} \quad (31)$$

Em circuitos de potência, a redução da  $R_{ON}$  oferece vantagens pela capacidade de reduzir as perdas do SOI MOSFET durante o comportamento estático e o de reduzir o tamanho do transistor [64].

## 2.9 TENSÃO EARLY

A tensão Early é um parâmetro fundamental para as aplicações de CIs CMOS analógicos, quando configurados como amplificadores. A  $V_{EA}$  está relacionada com a variação da corrente de dreno em função da tensão de dreno na região de saturação [64]. Assim que a tensão de dreno atingir o patamar cujo valor é  $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$ , será induzido o estrangulamento (*pinch-off*) na região de canal próximo ao dreno do MOSFET. Ao aumentar o valor da  $V_{DS}$ , o ponto de estrangulamento desloca-se na direção da fonte, ocasionando desta maneira uma redução do comprimento efetivo do canal ( $L_{eff}$ ) do MOSFET. Como consequência, ocorre o aumento da corrente de dreno na região de saturação [64]. Este comportamento do deslocamento do ponto de *pinch-off* pode ser observado através da Figura 17 [64].

Figura 17 - Comportamento na região de estrangulamento (*pinch-off*) do canal de um MOSFET para  $V_{DS} = V_{GS} - V_{TH}$  (a) e para  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$  (b)



Fonte: Autor, "adaptado de [64]"

Na figura 17,  $x_1$  e  $x_2$  representam os comprimentos efetivos do canal do MOSFET e  $V(x_1)$  e  $V(x_2)$  são as tensões de dreno que definem o local da região de estrangulamento do MOSFET. As tensões de dreno associadas ao  $x_1$  e  $x_2$  são definidas por  $V_{DS1}$  e  $V_{DS2}$ , respectivamente.

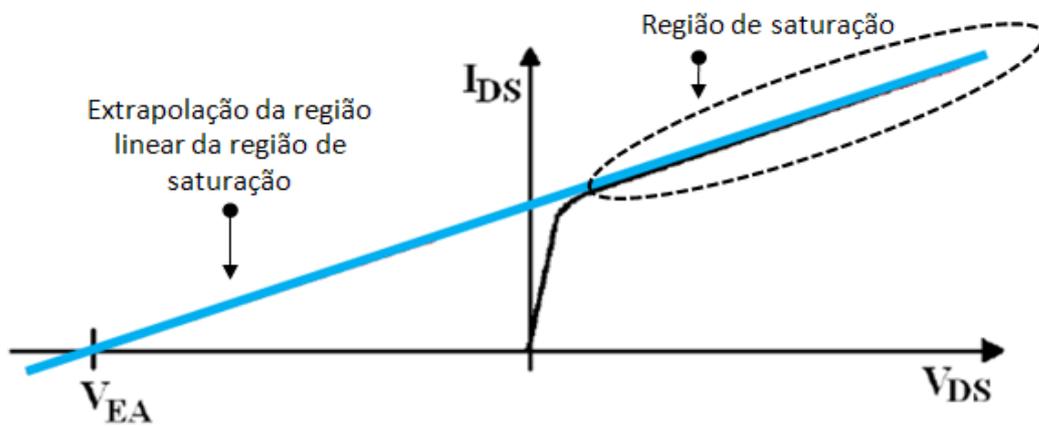
A influência deste efeito é visualizada através da inclinação da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{DS}$  na região de saturação, que por sua vez aumenta a corrente de dreno na região de saturação em decorrência do aumento de  $V_{DS}$  [44]. A influência desta inclinação na corrente de dreno na região de saturação é descrita pela equação (32) [65].

$$I_{DS} \cong \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (32)$$

onde  $\lambda$  é igual a  $\left(-\frac{1}{V_{EA}}\right)$ .

A tensão Early pode ser extraída através da extrapolação da região linear da curva de  $I_{DS}$  em função de  $V_{DS}$  na região de saturação até atingir o eixo das abscissas ( $V_{DS}$ ). O ponto de cruzamento desta extrapolação com o eixo das abscissas é definido como tensão Early [65]. Este procedimento da obtenção da tensão Early, é apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Método de extração da tensão Early pela extrapolação da região linear da região de saturação da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{DS}$  de um MOSFET até o cruzamento com o eixo das abscissas ( $V_{DS}$ )

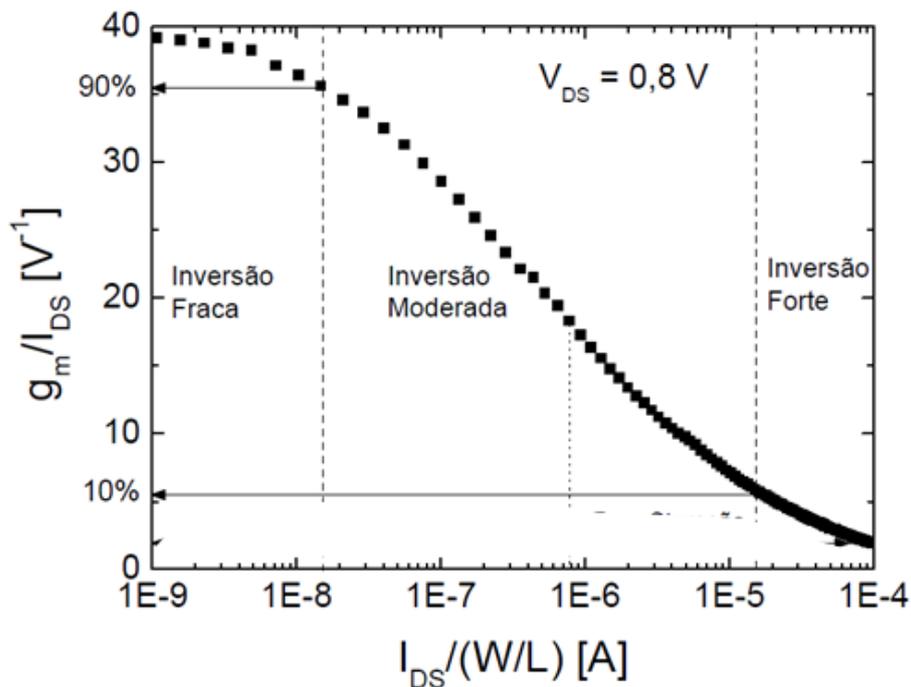


Fonte: Autor

## 2.10 RAZÃO DA TRANSCONDUTÂNCIA PELA CORRENTE DE DRENO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO NORMALIZADA PELO FATOR GEOMÉTRICO

A curva da razão  $g_m/I_{DS}$  em função da  $I_{DS}/(W/L)$  é considerada como uma ferramenta para projeto de CIs CMOS analógicos e de rádio frequência. Ela é capaz de explorar todas as regiões do regime de inversão do canal do SOI MOSFET (inversões fraca, moderada e forte) na qual esse transistor pode ser polarizado, conforme pode ser visto pela Figura 19. Esta curva é universal para os MOSFETs convencionais (*Bulk*) e SOI MOSFETs, pois  $g_m/I_{DS}$  independe do comprimento ( $L$ ) e da largura ( $W$ ) dos dispositivos [66]. Em outras palavras  $g_m/I_{DS}$ , representa a eficiência de um MOSFET em converter corrente elétrica em transcondutância, e consequentemente indica a capacidade de amplificação de sinais analógicos de um MOSFET, considerando-se uma determinada corrente de dreno necessária para polarizá-lo [66].

Figura 19 - Exemplo de uma curva de  $g_m/I_{DS}$  em função de  $I_{DS}/(W/L)$  de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular



Fonte: Autor

Através desta curva característica universal dos MOSFETs, os regimes de inversão do canal podem ser determinados em função do valor de  $(g_m/I_{DS})_{MÁX}$ . Os limites da região de inversão moderada estão entre 90% e 10% do valor de  $(g_m/I_{DS})_{MÁX}$ . A região do regime de inversão fraca é definida de 90% a 100% do valor de  $(g_m/I_{DS})_{MÁX}$ . A região de inversão forte é definida para valores inferiores a 10% de  $(g_m/I_{DS})_{MÁX}$ . Os valores mais elevados de  $g_m/I_{DS}$  são encontrados na região do regime de inversão fraca, devido à relação exponencial entre corrente de dreno e  $V_{GS}$  [67].

Cada região de inversão do canal do MOSFET apresenta os seus benefícios, como por exemplo, a região do regime de inversão moderada é mais atrativa para o desenvolvimento de CIs CMOS analógicos uma vez que contempla um bom compromisso entre o ganho de tensão e a resposta em frequência, quando comparado com a região do regime de inversão forte, que é capaz de produzir um baixo ganho de tensão e uma elevada frequência de ganho de tensão unitário [67]. O regime de inversão fraca, normalmente é usado para gerar altos ganhos de tensão, porém com baixa frequência de operação.

## 2.11 CONDUTÂNCIA DE SAÍDA

O parâmetro  $g_D$ , ou condutância de dreno mede a variação da corrente de dreno com a variação da tensão de dreno para um determinado valor de tensão aplicada à porta, ou seja, quanto menor esta variação, menor é a  $g_D$ .

Este parâmetro indica a sensibilidade do transistor em relação ao campo elétrico longitudinal, e tende a encontrar um menor valor quando o MOSFET está na região de saturação. A condutância de saída é definida pela equação (33) [44].

$$g_D = \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} \quad (33)$$

## 2.12 FREQUENCIA DE GANHO DE TENSÃO UNITÁRIO DO MOSFET

A frequência de ganho de tensão unitário representa a frequência de operação dos CIs CMOS em que a amplitude do sinal de entrada é a mesma que a da saída (ganho unitário de tensão) [68]. A frequência de ganho de tensão unitário é definida pela equação (34) [69].

$$f_T = \left( \frac{g_m}{I_{DS}} \right) \frac{I_{DS}}{2\pi C_L} = \frac{g_m}{2\pi C_L} \quad (34)$$

onde  $C_L$  representa a capacitância de carga.

## 2.13 GANHO DE TENSÃO INTRÍNSECO DO SOI MOSFET

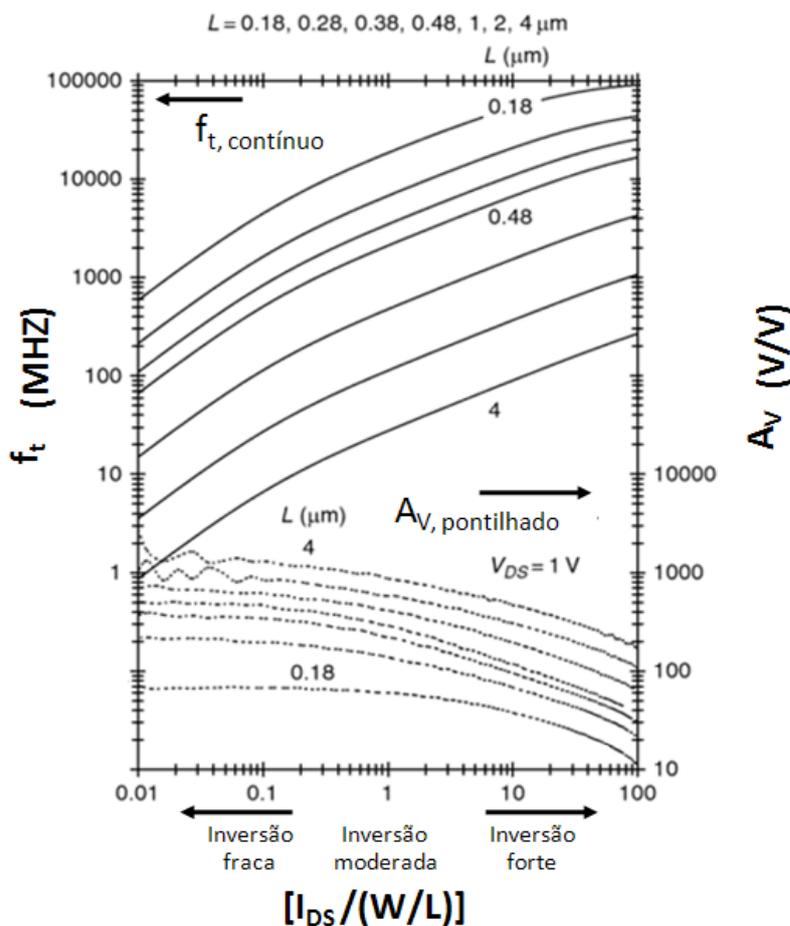
O ganho de tensão de um MOSFET é dado pela equação (35) [70]. Quanto maiores forem os valores da  $g_m/I_{DS}$  e a respectiva tensão Early, maior é o valor do ganho de tensão. Maiores valores de  $g_m/I_{DS}$  ocorrem no regime de inversão fraca.

$$A_V = \left( \frac{g_m}{I_{DS}} \right) V_{EA} \quad (35)$$

O gráfico do  $A_V$  de um SOI MOSFET em função de  $I_{DS}/(W/L)$  apresenta o mesmo comportamento do gráfico de  $g_m/I_{DS}$  em função de  $I_{DS}/(W/L)$ , em que o valor do ganho de tensão aumenta significativamente com o aumento do seu comprimento do canal [67].

Um dos grandes desafios dos CIs CMOS analógicos é potencializar o  $A_V$  e a  $f_T$ . No entanto, os mesmos são considerados inversamente proporcionais, ou seja, quando  $f_T$  aumenta, devido ao aumento de  $I_{DS}/(W/L)$ , o  $A_V$  diminui, conforme pode ser verificado através da Figura 20 [67].

Figura 20 - Curvas do  $A_V$  e da  $f_T$  em função de  $I_{DS}/(W/L)$  de um MOSFET



Fonte: Autor "adaptado de" [67]

### 3 EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES EM SOI MOSFETS

A redução das dimensões dos SOI MOSFETs, além de aumentar a integração dos CIs CMOS, também é responsável por aumentar a frequência de operação dos equipamentos. No entanto, acarreta também no aumento da variabilidade do comportamento elétrico destes transistores, em função da variação do processo de fabricação de CIs CMOS.

Considerando-se as aplicações de CIs CMOS sujeitas às radiações ionizantes, os SOI MOSFETs devem ser especialmente projetados para aumentar o seu desempenho elétrico e apresentar uma maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes (como TID e eventos de evento único, *single event effects*, SEEs). Além da tensão de limiar e da mobilidade dos portadores de carga móveis no canal, a corrente de fuga é um dos principais parâmetros afetados pela Dose Ionizante Total. Neste caso a  $I_{LEAK}$  aumenta significativamente em função da TID o que compromete principalmente os CIs CMOS de baixa potência e baixa tensão. Os SOI MOSFETs com óxidos de porta mais espessos apresentam uma menor corrente de fuga quando comparado com os transistores com óxidos de porta fino. No entanto, eles acabam apresentando maiores variações nos seus parâmetros e figura de mérito sob os efeitos da radiação ionizante quanto aos efeitos da TID [9].

Historicamente, o primeiro caso observado sobre a influência das radiações ionizantes no comportamento elétrico de um circuito eletrônico, ocorreu em um satélite de telecomunicações (Telstar), em 1962. Este fato ocorreu em decorrência de um teste nuclear realizado pelos Estados Unidos [17].

Algumas unidades relacionadas às radiações ionizantes são: a unidade de radioatividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o becquerel (Bq), que equivale a uma desintegração por segundo (Bq é igual a  $s^{-1}$ ) [71]; a unidade de energia no SI é o joule (J); em reações nucleares, a unidade mais utilizada é o elétron-volt (1 eV é igual a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J) [72]; a dose absorvida de radiação é definida como sendo a energia fornecida para uma determinada matéria por unidade de massa [71] sendo o Gray (Gy equivale a J/kg) a unidade no SI e muita utilizada na área de dosimetria, porém a unidade “rad”, que teve sua origem na expressão inglesa *Radiation Absorbed Dose*, é a mais utilizada na área de engenharia e equivale a 0,01 Gy [71]; o fluxo é definido como sendo o número de partículas (ou fótons) que passam por uma determinada área em um intervalo de tempo e sua unidade é  $cm^{-2}s^{-1}$  [72].

A energia depositada no material depende de sua densidade, e usualmente identificamos o material do alvo entre parênteses, ou seja, (Si) para o silício, ( $SiO_2$ ) para o

dióxido de silício e (GaAs) para o arseneto de gálio. A relação entre elas é 1 rad (Si) é igual a 0,58 rad (SiO<sub>2</sub>) que é igual a 0,94 rad (GaAs).

Podemos citar como fontes comuns de radiação: o Sol, as atividades cósmicas externas ao sistema solar, as explosões nucleares e a dos reatores nucleares.

Cabe destacar que a atmosfera terrestre atua similarmente a um filtro, reduzindo a intensidade das radiações ionizantes direcionadas ao planeta Terra [17]. As radiações ionizantes são mais intensas em altas altitudes e nas proximidades das regiões polares (devido às influências dos cinturões de radiação). Baixos níveis de radiações ionizantes são encontrados mesmo ao nível do mar, são níveis inofensivos para a saúde humana, mas que podem alterar a sensibilidade dos MOSFETs de dimensões extremamente reduzidas [73].

Os tipos de radiações ionizantes que podem afetar o funcionamento dos CIs CMOS são:

a) *Radiação por Próton*: o próton, que corresponde ao núcleo de hidrogênio [72], é a radiação mais abundante dos raios cósmicos. Cabe aqui destacar que um próton com energia na faixa de MeV é capaz de penetrar dezenas de micrometros no alumínio [72];

b) *Radiação por Nêutron*: o nêutron possui aproximadamente a mesma massa que o próton, porém com carga nula. A ausência de carga do nêutron dificulta o freamento dessa partícula [72]. A água é considerada uma blindagem eficiente contra a radiação por nêutrons [74];

c) *Radiação por Partícula  $\alpha$* : a partícula  $\alpha$  corresponde ao núcleo do átomo de Hélio (2 prótons e 2 nêutrons). Na faixa de energia de MeV, a partícula  $\alpha$  possui forte interação com a matéria. No silício, a partícula  $\alpha$  pode penetrar 23  $\mu\text{m}$  [72];

d) *Radiação por Partícula  $\beta$* : a partícula  $\beta$  possui a mesma massa do elétron, porém pode possuir carga positiva (pósitron) ou negativa (elétron). Comparado com a partícula  $\alpha$ , a partícula  $\beta$  pode penetrar facilmente no material e ser facilmente defletida [72];

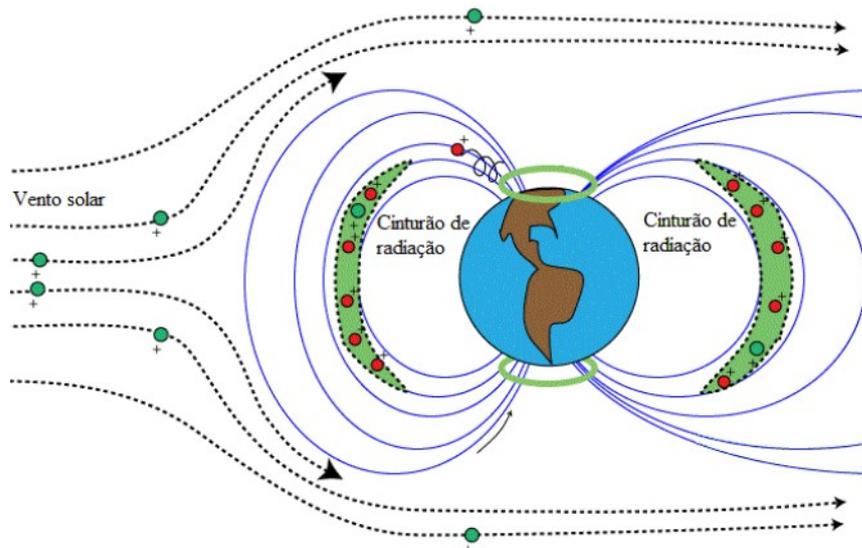
e) *Radiação por Raios- $\gamma$  e Raios-X*: são ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda. Os raios-X são obtidos por meio do choque de partículas carregadas com uma superfície ou característico do material do anodo, enquanto que os raios  $\gamma$  são originados durante as interações nucleares. Os raios  $\gamma$  e X interagem de forma similar com a matéria. Eles possuem alto poder de penetração na matéria e provocam ionização leve [72].

Obviamente, partículas com energia cinética consideravelmente maior, possuem maior poder de dano nos CIs CMOS. A colisão de uma partícula altamente energética com determinado material pode gerar partículas subatômicas tais como: o b-méson, o pósitron, o pión, o múon, o neutrino e o quark [72].

Já as principais fontes de radiações ionizantes espaciais são:

- a) *Cinturões de Van Allen*: são regiões do espaço ao redor do planeta Terra, repletas de prótons e elétrons, oriundas da interação do campo magnético terrestre com o vento solar, conforme pode ser visto através da Figura 21;

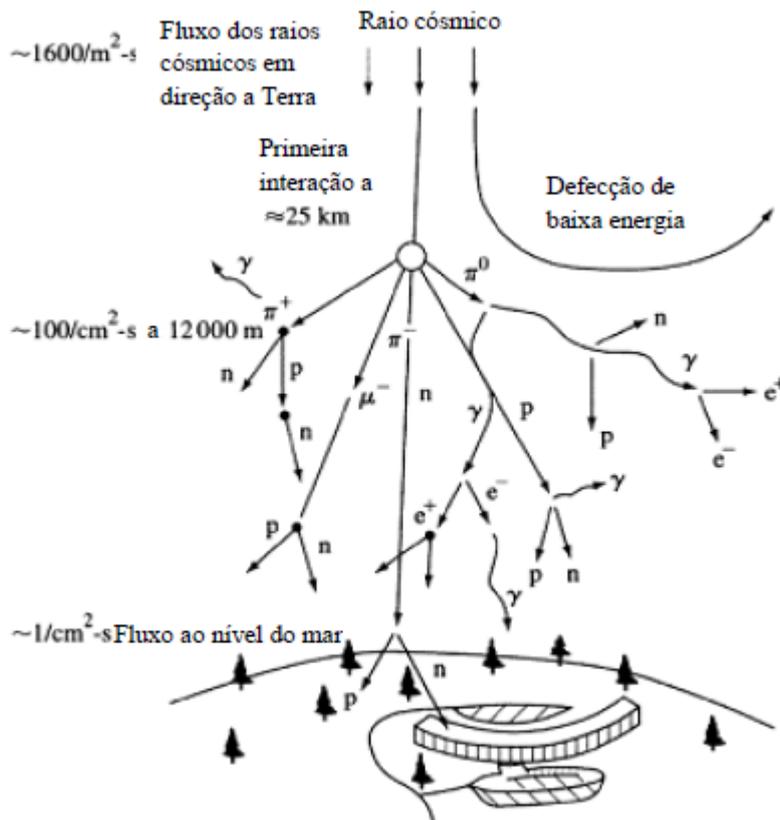
Figura 21- Representação do cinturão das radiações ionizantes do planeta Terra



Fonte: Autor

- b) *Raios Cósmicos*:
- Galácticos*: originado fora do sistema solar [75]. Esse tipo de radiação é constituído por 85% de prótons, 14% de partículas  $\alpha$  e 1% de núcleos pesados;
  - Solares*: este é constituído por partículas, raios ultravioletas (UV) e raios-X [72];
  - Terrestres*: são formados por partículas secundárias, produzidas pelo choque das partículas espaciais com a atmosfera terrestre [72], reagindo com o oxigênio e o nitrogênio, formando complexas cascatas de partículas secundárias e terciárias também conhecidas como “chuveiros de partículas [73], conforme está ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Raios cósmicos terrestre

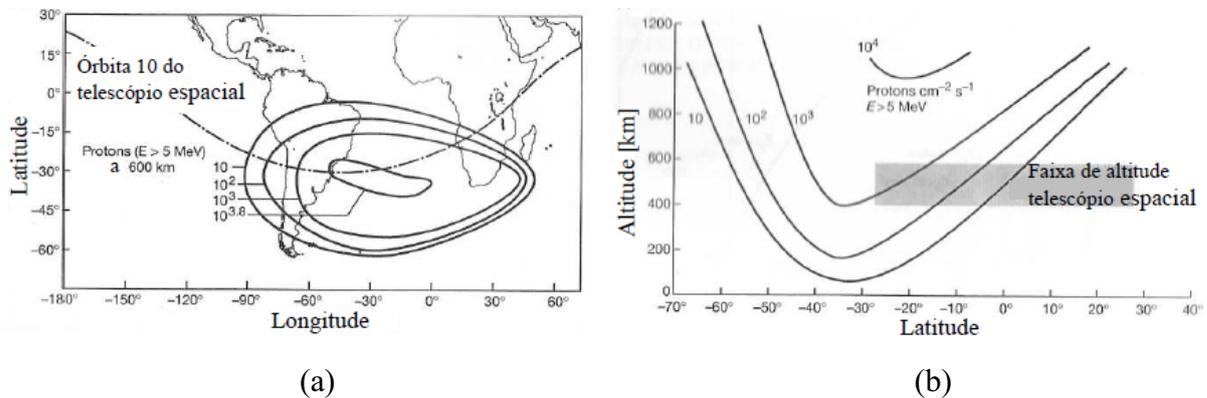


Fonte: Autor “adaptado de” [76].

Na Figura 22,  $p$  significa próton,  $n$  significa nêutron,  $\gamma$  está relacionada aos raios  $\gamma$ ,  $e^+$  se refere ao pósitron,  $e^-$  se refere ao elétron,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  e  $\pi^+$  são partículas píon de carga negativa, neutra e positiva, respectivamente,  $\mu^-$  é a partícula fundamental múon de carga negativa [76].

No campo magnético terrestre existem prótons, elétrons e íons de oxigênio armadilhados devido à força de Lorentz. Essas partículas aprisionadas no campo magnético terrestre podem afetar a durabilidade de satélites, dependendo de sua altitude, sua inclinação e de sua blindagem [75]. O campo magnético terrestre não é geograficamente uniforme: influências geológicas podem causar inclinação e deslocamento das linhas magnéticas [72], [75]. A “Anomalia Magnética do Atlântico Sul” (*South Atlantic Anomaly*, SAA) é considerada uma distorção magnética que culmina em uma maior influência da radiação no planeta (Figura 23).

Figura 23 - Indicação da SAA (a), e da trajetória do telescópio espacial Hubble (b)



Fonte: Autor “adaptado de” [77]

A Figura 23 (a) mostra a posição da SAA, incluindo a órbita do telescópio espacial Hubble [77]. Essa figura também apresenta curvas isofluxo que mostram que o telescópio espacial passa por regiões da SAA com alto fluxo de prótons [77].

O campo magnético terrestre também pode criar uma blindagem natural aos raios cósmicos [72]. De acordo com a força de Lorentz, uma força atua sobre uma determinada partícula carregada, quando esta cruza um campo magnético [78]. Essa partícula será desviada do planeta Terra caso sua energia seja baixa [72].

As aplicações de CIs CMOS espaciais baseiam-se nas missões de explorações espaciais e aplicações em satélites artificiais. Neste sentido, os satélites podem ser classificados quanto a sua altitude e são classificados como [17], [79]:

- a) *Low Earth Orbit* (LEO) ou satélites de órbita baixa. Situam-se em altitudes na faixa de 300 a 5.000 km, estando expostos a níveis significativos de radiações ionizantes e para inclinações de órbita inferior a 45°, o satélite estará exposto à Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Nas órbitas polares e suas proximidades, verifica-se a influência dos cinturões de radiação. Órbitas de aproximadamente 1.400 km são afetadas por altas doses de radiação;
- b) *Medium Earth Orbit* (MEO) ou satélites de órbita média, referem-se aos satélites que estão situados em órbita acima de 5.000 km de altitude e abaixo das órbitas geostacionárias (GEO);
- c) *Geosynchronous Orbit* (GEO), ou satélites geostacionários. Referem-se aos satélites acima de 36.000 km de altitude.

As órbitas MEO e GEO estão mais expostas ao cinturão de Van Allen, onde a maior fonte de radiação são os elétrons. Neste local, as radiações ionizantes podem ser mitigadas com blindagens de alumínio relativamente fina, dado o baixo poder de penetração dos elétrons [79].

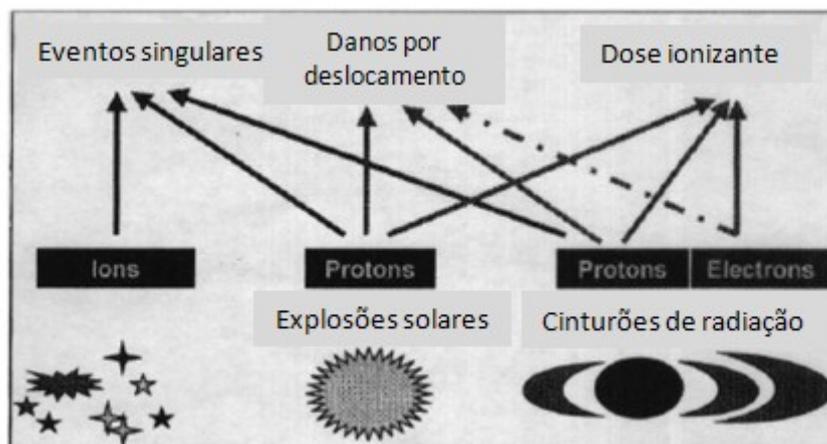
Para ilustrar, um satélite GEO operando durante dezoito anos pode acumular até 100 krad, desde que possua blindagem com 5 mm de espessura de alumínio, e pode acumular até 10 krad, desde que possua uma blindagem com 10 mm de espessura de alumínio. Comparativamente, um satélite a 2000 km de altitude (órbita LEO) durante cinco anos com blindagem de 10 mm de espessura de alumínio, pode acumular uma dose de até 300 krad [17]. No entanto, os satélites situados nas órbitas LEO, MEO e GEO, estão expostos a íons pesados e partículas de alta energia, que nem sempre podem ser evitadas com as blindagens de alumínio, e, portanto, podem ocorrer os efeitos indesejáveis, tais como:

- a) *Total Ionizing Dose* (TID), ou Dose Ionizante Total: trata-se de um efeito acumulativo, de longo prazo, que degrada algumas propriedades elétricas dos CIs CMOS, devido ao acúmulo de cargas positivas nos materiais isolantes que compõem os transistores que fazem parte deste CI CMOS, podendo ser reversível [9];
- b) *Displacement Damage* (DD), ou Danos por Deslocamento: referem-se aos danos físicos na estrutura cristalina do material, ocasionado pela perda de energia de forma não ionizante das partículas incidentes no material, degradando as propriedades do material [80]. A energia transferida durante uma colisão nuclear, seja ela elástica ou inelástica, pode ser suficiente para deslocar um átomo de seu local de origem no retículo cristalino, ou seja, ocasionando um deslocamento (*displacement damage*) que altera o arranjo dos átomos de sua organização original no retículo cristalino [75]. Os danos por deslocamento são a desorganização do retículo cristalino formando efeitos Frenkel que se caracterizam pela formação de vacâncias e posições intersticiais, as quais respectivamente são definidas como sendo a ausência de um átomo em uma posição do retículo cristalino e posições intersticiais, pela presença de um átomo fora de sua posição original;
- c) *Single Event Effects* (SEEs), ou efeitos singulares: são efeitos que ocorrem devido ao impacto de partículas fortemente ionizantes no silício [81], e são classificados da seguinte maneira:

- a. *Single Event Upset* (SEU), ou evento de única perturbação: modificando o estado do bit armazenado na memória [82];
- b. *Single Event Transient* (SET), ou evento de um único transiente: trata-se de um evento transiente que pode ou não ser capturado por um elemento de memória, podendo ocorrer, tanto em CIs CMOS digitais [83] quanto em analógicos [84];
- c. *Single Event Latchup* (SEL), ou eventos singulares catastróficos; *Single Event Burnout* (SEB), ou evento único de queima; *Single Event Gate Rupture* (SEGR), ou evento de ruptura de porta, e *Single Hard Error* (SHE), ou erro único fatal são eventos destrutivos que danificam permanentemente o circuito [85].

A Figura 24 relaciona as fontes de radiações ionizantes espaciais com as três classes de defeito.

Figura 24 - Classificação dos efeitos das radiações ionizantes espaciais em função de suas respectivas fontes irradiantes



Fonte: Autor, “adaptado de” [17]

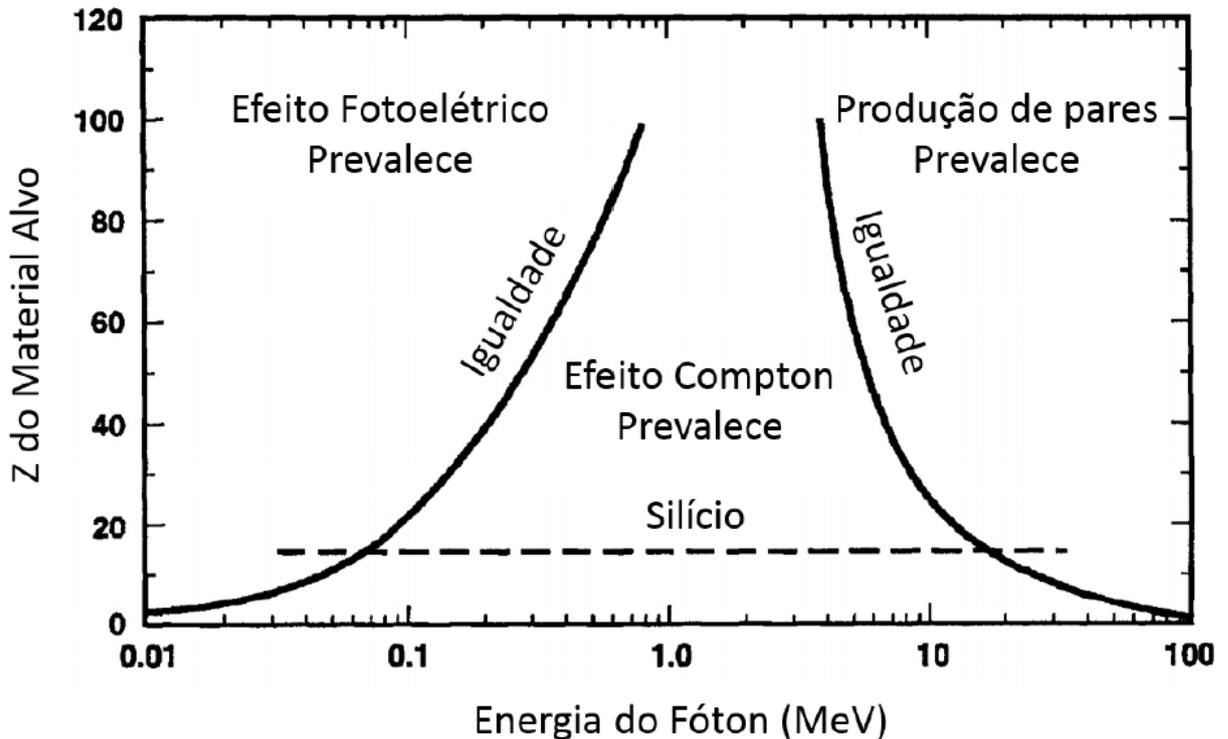
### 3.1 DOSE TOTAL IONIZANTE

A TID refere-se à dose total acumulada por um determinado material ou dispositivo eletrônico devido à exposição às radiações ionizantes ao longo do tempo [17]. Estes efeitos estão atrelados a intensidade da dose e ao tempo de exposição. A ionização nada mais é do

que um processo de adição ou remoção de elétrons (ou outras partículas carregadas) dos átomos. Uma partícula ionizante que incide no material, devido às colisões, é capaz de excitar elétrons da banda de valência dos materiais, que podem ganhar energia suficiente para passar para a banda de condução, gerando deste modo, pares elétrons- lacunas (PEL). A geração de corrente elétrica devido a estes efeitos pode ocorrer (inclusive em isolantes), caso seja aplicado um campo elétrico no material irradiado. Pelo fato da mobilidade das lacunas serem menor que a do elétron, cargas positivas podem ficar armadilhadas dentro dos isolantes, em que a produção e armadilhamento de lacunas dentro do dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) podem causar degradação do comportamento elétrico dos MOSFETS e transistores bipolares de junção. De um modo geral, em materiais condutores de baixa resistência (usados na porta ou substrato), a maioria dos pares elétron-lacuna (mais de 90%) se recombinam e desaparecem (considerando temperatura ambiente e sem interferência de campo elétrico externo e/ou polarizações) [72].

A interação de fótons de alta energia ou partículas carregadas com o material culmina com a sua ionização [86], e os danos se iniciam quando pares elétrons-lacunas são gerados no material [10]. Os efeitos das radiações ionizantes dependem basicamente da energia do fóton e do material alvo. Como resultado, os efeitos podem ser fotoelétricos, Compton ou produção de pares (PP). No caso deste trabalho os efeitos de interação com o silício foram majoritariamente fotoelétricos, já que se utilizaram raios-X de 10 keV de energia. Os efeitos em função da energia do fóton são visualizados na Figura 25.

Figura 25 - Efeitos das radiações ionizantes em função do material alvo e da energia do fóton



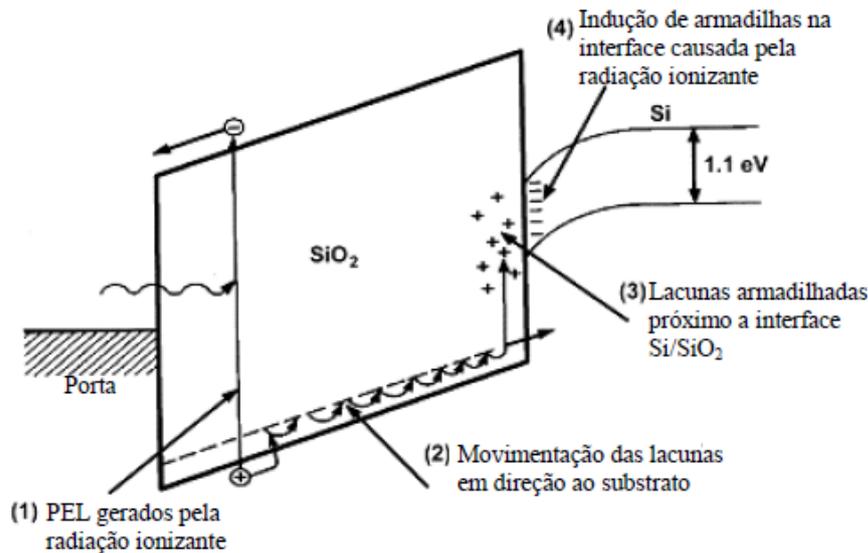
Fonte: Autor “adaptado de” [9].

Analisando a Figura 25, ao considerarmos os níveis de energia para os raios-X de baixa energia (abaixo de 50 keV e considerando o silício), pode-se concluir que ocorre a completa absorção da energia do fóton pelo elétron que está fortemente ligado ao núcleo. Este resultado é definido como efeito fotoelétrico.

Já para fótons incidentes com energias mais altas (a partir de 50 keV), o efeito Compton passa a prevalecer. Enquanto que para energias ainda mais altas de fótons incidentes (acima de 20 MeV), a geração de pares elétron-lacuna torna-se majoritária e estas duas partículas geradas vão ionizar o meio.

A Figura 26 apresenta como as radiações ionizantes atuam no óxido de porta dos MOSFETs.

Figura 26 - Efeitos das radiações ionizantes no óxido de porta



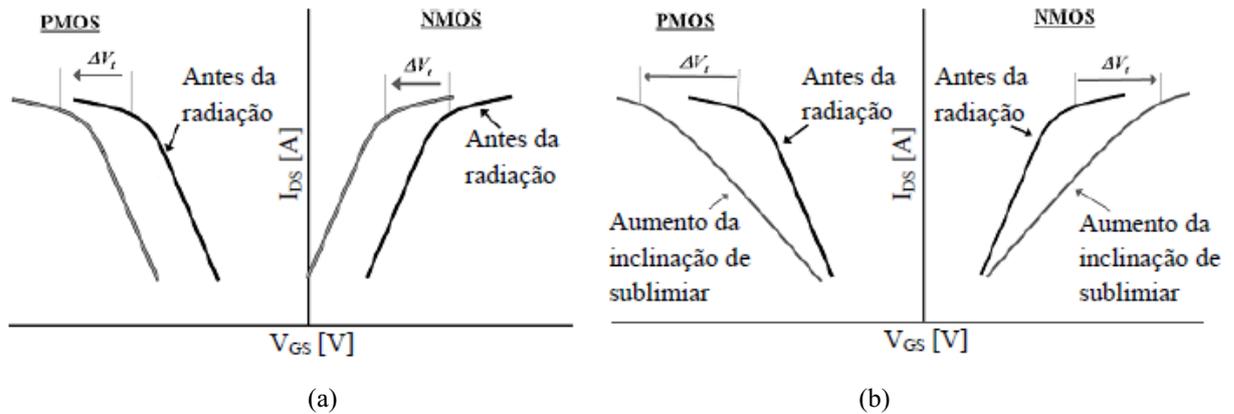
Fonte: Autor “adaptado de” [87].

Os efeitos apresentados na figura acima podem ser sumarizados em quatro etapas:

- Pares elétrons-lacuna são gerados no óxido de porta durante o processo de irradiação, e os elétrons são atraídos para a porta do transistor devido à aplicação de tensão positiva, enquanto que as lacunas se movem na direção do substrato. Neste intervalo, alguns elétrons se recombinam com as lacunas, em que a fração de portadores que se recombinam depende da energia e do tipo de material [87];
- As lacunas movimentam-se no interior do óxido de porta em direção ao substrato [87];
- As lacunas localizadas dentro do SiO<sub>2</sub> acumulam-se na proximidade da interface Si/SiO<sub>2</sub>, alterando a tensão de limiar do MOSFET [87];
- Cargas positivas são armadilhadas na interface SiO<sub>2</sub>.

A figura 27 indica a alteração tanto da tensão de limiar como da inclinação de sublimiar dos MOSFETs ocasionados pelo armadilhamento de cargas no óxido de porta e na interface formada pelo óxido e a região de silício onde é formado o canal.

Figura 27 - Influência das radiações ionizantes nas características elétricas do MOSFET, devido às cargas positivas armadilhadas no óxido de porta (a), devido às cargas positivas armadilhadas na interface  $\text{SiO}_2$  que é a região do silício onde é formado o canal do MOSFET (b)



Fonte: Autor "adaptado de" [10]

O acúmulo dos elétrons atraídos para a porta aumenta em função da intensidade da tensão aplicada na mesma, após a geração de PEL no óxido de silício. Analogamente, a quantidade de lacunas que não se recombinam aumenta à medida que o campo elétrico sobre o  $\text{SiO}_2$  também aumenta [88].

Os estudos referentes ao acúmulo de cargas nos óxidos de isolamento, induzidos pelas radiações ionizantes foram realizados em 1967 [89]. Os óxidos de campo e camadas de isolamento são menos imunes aos efeitos do TID quando comparados com as regiões ativas nos MOSFETs atuais [90]. As tecnologias atuais apresentam óxidos mais finos, desta maneira tem-se uma menor geração de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes e consequentemente elas são conduzidas para fora do óxido por efeito de tunelamento. Em contrapartida, óxidos muito finos são vulneráveis aos efeitos relacionados à fuga de corrente [17].

Os elétrons podem ocasionar a ionização dos átomos nas camadas de óxido, gerando os pares elétrons-lacuna. Caso a energia dos portadores gerados for maior do que a mínima energia necessária para gerar um par elétron-lacuna, poderá ocorrer a geração de mais de um par de portadores. Desta maneira, um único fóton de alta energia pode criar um número muito grande de pares elétrons-lacuna [9].

Posteriormente à geração dos portadores no óxido, devido aos efeitos das ionizações, ocorre a chamada recombinação inicial, em que parte dos PEL gerados sofrem recombinação

mútua, antes mesmo de deixarem a camada de óxido, guiados pelo campo elétrico presente nesta camada. A taxa de recombinação inicial é dependente do campo elétrico no óxido. Como os elétrons possuem uma alta mobilidade no óxido, eles são rapidamente “empurrados” para fora na presença do campo elétrico vertical, em taxas de pico segundos. Em transistores sem polarização ou polarização fraca, a recombinação inicial ocorre com maior intensidade [9].

Parte das lacunas que se movem na direção da interface  $\text{SiO}_2/\text{filme de silício (Si)}$  (admitindo-se uma tensão positiva na porta) será aprisionada ou armadilhada no óxido. À medida que as cargas positivas se dirigem em direção da interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , elas são aprisionadas e ocorre a liberação de íons de hidrogênio oriundos do processo de fabricação, que são, por sua vez, transportados até essa interface, onde podem interagir e formar regiões de aprisionamento [9].

O aprisionamento de cargas positivas na interface é mais lento do que no óxido e depende do campo elétrico aplicado (similarmente ao processo do aprisionamento no óxido). Uma pequena quantidade de cargas será aprisionada na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , sob polarização de campo elétrico negativo, já que as lacunas migrarão em sentido oposto ao da interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  [9]. Dessa forma, ocorre uma troca de cargas entre as regiões de aprisionamento na interface com o semicondutor, aumentando o ruído intrínseco do MOSFET. Quando o transistor estiver desligado (*off*), poderá ocorrer a inversão da polarização na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , gerando um caminho para o fluxo de corrente, dando origem à corrente de fuga (*leakage current*,  $I_{\text{LEAK}}$ ), aumentando o seu consumo de energia elétrica, a ponto inclusive de danificá-lo.

Além do efeito da *leakage current*, as cargas aprisionadas, sejam elas no óxido ou na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , são responsáveis por desviar a tensão dos MOSFETs, e podem causar a degradação da mobilidade de portadores do canal [17].

### 3.2 TENSÃO DE LIMIAR

Cargas aprisionadas no óxido ( $N_{\text{ot}}$ ) e na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  ( $N_{\text{it}}$ ) são responsáveis por modificar as características da região de sublimiar dos MOSFETs. A carga líquida aprisionada no óxido é normalmente positiva. Já na interface pode ser positiva, neutra ou negativa, dependendo do potencial da interface [17].

Nos MOSFETs do tipo “p”, verifica-se que a carga líquida, que é normalmente positiva e que está aprisionada na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , contribui negativamente para o desvio da tensão de limiar do MOSFET. No SOI MOSFET do tipo “n”, a carga aprisionada é

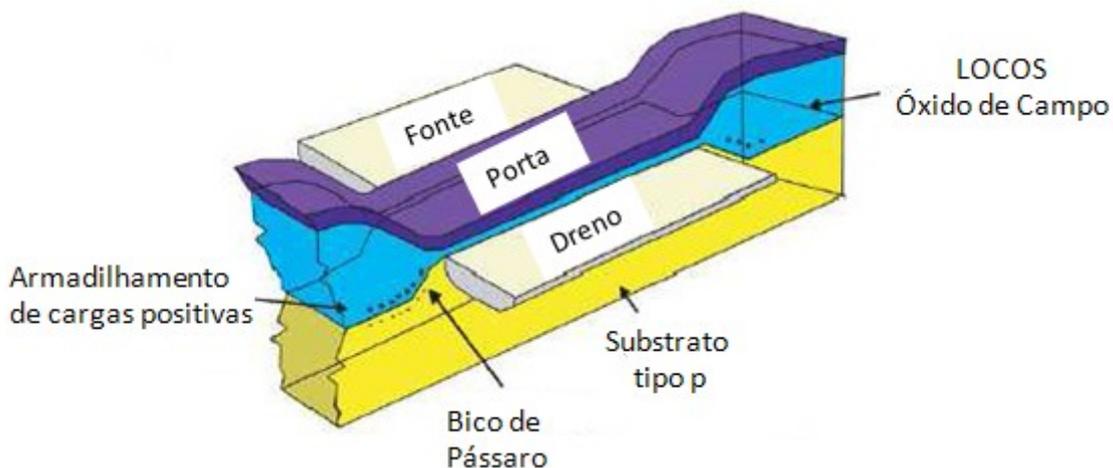
tipicamente negativa, ocasionando um desvio positivo na tensão de limiar. No entanto, o desvio final depende do resultado líquido das cargas acumuladas no óxido e na interface SiO<sub>2</sub>/Si [9].

### 3.3 CORRENTE DE FUGA

Os efeitos da TID, além de alterar a tensão de limiar, também podem influenciar a inclinação da curva do logaritmo de I<sub>DS</sub> em função de V<sub>GS</sub> na região de sublimiar. Isto ocorre devido ao acúmulo de cargas na interface. Tal efeito torna-se preocupante principalmente nos MOSFETs atuais, devido à redução da tensão de alimentação e da tensão de limiar dispositivos

A isolação LOCOS (*Local Oxidation of Silicon*) influencia no aumento da corrente de fuga nos MOSFETs depois de irradiados [88]. Neste caso, as cargas ficam armadilhadas no óxido de campo do transistor, nas regiões conhecidas como “regiões de bico de pássaro”, ou *Bird's Beak Region* (BBR), conforme está ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Representação do armadilhamento de cargas positivas nas regiões de bico de pássaro



Fonte: Autor “adaptado de” [9]

As cargas positivas armadilhadas nas BBRs após as irradiações ionizantes, que são responsáveis por criar regiões que funcionam como transistores parasitários, consequentemente são também responsáveis por degradar a inclinação de sublimiar [72].

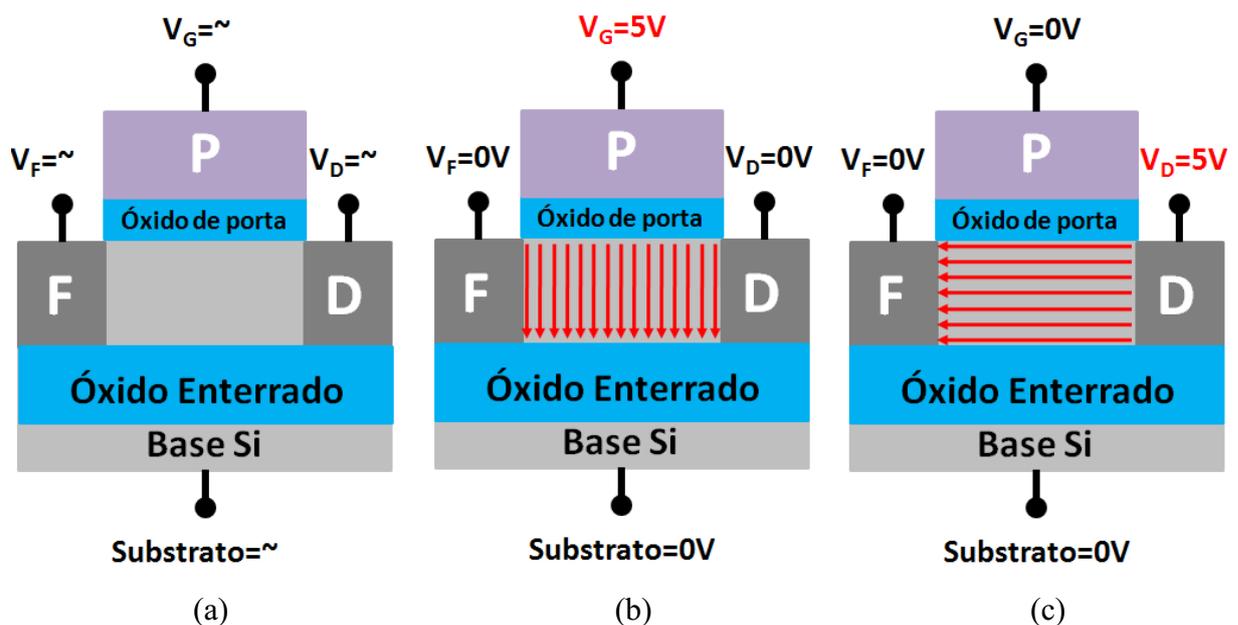
### 3.4 TÉCNICAS DE POLARIZAÇÕES DOS MOSFETS DURANTE O PROCEDIMENTO DE IRRADIAÇÃO COM RAIOS-X

Com o objetivo de simular ou acelerar os efeitos da TID no funcionamento dos CIs CMOS obtidas no espaço, foram desenvolvidas normas e procedimentos a fim de padronizar os testes de laboratório e garantir que os mesmos tenham uma representatividade muito próxima aos efeitos ocorridos no espaço. Os referidos manuais e normas permitem qualificar de forma segura os CIs CMOS para aplicações em ambientes sujeitos as radiações ionizantes.

Este trabalho é baseado no manual dos laboratórios Sandia (*Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance – SAND – 2008-6851P*) [91]. Este manual leva em consideração as diretrizes de teste do padrão Militar dos Estados Unidos da América, ou *military standard test guideline*, MIL – STD.

A Figura 29 ilustra os diferentes tipos de polarizações que geralmente são utilizadas durante os procedimentos de irradiações com raios-X e também ilustra o campo elétrico vertical e longitudinal em função de cada uma destas polarizações dos SOI nMOSFETs.

Figura 29 - Orientação do campo elétrico em um SOI nMOSFET em função das condições de polarização utilizadas durante os procedimentos de radiações ionizantes: regime passivo “floating”(a), condição de estado ligado “on-state” (b), condição de estado desligado “off-state” (c)



Fonte: Autor

A **condição passiva** ou *floating*, representada pela Figura 29 (a), na qual todos os terminais do SOI nMOSFET são deixados desconectados, ou flutuando (*floating*) [92]–[94] durante os procedimentos de irradiações com raios-X, foi utilizada para determinar as primeiras impressões e/ou resultados (por tratar-se de um dispositivo nunca antes estudado sob estas condições) sobre os efeitos da TID nos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito dos inovadores SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e hexagonal, para posterior comparação com os dados obtidos dos SOI nMOSFET com geometria de porta retangular equivalentes (mesmas áreas de porta e condições de polarização).

De maneira prática, este procedimento reflete a condição real de um dispositivo de reposição e/ou sobressalente, que mesmo não sendo utilizado (nas mais diversas aplicações como em aviões, missões espaciais e etc.), também sofrem os efeitos das radiações ionizantes [95].

A **condição de estado ligado** (*on state*) representada pela Figura 29 (b), na qual os terminais do SOI nMOSFET de fonte, dreno e substrato são aterrados e o terminal de porta é conectado a  $V_{DD}$  (+5 V), durante os procedimentos de radiações ionizantes. Através desta configuração é possível potencializar os efeitos das radiações ionizantes (armadilhamentos de cargas positivas) no SOI nMOSFET através da presença do campo elétrico vertical na região de canal.

Este procedimento é utilizado para simular a condição de chave fechada [96]. Algumas tecnologias de SOI nMOSFET FD apontam esta configuração, como a que mais produz armadilhamento de cargas positivas no óxido enterrado [19].

A **condição de estado desligado** (*off state*) representada pela Figura 29 (c), na qual os terminais do SOI nMOSFET de fonte, porta e substrato são aterrados e o terminal de dreno é conectado a  $V_{DD}$  (+5V), durante os procedimentos de radiação ionizantes. Através desta configuração é possível potencializar os efeitos das radiações ionizantes no SOI nMOSFET (os armadilhamentos de cargas positivas) através da presença campo elétrico longitudinal na região de canal (originado pela polarização de dreno do SOI nMOSFET).

Este procedimento é utilizado para simular a condição de chave aberta [96]. Alguns ensaios mostram que a condição de polarização de estado desligado pode resultar em uma grande variação da tensão de limiar de um SOI MOSFET [97], [98].

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar os procedimentos experimentais utilizados tanto para as caracterizações elétricas dos SOI MOSFETs, como para aplicação das doses de radiações ionizantes de raios-X. Apresentaremos também como os SOI nMOSFETs foram manufaturados e como os equipamentos de raios-X e de medidas foram utilizados para a condução dos experimentos.

### 4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DOS SOI NMOSFETS UTILIZADOS NESTE TRABALHO

Foram projetados CIs CMOS pelo grupo de pesquisa do Centro Universitário FEI, utilizando-se os SOI MOSFETs do tipo convencional, Diamante e octogonal, com diferentes comprimentos de canais, diferentes ângulos  $\alpha$  e diferentes fatores de corte  $c$ , para o caso do SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal. Os CIs CMOS contendo os diferentes dispositivos foram fabricados no Laboratório de Microeletrônica da Universidade Católica de Louvain na Bélgica (*Université Catholique de Louvain*, UCL) pelo grupo IC TEAM / ELEN, sob a supervisão do prof. Doutor Denis Flandre e do Mestre em microeletrônica Christian Renaux.

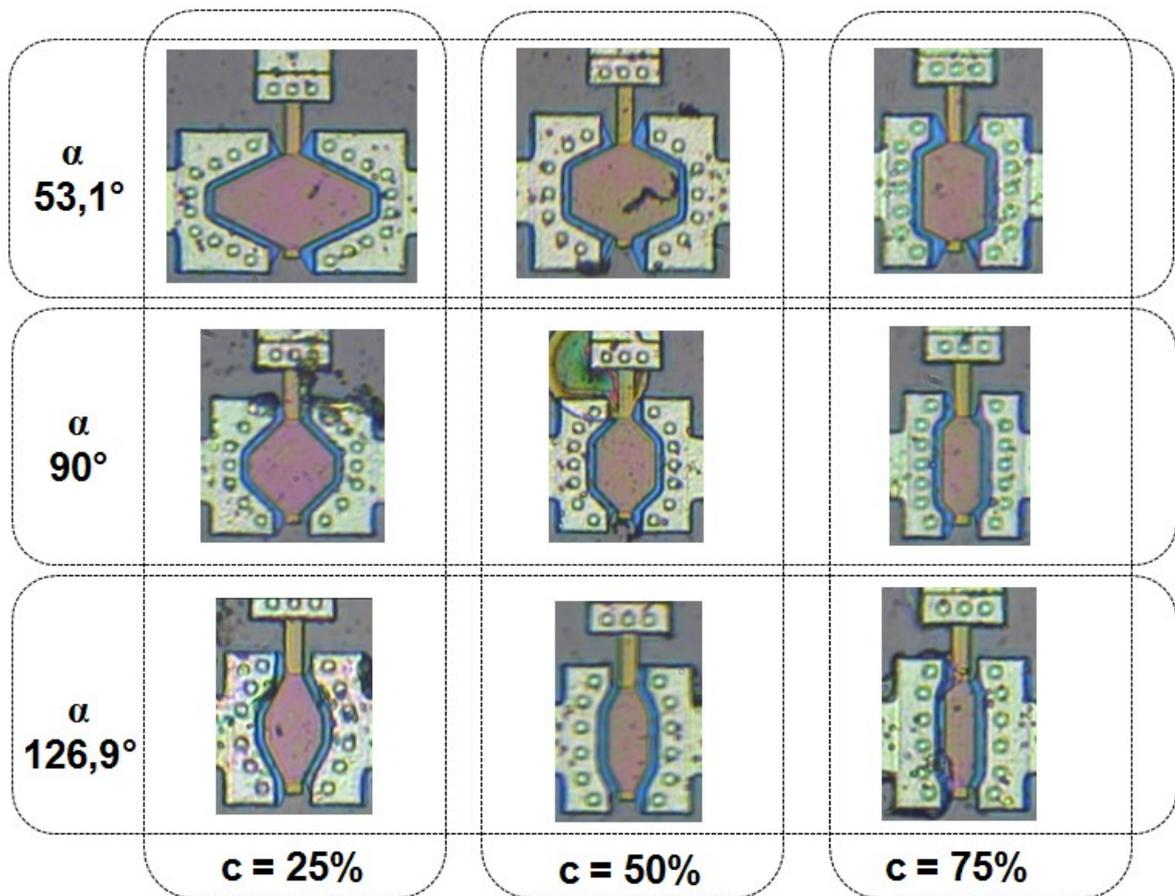
Os SOI nMOSFETs foram fabricados com tecnologia de 0,5  $\mu\text{m}$ , e os seus principais parâmetros tecnológicos são:  $t_{\text{ox}}$ ,  $t_{\text{Si}}$  e  $t_{\text{BOX}}$  são iguais a 30 nm, 80 nm e 390 nm respectivamente. As concentrações de dopantes nas regiões de canal e dreno/fonte são de  $6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  e  $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ , respectivamente.

Para este trabalho foram utilizadas três CIs CMOS distintos. Cada um contendo setenta e sete (77) SOI nMOSFETs.

A Tabela 01 apresenta as dimensões dos diferentes SOI nMOSFETs presentes nos CIs CMOS. Eles estão organizados em conjuntos e agrupados em função de suas topologias. O comprimento equivalente de canal é dado pela abreviação  $L_{\text{EQ}}$ . Os SOI nMOSFETs implementados com geometria de porta retangular são representados pela abreviação CSM, os SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, são representados pela abreviação OSM e os SOI nMOSFETs com geometria de porta hexagonal são representados pela abreviação DSM. Foram fabricados OSMs com três ângulos  $\alpha$  diferentes:  $53,1^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $126,9^\circ$ . Os fatores de corte  $c$  que foram fabricados são respectivamente de 25%, 50% e 75% para os SOI

nMOSFETs do tipo octogonal e estas diferentes variações do dispositivo OSM em função do fator de corte  $c$  e ângulo  $\alpha$  são representadas na Figura 30.

Figura 30 - Imagens dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal considerando os diferentes fatores de corte e ângulos



Fonte: Autor

Tabela 1 - Características dimensionais dos SOI nMOSFETs utilizados neste trabalho, onde W é igual a 30  $\mu\text{m}$  para todos os transistores

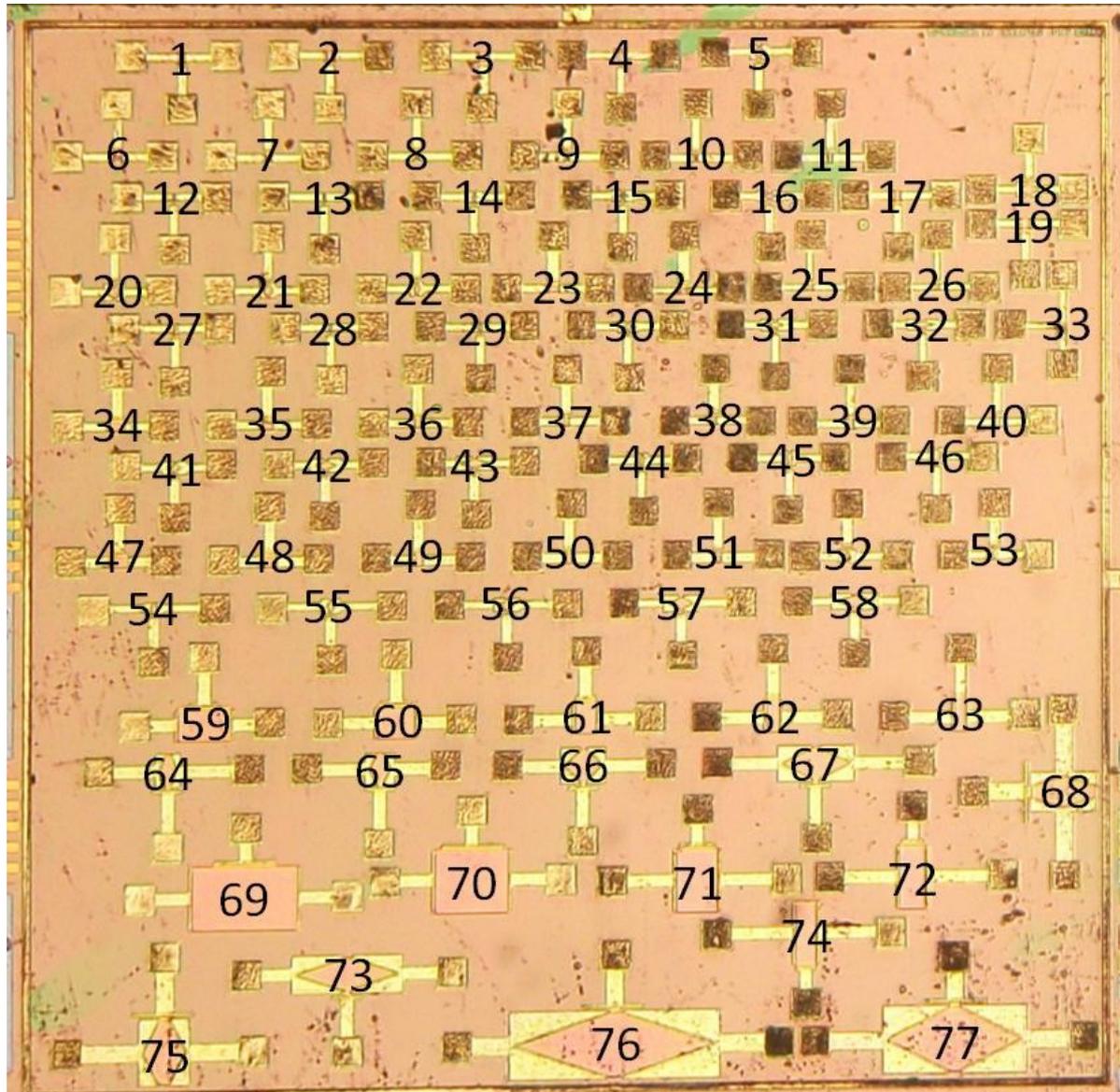
Grupo	Topologia	Referência	$c$ (%)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	W ( $\mu\text{m}$ )	$L_{EQ}$ ( $\mu\text{m}$ )	(W/L)	b ( $\mu\text{m}$ )	B ( $\mu\text{m}$ )	Área de porta ( $\mu\text{m}^2$ )
1	DSM	TR57		53,1	30	35	0,86	5	65	1050
	OSM	TR18	25	53,1	30	35	0,86	5	50	825
	CSM	TR3		180	30	27,5	1,09			825
2	OSM	TR20	50	53,1	30	25	1,2	5	35	600
3	OSM	TR5	25	90	30	20	1,5	5	27,5	486
	CSM	TR2		180	30	16,2	1,85			486
4	OSM	TR46	75	53,1	30	15	2	5	20	375
	CSM	TR39		180	30	12,5	2,4			375
5	OSM	TR4	25	126,9	30	12,67	2,37	5	16,5	324
	CSM	TR1		180	30	10,8	2,79			324

Fonte: Autor

A largura de canal e o valor de “b” são mantidos fixos para todos os SOI nMOSFETs dos tipos Diamante e octogonal.

A foto do CI CMOS usado por este trabalho de pesquisa está ilustrada na Figura 31.

Figura 31 - Imagem do CI CMOS fabricado na UCL com os diferentes OSMs, DSMs e CSMs equivalentes que foram utilizados para a realização deste estudo comparativo experimental



Fonte: Autor

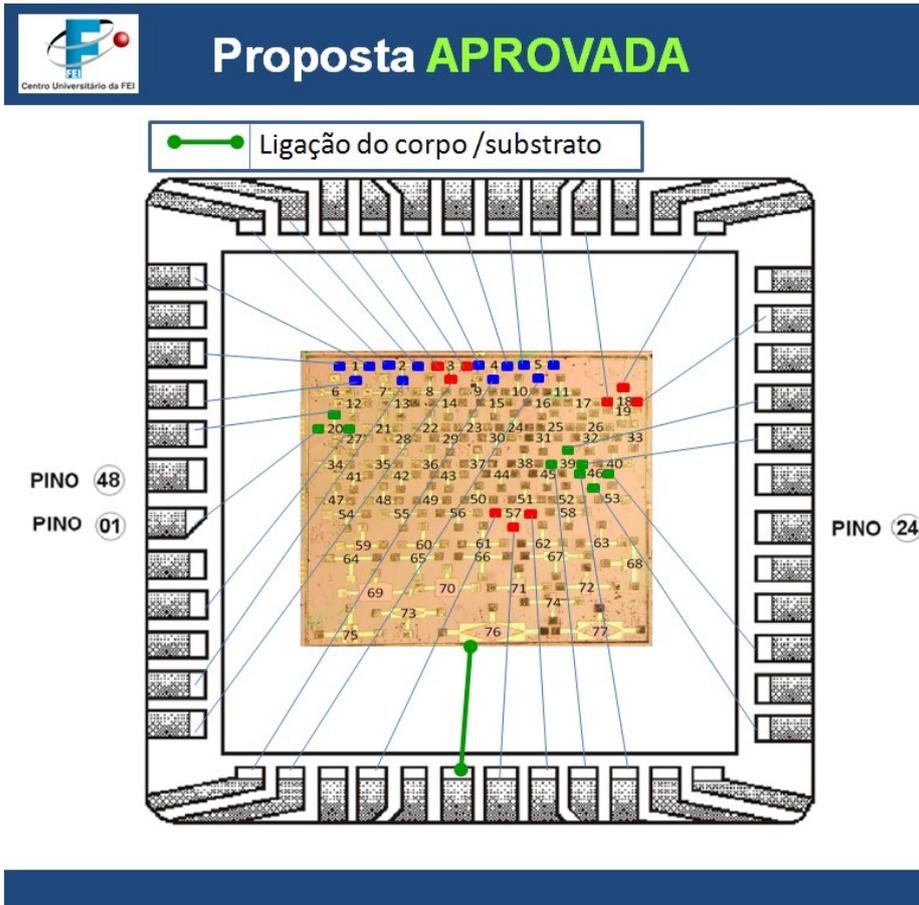
Das três amostras utilizadas neste trabalho, duas foram encapsuladas pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), com apoio do projeto intitulado de Circuitos Integrados Tolerantes a Radiação (CITAR).

Os encapsulamentos dos CIs CMOS foram necessários para facilitar as medidas e principalmente as polarizações dos transistores durante os procedimentos das radiações de raios-X. É importante ressaltar que foi provisionada uma janela móvel nos CIs CMOS, com o

objetivo de permitir as exposições dos transistores pelas radiações ionizantes de raios-X quando aberta e eliminar a influência da luz ambiente durante os testes quando fechada.

O esquema elétrico de ligações dos terminais dos CIs CMOS com os seus respectivos terminais está apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Esquema elétrico do encapsulamento da pastilha



Fonte: Autor

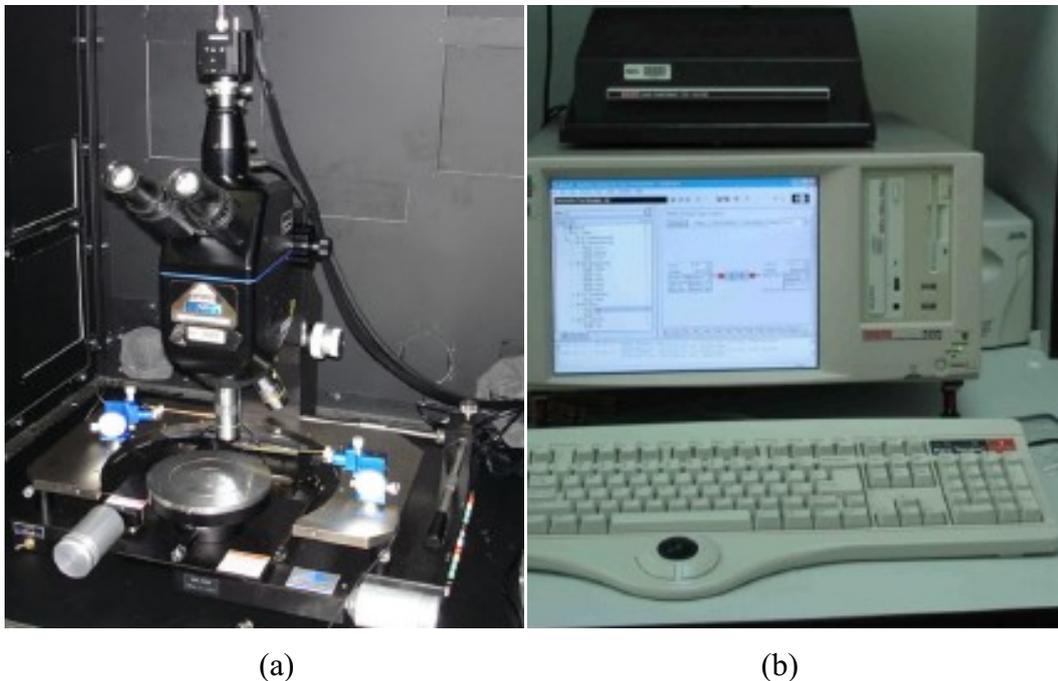
## 4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Esta subsecção visa apresentar os procedimentos experimentais que foram realizados para a obtenção das caracterizações elétricas e das polarizações dos SOI nMOSFETs, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X e também como foram definidas e aplicadas as doses de radiações de raios-X

#### 4.2.1 Procedimentos das Caracterizações Elétricas dos SOI nMOSFETs

O primeiro CI CMOS estudado não foi encapsulado e foi caracterizado eletricamente antes dos procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, ou seja, considerando-se a condição de Pré-irradiação, que foi definida como “Pré-rad”, através do microprovador Cascade Microtech, e pelo analisador de dispositivos semicondutores modelo 4200, da Keithley Instruments Inc, conforme está indicado na Figura 33.

Figura 33 - Equipamentos utilizados para as caracterizações elétricas dos SOI nMOSFETs: microprovador Cascade Microtech (a) e analisador de dispositivos semicondutores modelo 4200, da Keithley Instruments Inc. (b)



Fonte: Autor

Os equipamentos listados acima fazem parte do Laboratório de Microeletrônica do Centro Universitário FEI, localizados na sala K-406, prédio K, da unidade de São Bernardo do Campo. Vale a pena ressaltar que o laboratório possui temperatura controlada e configurada em 22°C.

Os CIs SOI CMOS 2 e 3, que foram encapsuladas no CTI Renato Archer, foram caracterizados eletricamente na condição de “Pré-rad”, tanto pelo Keithley modelo 4200 como pelo sistema de caracterização elétrica portátil, representado pelo analisador de dispositivos semicondutores da Keithley, modelo 2636, e um acessório de teste da Keithley, conforme ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Analisador de dispositivos semicondutores portátil da Keithley modelo 2636A (a), e o acessório de teste (b)



(a)

(b)

Fonte: Autor

Desta maneira, um ambiente de caracterização elétrica para os transistores foi instalado dentro do laboratório de materiais mecânicos, local no qual, fica localizado o Difratorômetro de Raios-X da Shimadzu modelo XRD-7000.

Para cada um dos três CIs CMOS, foram realizados os seguintes procedimentos experimentais:

- a) Caracterizações elétricas de todos os SOI nMOSFETs selecionados para este trabalho, sendo 13 SOI nMOSFETs do CI CMOS não encapsulado, 9 SOI nMOSFETs do CI CMOS 1 e mais 9 SOI nMOSFETs do CI CMOS 2, totalizando 31 SOI nMOSFETs. Estas caracterizações elétricas serviram para levantarmos as curvas características dos SOI nMOSFETs sem a influência da TID (condição de “Pré-rad”). Estas medidas experimentais serviram de base para definir o desvio percentual de cada um dos parâmetros elétrico e figuras de mérito, depois de aplicadas as doses de raios-X. Vale ressaltar que os resultados experimentais obtidos dos SOI nMOSFETs com geometria de porta retangular serviram como base de comparação para os demais transistores que foram avaliados por este trabalho;
- b) Aplicada a primeira dose de radiação ionizante de raios-X, três SOI nMOSFETs (TR18, TR57 e TR3) foram parcialmente caracterizados. Os valores das tensões de limiar e das inclinações de sublimiar resultantes desta primeira dose foram comparadas com os devidos valores na condição de “Pré-rad”. Caso não

ocorressem variações destes dois parâmetros ou se os mesmo eram muito próximos aos das medidas anteriores (variações menores do que 5%), uma nova dose era definida e aplicada nos SOI nMOSFETs. Este processo foi repetido várias vezes, até que fossem observadas mudanças nestes dois parâmetros elétricos estudados (alterações na faixa de 5% a 10%;

- c) Com o objetivo de identificar os danos permanentes nos SOI nMOSFETs (após a exposição dos SOI nMOSFETs às radiações ionizantes de raios-X definidas no item b), novas caracterizações elétricas eram realizadas a cada 24 horas, e os valores tanto da tensão de limiar, como da inclinação de sublimiar, eram comparados com os valores obtidos no dia anterior. Após sete dias de caracterizações foi constatado que os valores destes parâmetros elétricos não variavam mais, ficando caracterizado os danos permanentes nos SOI nMOSFETs, ou seja, sem os efeitos transitórios decorrentes da TID aplicada. Passados os sete dias, todos os SOI nMOSFETs foram caracterizados eletricamente, ficando aptos para receberem novas doses de radiações ionizantes de raios-X. Vale ressaltar que durante as caracterizações os transistores ficavam protegidos da influência da luz ambiente, e ao não ser utilizado eram alojados em embalagens anti estáticas contendo sílica em gel (para eliminar a umidade) e acondicionadas em local próprio dentro do laboratório com temperatura controlada;
- d) Após a aplicação da segunda dose de radiações ionizantes de raios-X, foram realizados os procedimentos descritos no item c, em decorridos sete dias, todos os SOI nMOSFETs foram caracterizados eletricamente, ficando aptos para receber uma nova dose de radiações ionizantes de raios-X;
- e) Aplicada a terceira e última dose de radiações ionizantes de raios-X, foram novamente realizados os procedimentos descritos no item c, e transcorridos o período de sete dias, todos os SOI nMOSFETs foram caracterizados eletricamente.

Com este procedimento, as variações dos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados dos SOI nMOSFETs foram obtidos, levando-se em conta as três diferentes doses de radiações ionizantes de raios-X. Estes dados experimentais foram colocados em função dos valores de “Pré-rad”, sendo possível analisar as devidas tendências dos comportamentos elétricos destes SOI nMOSFETs em função das TIDs aplicadas.

Os itens de *a* a *e* foram realizados três vezes: sendo a primeira para o CI CMOS não encapsulado (que foi devidamente mantido na condição passiva durante os procedimentos de

radiações ionizantes de raios-X); a segunda vez foi realizada para o CI CMOS 1 (que foi devidamente polarizado na condição de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X); e a terceira vez foi realizada para o CI CMOS 2 (que foi devidamente polarizado na condição de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X).

Ao término destas atividades, tínhamos informações da influência de três diferentes tipos de polarizações (passiva, estado ligado e estado desligado), considerando três doses distintas aplicadas, que foram suficientes para definirmos as tendências das variações dos doze parâmetros elétricos e figuras de mérito obtidos para cada dose de radiações ionizantes em relação aos valores na condição de “Pré rad”.

#### **4.2.2 Procedimentos das Radiações Ionizantes de Raios-X nos SOI NMOSFETs**

Todos os SOI nMOSFETs utilizados nesta tese foram expostos através de um Difratorômetro de raios-X da Shimadzu, modelo XRD-7000, conforme apresentado pela Figura 35.

Figura 35 - Difratorômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 (a) e equipamento de aquisição de dados (computador com programa dedicado) (b)



(a)

(b)

Fonte: Autor

Como podemos observar pela Figura 35, o equipamento da Shimadzu é blindado, e possui todos os itens de segurança que garantem que os ensaios de radiações ionizantes por raios-X possam ser executados (em que a porta do Difratorômetro fica bloqueada durante todo o procedimento de radiações ionizantes de raios-X). Todos os ajustes são realizados remotamente através de um microcomputador, o que garante que o operador não precise acessar o interior do Difratorômetro de raios-X.

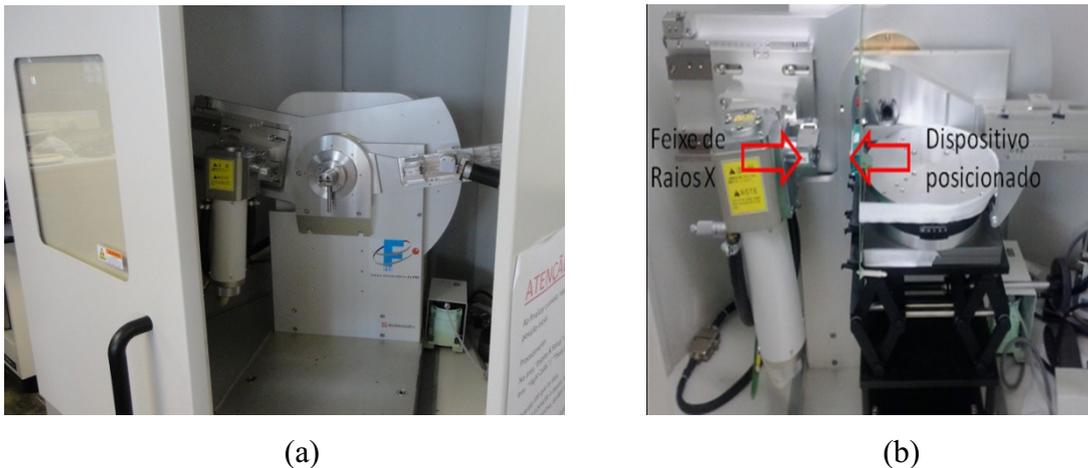
O difratorômetro em questão possui as seguintes características [99]:

- Potência máxima: 2 kW;
- Máxima corrente do tubo: 50 mA;
- Tensão máxima: 60 kV;

- Fuga de raios-X: menor que 2,5 Sv/h, considerando a potência máxima de saída.

A Figura 36 ilustra o Difratorômetro de raios-X do Centro Universitário FEI com a sua porta de proteção aberta, Figura 36(a), e o posicionamento de um dispositivo de teste contendo o CI CMOS para ser irradiado, Figura 36 (b).

Figura 36 - Difratorômetro: vista interna (a), e o posicionamento do dispositivo de teste contendo o CI CMOS para ser irradiado (b).



Fonte: Autor

Em todos os casos o Difratorômetro estava configurado com tubo de cobre a 52 cm da fonte, calibrado com feixes de raios-X com energia efetiva de 10 keV (através da combinação de uma tensão de 20 kV, com uma corrente de 10 mA), considerando-se o silício.

Os CIs CMOS foram posicionados a 50 mm de distância da fonte de raios-X, o que resulta em uma taxa de dose de 392 rad/s (utilizada para caracterização e qualificação de componentes semicondutores) [91]

Os ensaios foram divididos em três etapas distintas (uma para cada CI CMOS), sendo que cada uma delas foi conduzida de forma independente, com o objetivo de determinar como o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal comporta-se frente aos seus equivalentes com geometria de porta hexagonal e retangular. As etapas foram as seguintes:

### **Primeira Etapa**

Os SOI nMOSFETs do CI CMOS não encapsulado foram mantidos na condição passiva (sem polarização em nenhum dos seus terminais) durante as irradiações, com uma

dose total acumulada de 600 krad (de 500 krad até 600 krad, com passos de 50 krad). Esta condição na qual não temos uma polarização dos terminais dos SOI nMOSFETs, em que os mesmos ficam flutuando possui um caráter investigativo, necessário para se determinar as primeiras impressões principalmente para novas topologias.

Para este estudo as TIDs foram concebidas de tal forma que garantissem alterações significativas da tensão de limiar de forma a evidenciar as diferenças elétricas entre as diferentes topologias com geometria de porta octogonal, hexagonal e retangular.

### **Segunda Etapa**

Os SOI nMOSFETs do CI CMOS 1 foram mantidos na polarização de estado ligado em que o terminal de porta de todos os dispositivos conectados ao + 5 V e os demais terminais de todos os dispositivos foram conectados ao 0 V, estas conexões foram realizadas através de uma giga de teste constituída basicamente de uma placa de circuito impresso, soquetes para os CIs encapsulados e borneiras para conexões elétricas. Esta polarização induz a formação do campo elétrico vertical durante as irradiações. A dose total acumulada foi de 5 krad (de 3 krad até 5 krad, com passos de 1 krad). Esta condição de polarização, já apresenta um cunho investigativo e com o objetivo de potencializar os efeitos da TID decorrentes dos efeitos das radiações ionizantes de raios-X.

Para este segundo estudo, as TIDs foram projetadas de tal forma que a primeira dose resultasse em uma alteração na tensão de limiar de (5% a 10%). Esta é a faixa mínima necessária para isolarmos possíveis erros de medidas experimentais. Indiretamente com esta abordagem, poderíamos determinar qual foi a primeira topologia (geometria de porta octogonal, hexagonal e retangular) que foi afetada devido aos efeitos da TID ao considerar as alterações nas tensões de limiar, e/ou qual a dose mínima capaz de alterar a tensão de limiar dos referidos SOI nMOSFETs.

Este tipo de polarização, resulta em um campo elétrico vertical presente na estrutura dos SOI nMOSFETs durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Os defeitos ocasionados por esta polarização atuam diretamente no valor da tensão de limiar. Dentro deste cenário, a primeira TID foi de 1 krad (o que não surtiu variações nas tensões de limiar dos OSM, CSM e DSM). Posteriormente foi aplicada mais uma dose de 1 krad (resultando em uma TID de 2 krad), em que também não foram constatadas alterações significativas nas referidas tensões de limiar. Na sequência foi aplicada mais uma dose de 1

krad (resultando em uma TID de 3 krad), TID esta que já foi capaz de provocar alterações na tensão de limiar.

### **Terceira Etapa**

Os SOI nMOSFETs do CI CMOS 2 encapsulado foram mantidos na polarização de estado desligado (o terminal de dreno polarizado com +5 V e os demais terminais com 0V, o que induz a formação do campo elétrico longitudinal), durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, com uma dose total acumulada de 85 krad (de 50 krad até 75 krad e de 75 krad até 85 krad). Assim como para a polarização de estado ligado, a polarização de estado desligado possui um perfil investigativo, ao potencializar os efeitos da TID nas características elétricas dos SOI nMOSFETs.

Para esta etapa, as TIDs foram concebidas para que a dose inicial fosse na ordem de 50 krad e que a dose final não superasse o valor de 200 krad para evitar que o SOI nMOSFET fosse danificado eletricamente. Esta ordem de grandeza (e até superior) é observada em diversos estudos que consideram um SOI FD polarizado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Estas três abordagens e/ou metodologias utilizadas durante os experimentos geram três trabalhos distintos e independentes entre si, com o objetivo de apresentar o comportamento do SOI nMOSFET do tipo octogonal sob as diversas condições reais de polarização possíveis de operação.

Cabe aqui esclarecer que as TIDs aplicadas para cada etapa foram ajustadas para satisfazer determinadas condições específicas, de tal forma que esses experimentos com radiações ionizantes de raios-X não fossem destrutivos. Além disso, a maioria desses testes monitorou a tensão de limiar para definir as TIDs aplicadas.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PRINCIPAIS PARÂMETROS ELÉTRICOS E FIGURAS DE MÉRITO DOS SOI nMOSFETs.

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais com o objetivo de quantificar os efeitos das radiações ionizantes de raios-X nos principais parâmetros e figuras de mérito dos SOI nMOSFETs com geometrias de porta octogonal, hexagonal e retangular.

Todas as medidas experimentais foram realizadas em ambiente controlado, com o objetivo de eliminar as interferências causadas pelas variações de temperaturas, no comportamento elétrico dos transistores.

### 5.1 TENSÃO DE LIMIAR DOS SOI nMOSFETS IRRADIADOS POR RAIOS-X

Como relatado na introdução teórica, a tensão de limiar foi obtida a partir da segunda derivada da curva  $I_{DS}$  em função de  $V_{GS}$  [54], considerando  $V_{DS}$  igual a 10 mV.

As tensões de limiar foram obtidas através de caracterizações elétricas experimentais para todos os SOI nMOSFETs indicados anteriormente na Tabela 1. Para facilitar o entendimento, a Tabela 1 foi dividida em grupos da seguinte maneira:

- a) Grupo 01: Considera o OSM e o DSM com fator de corte “c” de 25%, com um ângulo “ $\alpha$ ” de 53,1°, e um CSM equivalente, com a mesma área de porta que a do OSM e uma mesma razão de aspecto que a do DSM;
- b) Grupo 02: Considera o OSM com fator de corte “c” de 50%, com um ângulo “ $\alpha$ ” de 53,1°;
- c) Grupo 03: Considera o OSM com fator de corte “c” de 75%, com um ângulo “ $\alpha$ ” de 53,1°, e um CSM equivalente, com a mesma área de porta que a do OSM;
- d) Grupo 04: Considera o OSM com fator de corte “c” de 25%, com um ângulo “ $\alpha$ ” de 90°, e um CSM equivalente, com a mesma área de porta que a do OSM;
- e) Grupo 05: Considera o OSM com fator de corte “c” de 25% com um ângulo “ $\alpha$ ” de 126,9°, assim como o seu devido equivalente CSM, ambos possuindo as mesmas áreas de porta.

Esta abordagem foi adotada para as análises das tensões de limiar e as inclinações de sublimiar (seção 5.2) dos dispositivos estudados. Para as tensões de limiar, esse estudo fez-se necessário, pois esse parâmetro elétrico é usado para a realização das diversas caracterizações elétricas dos SOI MOSFETs e conseqüentemente para a obtenção dos demais parâmetros

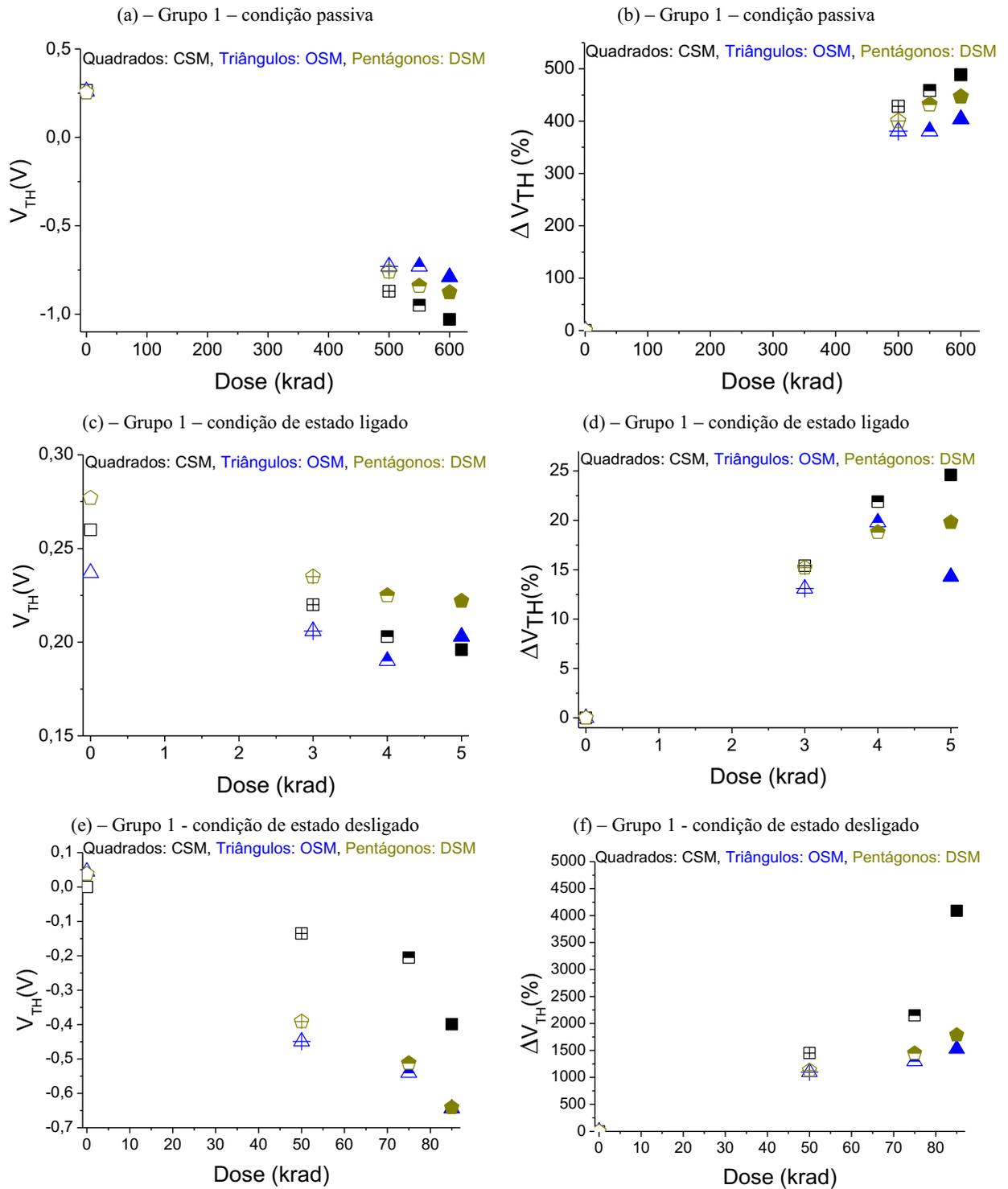
elétricos e figuras de mérito, que são levadas em consideração por esse projeto de pesquisa. Adicionalmente, esse estudo compara como as tensões de limiar dos OSMs se comportam em relação aos demais SOI MOSFETs equivalentes.

Inicialmente, considera-se o Grupo 01, ou seja, leva em conta o **OSM com “c” de 25% e “ $\alpha$ ” de 53,1°**, e os seus equivalentes DSM e CSM. As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs foram apresentadas na Tabela 1.

A Figura 37 apresenta as  $V_{TH}$  experimentais dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente de geometria de porta retangular em função das TIDs aplicadas. A Figura 37.a indica os valores das  $V_{THs}$  dos diferentes SOI nMOSFETs em função das TIDs, enquanto que a Figura 37.b, indica as variações percentuais das  $V_{THs}$  destes transistores para cada TID considerada em relação aos seus respectivos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. Todos os resultados estão considerando a condição passiva, durante as irradiações. As Figuras 37.c e 37.d são análogas as Figuras 37.a e 37.b, agora, porém, levando-se em conta a condição de polarização de estado ligado durante as irradiações. Da mesma maneira, as Figuras 37.e e 37.f são análogas as Figuras 37.c e 37.d, no entanto elas levam em conta a condição de polarização de estado desligado durante as irradiações.

Nas Figuras 38, 39, 40, 41, 42, os valores das  $V_{THs}$  do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal estão representados pelos triângulos na cor azul, os valores das  $V_{THs}$  do SOI nMOSFET com geometria de porta hexagonal pelos pentágonos na cor bege e os valores das  $V_{THs}$  do SOI nMOSFET com geometria de porta retangular pelos quadrados na cor preta. Os símbolos abertos indicam os valores obtidos antes de aplicarmos as doses ionizantes de raios-X, ou seja, indicam os valores na condição de “Pré-rad”, conforme os símbolos vão sendo pintados ou preenchidos, eles indicam que a TID está aumentando. Além disso, os símbolos totalmente fechados, indicam a última TID aplicada, de uma série de três que foram estudadas.

Figura 37 - Resultados experimentais dos comportamentos das  $V_{THS}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e desligado, (valores absolutos, Fig. 37.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 37.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 01



Fonte: Autor

Analisando a Figura 37.a, nota-se que todas as tensões de limiar dos SOI nMOSFETs foram expressivamente afetadas pelas TIDs aplicadas. Para o CSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,265 V (Pré-rad) para -1,03V (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,260 V (Pré-rad) para -0,79 V (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,256 V (Pré-rad) para -0,877 V (TID de 600 krad). Todos os valores das tensões de limiar dos SOI nMOSFET foram reduzidos com as doses aplicadas. Este resultado mostra que as diferentes doses de raios-X induziram armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta destes transistores e possivelmente também nos óxidos enterrados, de acordo com a literatura [10], [18], [100]. Analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de Pré-rad, como observado pela Figura 37.b, foram obtidas as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e da TID de 600 krad: 403% para o OSM, 444% para o DSM e 488% para o CSM. Portanto, observa-se que o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal apresenta um estilo de layout 17,4% mais tolerante aos efeitos da TID (600 krad), quando comparado com o SOI nMOSFET de geometria de porta retangular, e 9,2% mais tolerante, quando comparada com o SOI nMOSFET de geometria de porta hexagonal, considerando a condição passiva de polarização durante os procedimentos de radiações ionizante de raios-X.

Este resultado pode ser justificado devido ao novo estilo de layout do tipo octogonal para SOI nMOSFETs, que confere a ele um campo elétrico longitudinal menor (pelo fato de ser curvado) nas regiões de bico de pássaro, e conseqüentemente não ativando ou praticamente não ativando os transistores parasitários pertencentes a essas regiões, ou seja, o efeito DEPAAMBRE tem a capacidade de reduzir a influência dos efeitos da TID decorrentes das irradiações de raios X. Adicionalmente, ao projetar uma curva da variação percentual dos valores das tensões de limiar dos SOI nMOSFETs estudados, é possível verificar que existe uma variação mais acentuada em função das doses para o CSM quando comparado ao OSM e DSM, indicando uma menor tolerância do CSM.

Ao aplicarmos a polarização de estado ligado (terminal de porta do SOI nMOSFET com +5 V e demais terminais com 0 V), durante as irradiações, o campo elétrico vertical é aplicado na região de canal dos SOI nMOSFETs estudados e, conseqüentemente, os efeitos das TIDs são potencializados.

Considerando-se as TIDs utilizadas neste ensaio, verifica-se que tanto para o CSM como para o DSM, os valores das tensões de limiar sempre foram reduzidos em relação aos valores das TIDs anteriores. Analisando a Figura 37.c, observa-se que a  $V_{TH}$  do CSM passou de 0,260 V (Pré-rad) para 0,196 V (TID de 5 krad), e a  $V_{TH}$  do DSM passou de 0,277 V (Pré-

rad) para 0,222 V (TID de 5 krad). Estas reduções nas  $V_{THs}$  do DSM foram um pouco menores daquelas observadas para o caso do CSM equivalente, mas mesmo assim, todos os valores das  $V_{THs}$  desses transistores atingiram valores negativos. Portanto é verificado que os efeitos das TIDs aplicadas nestes dispositivos, decorrentes das irradiações, induziram o armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e possivelmente também no óxido enterrado [10], [18], [100].

No caso do OSM, observamos um mesmo comportamento que aqueles dos CSM e DSM, no qual o valor da sua  $V_{TH}$  passou de 0,237 V (Pré-rad) para 0,203 V (TID de 5 krad). No entanto, ao analisarmos a variação da  $V_{TH}$  do OSM, considerando-se a condição de uma TID de 4 krad para uma posterior TID de 5 krad, o valor da sua tensão de limiar aumentou, passando de 0,19 V (TID de 4 krad) para 0,222 V (TID de 5 krad), o que significa que o armadilhamento na sua interface  $SiO_2/Si$  passou a ter uma maior influência que aquelas que ocorreram no óxido de porta e no óxido.

Com este resultado, comparando-se com a condição passiva fica evidente que os efeitos da TID aplicadas nestes dispositivos, foram potencializados pela condição de polarização de estado ligado. E como resultado final, analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 37.c, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 5 krad: 14,3% para o OSM, 19,8% para o DSM e 24,6% para o CSM, ou seja, o OSM apresenta uma topologia 27,8% mais tolerante aos efeitos da TID (5 krad) quando comparada ao do DSM e 45,8% mais tolerante quando comparada ao CSM equivalente.

Ao considerarmos a condição de polarização de estado desligado (terminal de porta, fonte e substrato do SOI nMOSFET conectados ao 0 V e terminal de dreno ao +5V) durante as irradiações, o campo elétrico longitudinal é aplicado na região de canal dos SOI nMOSFETs analisados, o que resulta na potencialização dos efeitos da TID. Nota-se comportamentos similares de todos estes dispositivos desta análise em relação a condição passiva. Analisando a Figura 37.e a  $V_{TH}$  do CSM passou de 0 V (Pré-rad) para -0,399 V (TID de 85 krad), a  $V_{TH}$  do OSM passou de 0,045 V (Pré-rad) para -0,641 V (TID de 85 krad) e a  $V_{TH}$  do DSM passou de 0,038 V (Pré-rad) para -0,641 V (TID de 85 krad). Estes resultados demonstram que os valores obtidos decorrentes da polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X resultaram em um alto armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e possivelmente também no óxido enterrado. Sendo a condição que mais afetou o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal. E como

resultado final, analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 37.f, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 85 krad: 1531% para o OSM, 1786% para o DSM e 4090% para o CSM, ou seja, o OSM apresenta uma topologia mais tolerante aos efeitos da TID (85 krad) quando comparada ao do DSM e CSM equivalente.

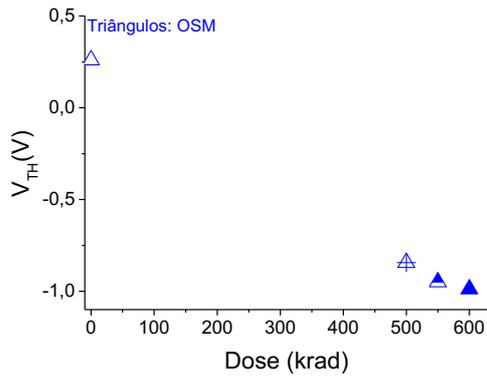
Analisando o Grupo 02, leva-se em conta o **OSM com “c” de 50% e “ $\alpha$ ” de 53,1°**. As características geométricas referentes SOI nMOSFET analisado foram destacadas na Tabela 1.

A Figura 38 apresenta as  $V_{TH}$  experimentais do OSM em função das TIDs aplicadas para as diferentes condições de polarizações durante os procedimentos de irradiação de raios-X. As Figuras 38.a, 38.c e 38.e indicam os valores das  $V_{TH}$  em função das TIDs, enquanto as Figuras 38.b, 38.d e 38.f indicam as variações percentuais das  $V_{TH}$  para cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. Os resultados das Figuras 38.a e 38.b consideram a condição passiva durante os procedimentos de irradiações ionizantes de raios-X. A Figura 38.c e 38.d consideram a polarização de estado ligado durante as irradiações. Analogamente, as Figuras 38.e e 38.f são similares as Figuras 38.a e 38.b, porém consideram a polarização de estado desligado durante as irradiações.

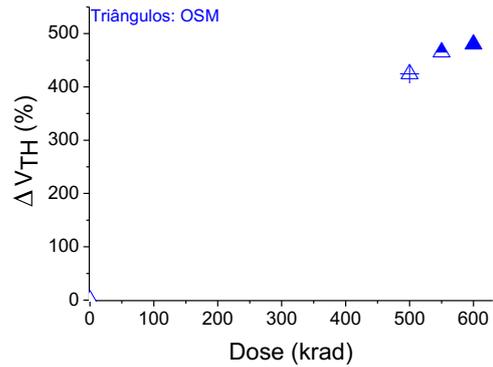
Na Figura 38, os valores das  $V_{TH}$  do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal estão representados pelos triângulos na cor azul e seguem o mesmo princípio já apresentado para a Figura 37.

Figura 38 - Resultados experimentais dos comportamentos das  $V_{THS}$  em função das TIDs de raios-X decorrentes das radiações ionizantes de raios-X para o OSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos, Fig. 38.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 38.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 2

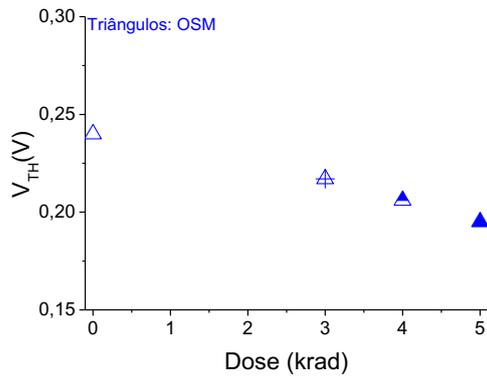
(a) – Grupo 2 - condição passiva



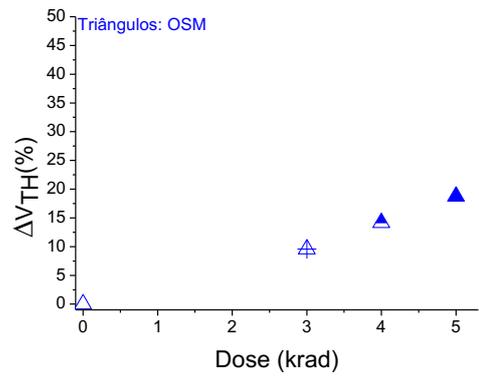
(b) – Grupo 2 - condição passiva



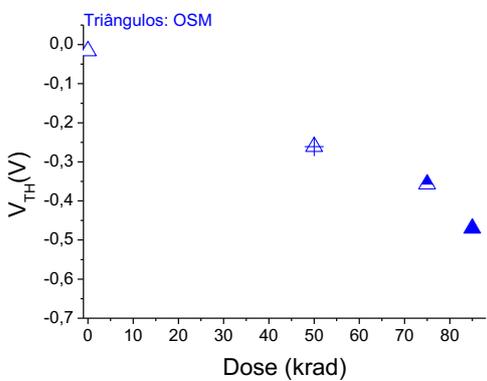
(c) – Grupo 2 - condição de estado ligado



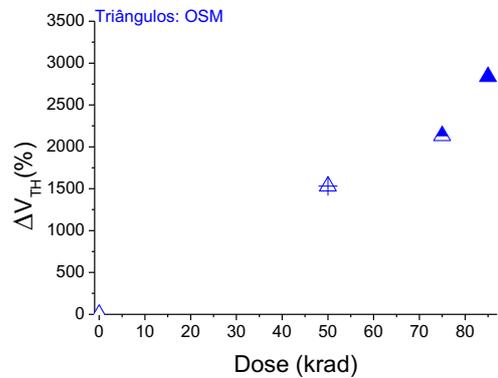
(d) – Grupo 2 - condição de estado ligado



(e) – Grupo 2 - condição de estado desligado



(f) – Grupo 2 - condição de estado desligado



Fonte: Autor

Analisando a Figura 38, nota-se que em todas as condições de polarização durante as irradiações, seja a condição passiva, a condição de estado ligado ou a condição de estado desligado, a tensão de limiar foi reduzida em função da TID aplicada, o que nos leva a concluir que o mecanismo predominante foi o de armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e no óxido enterrado ao invés do armadilhamento na interface  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  [10].

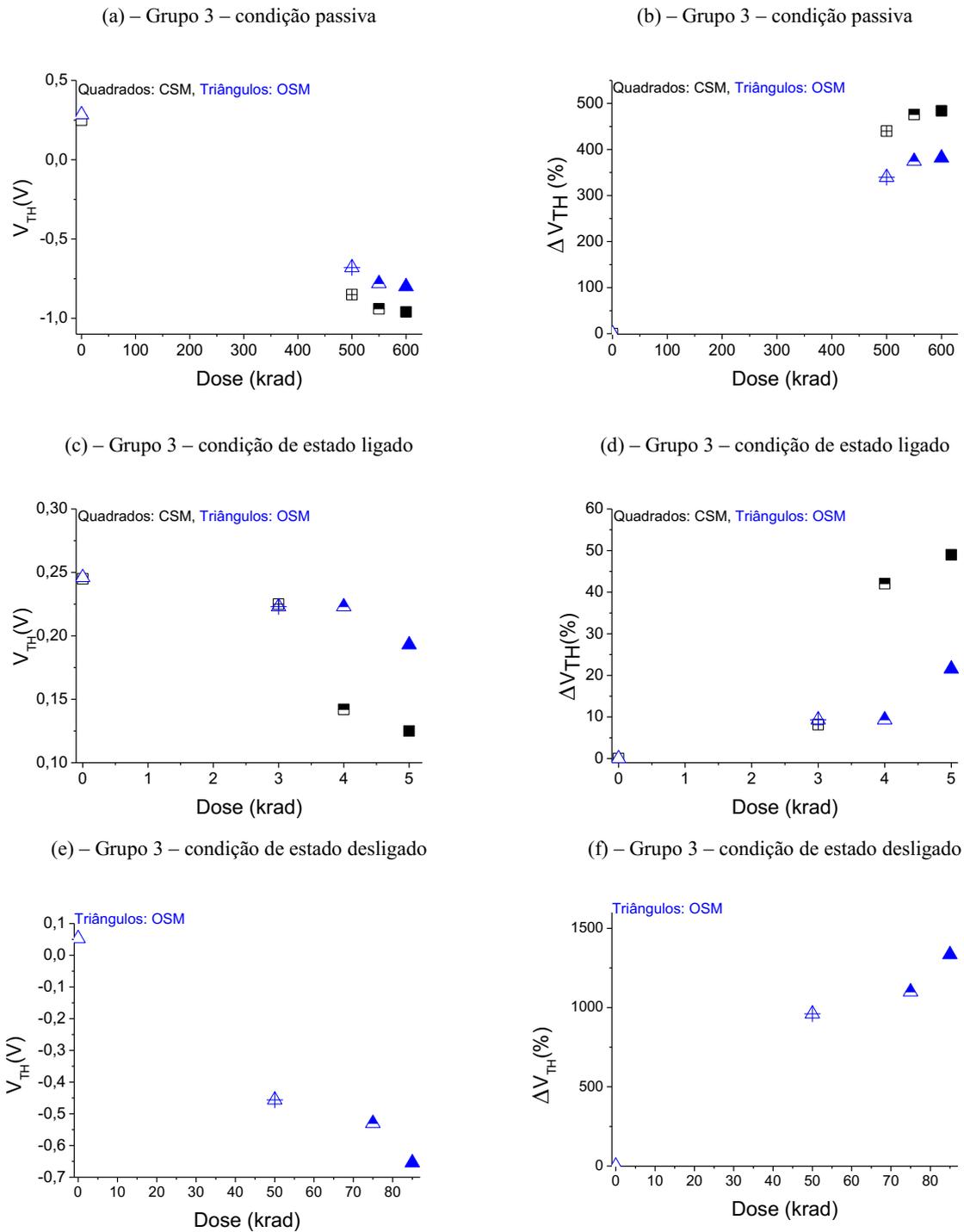
Os resultados apresentados na Figura 38.f mostram que a condição de polarização de estado desligado (onde os efeitos da TID foram potencializados em decorrência da presença do campo elétrico longitudinal durante o procedimento das radiações ionizantes de raios-X) é o que mais afeta o comportamento da tensão de limiar em relação as demais condições de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Considerando os gráficos das variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação foram obtidas as seguintes variações percentuais: 480% (TID de 600 krad), 18,75% (TID de 5 krad) e 2837,5% (TID de 85 krad), considerando as condições passiva, de estado ligado e estado desligado, respectivamente.

Considerando o Grupo 03, leva-se em conta o **OSM com “c” de 75% e “a” de 53,1°** e seu equivalente CSM. As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs analisados foram apresentadas na Tabela 1.

A Figura 39 apresenta as  $V_{\text{TH}}$  experimentais dos OSM e do CSM equivalente e seguem a mesma dinâmica apresentada para a Figura 37, ou seja, as Figuras 39.a, 39.c e 39.e indicam os valores das  $V_{\text{TH}}$  dos SOI nMOSFETs em função da dose aplicada para a condição passiva, condição de estado ligado e condição de estado desligado, respectivamente. As Figuras 39.b, 39.d e 39.f indicam as variações percentuais das  $V_{\text{TH}}$  destes transistores para cada TID considerada em relação aos seus respectivos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, para a condição passiva, condição de estado ligado e condição de estado desligado.

Vale ressaltar que o CSM referente ao estudo da condição de estado desligado teve suas características elétricas comprometidas, possivelmente devido a descarga eletrostática, não sendo possível a sua análise.

Figura 39 - Resultados experimentais dos comportamentos das  $V_{THS}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 39.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 39.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 3



Fonte: Autor

Os efeitos observados na Figura 39 sugerem o mesmo comportamento exposto para a Figura 38, em que todos os valores das  $V_{TH}$  dos SOI nMOSFETs foram reduzidos em função

da TID. Este resultado mostra que as diferentes radiações ionizante de raios-X induziram armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta destes transistores assim como nos óxidos enterrados, de acordo com a literatura [10], [18], [100]. Adicionalmente, a polarização de estado desligado é a condição que mais afeta o OSM após os efeitos da TID decorrentes dos procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. .

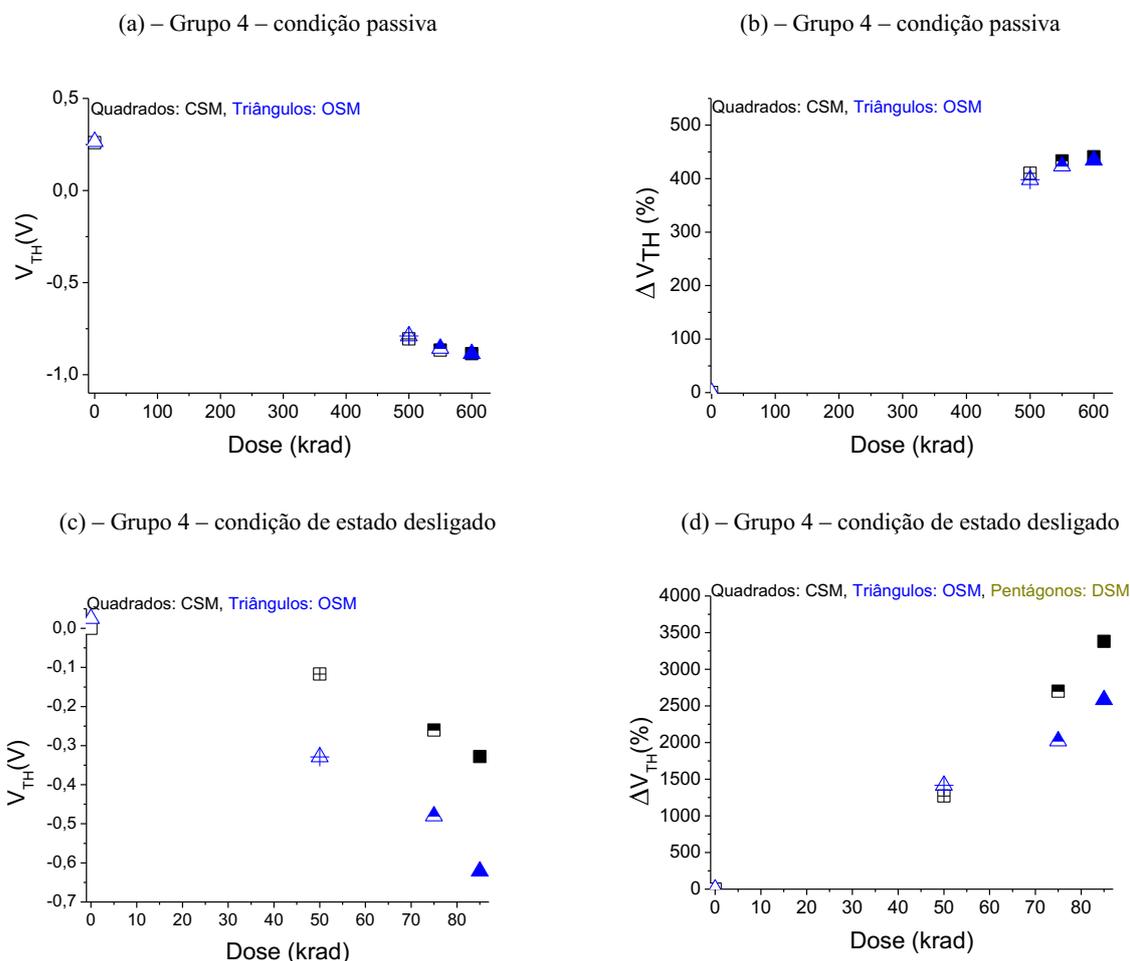
Vale ressaltar que o estilo de leiaute octogonal, apresentou uma maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes de raios-X, quando comparado ao seu CSM equivalente, tanto na condição de polarização passiva, no qual o valor da  $V_{TH}$  do CSM variou 105% a mais que a  $V_{TH}$  do OSM, como na de estado ligado, onde a  $V_{TH}$  do CSM variou 28% a mais que o OSM, considerando a última da TID.

Este resultado indica que o efeito DEPAMBBRE, atuou de forma significativa no OSM, com a desativação dos transistores parasitários originados nas regiões de bico de pássaro devido aos efeitos do armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta e enterrados, pelo fato de apresentar um campo elétrico longitudinal menor (pelo fato de ser curvado) nas regiões das BBRs.

Considerando o Grupo 04, leva-se em conta o **OSM com “c” de 25% e “ $\alpha$ ” de 90°** e o seu equivalente CSM. As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs foram apresentadas na Tabela 1.

A Figura 40 apresenta as  $V_{TH}$  experimentais dos OSM e do seu CSM equivalente em função da TID aplicada, seguindo o mesmo padrão apresentado na anteriormente, no qual as Figuras da esquerda (Fig. 40.a, 40.c e 40.e) indicam os valores das  $V_{TH}$  dos diferentes SOI nMOSFETs em função da TID, enquanto que as Figuras da direita (Fig. 40b, 40.c e 40,f) indicam as variações percentuais das  $V_{THs}$  desses transistores para cada TID considerada em relação aos seus respectivos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. As Figuras 40.a e 40.b refletem os resultados da  $V_{TH}$  para a condição passiva as Figuras 40.c e 40.d indica os valores das  $V_{TH}$  considerando a condição de estado desligado. As Figuras referentes aos dados resultantes da polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X não foram realizadas devido a falhas (curto-circuito dos terminais) no encapsulamento do CI.

Figura 40 - Resultados experimentais dos comportamentos das  $V_{TH}$ s em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 40.a, c, e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 40.b, d), respectivamente e considerando o Grupo 4



Fonte: Autor

Analisando a Figura 40.a, nota-se que todas as tensões de limiar dos SOI nMOSFETs foram expressivamente afetadas pelas TIDs aplicadas. Para o CSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,26 V (Pré-rad) para -0,886V (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,265V (Pré-rad) para -0,886V (TID de 600 krad). Todos os valores das tensões de limiar dos SOI nMOSFET foram deslocados para a esquerda do eixo das tensões de porta, e conseqüentemente acabaram ficando com os seus valores negativos em função da última TID aplicada. Este resultado mostra que as diferentes radiações ionizante de raios-X induziram armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta destes transistores e possivelmente também nos óxidos enterrados, como já apresentado pela literatura [10], [18], [100]. Analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de

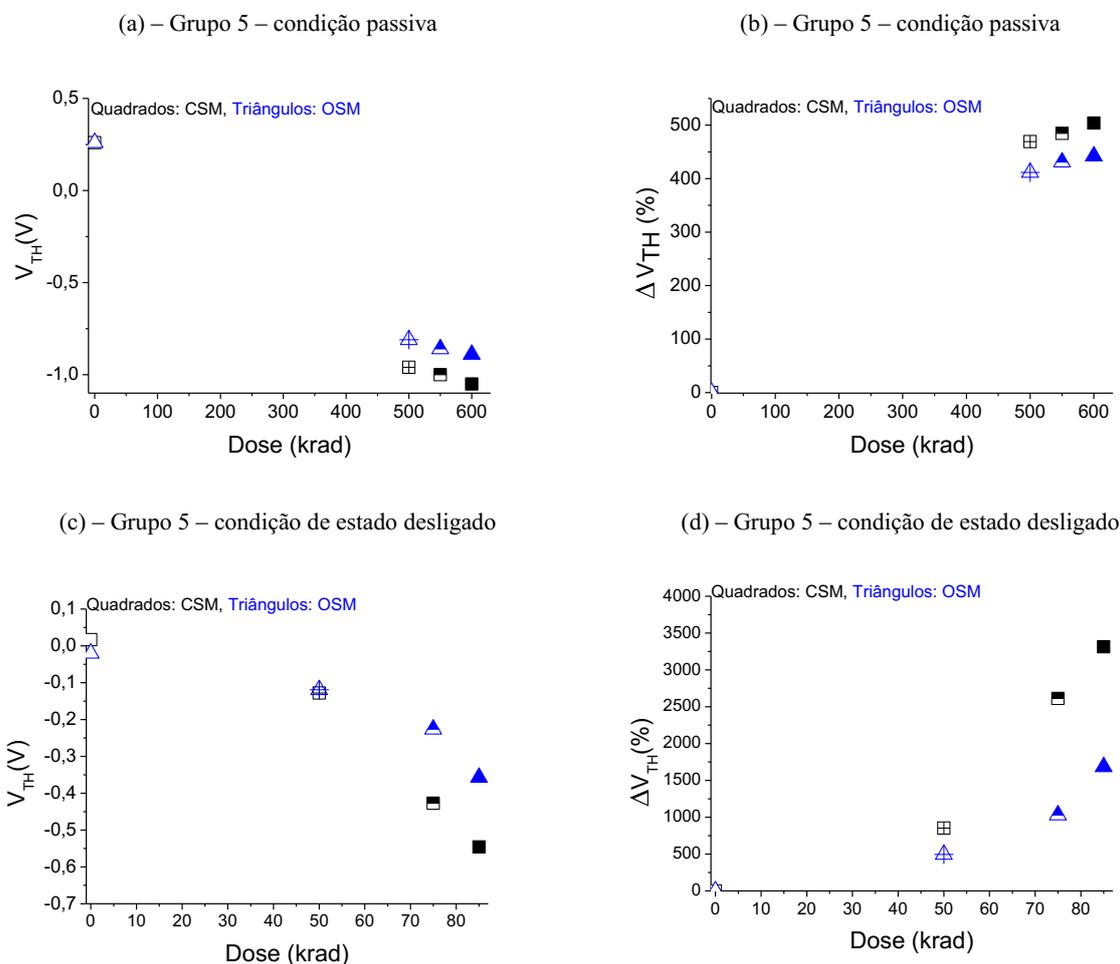
“Pré-rad”, como observado pela Figura 40.b, foram obtidas as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e da TID de 600 krad: 434% para o OSM, 440% para o CSM. Portanto, observa-se que o OSM com fator de corte “c” de 25% e ângulo “ $\alpha$ ” de 90°, apresenta comportamento similar ao do seu equivalente CSM já que esta configuração não potencializa o efeito DEPAMBBRE, já que sua topologia assemelha-se a topologia do dispositivo retangular.

Ao considerarmos a condição de polarização de estado desligado (terminal de porta, fonte e substrato do SOI nMOSFET conectados ao 0 V e terminal de dreno ao +5V) durante os procedimentos das radiações ionizantes de raios-X, o campo elétrico longitudinal é aplicado na região de canal dos SOI nMOSFETs analisados, o que resulta na potencialização dos efeitos da TID. Nota-se comportamentos similares de todos estes dispositivos desta análise em relação a condição passiva. No entanto, as variações das  $V_{THs}$  desses transistores foram um pouco mais intensas. Analisando a Figura 40.c a  $V_{TH}$  do CSM passou de 0,01 V (Pré-rad) para -0,328 V (TID de 85 krad), a  $V_{TH}$  do OSM passou de 0,025 V (Pré-rad) para -0,621 V (TID de 85 krad). Estes resultados demonstram que os valores obtidos decorrentes da polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X resultaram em um alto armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e possivelmente também no óxido enterrado. Sendo a condição que mais afetou o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal. E como resultado final, analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 40.d, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 85 krad: 2587% para o OSM, 3380% para o CSM.

Considerando o Grupo 05, leva-se em conta o **OSM com “c” de 25% e “ $\alpha$ ” de 126,9°** e seu equivalente CSM. As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs foram apresentados na Tabela 1.

A Figura 41 apresenta as  $V_{TH}$  experimentais dos OSM e CSM em função da TID aplicada. Em que as Figuras da esquerda indicam os valores das  $V_{THs}$  em função da dose aplicada, enquanto que as Figuras da direita indicam as variações percentuais das  $V_{THs}$  de cada dose em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. As Figuras 41.a e 41.b referem-se aos resultados em funções da condição passiva, enquanto que as Figuras 41.c e 41.d referem-se aos resultados da condição de estado desligado. As Figuras referentes aos dados da polarização de estado ligado durante as irradiações, não foram realizadas devido a falhas (possivelmente descarga eletrostática) nos transistores.

Figura 41 - Resultados experimentais dos comportamentos das  $V_{THS}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 41.a, e c valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 41.b e d), respectivamente e considerando o Grupo 5



Fonte: Autor

Analisando a Figura 41.a, nota-se que todas as tensões de limiar dos SOI nMOSFETs foram consideravelmente afetadas pelas TIDs aplicadas. Para o CSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,26 V (Pré-rad) para -1,05V (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $V_{TH}$  passou de 0,260 V (Pré-rad) para -0,89 V (TID de 600 krad). Todos os valores das  $V_{THs}$  foram deslocados para a esquerda do eixo das tensões de porta, em função da última TIDs aplicada. Este resultado mostra que as diferentes doses induziram armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta destes transistores e possivelmente também nos óxidos enterrados, de acordo com a literatura [10], [18], [100].

Analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de Pré-rad, como observado pela Figura 41.b, foram obtidas as

seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e da TID de 600 krad: 442% para o OSM e 504% para o CSM. Portanto, observa-se que o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal apresenta um estilo de layout 12,3% mais tolerante aos efeitos da TID (600 krad), quando comparado com o SOI nMOSFET de geometria de porta retangular.

Este resultado pode ser justificado devido ao novo estilo de layout do tipo octogonal para SOI nMOSFETs, que confere a ele um campo elétrico longitudinal menor (pelo fato de ser curvado) nas regiões de bico de pássaro, e conseqüentemente não ativando ou praticamente não ativando os transistores parasitários pertencentes a essas regiões, ou seja, em conseqüência do efeito DEPAMBRE presente no SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal, e portanto este tipo de layout para SOI nMOSFETs tem a capacidade de reduzir a influência dos efeitos da TID decorrentes das radiações ionizantes de raios X.

Ao considerarmos a condição de polarização de estado desligado (terminal de porta, fonte e substrato do SOI nMOSFET conectados ao 0 V e terminal de dreno ao +5V) durante os procedimentos das radiações ionizantes de raios-X, o campo elétrico longitudinal é aplicado na região de canal dos SOI nMOSFETs analisados, o que resulta na potencialização dos efeitos da TID. Nota-se comportamentos similares de todos estes dispositivos desta análise em relação a condição passiva. No entanto, as variações das  $V_{THs}$  desses transistores foram mais intensas. Analisando a Figura 41.c a  $V_{TH}$  do CSM passou de 0,017 V (Pré-rad) para -0,546 V (TID de 85 krad), a  $V_{TH}$  do OSM passou de -0,02 V (Pré-rad) para -0,357 V (TID de 85 krad). Estes resultados demonstram que os valores obtidos decorrentes da polarização de estado desligado durante as irradiações, resultaram em um alto armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e possivelmente também no óxido enterrado. Sendo a condição que mais afetou o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal.

Como resultado final, analisando os valores das variações percentuais das tensões de limiar em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 41.d, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 85 krad: 1685% para o OSM e 3311% para o CSM, ou seja, o OSM apresenta uma topologia mais tolerante aos efeitos da TID (85 krad) quando comparada ao do CSM equivalente.

## 5.2 INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR (SS)

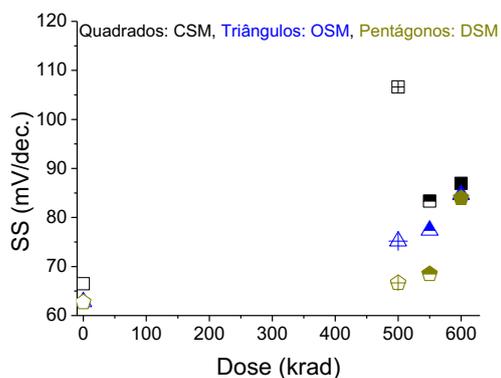
Assim como indicado na seção anterior (5.1), para conduzir o estudo da inclinação de sublimiar (SS), foram utilizados os SOI nMOSFETs indicados na Tabela 01.

A Figura 42 apresenta as SS experimentais dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada, considerando o Grupo 01 da Tabela 1 (**OSM com “c” de 25% e “ $\alpha$ ” de 53,1°**). A Figura 42.a indica os valores das SS em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 42.b indica as variações percentuais das SS destes transistores para cada TID considerada em relação aos seus respectivos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. Todos os resultados estão considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 42.c e 42.d são análogas as Figuras 42.a e 42.b, levando-se em conta a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Da mesma maneira, as Figuras 42.e e 42.f são análogas as Figuras 42.c e 42.d, levando em conta a condição de polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

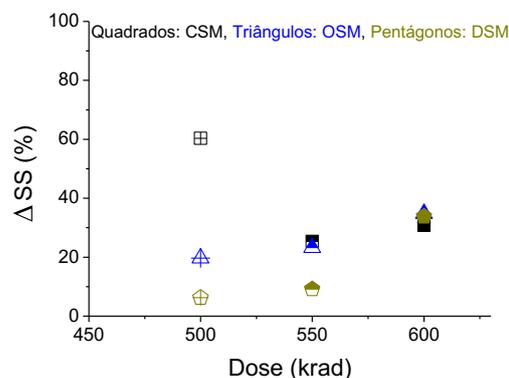
Nas Figuras 43, 44, 45, 46 247, os valores das SS do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal estão representados pelos triângulos na cor azul, os valores das SS do SOI nMOSFET com geometria de porta hexagonal pelos pentágonos na cor bege e os valores das SS do SOI nMOSFET com geometria de porta retangular pelos quadrados na cor preta. Os símbolos abertos indicam os valores obtidos antes de aplicarmos as doses ionizantes de raios-X, ou seja, indicam os valores na condição de “Pré-rad”, conforme os símbolos vão sendo pintados ou preenchidos, eles indicam que a TID está aumentando. Além disso os símbolos totalmente fechados, indicam a última TID aplicada, de uma série de três que foram estudadas.

Figura 42 - Resultados experimentais do comportamento das SSs em função das doses TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 42.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores da condição de “Pré-rad”, Fig. 42.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 1

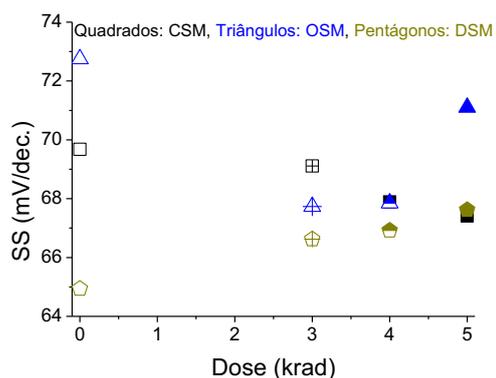
(a) – Grupo 1 – condição passiva



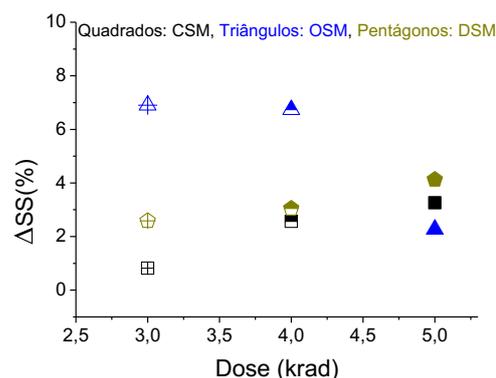
(b) – Grupo 1 – condição passiva



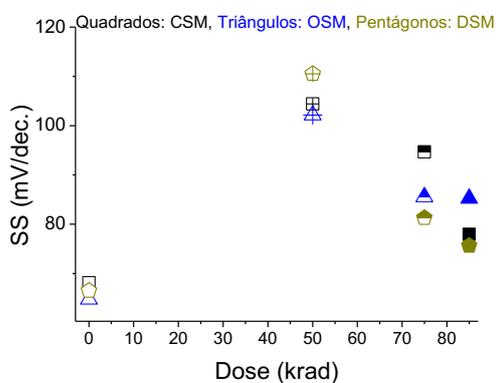
(c) – Grupo 1 – condição de estado ligado



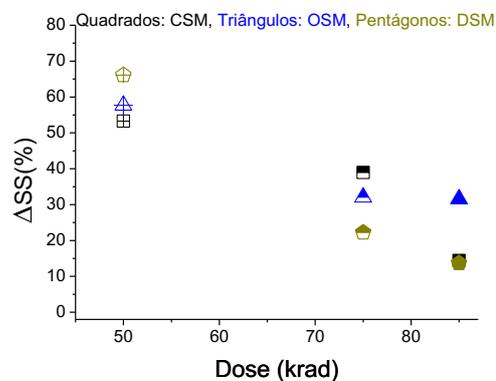
(d) – Grupo 1 – condição de estado ligado



(e) – Grupo 1 – condição de estado desligado



(f) – Grupo 1 – condição de estado desligado



Fonte: Autor

Analisando a Figura 42.a, nota-se que todas as inclinações de sublimiar dos SOI nMOSFETs foram afetadas pelas TIDs aplicadas. Para o CSM, a SS passou de 66,48 mV/dec. (Pré-rad) para 86,95 mV/dec. (TID de 600 krad). Para o OSM, a SS passou de 62,8 mV/dec. (Pré-rad) para 84,67 mV/dec. (TID de 600 krad). E para o DSM, a SS passou de 62,7 mV/dec. (Pré-rad) para 83,96 mV/dec. (TID de 600 krad). Todos os valores das SSs dos SOI nMOSFET foram incrementados positivamente em função da última TIDs aplicada. Este resultado mostra que as diferentes radiações ionizante de raios-X induziram armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta destes transistores e possivelmente também nos óxidos enterrados, de acordo com a literatura [10], [18], [100]. Analisando os valores das variações percentuais das SSs em relação aos valores obtidos na condição de Pré-rad, como observado pela Figura 42.b, foram obtidas as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e da TID de 600 krad: 30,8% para o OSM, 34% para o DSM e 33,8% para o CSM. Verifica-se que os resultados são muito próximos entre os SOI nMOSFETs considerando a TID de 600 krad.

Analisando a Figura 42.c, observa-se que a SS do CSM passou de 69,68 mV/dec. (Pré-rad) para 67,41 mV/dec. (TID de 5 krad), e a SS do DSM passou de 64,94 mV/dec. (Pré-rad) para 67,62 mV/dec. (TID de 5 krad), enquanto que a SS do OSM passou de 72,75 mV/dec. (Pré-rad) para 71,1 mV/dec. (TID de 5 krad),.

Com este resultado, comparando-se com a condição passiva (*floating*) fica evidente que os efeitos da TID aplicadas nestes dispositivos, decorrentes das radiações ionizantes de raios-X, não foram potencializados pela condição de polarização de estado ligado. E como resultado final, analisando os valores das variações percentuais das SSs em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 42.c, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 5 krad: 2,26% para o OSM, 4,12% para o DSM e 3,25% para o CSM, ou seja, todos os SOI nMOSFETs apresentaram comportamentos muito semelhantes.

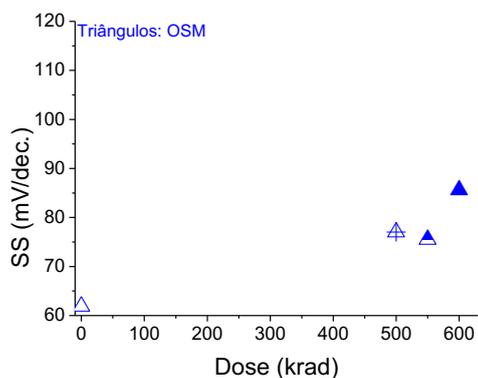
Analisando a Figura 42.e a SS do CSM passou de 68,12 mV/dec. (Pré-rad) para 77,94 mV/dec. (TID de 85 krad), a SS do OSM passou de 64,78 mV/dec. (Pré-rad) para 85,25 mV/dec. (TID de 85 krad) e a SS do DSM passou de 66,52 mV/dec. (Pré-rad) para 75,64 mV/dec. (TID de 85 krad). Estes resultados demonstram que os valores obtidos decorrentes da condição passiva e polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X resultaram em um maior armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e possivelmente também no óxido enterrado quando comparado com as demais condições. Estas duas condições afetaram de maneira muito similar os valores das SS do

OSM. Como resultado final, analisando os valores das variações percentuais das SS em relação aos valores obtidos na condição de pré-irradiação, como observado pela Figura 42.f, temos as seguintes variações percentuais entre os valores obtidos na condição de pré-irradiação e a TID igual a 85 krad: 31,6% para o OSM, 13,7% para o DSM e 14,4% para o CSM.

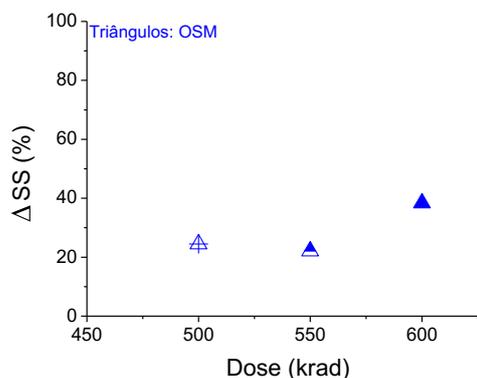
A Figura 43 apresenta as SS experimentais dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal considerando o Grupo 02 da Tabela 1 (**OSM com “c” de 50% e “ $\alpha$ ” de 53,1°**). A Figura 43.a indica os valores das SS em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 43.b, indica as variações percentuais das SS de cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva durante os procedimentos de irradiações ionizantes de raios-X. A Figura 43.c indica os valores das SS em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 43.d, indica as variações percentuais da SS de cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de irradiações ionizantes de raios-X. A Figura 43.e, indica os valores das SS em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 43.f, indica as variações percentuais da SS de cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de irradiações ionizantes de raios-X.

Figura 43 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TIDs de raios-X para os OSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 43.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 43.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 2

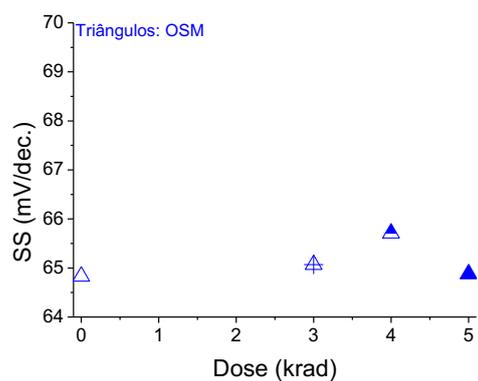
(a) – Grupo 2 – condição passiva



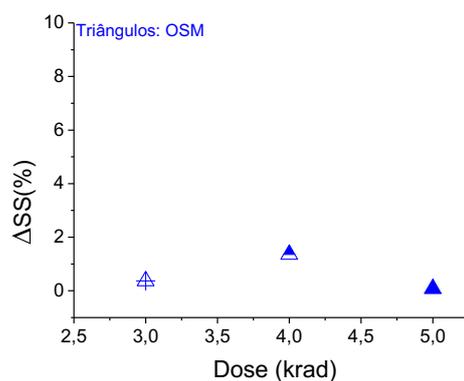
(b) – Grupo 2 – condição passiva



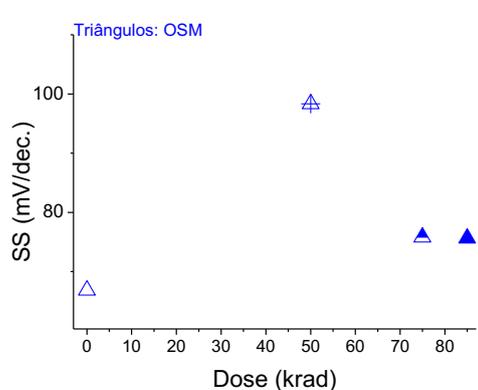
(c) – Grupo 2 – condição de estado ligado



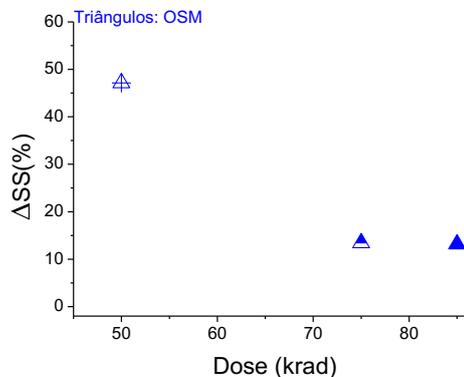
(d) – Grupo 2 – condição de estado ligado



(e) – Grupo 2 – condição de estado desligado



(f) – Grupo 2 – condição de estado desligado



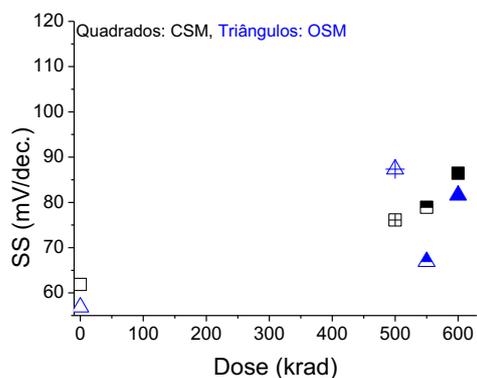
Fonte: Autor

Para a Figura 43, nota-se as seguintes tendências: na condição passiva os valores das SSs do OSM passaram de 61,88 mV/dec (Pré-rad) para 85,61 mV/dec. (TID de 600 krad), uma variação percentual de 38,35% entre elas. Já na polarização de estado ligado os valores das SSs do OSM passaram de 64,85 mV/dec (Pré-rad) para 64,88 mV/dec. (TID de 5 krad), uma variação percentual inferior a 1%. Enquanto que na polarização de estado desligado os valores das SSs do OSM passaram de 66,83 mV/dec (Pré-rad) para 75,64 mV/dec. (TID de 85 krad), uma variação percentual de 13,18% entre elas.

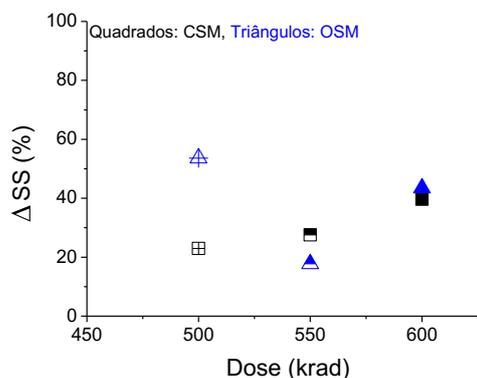
A Figura 44 apresenta as SS experimentais dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada, considerando o Grupo 03 da Tabela 1 (**OSM com “c” de 75% e “ $\alpha$ ” de 53,1°**). A Figura 44.a indica os valores das SS em função da dose aplicada, enquanto que a Figura 44.b, indica as variações percentuais das SS dos SOI nMOSFETs para cada TID considerada em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”. Todos os resultados considerando a condição passiva durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 44.c indica os valores das SS em função da dose aplicada, enquanto que a Figura 44.d, indica as variações percentuais da SS dos SOI nMOSFETs para cada TID estudada em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 44.e, indica os valores das SS em função dos SOI nMOSFETs em função das TIDs estudadas, enquanto que a Figura 44.f, indica as variações percentuais da SS de cada TID analisada em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Para esta condição de polarização o CSM não foi analisado devido a falhas no componente.

Figura 44 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TIDs de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 44.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 44.b, d, f), respectivamente e considerando o Grupo 3

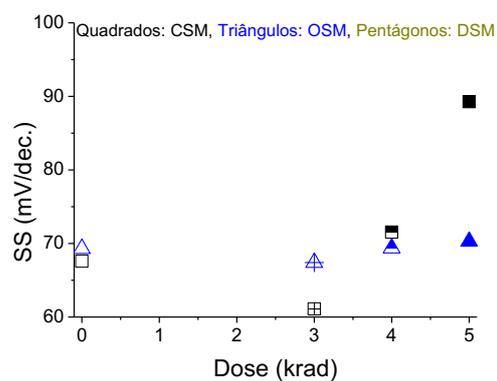
(a) – Grupo 3 – condição passiva



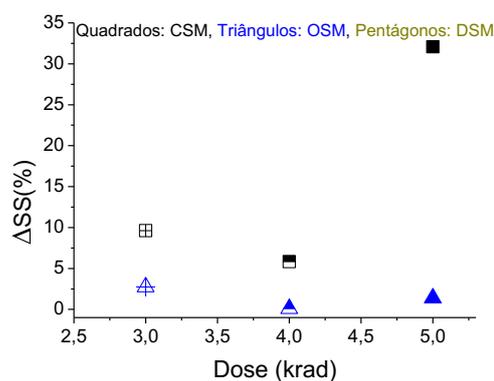
(b) – Grupo 3 – condição passiva



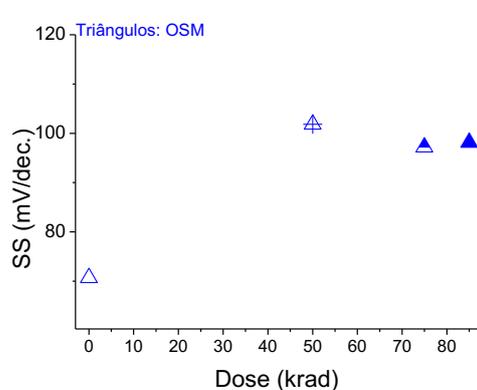
(c) – Grupo 3 – condição de estado ligado



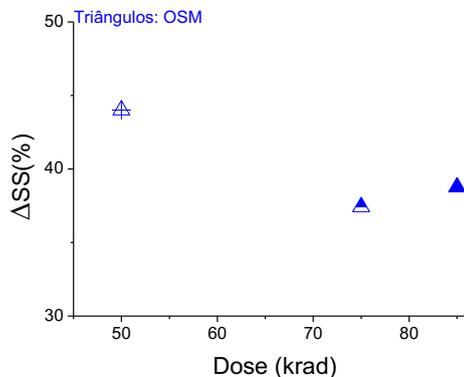
(d) – Grupo 3 – condição de estado ligado



(e) – Grupo 3 – condição de estado desligado



(f) – Grupo 3 – condição de estado desligado

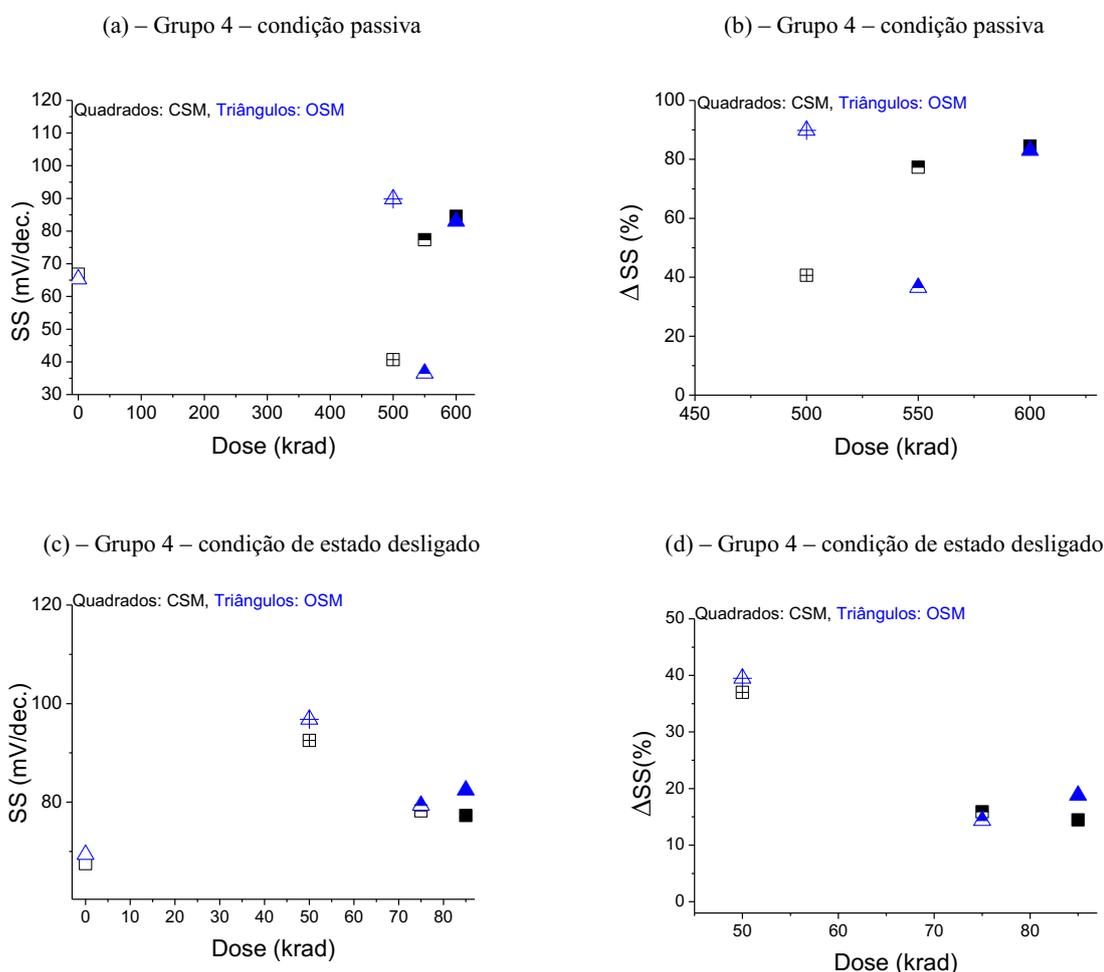


Fonte: Autor

Para a Figura 44, tem-se as seguintes tendências: na condição passiva os valores das SSs dos CSM e OSM passaram de 61,88 e 57 mV/dec (Pré-rad) para 86,43 e 81 mV/dec. (TID de 600 krad), uma variação percentual de 39,67 e 45%, respectivamente. Já na polarização de estado ligado, os valores das SS dos CSM e OSM passaram de 67,6 e 69,31 mV/dec (Pré-rad) para 89,28 e 70,28 mV/dec. (TID de 5 krad), uma variação percentual de 32 e 1,4%, respectivamente. Na polarização de estado desligado, os valores das SS do OSM passaram de 70,71 mV/dec (Pré-rad) para 98,13 mV/dec. (TID de 85 krad), uma variação percentual de 38,8% entre elas. Pelos resultados nota-se que com exceção da condição floating, o OSM apresentou uma maior tolerância aos efeitos da TID.

A Figura 45 apresenta as SS experimentais dos OSMs e CSMs equivalentes em função da TID aplicada, considerando o Grupo 4 da Tabela 1 (**OSM com “c” de 25% e “α” de 90°**). A Figura 45.a indica os valores das SSs em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 45.b, indica as variações percentuais das SSs de cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras referentes a polarização de estado ligado não foram possíveis de serem obtidas devido a falhas no encapsulamento. As Figuras 45.c e 45.d são análogas as Figuras 45.a e 45.b, levando em conta a condição de polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Figura 45 - Resultados experimentais do comportamento das SS em função das TID de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 45.a e c valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 45.b e d), respectivamente e considerando o Grupo 4

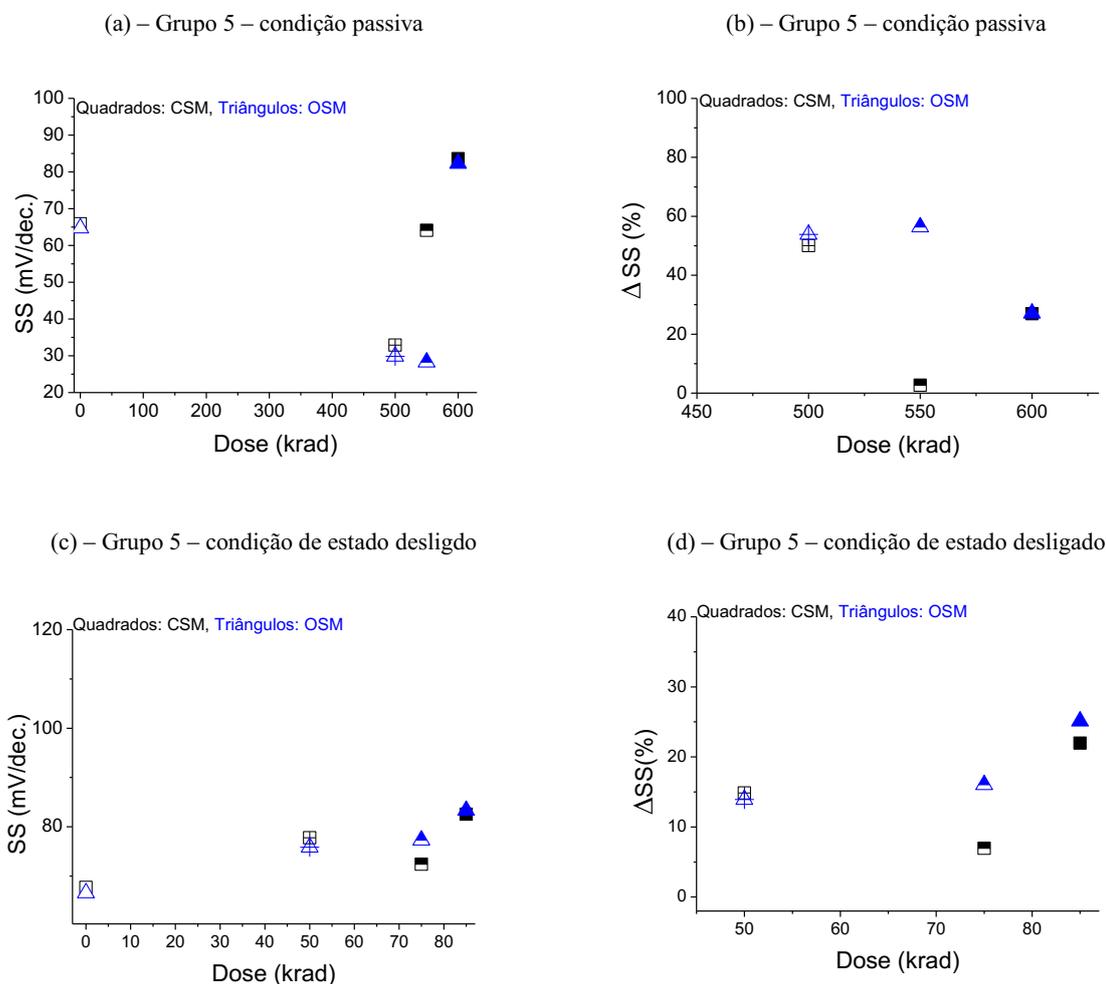


Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 45 a, tem-se as seguintes tendências: na condição passiva os valores das SS dos CSM e OSM passaram de 66,8 e 65,35 mV/dec (Pré-rad) para 84,53 e 82,98 mV/dec. (TID de 600 krad), uma variação percentual de 26,54 e 26,98%, respectivamente. Já na polarização de estado ligado ocorreu uma falha no encapsulamento, o que impossibilitou de obter as informações. Enquanto que na polarização de estado desligado os valores das SS dos CSM e OSM passaram de 67,52 e 69,39 mV/dec (Pré-rad) para 77,28 e 82,44 mV/dec. (TID de 85 krad), uma variação percentual de 14,45 e 18,81% entre elas. Pelos resultados, nota-se que os OSM e CSM tiveram alterações semelhantes em seus valores de SS, apresentando um mesmo comportamento.

A Figura 46 apresenta as SS experimentais dos OSMs e CSMs equivalentes em função da TID aplicada, considerando o Grupo 5 da Tabela 1 (**OSM com “c” de 25% e “α” de 126,9°**). A Figura 46.a indica os valores das SSs em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 45.b, indica as variações percentuais das SSs de cada TID em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 46.c e 46.d são análogas as Figuras 46.a e 46.b, no entanto elas levam em consideração a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Da mesma maneira, as Figuras 46.e e 46.f são análogas as Figuras 45.a e 45.b, no entanto elas levam em conta a condição de polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Figura 46 - Resultados experimentais do comportamento das SSs em função das TIDs de raios-X para os OSMs e CSMs nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 46.a e c e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 46.b e d), respectivamente e considerando Grupo 5



Fonte: Autor

Pela Figura 46, têm-se as seguintes tendências: na condição passiva os valores das SS dos CSM e OSM passaram de 65,88 e 64,74 mV/dec (Pré-rad) para 83,61 e 82,3 mV/dec. (TID de 600 krad), uma variação percentual de 26,91 e 27,13%, respectivamente. Já na polarização de estado ligado ocorreu uma falha no encapsulamento, o que impossibilitou de levantar as informações. Enquanto que na polarização de estado desligado os valores das SS dos CSM e OSM passaram de 67,7 e 66,6 mV/dec (Pré-rad) para 82,57 e 83,33 mV/dec. (TID de 85 krad), uma variação percentual de 21,96 e 25,12% entre elas. Pelos resultados nota-se que os OSM e CSM tiveram alterações semelhantes em seus valores de SS, apresentando um mesmo comportamento.

### 5.3 TRANSCONDUTÂNCIA

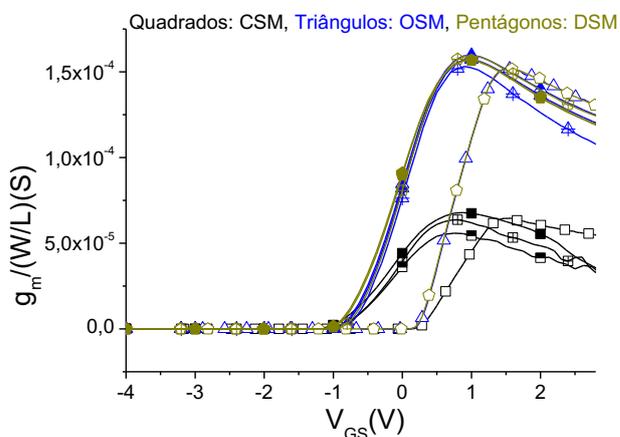
Para o estudo da transcondutância e da transcondutância máxima normalizada em função da razão de aspecto [ $g_{mMAX}/(W/L)$ ] foram consideradas as características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs que estão indicadas na Tabela 1 Grupo 01. Vale ressaltar que os valores das transcondutâncias e conseqüentemente das transcondutâncias máximas, foram normalizadas pelas razões de aspecto ( $W/L$ ) desses transistores, para eliminar a influência das dimensões dos diferentes SOI nMOSFETs estudados.

A Figura 47 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias normalizadas pelas razões de aspecto [ $g_m/(W/L)$ ] em função da tensão de porta dos SOI nMOSFETs indicados na Tabela 1 Grupo 01. Em todos os casos foram utilizados uma tensão de dreno ( $V_{DS}$ ) de 1 V (transistores operando na região de saturação). A Figura 47.a ilustra as curvas de  $g_m/(W/L)$  destes transistores em função de  $V_{GS}$ , considerando-se a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, enquanto que a Figura 47.b mostra as curvas de  $g_m/(W/L)$  destes transistores em função de  $V_{GS}$  considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, e a Figura 47.c, apresenta as curvas de  $g_m/(W/L)$  destes transistores em função de  $V_{GS}$  levando-se em conta a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

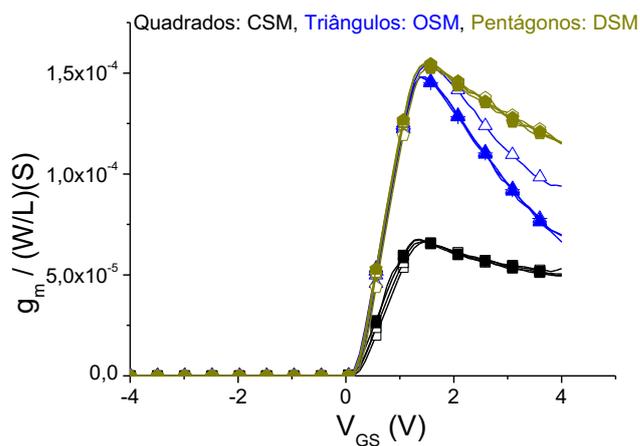
Os símbolos, cores e legendas utilizadas na Figura 47 seguem a mesma dinâmica das Figuras anteriores.

Figura 47 - Resultados experimentais do comportamento das curvas da  $g_m/(W/L)$  em função da tensão de porta, considerando as TIDs de raios-X para os, DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (*floating*) (Fig. 47.a.), de estado ligado, (Fig. 52.b.) e de estado desligado, (Fig. 52.c.), respectivamente

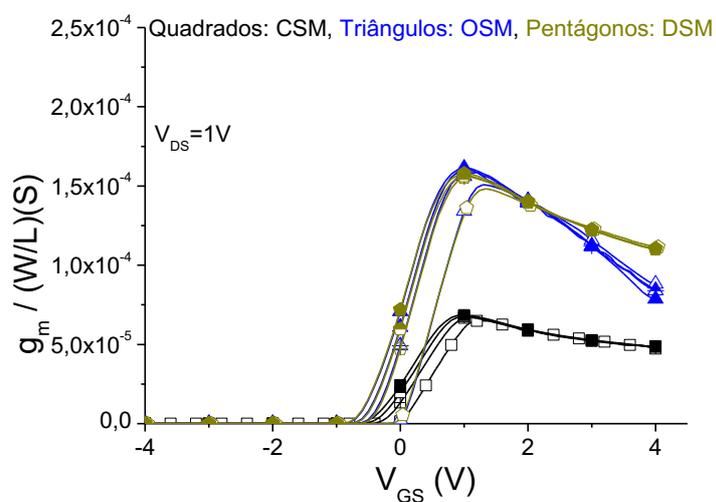
(a) – Condição Passiva –  $V_{DS} = 1$  V.



(b) – Condição de estado ligado /  $V_{DS} = 1$  V.



(c) – Condição de estado desligado /  $V_{DS} = 1$  V.



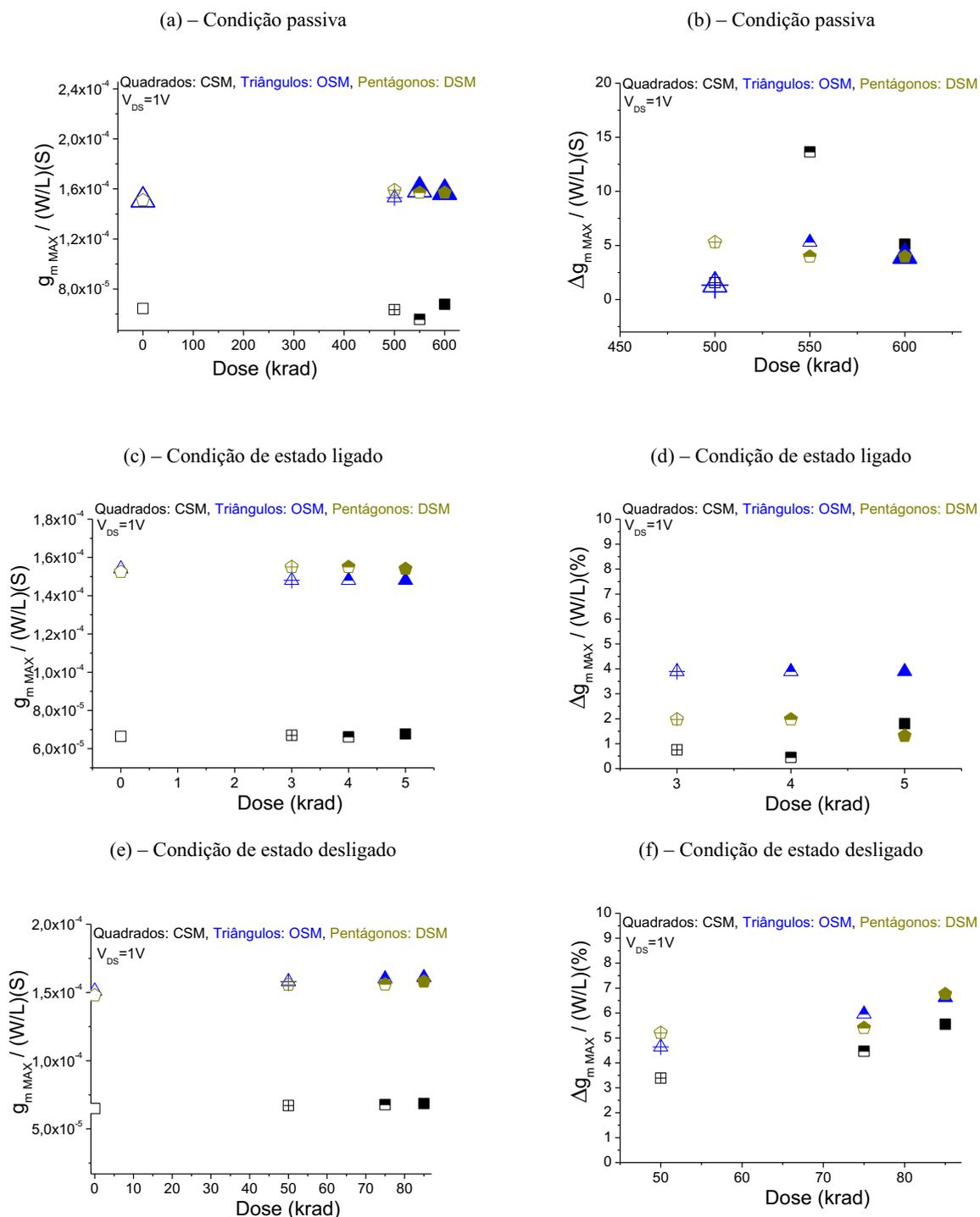
Fonte: Autor

Pode-se observar por meio da Figura 47 que em todos os casos existe um deslocamento das curvas de  $g_m/(W/L)$  para a esquerda do eixo das  $V_{GS}$ . Isto pode ser justificado em decorrência das variações da tensão de limiar e conseqüentemente do armadilhamento de cargas positivas nos óxido de porta e óxido enterrado [10], [101]. Nota-se também que os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM e do DSM são sempre maiores que os do CSM equivalente, considerando-se as mesmas condições de polarização e para as diferentes TIDs estudadas devido aos efeitos LCE e PAMDLE presentes nessas inovadoras estruturas de SOI nMOSFET.

A Figura 48 apresenta as  $g_{mMAX}/(W/L)$  obtidas experimentalmente dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular, respectivamente, em função das TIDs aplicadas. A Figura 48.a indica os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 48.b, ilustra as variações percentuais das  $g_{mMAX}/(W/L)$  para cada dose aplicada em relação aos seus valores que foram obtidos na condição de “Pré-rad”. As Figuras 48.a e 48.b foram obtidas considerando-se a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 48.c e 48.d, são análogas as Figuras 48.a e 48.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Além disso, as Figuras 48.e e 48.f, também são análogas as Figuras 48.a e 48.b, mas agora, elas consideram a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETS utilizados na Figura 48, são análogos ao da análise anterior.

Figura 48 - Resultados experimentais do comportamento das  $g_{mMAXs}(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 48.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 48.b, d, f), respectivamente



Fonte: Autor

Analisando a Figura 48, verifica-se que para a condição de polarização passiva, os efeitos das TIDs decorrentes das radiações ionizantes de raios-X não foram significativos para os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs analisados. De maneira quantitativa para o CSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 64,5  $\mu$ S (Pré-rad) para 67,8  $\mu$ S (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 151  $\mu$ S (Pré-rad) para 157  $\mu$ S (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 151  $\mu$ S (Pré-rad) para 157  $\mu$ S (TID de 600 krad). Vale ressaltar que os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM e do DSM mantiveram-se superiores em relação aos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM equivalente, tanto para a condição de “Pre-rad”, como também para as diferentes TID consideradas, e essa superioridade foi aproximadamente de 2,34 vezes maiores (em média) que aquelas observadas no CSM equivalente. Adicionalmente, nota-se pela Figura 48.b que a variação média dos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 3,55%, do DSM em torno de 4,41% e do CSM equivalente em torno de 6,75%. Portanto, baseado nesses resultados experimentais, pode-se concluir que os efeitos LCE e PAMDLE não foram degradados pelos efeitos das TIDs aplicadas, decorrentes do processo de radiações ionizantes de raios-X.

Levando-se em conta a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações de raios-X, observa-se que os efeitos das TIDs decorrentes das radiações ionizantes de raios-X também não foram significativos para os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs analisados. Pela Figura 48.c nota-se que para o CSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 66,5  $\mu$ S (Pré-rad) para 67,7  $\mu$ S (TID de 5 krad). Para o OSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 154  $\mu$ S (Pré-rad) para 148  $\mu$ S (TID de 5 krad). E para o DSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 152  $\mu$ S (Pré-rad) para 154  $\mu$ S (TID de 5 krad). Adicionalmente os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM e do DSM mantiveram-se maiores em relação aos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM equivalente, tanto para a condição de “Pre-rad”, como também para as diferentes TID consideradas, e esses valores superiores foram aproximadamente de 2,32 vezes maiores, em média.

Analisando a Figura 48.d, nota-se que a variação média dos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 3,9%, do DSM em torno de 1,75% e do CSM em torno de 1%. Portanto, baseado nesses resultados experimentais, conclui-se que os efeitos LCE e PAMDLE também não foram degradados pelos efeitos das TIDs aplicadas, decorrentes do processo de radiações ionizantes de raios-X, sob a influência da polarização de estado ligado (desvios máximos menores que 5%).

Finalmente, analisando a condição de polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações de raios-X, observa-se que os efeitos das TIDs decorrentes das

radiações ionizantes de raios-X também não foram significativos para os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs analisados. Pela Figura 48.e nota-se que para o CSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 64,9  $\mu S$  (Pré-rad) para 68,5  $\mu S$  (TID de 85 krad). Para o OSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 151  $\mu S$  (Pré-rad) para 161  $\mu S$  (TID de 85 krad). E para o DSM, a  $g_{mMAX}/(W/L)$  passou de 148  $\mu S$  (Pré-rad) para 158  $\mu S$  (TID de 85 krad). Adicionalmente os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM e do DSM mantiveram-se superiores em relação aos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM equivalente, tanto para a condição de “Pre-rad”, como também para as diferentes TID consideradas. Essa superioridade em seus valores foi aproximadamente de 2,33 vezes maiores, em média, que aquelas observadas no CSM equivalente.

Analisando a Figura 48.f, nota-se que a variação média dos valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 5,74%, do DSM em torno de 5,77% e do CSM em torno de 4,47%, ou seja, as variações foram muito similares entre si. Portanto, baseado nesses resultados experimentais, pode-se concluir que os efeitos LCE e PAMDLE mais uma vez não foram fortemente afetados pelos efeitos das TIDs aplicadas decorrentes do processo de radiações ionizantes de raios-X sob a influência da polarização de estado desligado.

Para complementar o estudo das  $g_{mMAX}/(W/L)$ , a Tabela 2 apresenta as características geométricas dos OSM em outras duas análises que são realizadas. A primeira análise considera a influência do fator de corte (células preenchidas com a cor rosa) e a segunda análise considera a influência do ângulo  $\alpha$  (células preenchidas pela cor verde), ambas no comportamento elétrico dos OSMs em função das TIDs consideradas. Vale ressaltar que a análise referente a influência do ângulo  $\alpha$  no comportamento do OSM na condição de polarização de estado ligado, não foi possível de ser realizada devido as avarias em ambos os transistores que fariam parte desta análise.

A Tabela 2 também apresenta as dimensões do SOI nMOSFET com geometria retangular, que é usado como um transistor de referência, onde os resultados das  $g_{mMAX}/(W/L)$  dos OSMs são comparados aos do CSM equivalente.

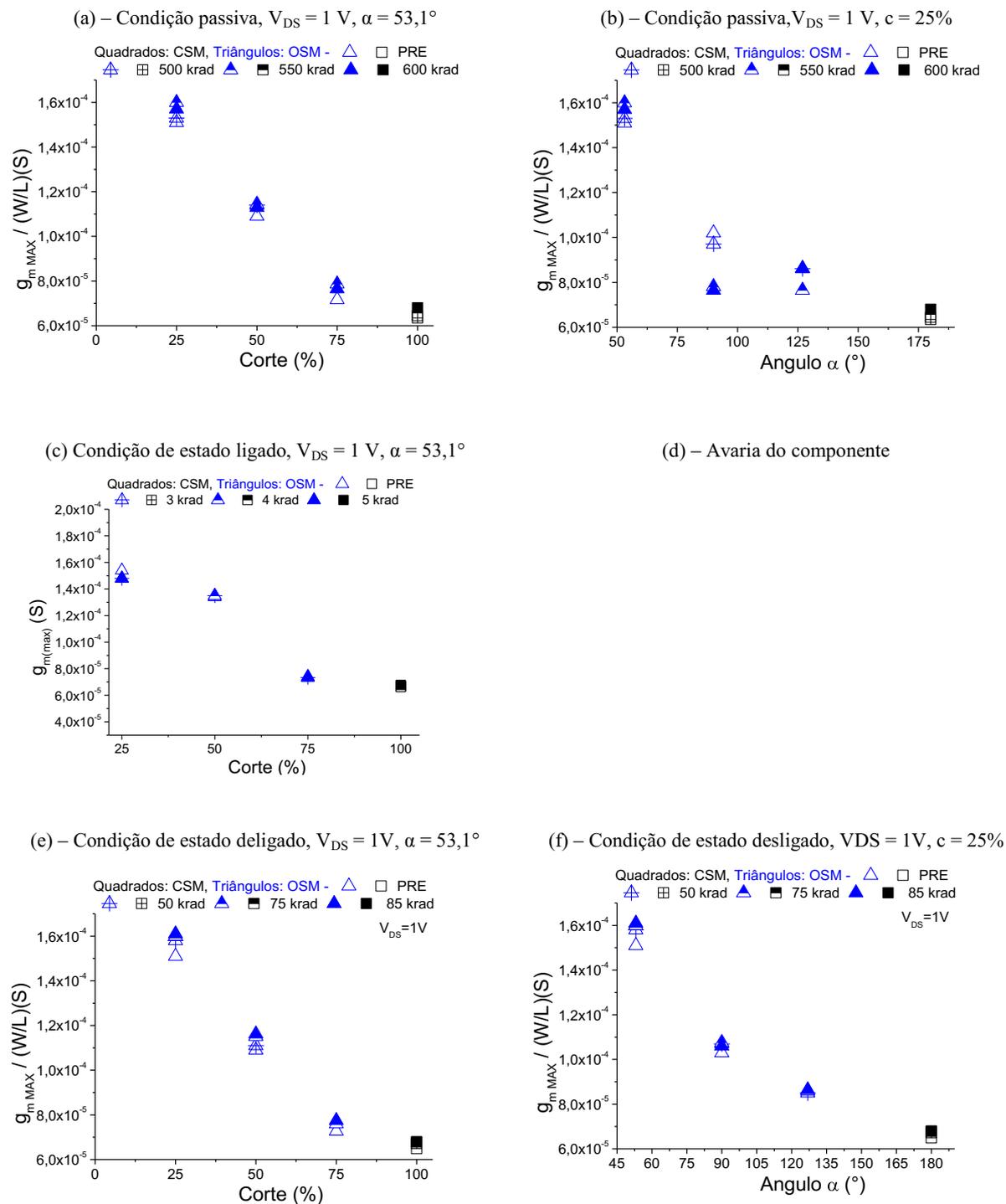
Tabela 2 - Características dimensionais dos SOI nMOSFETs com geometrias de porta octogonal (TR46, TR20, TR18, TR5 e TR4) e retangular (TR3) utilizados nos ensaios para as obtenções das  $g_{mMAX}/(W/L)$

Topologia	Referência	$c$ (%)	$\alpha$ (°)	W ( $\mu\text{m}$ )	$L_{FQ}$ ( $\mu\text{m}$ )	(W/L)	b ( $\mu\text{m}$ )	B ( $\mu\text{m}$ )	Área de porta ( $\mu\text{m}^2$ )
OSM	TR46	75	53,1	30	15	2	5	20	375
OSM	TR20	50	53,1	30	25	1,2	5	35	600
OSM	TR18	25	53,1	30	35	0,86	5	50	825
OSM	TR5	25	90	30	20	1,5	5	27,5	486
OSM	TR4	25	126,9	30	12,67	2,37	5	16,5	324
CSM	TR3		180	30	27,5	1,09			825

Fonte: Autor

A Figura 49 apresenta os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  obtidas experimentalmente para os diferentes OSMs e do CSM. A Figura 49.a apresenta os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 49.b indica os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 49.c ilustra os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 49.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM. Analogamente, a Figura 49.e mostra os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 49.f ilustra os valores das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Figura 49 - Resultados experimentais do comportamento das  $g_{mMAX}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do fator de corte “c”, Fig. 49.a, c, e., e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 49.b e f), respectivamente



Fonte: Autor

Para a condição de polarização passiva durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, ao analisar a influência do fator de corte “c” para as diferentes TIDs

(Fig. 49 a.), verifica-se que ao aumentar o fator de corte de 25% para 75%, a geometria de porta octogonal do SOI nMOSFET torna-se mais semelhante a de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular. E como resultado o comportamento da  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM aproxima-se do comportamento da  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM, ou seja, os valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM tendem ao do CSM.

Ao analisar a influência do ângulo  $\alpha$  (Fig. 49 b.), nota-se que ao aumentarmos o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  para  $126,9^\circ$ , mais os valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM se aproximam dos valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM, pois ao aumentarmos o ângulo  $\alpha$  da geometria de porta octogonal do OSM, esse transistor vai se tornando mais semelhante ao CSM.

Em ambos os casos verificamos, a forte dependência dos efeitos LCE e PAMDLE pelas condições geométricas do OSM, ou seja, quanto menor o fator de corte “c” e menor o ângulo  $\alpha$ , maiores serão a incidência dos efeitos LCE e PAMDLE nos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, e como demonstrado anteriormente, resultam em valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM, em média, 2,34 vezes maiores que os valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM equivalente. As Figuras 49.a e 49.b mostram que o melhor estilo de leiaute octogonal é aquele que apresenta um fator de corte “c” de 25% e um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , pois são responsáveis por apresentarem uma maior  $g_{mMAX}/(W/L)$  em relação aos demais valores do fator de corte “c” e ângulo  $\alpha$  considerados por este trabalho de pesquisa (efeitos LCE e PAMDLE mais intensos nesse tipo de estrutura SOI nMOSFET em relação as demais estudadas). Estas características dimensionais para os OSMs já tinham sido identificadas em trabalhos e publicações anteriores, como sendo uma configuração “ótima” para potencializar os efeitos LCE e PAMDLE de um OSM [39]. Adicionalmente, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  para todos os três diferentes SOI nMOSFETs como ilustrado na Figura 49.a, nota-se que as variações das  $g_{mMAX} / (W/L)$  não foram significativas e são menores que 4% para as diferentes TIDs consideradas neste estudo. Além disso, considerando agora um fator de corte de 25% para os três outros SOI nMOSFETs indicados na Tabela 2, como ilustrado na Figura 49.b, percebe-se diferentes variações das  $g_{mMAX} / (W/L)$  para os diferentes ângulos  $\alpha$  considerados, levando-se em conta as diferentes TIDs, ou seja, a maior variação de  $g_{mMAX} / (W/L)$  em relação ao “Pré-rad” foi observada para o SOI nMOSFET com um ângulo  $\alpha$  de  $90^\circ$ , que foi de 25%. Isto talvez possa ser justificado, pois o SOI nMOSFET com um ângulo  $\alpha$  de  $90^\circ$  foi o transistor que mais sofreu com as variações decorrentes do processo de fabricação em relação aos demais dispositivos. Portanto, considerando a condição passiva durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, conclui-se que os SOI nMOSFETs com diferentes ângulos  $\alpha$  são mais influenciados pelos efeitos das TIDs, que os SOI nMOSFETs

com diferentes fatores de corte “c”. Isso pode ser justificado em decorrência de que a variação do ângulo  $\alpha$  dos OSM, considerando-se um fator de corte de 25%, é capaz de produzir maiores variações nos efeitos LCE e PAMDLE do que a variação do fator de corte “c” destes transistores, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de 53,1°.

Para a condição de polarização de estado ligado, também observa-se que o valor de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM reduz a medida que o fator de corte “c” aumenta. Quanto mais são aumentados o fator de corte e o ângulo  $\alpha$  do leiaute octogonal, mais o OSM assemelha-se ao leiaute do CSM, em que os valores de  $g_{mMAX} / (W/L)$  do OSM tendem aos valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM. Na condição de  $c=25\%$ , os valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  chegam a ser 2,32 vezes maiores do que os do CSM equivalente.

Isto é justificado devido a uma maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal, e conseqüentemente tem-se um maior campo elétrico longitudinal resultante no OSM em relação ao do CSM equivalente, e, portanto tem-se os efeitos LCE e PAMDLE atuando de uma forma mais intensa. Adicionalmente, conforme mostrado na Figura 49.c, nota-se uma baixa influência das TIDs utilizadas neste estudo nos valores das diferentes  $g_{mMAX}/(W/L)$  do OSM em função do fator de corte, apresentando variações nos valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  menores que 4% para as diferentes TIDs estudadas.

Pelos valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  apresentados devido à polarização de estado desligado, mais uma vez verifica-se que ao aumentarmos tanto o fator de corte “c” (conforme apresentado na Figura 49.e) como também o ângulo  $\alpha$  (conforme apresentado na Figura 49.f), do estilo de leiaute do tipo octogonal para SOI nMOSFETs, menores serão os valores das  $g_{mMAX} / (W/L)$  do OSM, ou em outras palavras, mais o OSM se tornará parecido ao leiaute do tipo retangular. Isto deve-se as menores interações entre as componentes do campo elétrico longitudinal e conseqüentemente gera-se um menor campo elétrico longitudinal resultante no OSM, e também tem-se menores intensidades dos efeitos LCE e PAMDLE atuando no OSM. Percebe-se também por meio da Figura 49.f, onde se tem um fato de corte  $c=25\%$  e diferentes ângulos  $\alpha$ , que as variações das  $g_{mMAX}/(W/L)$  devido às diferentes TIDs consideradas, são menores que 5,74%, e, portanto pouco significativas para as diferentes TIDs utilizadas neste estudo, devido ao efeito DEPAMBBRE existente na estrutura do OSM.

Estes três estudos adicionais mostram o OSM com fator de corte de 25% e ângulo  $\alpha$  de 53,1° como a configuração de leiaute octogonal ideal para SOI nMOSFETs. Nestas estruturas os efeitos LCE e PAMDLE são potencializados, gerando valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  em média, 2,33 vezes maiores que os valores de  $g_{mMAX}/(W/L)$  do CSM. As variações de  $g_{mMAX}/(W/L)$

dos OSMs com as diferentes TIDs aplicadas foram sempre menores que aproximadamente 6%, em decorrência do efeito DEPAMBBRE existente na estrutura do OSM.

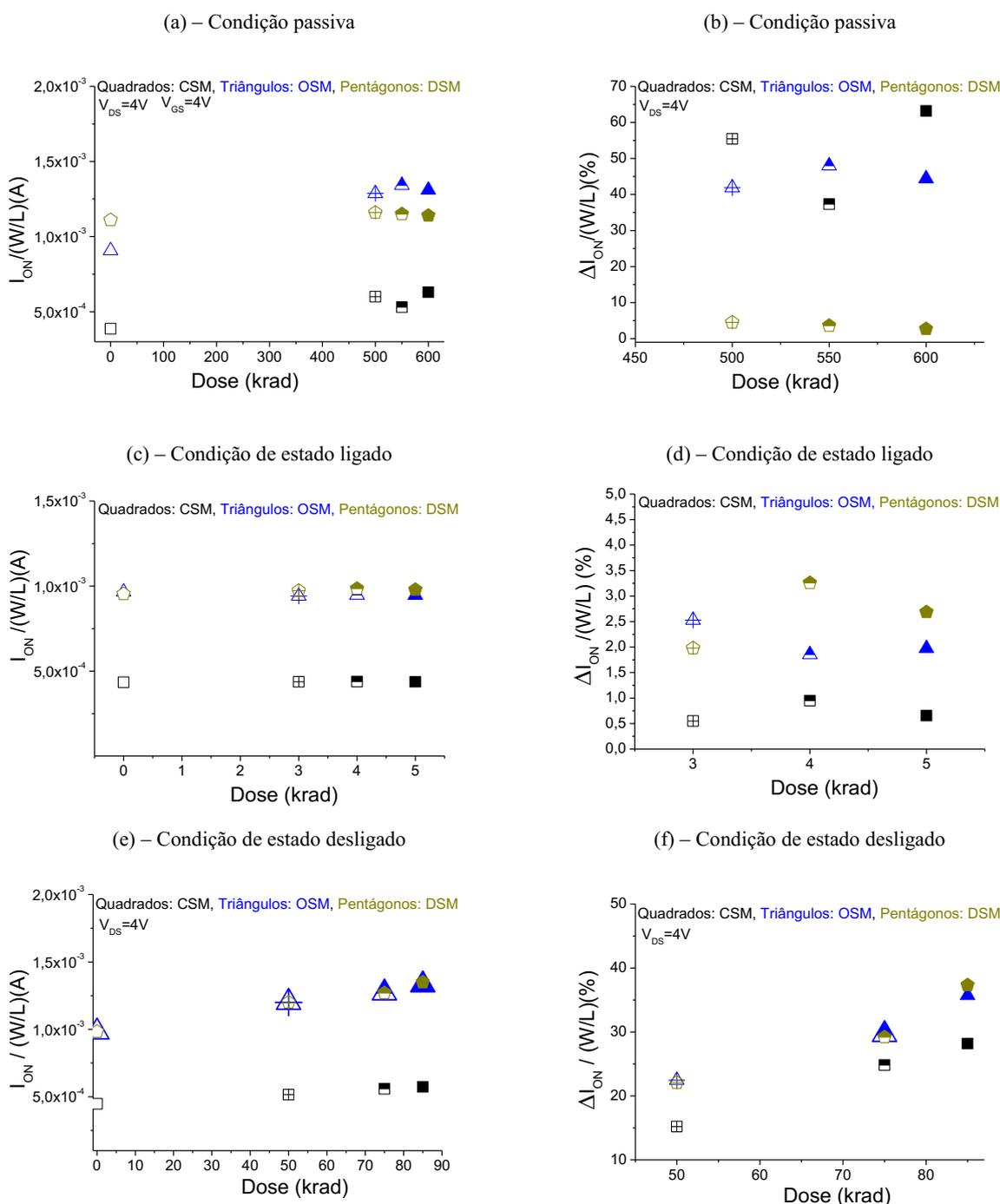
#### 5.4 CORRENTE DE ESTADO LIGADO, CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO E CORRENTE DE FUGA

Os estudos das correntes de estado ligado ( $I_{ON}$ ), corrente de estado desligado ( $I_{OFF}$ ), a razão entre  $I_{ON}$  e  $I_{OFF}$  e da corrente de fuga ( $I_{LEAK}$ ) foram todos normalizados pela razão de aspecto ( $W/L$ ) destes transistores, para eliminar a influência das dimensões dos diferentes SOI nMOSFETs estudados. As características dimensionais dos SOI nMOSFETs utilizados foram indicados na Tabela 1 Grupo 01.

A Figura 50 apresenta os valores experimentais das  $I_{ON}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta hexagonal, octogonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função das diferentes TIDs estudadas. Para a extração de todos os valores de  $I_{ON}/(W/L)$  foram considerando as seguintes condições:  $V_{DS}=V_{GS}=+4$  V. A Figura 50.a apresenta os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  em função das TIDs estudadas, enquanto que a Figura 50.b ilustra as variações percentuais das  $I_{ON}/(W/L)$  para cada TID em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”. Os resultados apresentados nas Figuras 50.a e 50.b foram obtidos considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 50.c e 50.d seguem a mesma dinâmica das Figuras 50.a e 50.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Além disso, as Figuras 50.e e 50.f também são análogas as Figuras 50.a e 50.b, mas agora, considerando-se a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

As legendas utilizadas na Figura 50, seguem o mesmo princípio das sessões anteriores.

Figura 50 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{ON}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 50.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 50.b, d, f), respectivamente, considerando  $V_{GS}=V_{DS}=4V$  em todos os casos



Fonte: Autor

Analisando a Figura 50, verifica-se que para a condição de polarização passiva que os efeitos da radiação ionizantes influenciaram o valor da corrente de estado ligado devido à

alteração no valor da tensão de limiar, dado pelo armadilhamento de cargas positivas nos óxidos. Analisando a Figura 50.a, tem-se os seguintes valores de  $I_{ON}/(W/L)$ , para o CSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,386 mA (Pré-rad) para 0,63 mA (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,907 mA (Pré-rad) para 1,31 mA (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 1,11 mA (Pré-rad) para 1,14 mA (TID de 600 krad). Uma informação importante é a de que os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM e do DSM mantiveram-se superiores em relação aos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM equivalente, tanto para a condição de “Pre-rad”, como para as diferentes TID consideradas neste estudo, e essa superioridade foi de 2,35 vezes maiores (TID de 600 krad) que aquelas observadas no CSM equivalente devido aos efeitos LCE e PAMDLE, que permanecem potencializando as componentes do campo elétrico longitudinal e, conseqüentemente, o campo elétrico longitudinal resultante. Adicionalmente, nota-se pela Figura 50.b que a variação média dos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 44,76%, do DSM em torno de 3,6% e do CSM equivalente em torno de 52%. As variações médias evidenciam a maior tolerância aos efeitos das radiações ionizantes de raios-X do DSM e OSM, devido ao efeito DEPAMBBRE. Estes resultados também nos mostram que os efeitos LCE e PAMDLE permanecem ativos e sem sofrerem degradação pelos efeitos das TIDs aplicadas, decorrentes do processo de radiações ionizantes de raios-X.

Na polarização de estado ligado observamos a mesma tendência apresentada para a condição passiva (*floating*), ou seja, a superioridade apresentada pelo OSM e DSM no Pré-rad perpetuou-se ao longo das doses. Analisando a Figura 50.c, tem-se os seguintes valores de  $I_{ON}/(W/L)$ : para o CSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,435 mA (Pré-rad) para 0,437 mA (TID de 5 krad). Para o OSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,966 mA (Pré-rad) para 0,947 mA (TID de 5 krad). E para o DSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,954 mA (Pré-rad) para 0,985 mA (TID de 5 krad). Uma informação importante é a de que os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM e do DSM mantiveram-se superiores em relação aos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM equivalente, tanto para a condição de “Pre-rad”, como para as diferentes TID consideradas neste estudo, e essa superioridade foi de 2,22 vezes maiores (em média) que aquelas observadas no CSM equivalente. Este comportamento também é o resultado dos efeitos LCE e PAMDLE na estrutura octogonal. Adicionalmente, nota-se pela Figura 50.d que a variação média dos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 2,12%, do DSM em torno de 2,64% e do CSM equivalente em torno de 0,7%, ou seja, as variações foram muito próximas, sendo considerado um comportamento similar entre os três dispositivos.

Enfim, para a polarização de estado desligado observa-se a mesma tendência exemplificada na condição passiva e na de estado ligado, em que, os maiores valores de

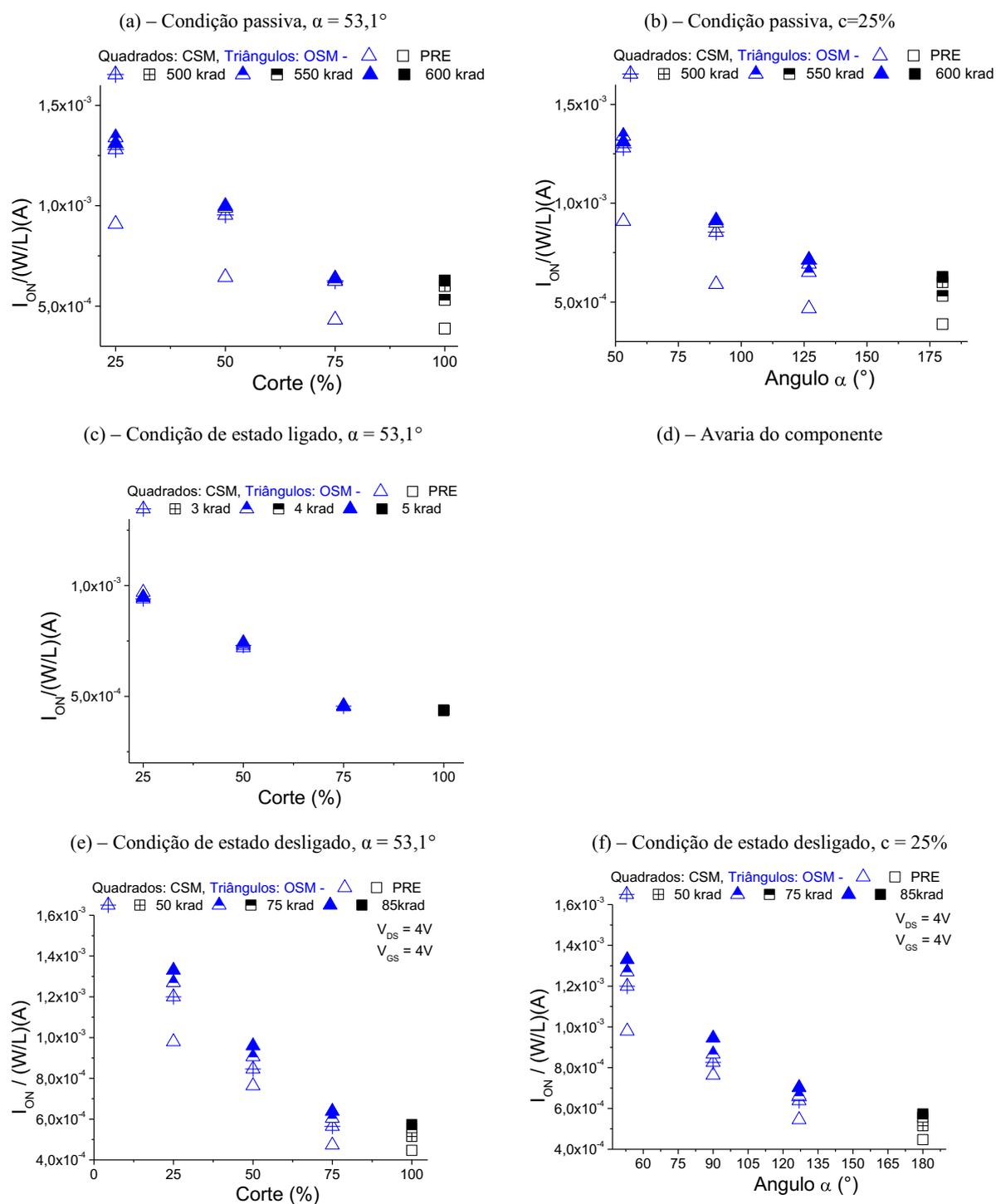
$I_{ON}/(W/L)$  apresentada pelo OSM e DSM no Pré-rad perpetuou-se ao longo das TID, onde o OSM apresentou valores de  $I_{ON}/(W/L)$  2,19 vezes maiores (em média) que o do CSM, ou seja, os efeitos LCE e PAMDLE permaneceram ativos e não foram afetados de forma significativa pelas TIDs utilizadas neste estudo. Pela Figura 50.e, temos os seguintes valores de  $I_{ON}/(W/L)$ : para o CSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,447 mA (Pré-rad) para 0,573 mA (TID de 85 krad). Para o OSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,98 mA (Pré-rad) para 1,33 mA (TID de 85 krad). E para o DSM, a  $I_{ON}/(W/L)$  passou de 0,983 mA (Pré-rad) para 1,35 mA (TID de 85 krad). De forma complementar, observa-se pela Figura 50.e que a variação média dos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 29%, do DSM em torno de 29,5% e do CSM equivalente em torno de 23%.

Para explorar o comportamento da  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM, a Tabela 2 apresenta as características geométricas dos OSM em outras duas análises que são realizadas. A primeira análise foca na influência do fator de corte “c” (células preenchidas com a cor rosa) e a segunda análise na influência do ângulo  $\alpha$  (células preenchidas pela cor verde), ambas no comportamento elétrico dos OSMs em função das TIDs. A análise referente a influência do ângulo  $\alpha$  no comportamento do OSM na condição de polarização de estado ligado, não foi realizada devido as avarias em ambos os transistores que fariam parte desta análise.

A Figura 51 apresenta os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  experimentais dos OSMs. A Figura 51.a apresenta os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 51.b, indica os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25% ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 51.c indica os valores das  $I_{ON}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de 53,1°. A Figura 51.e e 51.f, são análogas as Figuras 51.a e 51.b, no entanto, levando-se em consideração a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETS utilizados na Figura 51, são análogos a análise anterior e correspondem ao mesmo padrão utilizado na Figura 50.

Figura 51 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{ON}(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 51.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 51.b e f), respectivamente, considerando  $V_{DS}=V_{GS}= 4V$  em todos os casos



Fonte: Autor

Para a condição de polarização passiva, ao analisar a influência do corte para as diferentes TIDs (Fig. 51 a.) fica claro que ao aumentar o fator de corte de 25% a 75%, equivale-se a dizer que mais o OSM torna-se semelhante ao CSM, aproximando-se inclusive das condições elétricas do CSM, ou seja, os valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM se aproximam dos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM. Ao analisar a influência do ângulo  $\alpha$  (Fig. 51 b.), nota-se que ao aumentarmos o ângulo de  $53,1^\circ$  para  $126,9^\circ$ , mais a geometria de porta do OSM assemelha-se a de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular, em uma relação muito próxima ao ocorrida na Figura 51.a. As Figuras 51.a e 51.b apresentam um comportamento similar em função da dose de raios X com desvios nos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM na ordem 45% em todas as TIDs estudadas, enquanto que os desvios nos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM foram na ordem de 52%. Este resultado denota uma leve vantagem do OSM em termos de tolerância aos efeitos da TID devido a contribuição do efeito DEPAMBBRE. Conclui-se para as Figuras 51.a e 51.b que os efeitos LCE e PAMDLE possuem uma forte dependência pelas configurações geométricas do OSM, e que neste caso ocorreram de formas similares e indicam que a topologia “ótima” é o OSM com um fator de corte de 25% e um ângulo de  $53,1^\circ$ . Vale ressaltar que os efeitos LCE e PAMDLE possibilitaram valores de  $I_{ON}/(W/L)$  para o OSM aproximadamente 2 vezes maiores que aos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM, devido a potencialização do campo elétrico longitudinal resultante.

Para a condição de polarização de estado ligado, também nota-se que o valor da  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM diminui ao aumentarmos o fator de corte “c” (conforme Figura 51c.), em que o OSM aproxima-se da geometria de porta retangular do CSM. Mais uma vez fica claro a dependência dos efeitos LCE e PAMDLE para os diferentes fatores de corte. Adicionalmente, observa-se uma baixa variação dos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  dos OSMs para as diferentes TIDs, com variações menores de que 2%, demonstrando que os comportamentos dos OSM e CSM de referência foram pouco afetados pelas diferentes TIDs consideradas neste estudo. Em que no caso do OSM este resultado é fruto do efeito DEPAMBBRE.

Analisando os resultados dados pela polarização de estado desligado, mais uma vez observa-se a dependência dos efeitos LCE e PAMDLE em detrimento das alterações geométricas do OSM, seja para os diferentes fatores de corte, ou para os diferentes ângulos  $\alpha$ .

As Figuras 51e. e 51.f apresentam comportamentos muito próximos, com desvios dos valores das  $I_{ON}/(W/L)$  dos OSMs menores do que 35%, onde conclui-se que a influência do fator de corte foi a mesma apresentada pelo ângulo  $\alpha$ .

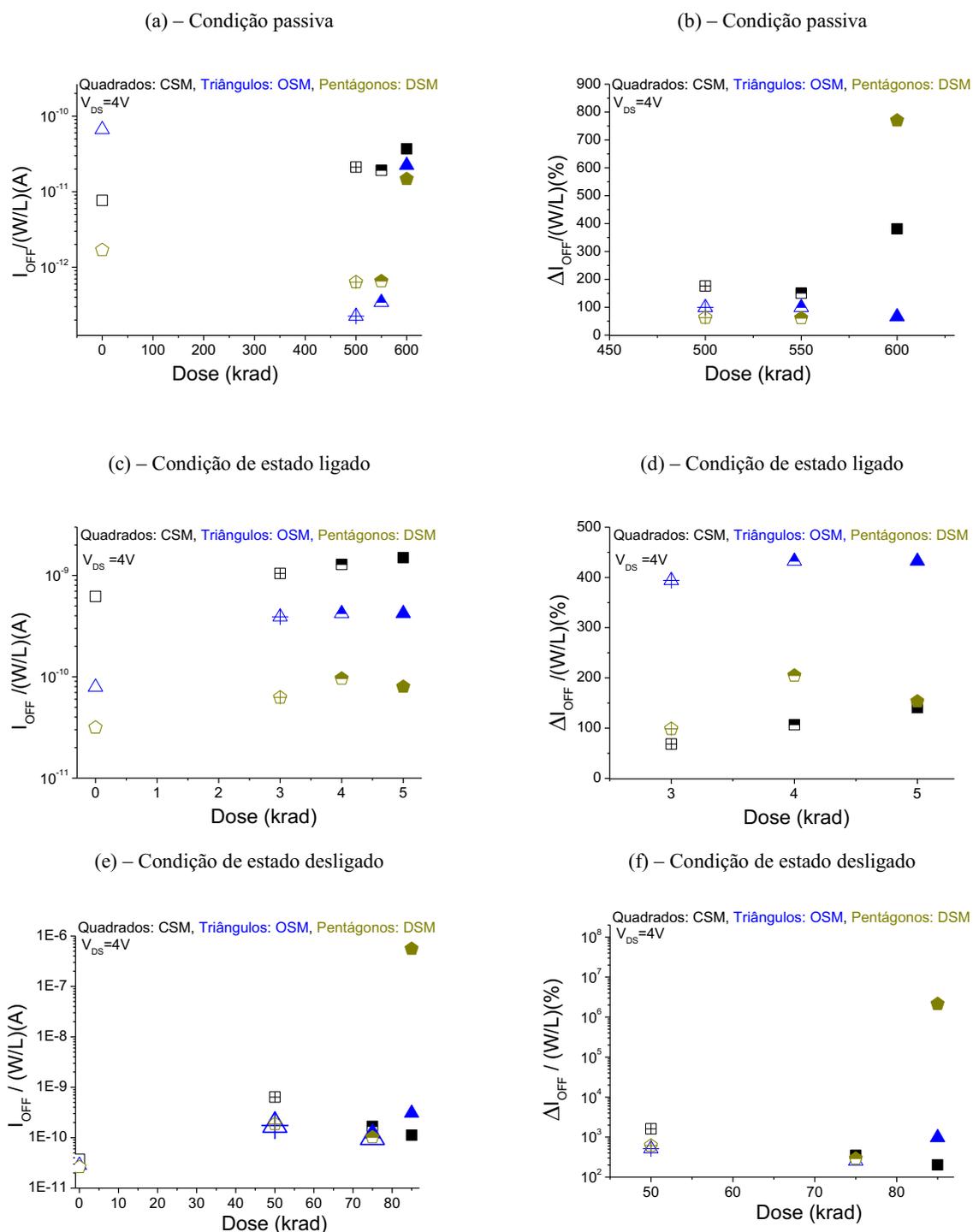
Ao fim desta análise, percebe a forte dependência dos efeitos LCE e PAMDLE pelas diferentes configurações do OSM sejam em função do fator de corte “c” ou do ângulo  $\alpha$ . Outra informação importante é a de que para a polarização de estado desligado, o fator de corte “c” e o ângulo  $\alpha$  apresentam uma mesma influência no resultado das  $I_{ON}/(W/L)$  e/ou contribuem de forma semelhantes na potencialização do efeito LCE. A influência do efeito DEPAMBBRE também é notada ao verificarmos que as variações percentuais dos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do OSM foram iguais ou inferiores aos valores de  $I_{ON}/(W/L)$  do CSM em média.

As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs estudados para a obtenção de corrente de estado desligado normalizada pela razão de aspecto ( $I_{OFF}/(W/L)$ ) foram destacadas na Tabela 1 Grupo 1.

A Figura 52 apresenta os valores experimentais das  $I_{OFF}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 52.a indica os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 52.b apresenta as variações percentuais das  $I_{OFF}/(W/L)$  para cada TID em relação aos seus valores que foram obtidos na condição de “Pré-rad”, ambas as Figuras considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 52.c e 52.d seguem o mesmo princípio das Figuras 52.a e 52.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Já as Figuras 52.e e 52.f também são análogas as Figuras 52.a e 52.b, mas agora, elas consideram a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 52 são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 51.

Figura 52 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos: Fig. 52.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 52.b, d, f), respectivamente



Fonte: Autor

Analisando a Figura 52, verifica-se para a condição de polarização passiva que os efeitos da radiação ionizantes influenciaram o valor da corrente de estado desligado devido ao armadilhamento de cargas positivas no óxido enterrado e pela ativação dos transistores parasitários na região de bico de pássaro. Para a extração de todos os valores de  $I_{OFF}/(W/L)$  foram considerando as seguintes condições:  $V_{DS} = +4$  V e  $V_{GS}$  equivalente ao desligamento elétrico do SOI nMOSFET. Vale ressaltar que o OSM apresentava um valor de corrente de estado desligado superior que ao CSM na condição pré-rad. No entanto este comportamento inverteu em função da TID, o que demonstra a atuação do efeito DEPAMBBRE para o OSM. Este efeito também é visualizado para o DSM. Considerando a TID final a corrente de estado desligado do OSM é 1,65 vezes menor que a do CSM. De maneira quantitativa para o CSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 7,67 pA (Pré-rad) para 36,9 pA (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 66,5 pA (Pré-rad) para 22,3 pA (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 1,69 pA (Pré-rad) para 14,7 pA (TID de 600 krad). Vale ressaltar que os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM foram inferiores em relação aos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  do CSM equivalente, ao considerar a TID final. E essa superioridade foi aproximadamente de 2,34 vezes maiores (em média) que aquelas observadas no CSM equivalente. Adicionalmente, nota-se pela Figura 52.b que a variação média dos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 3,55%, do DSM em torno de 4,41% e do CSM equivalente em torno de 6,75%. Portanto, baseado nesses resultados experimentais, pode-se concluir que o efeito DEPAMBBRE atuou de forma significativas para o OSM e DSM resultando inclusive em uma inversão das tendências, ou seja, para a condição “Pré-rad” o CSM apresentou melhores resultados, no entanto, ao considerar as TIDs, o OSM apresentou resultados melhores.

Na polarização de estado ligado observamos que tanto o OSM como o DSM apresentam valores de corrente de estado desligado inferiores aos observados no CSM, 7,86 e 19,7 vezes menores respectivamente na condição de pré-rad. O efeito DEPAMBBRE garantiu que esta mesma tendência, ou seja, a superioridade apresentada pelo OSM e DSM, perpetua-se ao longo das TIDs, com valores 4,5 e 23,8 vezes menores que o CSM, respectivamente considerando a TID final utilizada neste estudo. Quantitativamente e extraindo-se os valores da Figura 52.c para o CSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 621 pA (Pré-rad) para 1500 pA (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 79,1 pA (Pré-rad) para 421 pA (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 31,5 pA (Pré-rad) para 79,8 pA (TID de 600 krad). Adicionalmente, nota-se pela Figura 52.d que a variação média dos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 419%, do DSM em torno de 152% e do CSM equivalente em torno de 105%. No entanto, mesmo com as variações percentuais apresentadas pelos OSM

e DSM, os seus valores ainda são menores que ao CSM. Além do mais, analisando a Figura 52.d, podemos inferir que para uma próxima TID, os valores de  $I_{OFF}/(W/L)$  do CSM subirão, enquanto que os valores de  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM e DSM diminuirão, onde evidencia a atuação do efeito DEPAMBBRE.

Na polarização de estado desligado observamos o efeito DEPAMBBRE atuando até a segunda dose na Figura 52.e, em que considerando a dose final a corrente de estado desligado do CSM ficou 2,74 vezes menor que a do OSM, demonstrando que a polarização de estado desligado intensifica os efeitos da TID no OSM e conseqüentemente os efeitos parasitários. Quantitativamente, extraíndo-se os valores da Figura 52.e para o CSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 37,1 pA (Pré-rad) para 112 pA (TID de 600 krad). Para o OSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 28,4 pA (Pré-rad) para 307 pA (TID de 600 krad). E para o DSM, a  $I_{OFF}/(W/L)$  passou de 26,1 pA (Pré-rad) para 558000 pA (TID de 600 krad). Adicionalmente, nota-se pela Figura 52.f que a variação média dos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 581%, do DSM em torno de 712911% e do CSM equivalente em torno de 722%. Pelas variações percentuais, nota-se que a polarização de estado ligado potencializou os efeitos parasitários no OSM e principalmente no DSM, mesmo assim, o efeito DEPAMBBRE, conferiu uma maior tolerância aos efeitos da TID quando comparado ao CSM.

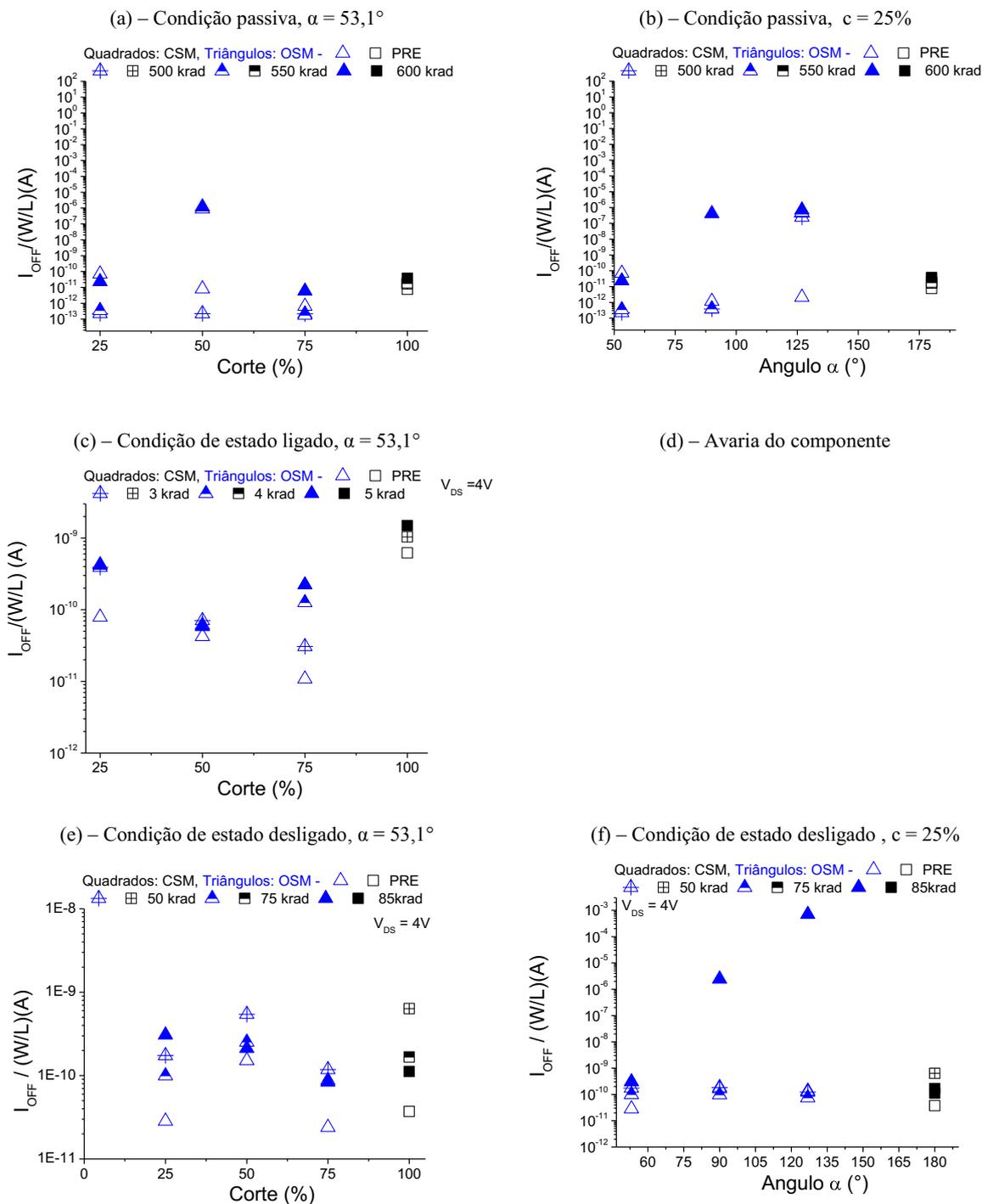
Para aprofundar o estudo da  $I_{OFF}/(W/L)$ , a Tabela 2 sumariza as características geométricas dos OSM em outras duas análises que são realizadas. A primeira análise considera a influência do fator de corte “c” (células preenchidas com a cor rosa) e a segunda análise considera a influência do ângulo  $\alpha$  (células preenchidas pela cor verde), ambas no comportamento elétrico dos OSMs em função das TIDs estudadas que fariam parte desta análise.

A Figura 53 apresenta os valores experimentais das  $I_{OFF}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal. A Figura 53.a indica os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 53.b indica os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 53.c ilustra os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 53.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM. Analogamente, a Figura 53.e mostra os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 53.f ilustra os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs,

mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETS utilizados na Figura 53, são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 48.

Figura 53 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 53.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 53.b, f), respectivamente, considerando  $V_{DS}=+4V$



Observando as três condições de polarização, verifica-se que as tendências são um pouco mais complexas, seja em função do corte ou do ângulo para a corrente de estado

desligado, mas fica evidente a influência do leiaute neste parâmetro e conseqüentemente do efeito DEPAMBBRE. Nota-se pela Figura 53.a que o fator de corte “c” de 75% resultou na menor variação percentual média (317%) considerando as diferentes TIDs estudadas, no entanto, foi superior a variação do CSM (235%). Por outro lado, a maior variação encontrada refere-se ao OSM com fator de corte de 50%, sugerindo que este foi o dispositivo que mais sofreu os efeitos dos transistores parasitários nas BBRs. Pela Figura 53.b, também nota-se variações do OSM em função do ângulo  $\alpha$ , superiores a apresentada pelo CSM. Esta figura sugere um maior controle do efeito DEPAMBBRE para ângulos pequenos. Pode-se reparar que ao aumentarmos o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  até  $126,9^\circ$ , o valor de  $I_{OFF}/(W/L)$  aumenta gradativamente ao considerar a última TID.

Já para a Figura 53.c, que leva em conta a condição de polarização de estado ligado, observa-se que todos os valores de  $I_{OFF}/(W/L)$  do OSM são inferiores do CSM de referência. O fator de corte que obteve a menor variação para as TIDs estudadas foi o fator de corte “c” de 50% com uma variação média entre as TIDs estudadas de 50%.

Para a condição de polarização de estado desligado, também nota-se uma complexidade na tendência dos valores. Analisando a Figura 53.e, observam-se grandes variações em função da TID. No entanto, o OSM com fator de corte c de 25% que obteve a maior variação média (581%) para as diferentes TIDs, teve um comportamento superior ao CSM equivalente, dado que o CSM variou em média 722%. Estes resultados foram possíveis devido ao efeito DEPAMBBRE. Analisando a Figura 53.f, nota-se que a influência do ângulo foi mais notável que a influência gerada pelo fator de corte “c” como visualizado na Figura 53.e.

É sabido que um dos principais efeitos da TID nos SOI nMOSFETs devido ao armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e óxido enterrado, é dado pelo o aumento da corrente de estado desligado. Isto realmente aconteceu pra o CSM. No entanto, ao considerar o OSM e o efeito DEPAMBBRE este aumento não acontece para todas as configurações e em função das condições de polarização durante os procedimentos de raios-X, no qual o efeito DEPAMBBRE incorporou uma maior tolerância aos OSMs.

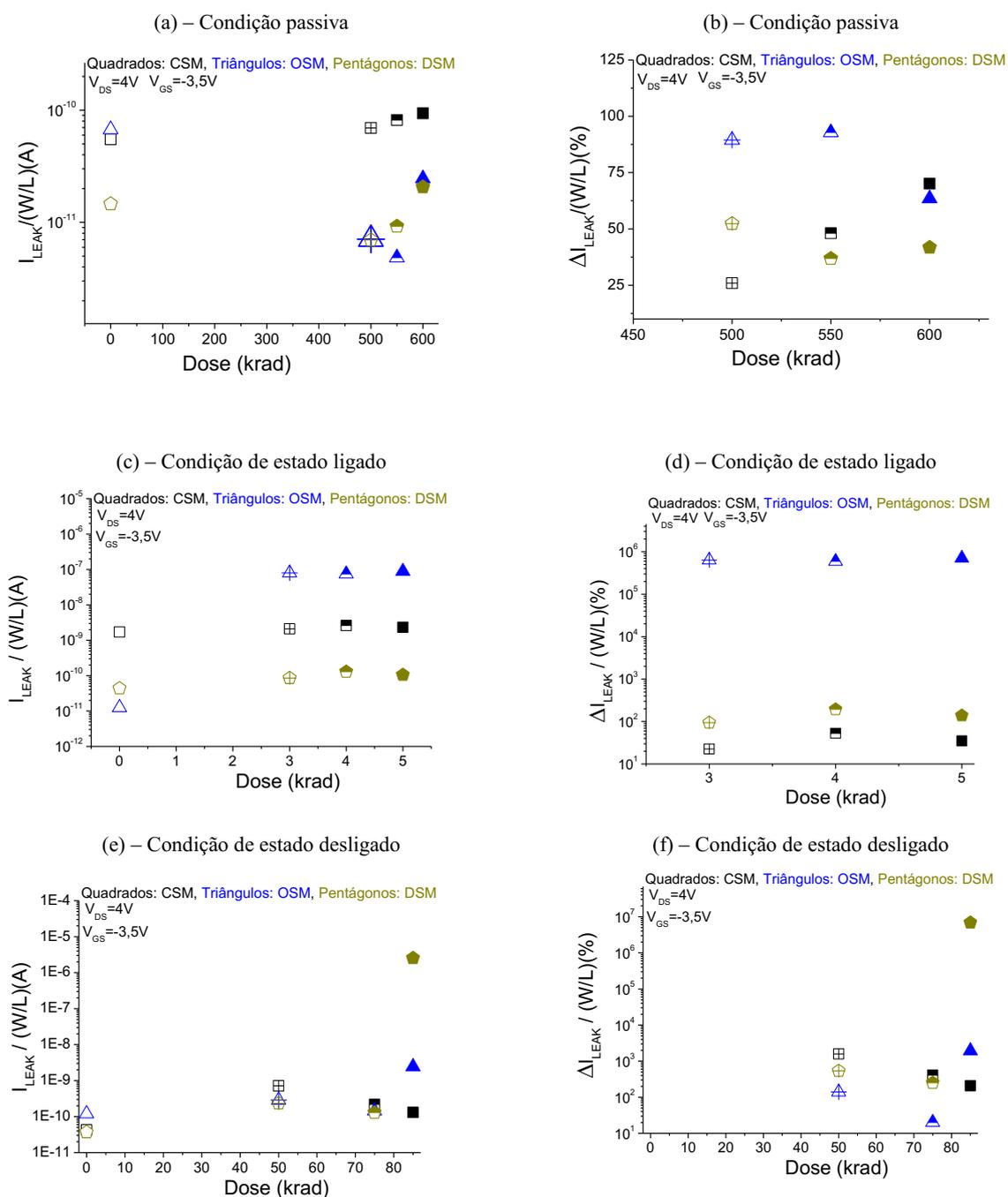
As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs estudados para a obtenção de corrente de fuga normalizada pela razão de aspecto ( $I_{LEAK}/(W/L)$ ) foram destacadas na Tabela 1.

A Figura 54 apresenta os valores experimentais das ( $I_{LEAK}/(W/L)$ ) dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 54.a indica os valores das

$I_{LEAK}/(W/L)$  em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 54.b apresenta as variações percentuais das  $I_{LEAK}/(W/L)$  para cada TID em relação aos seus valores que foram obtidos na condição de “Pré-rad”, ambas as Figuras considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 54.c e 54.d, seguem o mesmo princípio das Figuras 44.a e 44.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Já as Figuras 54.e e 54.f, também são análogas as Figuras 54.a e 54.b, mas agora, elas consideram a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 54, são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 53.

Figura 54 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos: Fig. 54.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”: Fig. 54.b, d, f), respectivamente, considerando  $V_{DS}=4\text{ V}$  e  $V_{GS}=-3,5\text{ V}$



Fonte: Autor

Verifica-se para a condição passiva na Figura 54.a, que os efeitos da radiação ionizante influenciaram o valor da corrente de fuga devido ao armadilhamento de cargas positivas no

óxido enterrado e pela ativação dos transistores parasitários na região de bico de pássaro. Vale ressaltar que o OSM apresentava um valor de fuga superior que ao CSM na condição de Pré-rad, no entanto este comportamento inverteu em função da dose, o que demonstra a atuação do efeito DEPAMBBRE para o OSM. Este efeito também é visualizado para o DSM. Considerando a dose final a corrente de fuga do OSM é 3,81 vezes menor que a do dispositivo convencional equivalente. Adicionalmente, nota-se pela Figura 54.b que variação média dos valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 81%, do DSM em torno de 43% e do CSM equivalente em torno de 48%. Portanto, baseado nesses resultados experimentais, pode-se concluir que o efeito DEPAMBBRE atuou de forma significativa para o OSM e DSM resultando inclusive em uma inversão das tendências, ou seja, para a condição “Pré-rad” o CSM apresentou melhores resultados, no entanto, ao considerar as TIDs, o OSM apresentou resultados melhores. A corrente de fuga em um dispositivo MOSFET não tem uma única origem, ela é dada pela combinação da fuga pela região de bico de pássaro, associada a fuga pela porta e da própria corrente de difusão. No caso do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal o perímetro possui uma forte influência no resultado final associado a corrente de fuga. Ao considerarmos a condição passiva verifica-se que a corrente de fuga do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal é inferior que ao do SOI nMOSFET com geometria de porta retangular. Este comportamento é atribuído a maior distribuição do campo elétrico longitudinal (mesmo que mais intenso) ao longo do perímetro do dispositivo, tendo como resultado um menor campo uma menor corrente de deriva e de fuga.

Na polarização de estado ligado, verifica-se pela Figura 54c. que conforme aumenta-se a TID, ocorre o incremento da  $I_{LEAK}/(W/L)$ . No caso do OSM ocorreu uma variação de 90% após a primeira TID (1 krad) ao comparar com o seu valor de “Pré-rad”, enquanto que na mesma situação o CSM variou 25% e o DSM 52%. Vale ressaltar a inversão de comportamento da  $I_{LEAK}/(W/L)$  do OSM que na condição “Pré-rad” era 1,22 vezes maior que ao valor de  $I_{LEAK}/(W/L)$  do CSM e considerando a última TID avaliada, foi o CSM que passou a ter um valor 3,8 vezes maior que ao do OSM. Pela Figura 54.d, percebe-se uma baixa variação percentual dos valores da  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função das TIDs, onde nota-se uma maior linearidade para as variações do OSM devido ao efeito DEPAMBBRE.

Já na polarização de estado desligado, que vem se mostrando ser a condição que mais afeta o OSM, avalia-se pela Figura 54e. que ao aumentarmos a TID, ocorre o incremento da  $I_{LEAK}/(W/L)$  tanto do OSM como para o DSM com exceção de TID de 75 krad, situação na qual todos os valores são reduzidos, mas voltam a subir para a próxima TID. Considerando-se a última TID, a  $I_{LEAK}/(W/L)$  do OSM é 18,7 maior que ao do CSM equivalente, o que denota

um resultado negativo para o OSM. Adicionalmente, nota-se pela Figura 52.f que a variação média dos valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  do OSM foi em torno de 701%, do DSM em torno de 2294718% e do CSM equivalente em torno de 736%. Apesar das menores variações apresentadas pelo OSM pelo efeito DEPAMBBRE, o seu resultado final foi inferior ao do CSM.

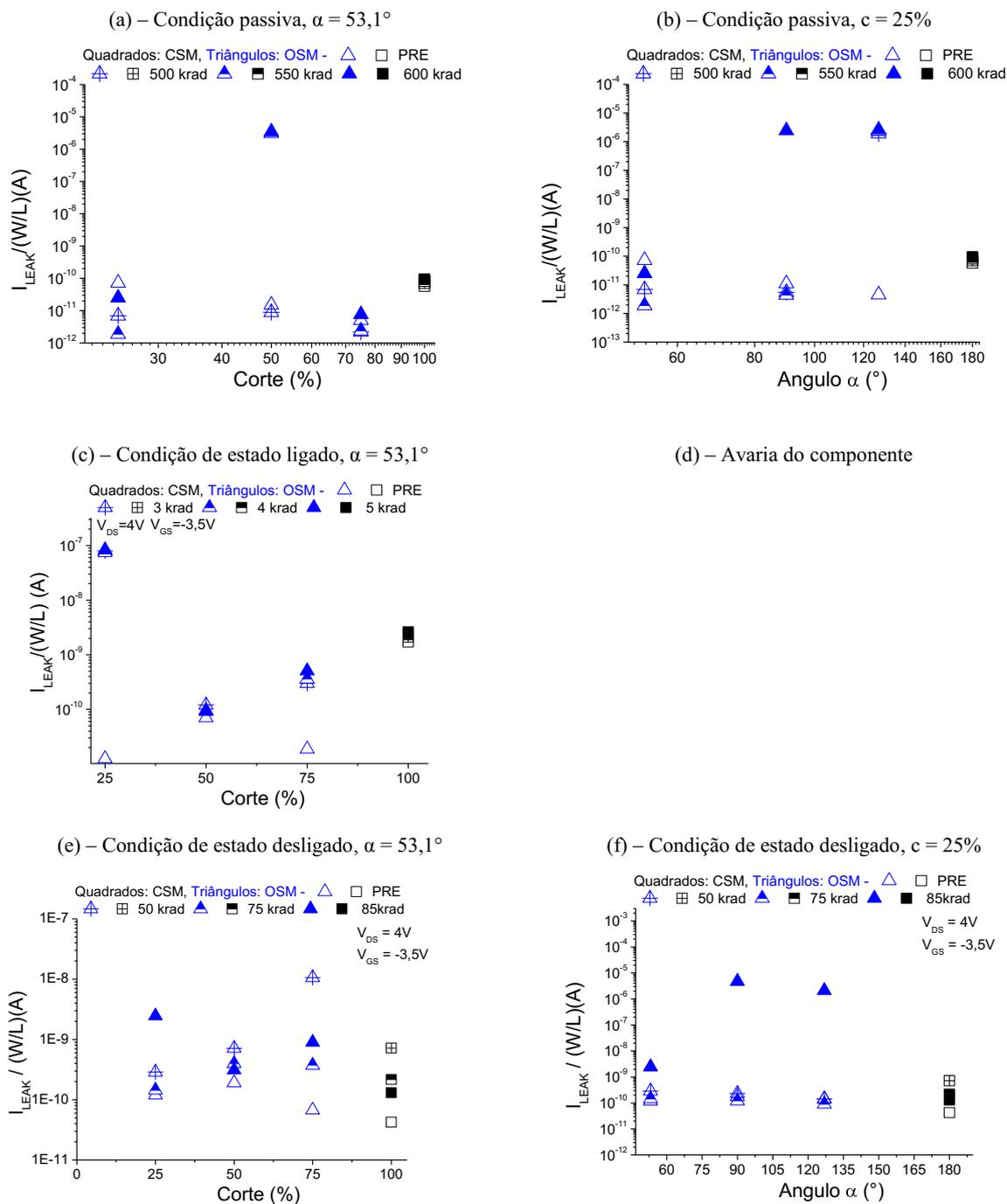
Para o melhor entendimento do comportamento da corrente de fuga em função da TID tanto para a polarização de estado ligado como de estado desligado, é necessário confrontar o campo elétrico longitudinal resultante e a sua devida distribuição ao longo do perímetro na junção metalúrgica. Nestes casos o campo elétrico resultante na junção metalúrgica fica muito mais intenso, e apesar de distribuído ao longo do perímetro ainda resulta em uma maior corrente elétrica quando comparado a topologia retangular resultando em uma maior corrente de deriva e conseqüentemente de fuga.

Para aprofundar o estudo da  $I_{LEAK}/(W/L)$ , a Tabela 2 sumariza as características geométricas dos OSM em outras duas análises que são realizadas. A primeira análise considera a influência do fator de corte “c” (células preenchidas com a cor rosa) e a segunda análise considera a influência do ângulo  $\alpha$  (células preenchidas pela cor verde), ambas no comportamento elétrico dos OSMs em função das TIDs estudadas que fariam parte desta análise.

A Figura 55 apresenta os valores experimentais das  $I_{LEAK}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal. A Figura 55.a indica os valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 55.b indica os valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 55.c ilustra os valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 55.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM. Analogamente, a Figura 55.e mostra os valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 55.f ilustra os valores das  $I_{OFF}/(W/L)$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{LEAK}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 55 são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 48.

Figura 55 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função das doses TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 55.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 55.b, f), respectivamente, considerando  $V_{DS} = 4V$  e  $V_{GS} = -3,5V$



Fonte: Autor

Novamente analisando-se as três condições de polarização, verifica-se a forte influência da TID, tanto ao considerar o fator de corte “c”, ou o ângulo  $\alpha$ . Nota-se pela Figura

55.a que o fator de corte “c” de 75%, resultou na menor variação percentual média (56%) considerando as diferentes TIDs estudadas, no entanto, foi superior a variação do CSM (48%). Por outro lado, a maior variação encontrada refere-se ao OSM com fator de corte de 50%, sugerindo que este foi o dispositivo que mais sofreu os efeitos dos transistores parasitários nas BBRs e com a distribuição do campo elétrico longitudinal ao longo do perímetro da junção metalúrgica. Pela Figura 53.b, também nota-se variações do OSM em função do ângulo  $\alpha$ , superiores a apresentada pelo CSM.

Já para a Figura 55.c, que sumariza os valores de  $I_{LEAK}/(W/L)$  obtidos para a condição de polarização de estado ligado, observa-se que todos os valores de  $I_{LEAK}/(W/L)$  do OSM são inferiores do CSM de referência, com exceção do OSM com fator de corte “c” de 25%. Observando-se os outros dois OSM com  $c=50\%$  e  $75\%$ , nota-se que ao aumentar o fator de corte, temos um incremento do valor da  $I_{LEAK}/(W/L)$  dos OSM, onde estes valores tendem a se aproximar dos valores do CSM. O fator de corte que obteve a menor variação para as TIDs estudadas foi o fator de corte “c” de 50% com uma variação média entre as TIDs estudadas de 37%.

Para a condição de polarização de estado desligado, mais uma vez nota-se uma complexidade na tendência dos valores da  $I_{LEAK}/(W/L)$ . Analisando a Figura 55.e, observa-se grandes variações dos valores da  $I_{LEAK}/(W/L)$  em função da TID e do fator de corte. Vale ressaltar que o OSM com fator de corte c de 50% obteve uma variação média (146%) para as diferentes TIDs inferior a variação média (736%) apresentada pelo CSM. Estes resultados demonstram que o efeito DEPAMBBRE aliada e melhor distribuição do campo elétrico longitudinal ao longo do perímetro na junção metalúrgica resultaram em uma menor corrente de fuga para o OSM com fator de corte “c” de 50%. Analisando a Figura 55.f, nota-se que a influência do ângulo foi menos notável que a influência gerada pelo fator de corte “c” como visualizado na Figura 55.e, como por exemplo, os OSM com ângulo  $\alpha$  de  $90^\circ$  e  $126,9^\circ$  obtiveram resultados similares de  $I_{LEAK}/(W/L)$ .

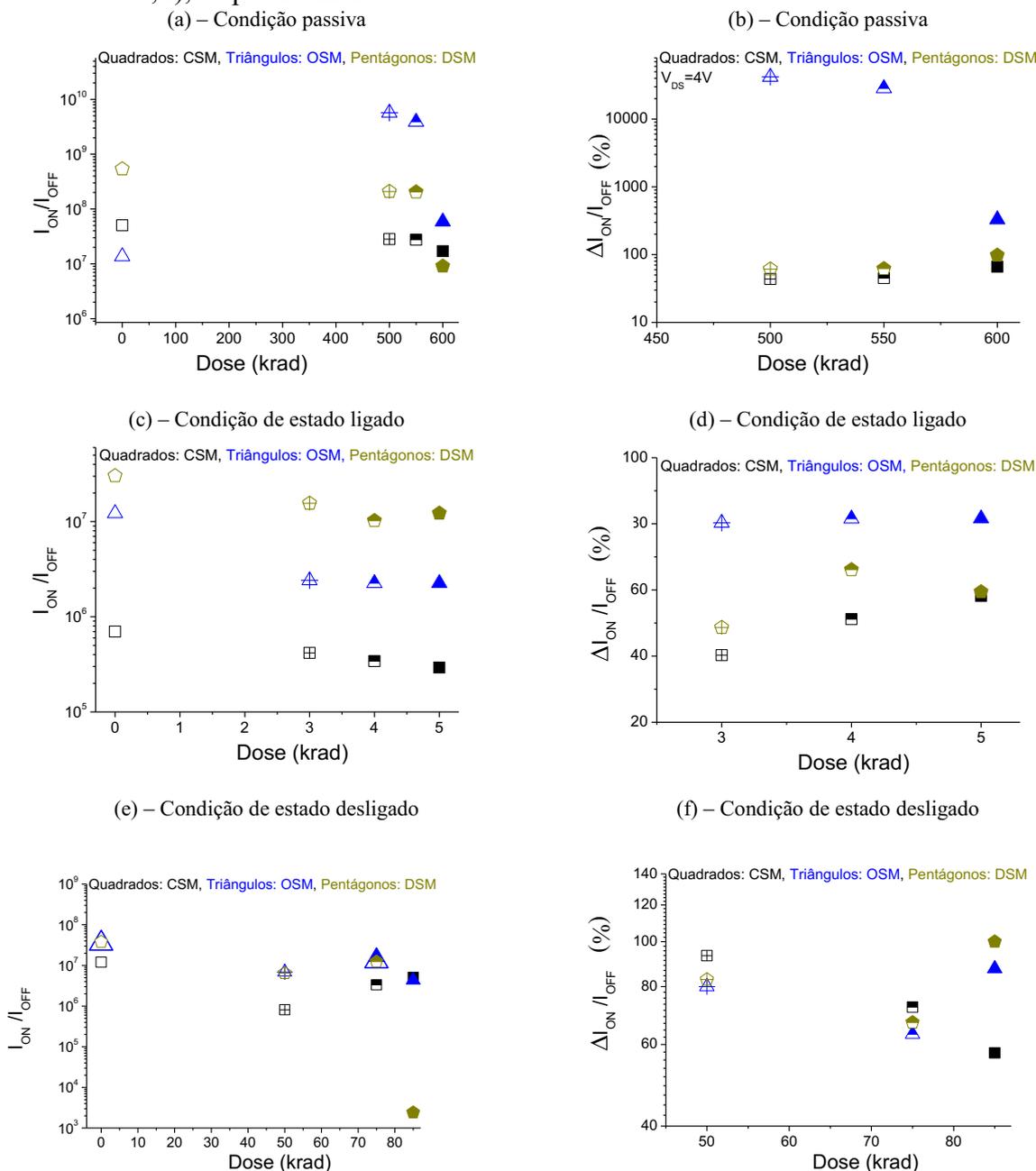
## 5.5 RAZÃO ENTRE A CORRENTE DE ESTADO LIGADO PELA CORRENTE DE ESTADO DESLIGADO

As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs utilizados nesta análise foram destacados na Tabela 1 Grupo 01.

A Figura 56 apresenta os valores experimentais das  $I_{ON}/I_{OFF}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 56.a indica os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 56.b, apresenta as variações percentuais das  $I_{ON}/I_{OFF}$  para cada TID em relação aos seus valores que foram obtidos na condição de “Pré-rad”, ambas as Figuras considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 56.c e 56.d, seguem o mesmo princípio das Figuras 56.a e 56.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Já as Figuras 56.e e 56.f também são análogas as Figuras 56.a e 56.b, mas elas consideram a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 56 são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 55.

Figura 56 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 56.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 56.b, d, f), respectivamente



Fonte: Autor

O resultado da razão  $I_{ON}/I_{OFF}$  é o reflexo da análise das correntes de estado ligado e desligado em cada condição de polarização.

De maneira geral observa-se que independente da condição de polarização, a razão  $I_{ON}/I_{OFF}$  do OSM foi superior que ao CSM em todas as condições de polarização e para todas as TIDs consideradas neste trabalho. Este resultado é uma combinação dos efeitos LCE, PAMDLE e DEPAMBBRE, sendo que os dois primeiros proporcionaram uma maior corrente de estado ligado no OSM que superou as ocasiões nas quais o OSM apresentou uma maior corrente de estado desligado.

Pela Figura 56a. observa-se que na condição de “Pré-rad” o DSM apresenta o maior valor de  $I_{ON}/I_{OFF}$ , seguido pelo CSM. E numericamente o valor de  $I_{ON}/I_{OFF}$  do CSM é 3,69 vezes maior que o do OSM. No entanto, ao considerar a última TID, ocorre uma inversão neste resultado, sendo o valor de  $I_{ON}/I_{OFF}$  do OSM 3,44 vezes maior que ao do CSM. Os resultados apresentados nas Figuras 56.a e 56.b, sofrem uma maior influência da  $I_{OFF}/(W/L)$ , devido ao armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta e enterrado. Os valores da Figura 56.b apresentam as maiores variações percentuais para o OSM.

Na polarização de estado ligado, pela Figura 56.c, observam-se novamente os valores superiores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  do DSM e OSM, com valores na condição “Pré-rad” 43,3 e 17,46 vezes maiores que ao do CSM, respectivamente. E ao considerar a última TID de 5 krad, estes valores passam para 41,97 e 7,69 vezes maiores que ao do CSM, respectivamente. A Figura 56.d ilustra a maior variação dos valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  para o OSM como reflexo do resultado de sua corrente de estado desligado.

Considerando a polarização de estado desligado, nota-se que o DSM obteve uma maior variação em seus valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$ , principalmente ao considerar a última TID de 85 krad. Já o perfil verificado na Figura 56.e esta relacionado com o perfil da  $I_{OFF}/(W/L)$ . Esta condição de polarização é a que mais afetou o OSM e a intensidade dos seus valores são praticamente os mesmos. Pela Figura 56f. temos as seguintes variações médias nos valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  considerando as diferentes TIDs: Para o DSM temos 83,27%, para o OSM temos 76,87% e pra o CSM temos 74,36%.

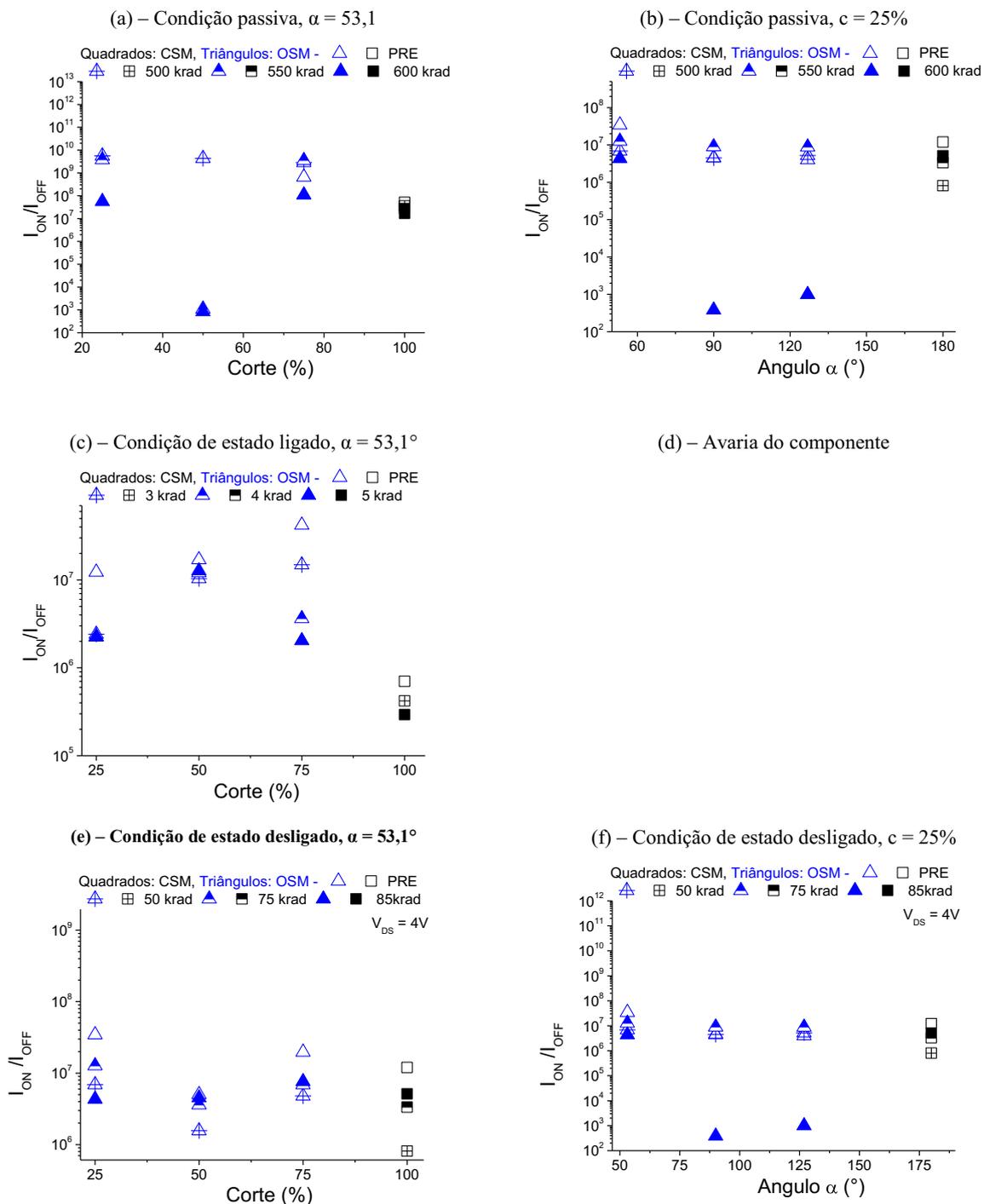
O comportamento da  $I_{ON}/I_{OFF}$  é explorado utilizando os componentes sumarizados na Tabela 2, que leva em conta a influência do ângulo e do fator de corte e os resultados são apresentados na Figura 57.

A Figura 57 apresenta os valores experimentais das  $I_{ON}/I_{OFF}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal. A Figura 57.a indica os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 57.b, indica os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva,

durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 57.c ilustra os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 57.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM, considerando a polarização de estado ligado. Analogamente, a Figura 57.e mostra os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 57.f ilustra os valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $I_{ON}/I_{OFF}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 57 são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 56.

Figura 57 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 57.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 57.b, f), respectivamente



Fonte: Autor

Assim como abordado em estudos anteriores como a corrente de estado ligado, a corrente de estado desligado e a corrente de fuga, as tendências de comportamento para os valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  são afetados pela TID, seja em função do corte ou do ângulo  $\alpha$ .

Considerando a Figura 57.a, observam-se que os maiores valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  são encontrados para o OSM (excluindo-se o OSM com  $c=50\%$ ). No entanto, a menor variação dos valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função das TIDs estudadas ocorreram para o CSM com uma variação média de 51%. O OSM que apresentou os melhores resultados e conseqüentemente uma melhor interação com o efeito DEPAMBBRE, foi o OSM com fator de corte “c” de 75%, que apresentou uma variação média de 56%. Pela Figura 57b. percebe-se uma maior dependência de  $I_{ON}/I_{OFF}$  nos ângulos  $\alpha$ . Se considerarmos a última TID, os OSMs com os ângulos de  $90^\circ$  e  $126,9^\circ$  resultaram em valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  inferiores ao apresentado pelo CSM.

Analisando a Figura 57.c, nota-se que os OSMs com ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  independentemente do fator de corte “c” apresentam valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  similares (OSM com  $c=75\%$ ) ou superiores (OSM com  $c=25\%$  e  $50\%$ ) que ao do CSM. Este resultado pode ser justificado, devido a uma melhor interação do efeito DEPAMBBRE para os OSM com fatores de corte “c” inferiores a 75%.

Considerando a condição de polarização de estado desligado, nota-se pela Figura 57e. que os valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  dos OSM são iguais ou superiores aos apresentados pelo CSM, no entanto com uma menor variação ao longo das TIDs. Pela Figura 57.f, percebe-se o mesmo comportamento apresentado pela Figura 57.b, na qual tem-se uma maior dependência dos valores de  $I_{ON}/I_{OFF}$  em função dos ângulos  $\alpha$ .

## 5.6 RESISTÊNCIA DE ESTADO LIGADO

Os valores levantados experimentalmente para a resistência de estado ligado baseiam-se nos SOI nMOSFETs descritos na Tabela 1 Grupo 1.

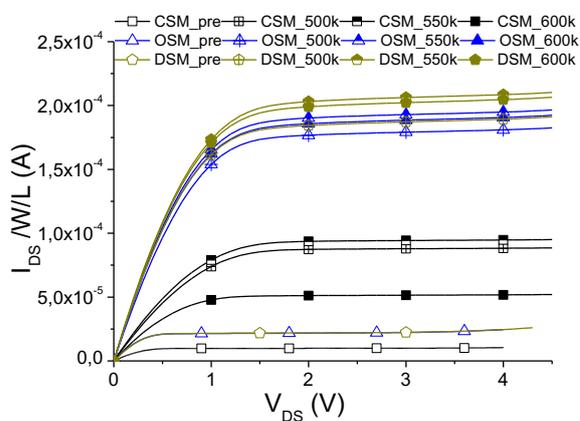
A Figura 58 apresenta os valores experimentais das  $I_{DS}/(W/L)$  em função da tensão de dreno dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 58.a indica as curvas de  $I_{DS}/(W/L) \times V_{DS}$  em função das TIDs aplicadas, considerando a condição passiva durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, enquanto que a Figura

58.b e 58.c apresenta as curvas de  $I_{DS}/(W/L) \times V_{DS}$  em função das TIDs, considerando a condição de polarização de estado ligado e de estado desligado, respectivamente.

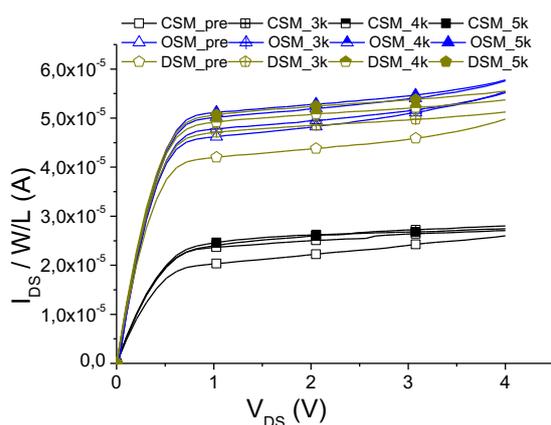
Os símbolos e cores dos valores das curvas de  $I_{DS}/(W/L) \times V_{DS}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 58 são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 57.

Figura 58 - Resultados experimentais do comportamento das  $I_{DS}/(W/L)$  vs  $V_{DS}$  em função das TIDs de raios-X dos DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 58. a), de estado ligado, (Fig. 58.b) e de estado desligado, (Fig. 58.c), considerando um  $V_{GS}=1$  V em todos os casos

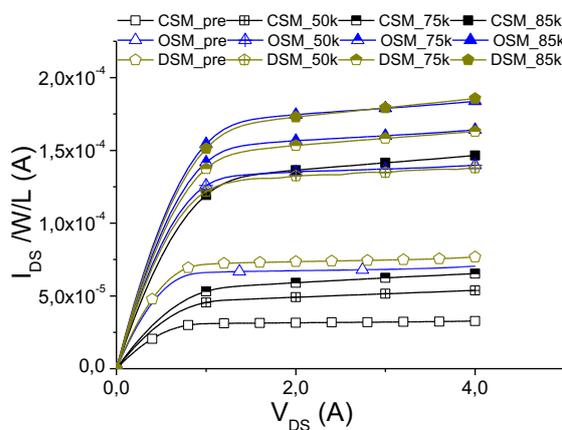
(a) – Condição passiva



(b) – Condição de estado ligado



(c) – Condição de estado desligado



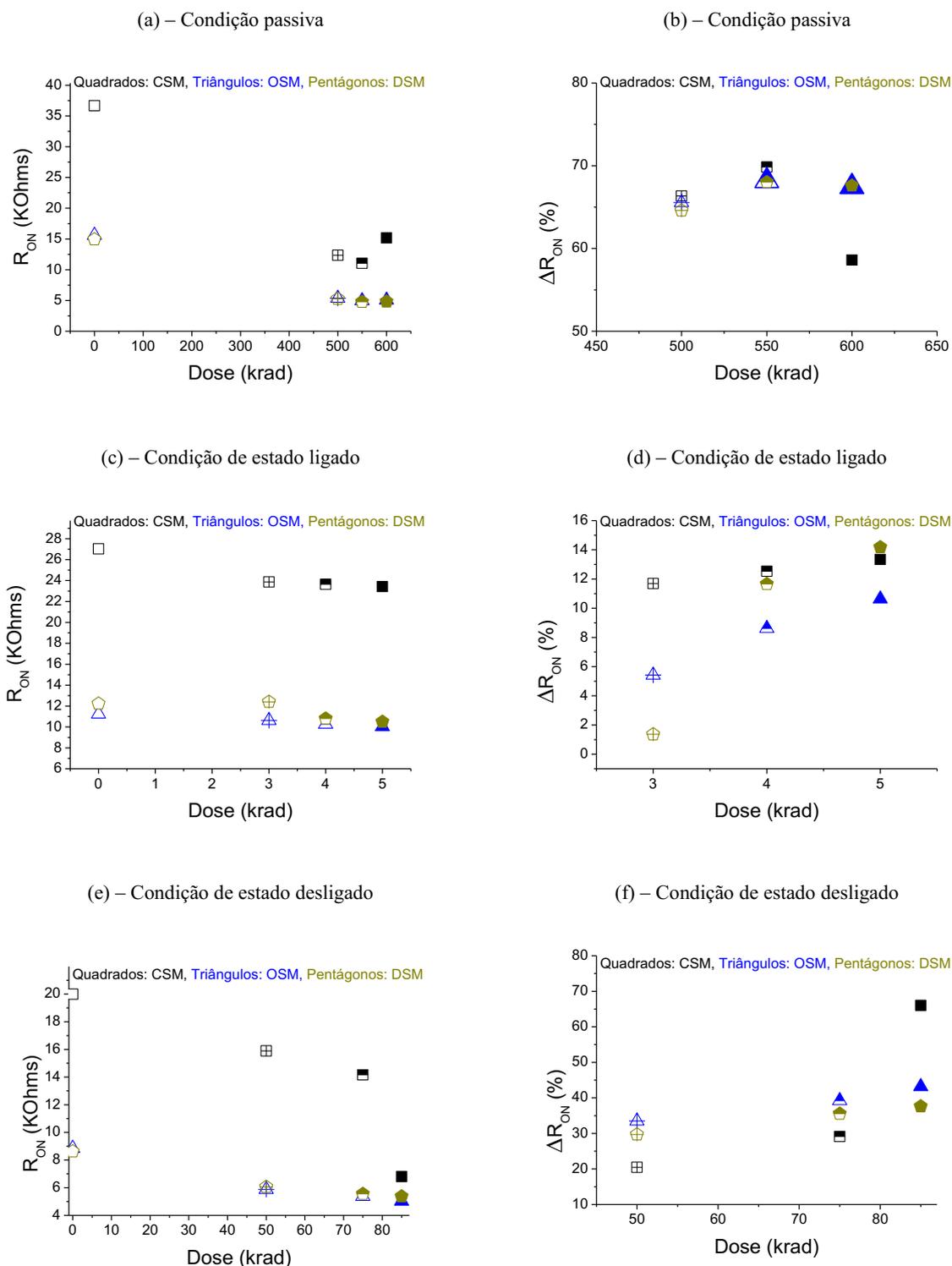
Fonte: Autor

Observa-se por meio da Figura 58 que em todos os casos existe um aumento de  $I_{DS}/(W/L)$  em função das TIDs. Isto pode ser justificado em decorrência do armadilhamento de cargas positivas nos óxido de porta e óxido enterrado [10], [101], que por reduziram os valores das tensões de limiar, aumentando os valores de  $I_{DS}/(W/L) \times V_{DS}$ . Nota-se também que os valores das  $I_{DS}/(W/L) \times V_{DS}$  do OSM e do DSM são sempre maiores que os do CSM equivalente, considerando-se diferentes condições de polarizações durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X e para as diferentes TIDs estudadas, devido principalmente aos efeitos LCE e PAMDLE presentes nessas inovadoras estruturas de SOI nMOSFET.

A Figura 59 apresenta os valores experimentais das  $R_{ON}$  dos DSM, OSM e CSM em função da TID aplicada. A Figura 59.a indica os valores das  $R_{ON}$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 59.b, indica as variações percentuais das  $R_{ON}$  de cada TID em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 59.c e 59.d e Figuras 59.e e 59.f, são análogas as Figuras 59.a e 59.b, no entanto, levam em consideração a polarização de estado ligado e a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, respectivamente.

Os símbolos e cores dos valores das  $R_{ON}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 59 são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 58.

Figura 59 - Resultados experimentais do comportamento das  $R_{ONs}$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 59.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 59.b, d, f), respectivamente, considerando um  $V_{GS}=1$  V em todos os casos



Fonte: Autor

Analisando a Figura 59 a, nota-se que o comportamento da resistência de estado ligado tanto do OSM como para o DSM foram superiores (em que quanto menor o valor da  $R_{ON}$ , melhores são os resultados) que ao do CSM em todas as TIDs avaliadas neste estudo. Assim como em todas as condições de polarização durante os procedimentos de radiações de raios-X.

Considerando a condição passiva, tem-se pela Figura 59.a que o OSM apresenta menores valores de  $R_{ON}$  já na condição “Pré-rad” devido aos efeitos LCE e PAMDLE. Esta mesma tendência foi verificada TID após TID. Este resultado é muito importante, já que demonstra que os efeitos LCE e PAMDLE permaneceram ativos mesmo após os efeitos da radiação ionizante de raios-X. Na condição de Pré-rad o CSM apresentava um valor de  $R_{ON}$  2,35 vezes maior que ao do OSM, e considerando a última dose, o CSM apresentou um valor de  $R_{ON}$  3,13 vezes maior que ao do OSM equivalente, ou seja, após a radiação este parâmetro elétrico foi potencializado. Pela Figura 59.b visualiza-se que as variações percentuais no DSM e OSM após a primeira dose foram menos intensas do que as variações no CSM devido ao efeito DEPAMBBRE.

Pela condição de polarização de estado ligado, conforme dados apresentados na Figura 59.c, observa-se que o DSM e OSM apresentavam valores inferiores de  $R_{ON}$  (quanto menor melhor) que o CSM já na condição de “Pré-rad”, onde o CSM apresentou um valor de  $R_{ON}$  2,4 vezes maior que ao do OSM e ao considerar a última TID tem-se um valor de  $R_{ON}$  2,34 vezes maior que ao do OSM. Mais uma vez ficam evidenciados a influência dos efeitos LCE e PAMDLE no comportamento do OSM. Vale ressaltar que, pela análise da Figura 59.d, o dispositivo OSM teve a menor variação (8,23% em média) ao longo das TIDs quando comparado com o CSM (12,8% em média).

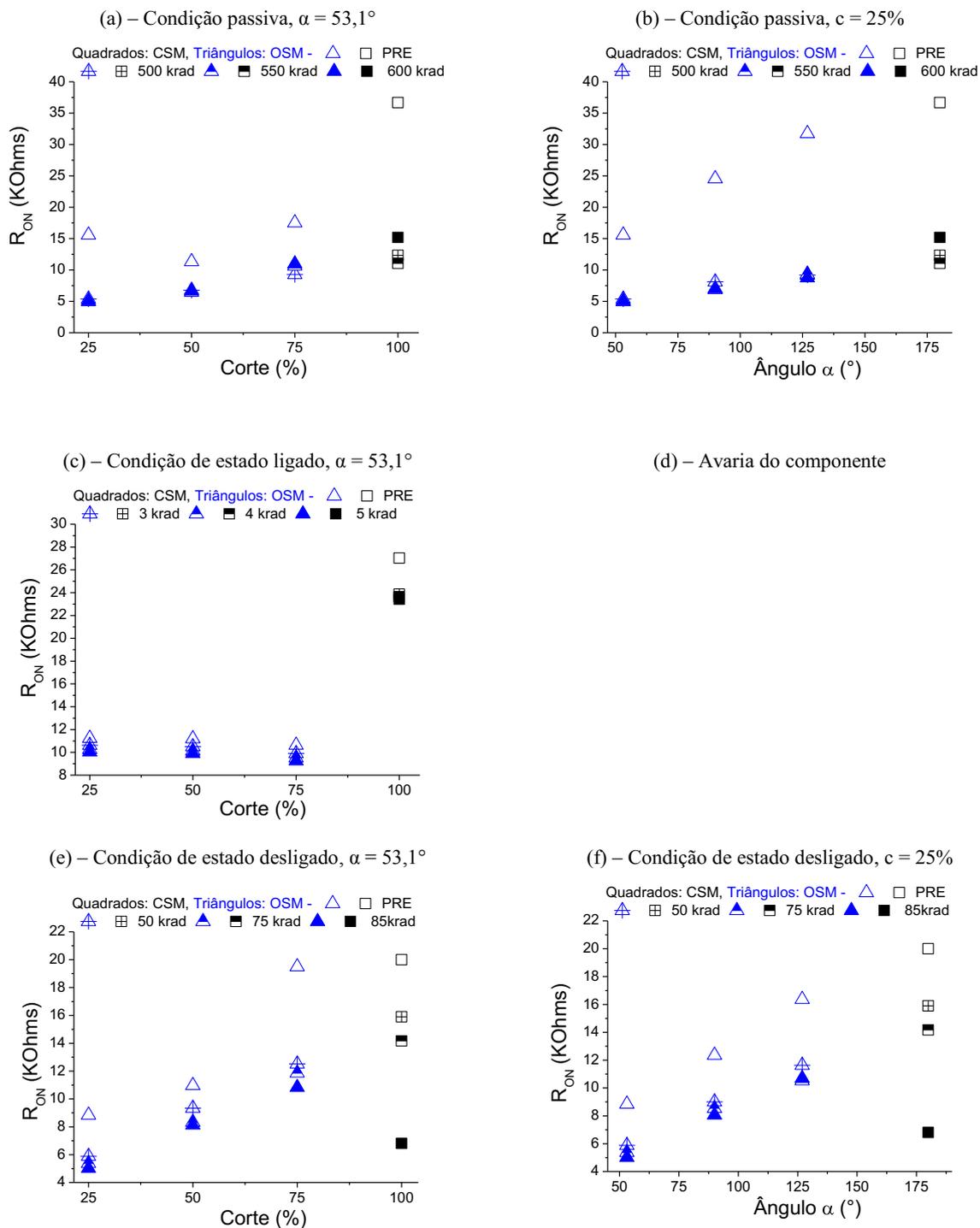
Analisando a polarização de estado desligado, também observa-se o melhor comportamento do OSM e DSM com menores valores de  $R_{ON}$  quando comparado com o CSM. Na condição de Pré-rad o CSM apresentou um valor de  $R_{ON}$  2,26 vezes maior que o do OSM e ao considerar a última TID, um valor de  $R_{ON}$  1,36 vezes maior que ao do OSM. Tanto pela Figura 59.e como 59.f, nota-se que apesar dos valores de  $R_{ON}$  do CSM diminuírem consideravelmente em função da TID, o que não ocorre para o OSM e DSM devido ao efeito DEPAMBBRE.

A Figura 60 apresenta os valores experimentais das  $R_{ON}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal em função do fator de corte e do ângulo  $\alpha$  conforme apresentados na Tabela 2. A Figura 60.a indica os valores das  $R_{ON}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura

60.b, indica os valores das  $R_{ON}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva, ou *floating* durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 60.c ilustra os valores das  $R_{ON}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 60.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM. Analogamente, a Figura 60.e mostra os valores das  $R_{ON}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 60.f ilustra os valores das  $R_{ON}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $R_{ON}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 60, são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 59.

Figura 60 - Resultados experimentais do comportamento das  $R_{ONs}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 60.a, c, e, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 60.b, f), respectivamente, considerando um  $V_{GS}=1V$



Fonte: Autor

Para a condição de polarização passiva, ao analisar a influência do corte (Fig. 60 a.) fica claro que ao aumentar o fator de corte de 25% a 75% mais a geometria da região de canal

do OSM se aproxima da geometria do SOI nMOSFET com geometria de porta retangular. Neste caso os valores de  $R_{ON}$  do OSM tende aos valores de  $R_{ON}$  do CSM, em que menor é a interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal, e conseqüentemente do campo elétrico longitudinal resultante, com a redução dos efeitos LCE PAMDLE.

De forma inversa, ao diminuirmos o fator de corte, potencializamos os efeitos LCE e PAMDLE com uma maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal com o formato de porta octogonal, que pode ser representada pela composição de infinitos transistores em paralelo, com os transistores de menor comprimento de canal nas extremidades da estrutura octogonal, onde a corrente de dreno fluirá com maior intensidade, resultando com um desempenho superior do OSM em todos os casos. Ao analisar a influência do ângulo (Fig. 60 b.), nota-se que ao aumentarmos o ângulo de  $53,1^\circ$  para  $126,9^\circ$ , mais o OSM se aproxima das condições topológicas do CSM. Os dois gráficos apresentam um comportamento muito similar em função da TID.

Analisando a Figura 60.c, que apresenta o comportamento dos OSMs e CSMs levando-se em consideração a polarização de estado ligado, mais uma vez nota-se que os comportamentos de  $R_{ON}$  em função do corte são superiores que ao apresentado pelo CSM. No entanto, para as doses utilizadas ocorreu uma inversão de tendência da observada na Figura 60.a, neste caso ao aumentarmos o fator de corte “c” ocorreu uma leve diminuição do valor de  $R_{ON}$ .

Analisando a polarização de estado desligado pela Figura 60.e, nota-se duas tendências para o OSM: a primeira delas referem-se a influência das TIDs, em que conforme elas são incrementadas, ocorre uma diminuição dos valores de  $R_{ON}$ . A segunda tendência é dada em função do fator de corte “c”, que ao ser incrementado, também incrementa os valores de  $R_{ON}$ . Estas duas tendências também são visualizadas na Figura 60.f. No entanto, verifica-se em ambas as figuras que a última TID analisada afetou fortemente o CSM, fazendo com que o seu valor de  $R_{ON}$  também fosse alterado, e neste caso, decrementado. Ainda assim o OSM com a topologia ideal manteve um valor de  $R_{ON}$  menor que o do CSM para a TID de 85 krad, já que o CSM apresentou um valor 1,35 vezes maior.

Em ambos os casos verificamos a forte dependência dos efeitos LCE e PAMDLE pelas condições geométricas do OSM. Mais uma vez os gráficos apresentados nos sugerem que a topologia ideal, ou seja, aquela que potencializa as características elétricas do OSM pelos efeitos do LCE, PAMDLE e DEPAMBBRE, é o OSM com um fator de corte de 25% e um ângulo de  $53,1^\circ$ .

## 5.7 TENSÃO EARLY

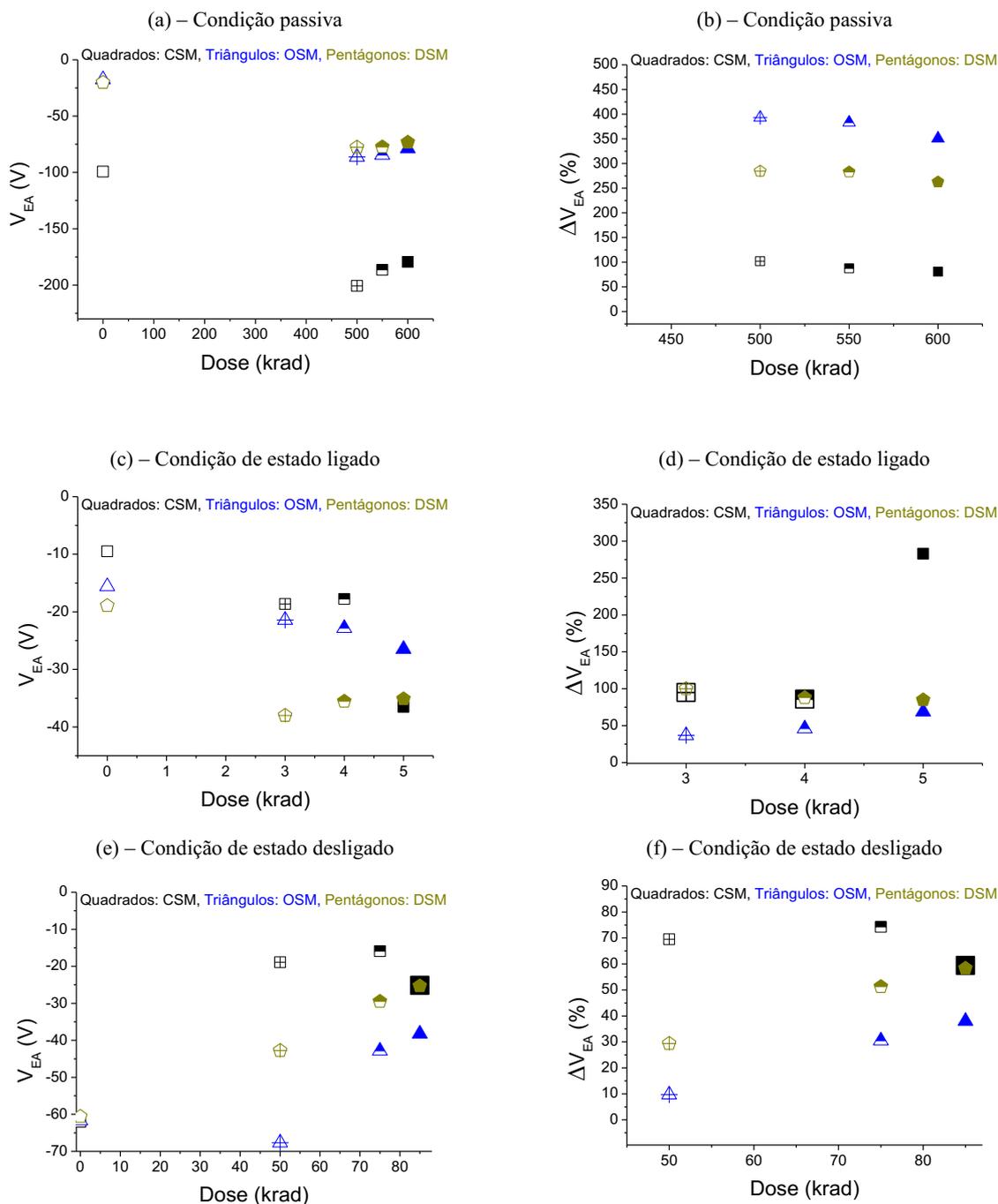
As características geométricas referentes aos SOI nMOSFETs foram destacados na Tabela 1.

A Figura 61 apresenta os valores experimentais das  $V_{EA}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 61.a indica os valores das  $V_{EA}$  em função das TIDs aplicadas, enquanto que a Figura 61.b, apresenta as variações percentuais das  $V_{EA}$  para cada TID em relação aos seus valores que foram obtidos na condição de “Pré-rad”, ambas as Figuras considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 61.c e 61.d, seguem o mesmo princípio das Figuras 61.a e 61.b, no entanto, elas consideram a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Já as Figuras 61.e e 61.f, também são análogas as Figuras 61.a e 61.b, mas agora, elas consideram a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $V_{EA}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 61, são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 60.

Os valores foram obtidos através da extrapolação da região linear da curva da corrente de dreno em função da tensão de dreno desprezando as elevações abruptas, considerando a janela de  $V_{DS}$  de 2 a 3 V.

Figura 61 - Resultados experimentais do comportamento das  $V_{EA}$ s em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (valores absolutos, Fig. 61.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 61.b, d, f), respectivamente, considerando um  $V_{GS}=1\text{ V}$



Fonte: Autor

Analisando a condição passiva pela Figura 61 a, nota-se que o valor da tensão Early tanto do OSM como do DSM foram inferiores que ao do CSM tanto antes como após as TIDs.

Como o OSM e DSM possuem um maior campo elétrico longitudinal resultante e um formato de porta octogonal (OSM) ou hexagonal (DSM), que podem ser representados pela associação paralela de infinitos transistores com diferentes comprimentos de canal, sendo que os transistores com o menor comprimento de canal estão localizados nas extremidades e consequentemente, esta é a região por onde flui com uma maior intensidade a corrente de dreno. Esta combinação resulta em uma maior modulação do comprimento de canal do OSM, e como a  $V_{EA}$  esta relacionada a esta região (*pinch-off*), o valor de  $V_{EA}$  aumenta (sendo que quanto menor o valor de  $V_{EA}$ , melhor). Ao considerarmos a condição de “Pré-rad”, o CSM apresenta uma  $V_{EA}$  5,67 e 4,9 vezes superior que a do OSM e DSM, respectivamente, e após a última TID avaliada neste estudo (600 krad) um valor 2,27 e 2,44 vezes superior que a do OSM e DSM respectivamente. Analisando a Figura 61.b, nota-se uma maior variação percentual para o OSM e DSM, pois como os seus valores eram baixos, ocorreu uma maior alteração percentual. No entanto, após a primeira TID, nota-se uma flutuação similar entre os DSM, OSM e CSM.

Para a condição de polarização de estado ligado, observa-se pela Figura 61.c, que para o OSM e CSM, o valor de  $V_{EA}$  continua caindo (com valores mais negativos) em função da TID. Este fato pode ser justificado pela menor modulação do comprimento de canal destes dispositivos. Para o dispositivo DSM, ocorreu o inverso, ou seja, o efeito PAMDLE atuando de maneira diferente. Ao considerarmos a condição de “Pré-rad” o DSM e OSM apresenta uma  $V_{EA}$  1,99 e 1,64 vezes superior que a do CSM, respectivamente, e após a última TID avaliada neste estudo (5 krad) ocorre uma inversão nesta tendência em que o CSM apresenta um valor 1,38 e 1,04 vezes superior que a do OSM e DSM respectivamente. Analisando a Figura 61.d, nota-se uma maior variação percentual para o OSM devido ao efeito DEPAMBBRE.

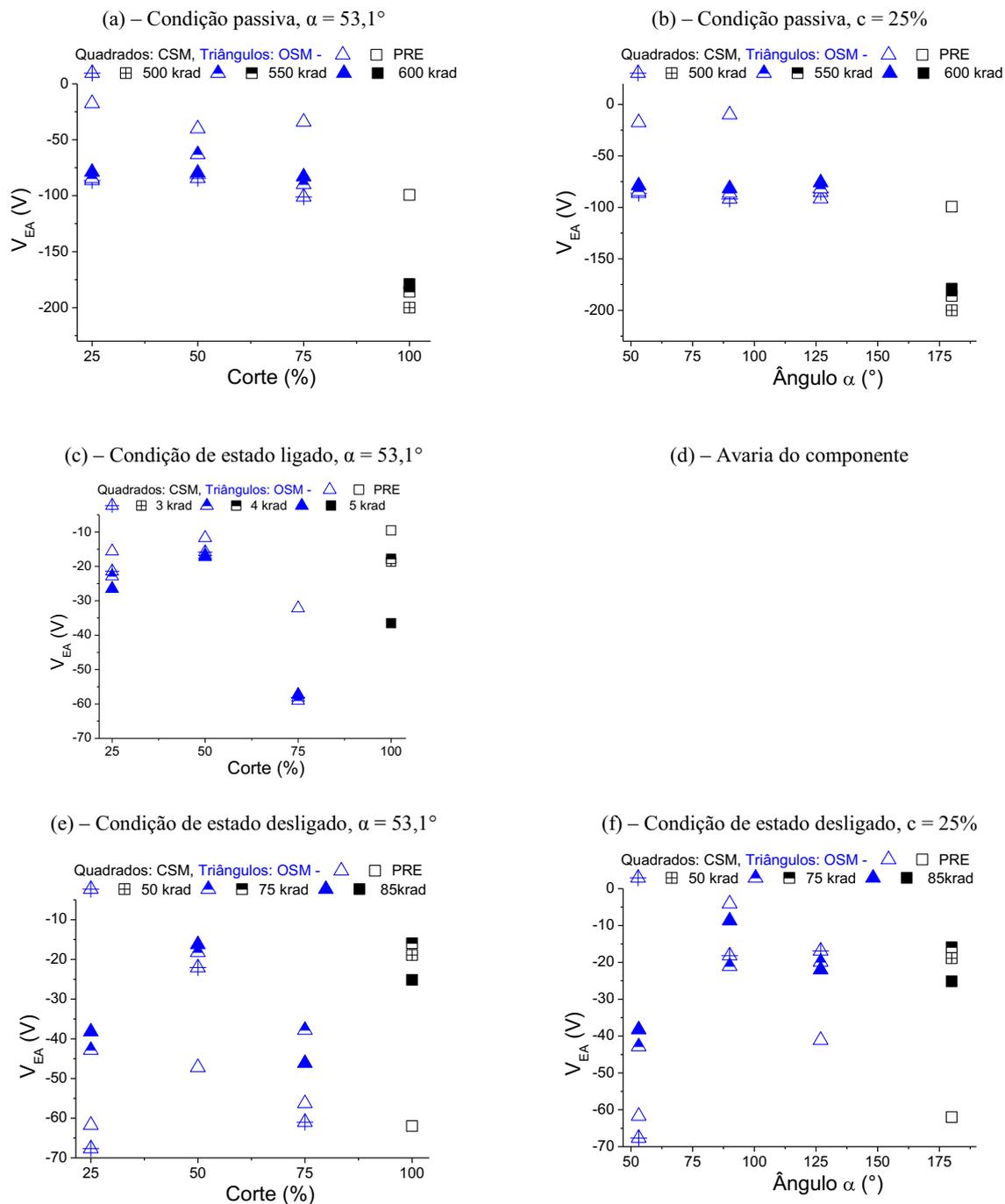
Considerando a polarização de estado desligado, nota-se o comportamento similar entre a Figura 61.e e 61.a, no entanto, ao considerar a condição de “Pré-rad” o DSM/ OSM e CSM, apresentam valores similares de  $V_{EA}$ , sendo -60,06 V/ -61,71 V e -62,01 V respectivamente e após a última TID avaliada (85 krad), os valores passaram para -25,3 V / -38,15 V e -25,3 V, para o DSM, OSM e CSM respectivamente. Em adição pela Figura 61.f verifica-se que o OSM variou 21% menos que o CSM e DSM.

A Figura 62 apresenta os valores experimentais das  $V_{EA}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal sumarizados na Tabela 2. A Figura 62.a indica os valores das  $V_{EA}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando um ângulo  $\alpha$  de 53,1°, enquanto que a Figura 62.b, indica os valores das  $V_{EA}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as

diferentes TIDs, considerando um fator de corte de 25%. Estes resultados consideram a condição passiva, ou *floating* durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 62.c ilustra os valores das  $V_{EA}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, considerando-se um ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  considerando o estado ligado, enquanto que a Figura 62.d não pode ser desenvolvida devido a avarias no CSM e OSM. Analogamente, a Figura 62.e mostra os valores das  $V_{EA}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, mantendo-se o ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$ , enquanto que a Figura 62.f ilustra os valores das  $V_{EA}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, mantendo-se o fator de corte de 25%. Ambos estes resultados estão considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $V_{EA}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 62, são análogos as análises anteriores.

Figura 62 - Resultados experimentais do comportamento das  $V_{EA}$ s em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 62.a, c, e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 62.b, f) respectivamente, considerando um  $V_{GS} = 1$  V



Fonte: Autor

Analisando as Figuras 61.a e 61.b, comparativamente nota-se uma maior dependência do fator de corte “c” na influência dos valores de  $V_{EA}$  quando comparado a influência do

ângulo  $\alpha$ . Pela Figura 61.a, observa-se que ao incrementarmos a TID, ocorre de uma maneira geral a diminuição dos valores de  $V_{EA}$ . Este resultado sugere que o armadilhamento de cargas positivas tanto no óxido como na interface, além de reduzirem o valor da tensão de limiar, dificulta a modulação do comprimento de canal considerando a condição passiva. De uma maneira geral este comportamento descrito para a Figura 61.a também ocorre para a Figura 61.b.

Considerando a polarização de estado ligado, conforme indicado pela Figura 61.c, nota-se uma grande variação dos valores de  $V_{EA}$ , que foram potencializados pelo campo elétrico vertical, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Observa-se que o efeito DEPAMBBRE teve uma maior influência para o OSM com fator de corte “c” igual a 50%. Vale mencionar que OSM com fator de corte “c” igual a 75% apresentou uma variação similar que ao OSM já que ao aumentarmos o fator de corte o OSM assemelha-se com o SOI nMOSFET com geometria de porta retangular, e neste caso o OSM apresentou um valor de  $V_{EA}$  por volta de 1,45 vezes superior que ao do CSM.

Analisando os efeitos da polarização de estado desligado nos valores da  $V_{EA}$  através das Figuras 62.e e 62.f, verifica-se que o campo elétrico longitudinal, imposto durante os procedimentos de radiações ionizantes afetaram significativamente os valores da  $V_{EA}$  sejam em função do fator de corte “c” como do ângulo  $\alpha$ . O que ambos os gráficos nos mostram é que ocorreu uma menor variação dos valores de  $V_{EA}$  em função das diferentes TIDs estudadas nesta tese devido ao efeito DEPAMBBRE, já que a variação do CSM considerando o maior e o menor valor foi de 74% enquanto que a do OSM foi 65% (considerando a configuração que mais variou, ou seja, o OSM com  $c=50\%$ ).

## 5.8 RAZÃO DA TRANSCONDUTÂNCIA PELA CORRENTE DE DRENO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE DRENO NORMALIZADA PELO FATOR GEOMÉTRICO

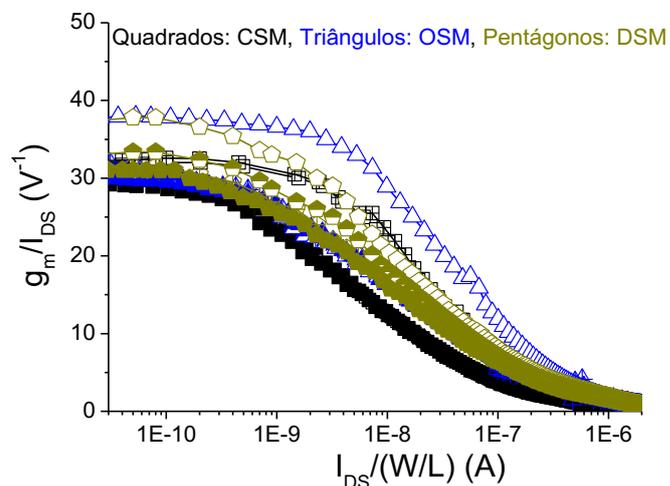
Para os estudos da transcondutância pela corrente de dreno em função da corrente de dreno normalizada pelo fator geométrico, foram utilizados aos SOI nMOSFETs destacados na Tabela 1 Grupo 1.

A Figura 63 representa as curvas experimentais de  $g_m/I_{DS}$  em função de  $I_{DS}/(W/L)$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e retangular considerando as TIDs para as condições de polarizações passiva (Figura 63.a), de estado ligado (Figura 63.b), e de estado desligado (Figura 63.c), considerando todas as TIDs avaliadas por esta tese.

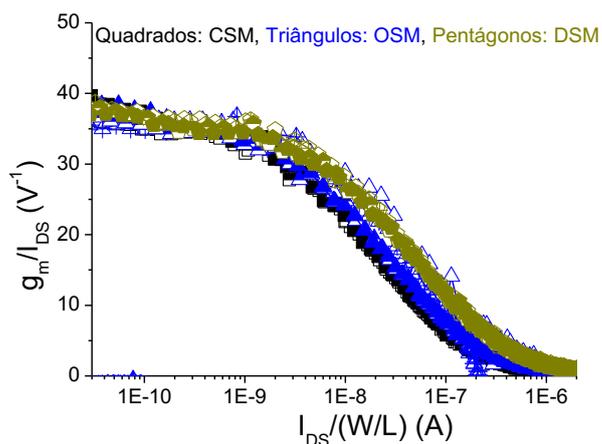
Os símbolos e cores dos valores das  $g_m/I_{DS}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 63, são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 62.

Figura 63 - Resultados experimentais do comportamento da  $g_m/I_{DS}$  vs  $I_{DS}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM, e CSM, nas condições de polarizações passiva (Fig. 63.a), de estado ligado, (Fig. 63.b) e de estado desligado, (Fig. 63.c), considerando um  $V_{GS}=0,1$  V

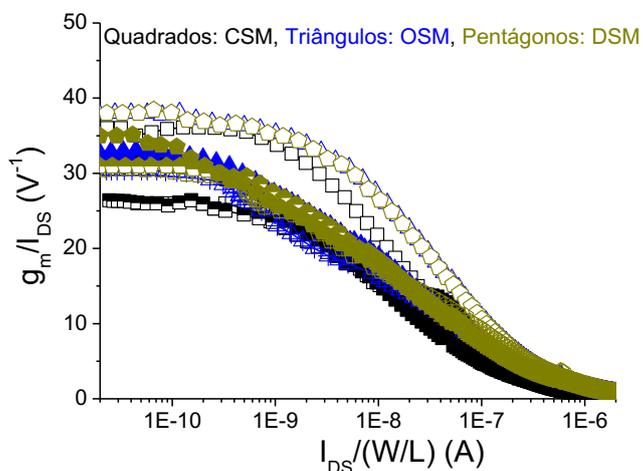
(a) – Condição passiva



(b) – Condição de estado ligado



(c) – Condição de estado desligado



Fonte: Autor

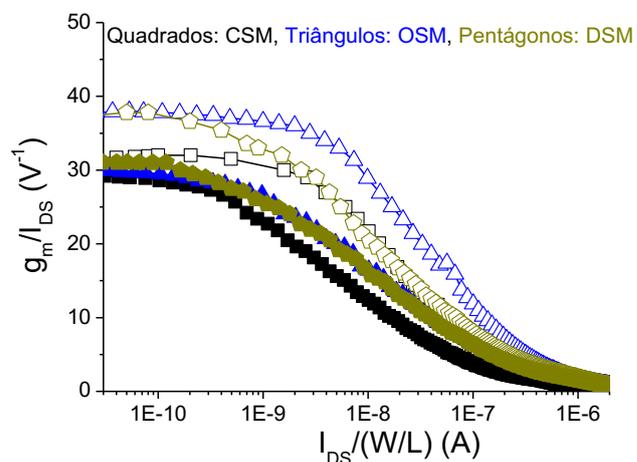
Analisando a Figura 63, verifica-se que os valores de  $g_m/I_{DS}$  por  $I_{DS}/(W/L)$  diminuem em função da TID, independente da condição de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Este fato é decorrente do armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e no óxido enterrado [10].

A Figura 64 também mostra as evoluções das  $g_m/I_{DS}$  por  $I_{DS}/(W/L)$  experimentais dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e retangular, mas agora considerando apenas a condição inicial (Pré-rad) e a condição final (dose acumulada final) de raios-X, para as condições de polarizações passiva (Figura 64.a), de estado ligado (Figura 64.b) e de estado desligado (Figura 64.c).

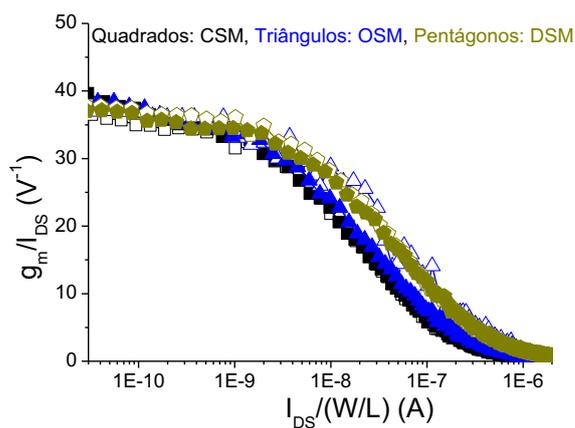
Os símbolos e cores dos valores das  $g_m/I_{DS}$  dos SOI nMOSFETS utilizados na Figura 64, são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 63.

Figura 64 - Resultados experimentais do comportamento das  $g_m/I_{DS}$  vs  $I_{DS}/(W/L)$  em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, nas condições de polarizações passiva (Fig. 64.a), de estado ligado, (Fig. 64.b) e de estado desligado, (Fig. 64.c), considerando um  $V_{GS}=0,1$  V

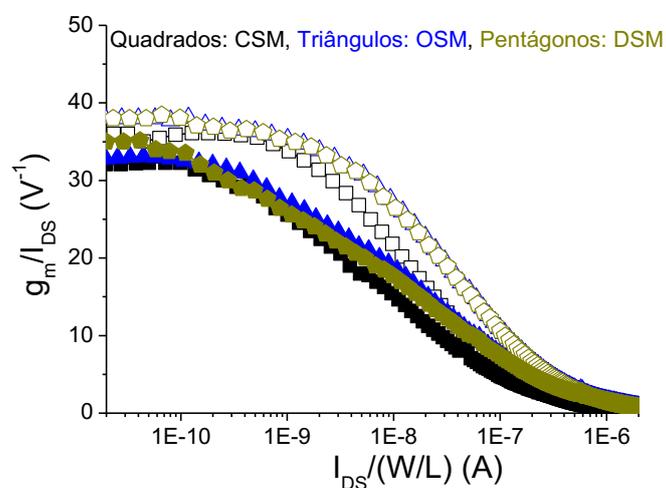
(a) – Condição passiva



(b) – Condição de estado ligado



(c) – Condição de estado desligado



Fonte: Autor

Analisando as Figuras 63 e 64 observa-se que o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal, apresenta valores superiores de  $g_m/I_{DS}$  quando comparado com o SOI nMOSFET com geometria de porta retangular em todos os regimes de inversão do canal, ou seja, no regime de inversão forte, moderado e fraco e considerando todas as condições de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, ou seja, para a condição passiva, de estado ligado e estado desligado. Este é um resultado extremamente expressivo para o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal.

Para evidenciar este comportamento, os resultados foram quantificados dividindo-se o valor de  $g_m/I_{DS}$  do OSM pelo do CSM em todos os regimes de inversão do canal (considerando  $I_{DS}/W/L$  de  $3 \times 10^{-11}$  A na inversão fraca,  $I_{DS}/W/L$  de  $3 \times 10^{-9}$  A na inversão moderada e  $I_{DS}/W/L$  de  $1 \times 10^{-7}$  A na inversão forte) e calculada a média aritmética destes valores. Desta maneira na condição passiva o OSM apresentou valores de  $g_m/I_{DS}$  1,32 vezes maiores que ao valor de  $g_m/I_{DS}$  do CSM, na polarização de estado ligado o OSM apresentou valores de  $g_m/I_{DS}$  1,08 vezes maiores que ao do CSM e por fim na polarização de estado desligado o OSM apresentou valores 1,25 vezes maiores que ao do CSM.

Estes resultados estão diretamente ligados a influência positiva do efeito LCE e PAMDLE nas características elétricas do OSM, ao potencializar o campo elétrico longitudinal, ou seja, tanto o efeito LCE como o PAMDLE permaneceram ativos e com intensidade similar ao verificado na condição de Pré-rad, mesmo após aos procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

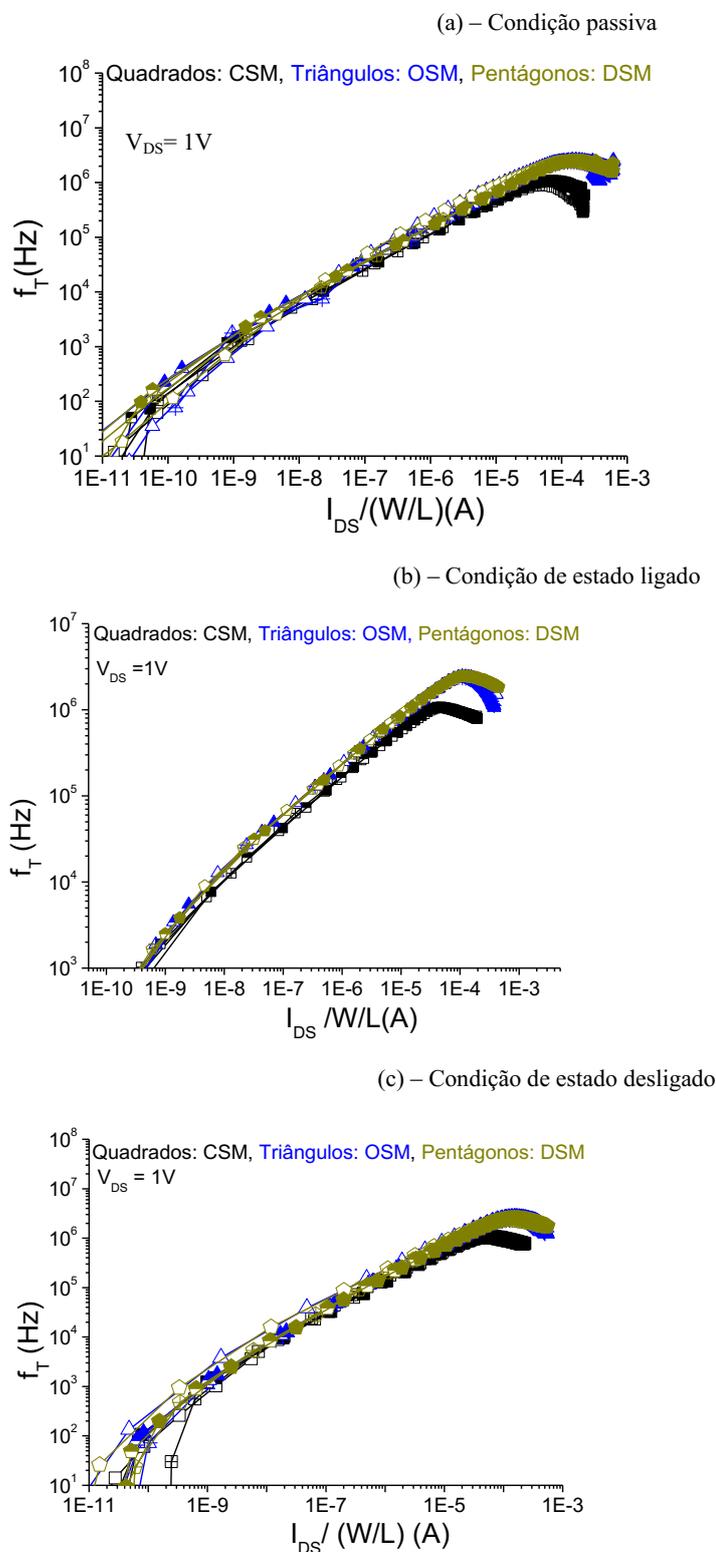
## 5.9 FREQUÊNCIA DE GANHO DE TENSÃO UNITÁRIO

A Figura 65 apresenta as curvas experimentais das  $f_{Ts}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada conforme sumarizados na Tabela 1 Grupo 1. A Figura 65.a indica as curvas das  $f_{Ts}$  em função da TID, considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 65.b indica as curvas das  $f_T$  em função da TID aplicada considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 65.c indica as curvas das  $f_T$  em função da TID, considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $f_T$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 65 são análogos ao da análise anterior.

Para a obtenção dos valores de  $f_T$ , foi utilizada uma capacitância de carga de 10pF.

Figura 65 - Curvas experimentais do comportamento das  $f_T$  considerando as TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 65.a), de estado ligado, (Fig. 65.b) e de estado desligado, (Fig. 65.c)



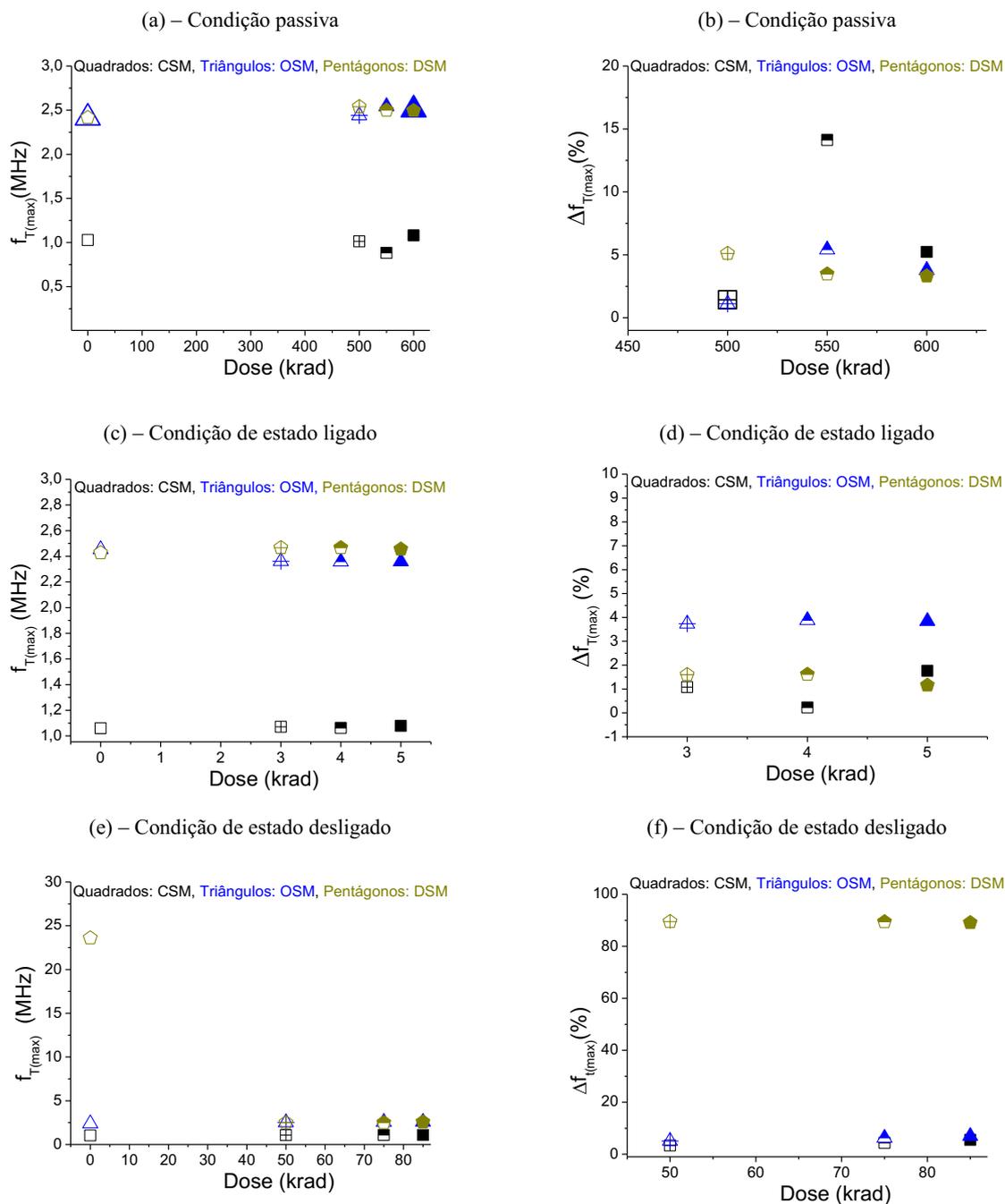
Fonte: Autor

A Figura 65 é mostrada de forma a apresentar o perfil da curva de  $f_T$ , abordando todas as regiões de inversão do SOI nMOSFET, já que o estudo abordará os valores máximos de frequência de ganho de tensão unitário  $f_{T(\text{MAX})}$ , extraídas na região de inversão forte.

A Figura 66 apresenta os valores experimentais das  $f_{T(\text{Max})}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada. A Figura 66.a indica os valores das  $f_{T(\text{Max})}$  em função da TID, enquanto que a Figura 66.b, indica as variações percentuais das  $f_{T(\text{Max})}$  para cada TID em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 66.c e 66.d são análogas as Figuras 66.a e 66.b, no entanto, considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. As Figuras 66.e e 66.f também são semelhantes às Figuras 66.a e 66.b, mas agora levando em consideração a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $f_{T(\text{Max})}$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 66, são análogos ao da análise anterior abordadas para a Figura 65.

Figura 66 - Resultados experimentais do comportamento das  $f_{T(\text{Max})}$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado, (valores absolutos, Fig. 66.a, c, e e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 66.b, d, f), respectivamente, considerando um  $V_{DS}=1$  V em todos os casos



Fonte: Autor

Considerando a condição passiva, como mostrado nas Figuras 66.a e 66.b, nota-se que o OSM e DSM, apresentam valores superiores ao do CSM em 2,35 vezes na condição de

“Pré-rad” e de 2,32 considerando a última TID avaliada (600 krad). Este resultado deve-se principalmente aos efeitos LCE e PAMDLE, que resultam em uma maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal e conseqüentemente pelo maior campo elétrico longitudinal resultante. Pela Figura 66.b verificamos uma baixa variação média dos valores de  $f_{T(MAX)}$  com variação máxima de 3,9% para o DSM e OSM e de 6,9% para o CSM, o que podemos considerar como comportamentos similares. No caso do OSM e DSM, este resultado pode ser justificado devido ao efeito DEPAMBBRE.

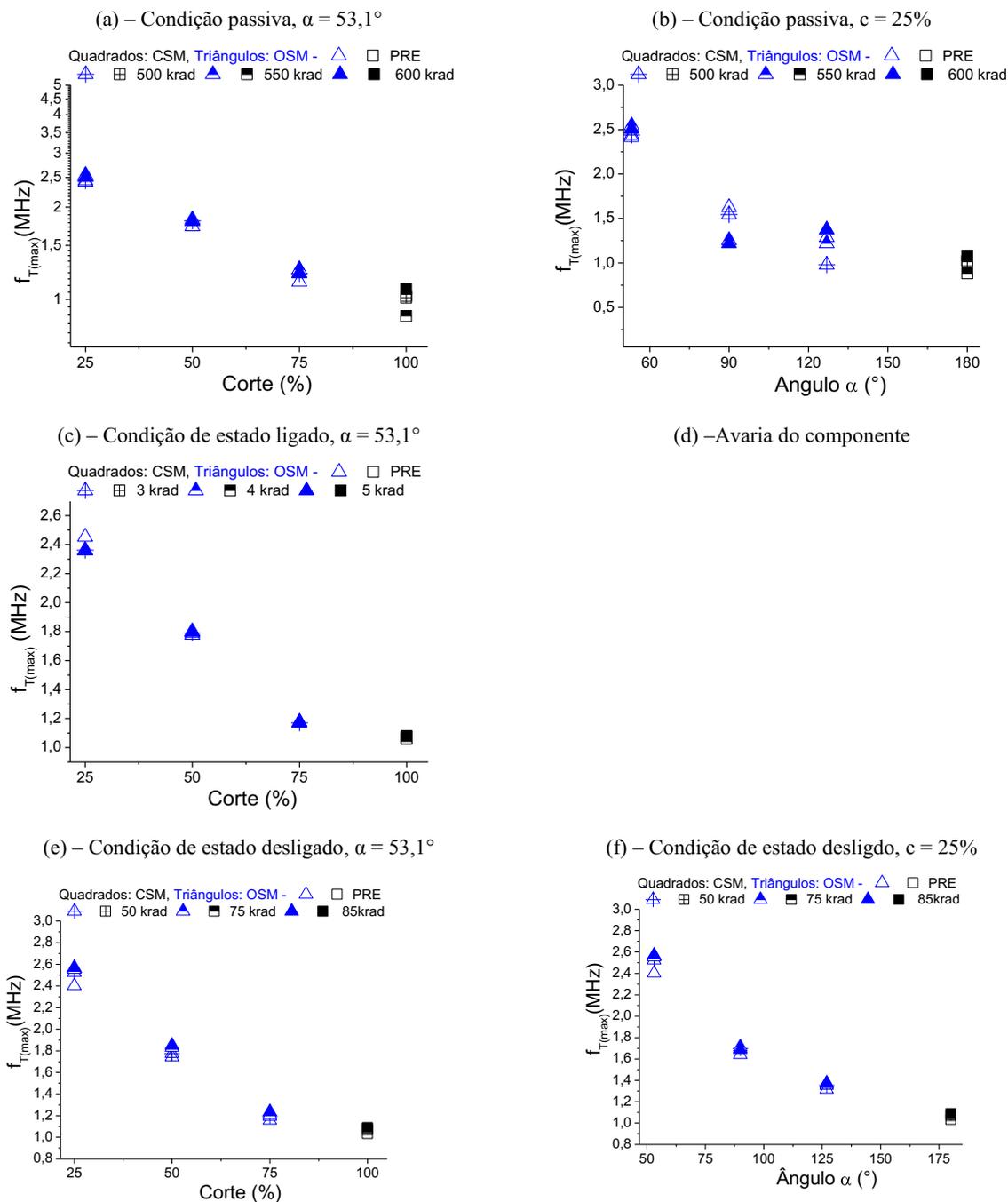
As Figuras 66.c e 66.d, apresentam os valores das  $f_{T(MAX)}$  considerando a polarização de estado ligado e seguem a mesma tendência apresentada nas Figuras 66.a e 66.b, no entanto, neste caso conforme mostrado na Figura 66.c, o OSM e DSM, apresentam valores superiores ao do CSM em 2,3 vezes na condição de “Pré-rad” e de 2,28 considerando a última TID avaliada (5 krad). Este resultado também se deve aos efeitos LCE e PAMDLE, que resultam em uma maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal e conseqüentemente pelo maior campo elétrico longitudinal resultante. Pela Figura 66.d também nota-se uma baixa variação média dos valores de  $f_{T(MAX)}$  com variação máxima de 1,45% para o e DSM, de 3,8% para o OSM e 1% para o CSM, o que caracteriza comportamentos similares. No caso do OSM e DSM, este resultado pode ser justificado devido ao efeito DEPAMBBRE.

Finalmente, as Figuras 66.d e 66.e, apresentam os valores das  $f_{T(MAX)}$  considerando a polarização de estado desligado e, mais uma, vez seguem a mesma tendência apresentada nas Figuras 66.a e 66.b. No entanto, excluindo-se o comportamento do DSM na condição “Pré-rad” pois apresentou um valor muito elevado conforme mostrado na Figura 66.e, o OSM apresenta valores superiores ao do CSM em 2,33 vezes na condição de “Pré-rad” e de 2,35 considerando a última TID avaliada (85 krad). Este resultado também se deve aos efeitos LCE e PAMDLE, que resultam em uma maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal e conseqüentemente pelo maior campo elétrico longitudinal resultante. Pela Figura 66.e também nota-se uma baixa variação média dos valores de  $f_{T(MAX)}$  com variação máxima de 89% para o e DSM (valor que não deve ser considerado), de 6,1% para o OSM e 4,38% para o CSM, o que caracteriza comportamentos similares. No caso do OSM e DSM, este resultado pode ser justificado devido ao efeito DEPAMBBRE.

A Figura 67 apresenta os valores experimentais das  $f_{T(Max)}$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal em função do fator de corte e ângulo  $\alpha$  conforme sumarizado na Tabela 2. A Figura 67.a indica os valores das  $f_{T(Max)}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, enquanto que a Figura 67.b, indica os valores das  $f_{T(Max)}$  em função do ângulo

“ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 67.c indica os valores das  $f_{T(\text{Max})}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs considerando o estado ligado. A Figura 67.e, indica os valores das  $f_{T(\text{Max})}$  em função do fator de corte “c” para as diferentes TIDs, enquanto que a Figura 67.f, indica os valores das  $f_{T(\text{Max})}$  em função do ângulo “ $\alpha$ ” para as diferentes TIDs, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Figura 67 - Resultados experimentais do comportamento das  $f_{T_s(\max)}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM e CSM, nas condições de polarizações passiva, estado ligado e estado desligado (em função do corte “c”, Fig. 67.a, c, e e em função do ângulo “ $\alpha$ ”, Fig. 67.b e f), respectivamente



Fonte: Autor

Para a condição de polarização passiva ao analisar a influência do corte (Fig. 67 a.) fica claro que ao aumentar o fator de corte de 25% a 75% mais o OSM se aproxima da topologia de um SOI nMOSFET com geometria de porta retangular. Ao analisar a influência

do ângulo (Fig. 67 b.), nota-se que ao aumentarmos o ângulo de  $53,1^\circ$  para  $126,9^\circ$ , mais o OSM assemelha-se da topologia do SOI nMOSFET com geometria de porta retangular. Os dois gráficos apresentam um comportamento muito similar em função da dose de raios-X.

Em ambos os casos verificamos a forte dependência dos efeitos LCE e PAMDLE pelas condições geométricas do OSM, em que para fatores de corte “c” e ângulos  $\alpha$  baixos, temos uma maior interação entre as componentes de campo elétrico longitudinal e, conseqüentemente, do campo elétrico longitudinal resultante. Nota-se pela Figura 67.b uma maior dependência dos valores de  $f_{T(MAX)}$  em relação ao ângulo  $\alpha$ , o que nos sugere que o efeito DEPAMBBRE, apresenta uma maior relação com o fator de corte “c.”

A Figura 67.c, que leva em consideração a polarização de estado ligado segue a mesma tendência abordada na Figura 67.a, onde mais uma vez verifica-se a influência do fator de corte “c” nos efeitos LCE e DEPAMBBRE, e neste caso o efeito DEPAMBBRE, corroborou para que as alterações em função da TID fossem menores de 5 %.

Ao considerar a polarização de estado desligado abordada pelas Figuras 67.e e 67.f, verificam-se que ambos os gráficos apresentam tendência similares, em que, ao diminuirmos seja o fator de corte seja o ângulo  $\alpha$ , maiores serão os valores das  $f_{T(MAX)}$  devido à maior interação entre as componentes do campo elétrico longitudinal e conseqüentemente um maior campo elétrico longitudinal resultante.

Os gráficos apresentados nos sugerem que a topologia ideal, ou seja, aquela que potencializa as características elétricas do OSM pelos efeitos do LCE, PAMDLE e DEPAMBBRE é o OSM com um fator de corte de 25% e um ângulo de  $53,1^\circ$ .

## 5.10 GANHO DE TENSÃO INTRÍNSECO DO TRANSISTOR

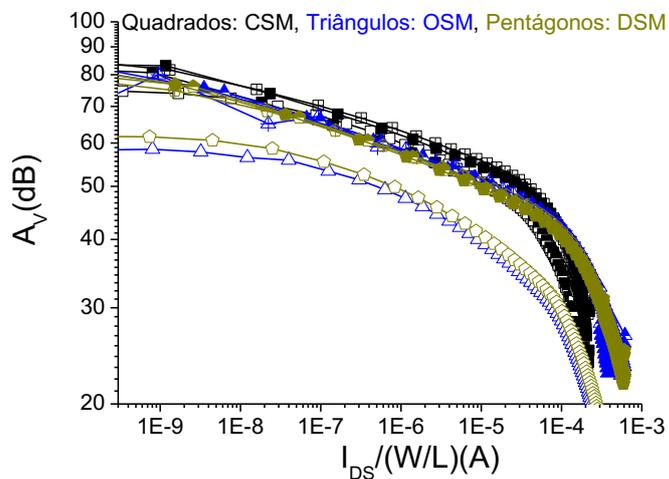
A Figura 68 apresenta as curvas experimentais dos  $A_V$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada, conforme apresentados na Tabela 1 Grupo 1. A Figura 68.a indica as curvas das  $A_{Vs}$  em função da TID aplicada, considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 68.b indica as curvas das  $A_V$  em função da TID aplicada, considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 68.c indica as curvas

das  $A_V$  em função da TID aplicada, considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

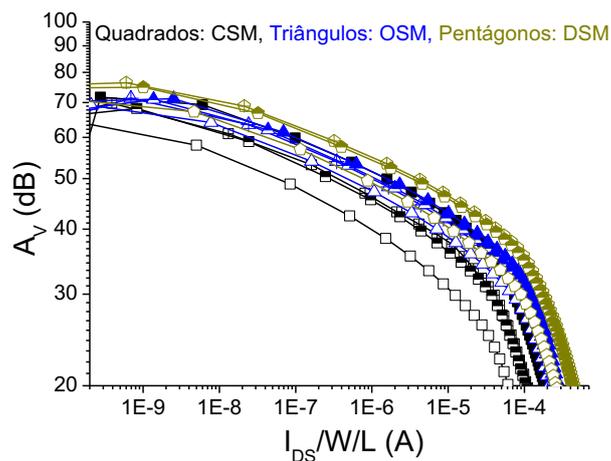
Os símbolos e cores dos valores das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 68 são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 47.

Figura 68 - Resultados experimentais do comportamento das  $A_{V_S}$  considerando as TIDs de raios-X para os SOI DSM, OSM e CSM nas condições de polarizações passiva (Fig. 68.a), de estado ligado, (Fig. 68.b) e de estado desligado, (Fig. 68.c)

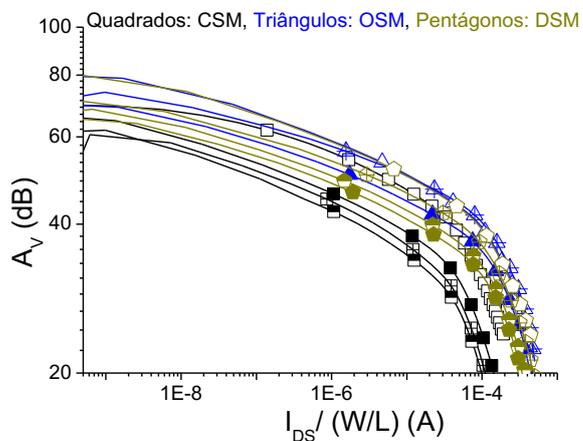
(a) – Condição passiva



(b) – Condição de estado ligado



(c) – Condição de estado desligado



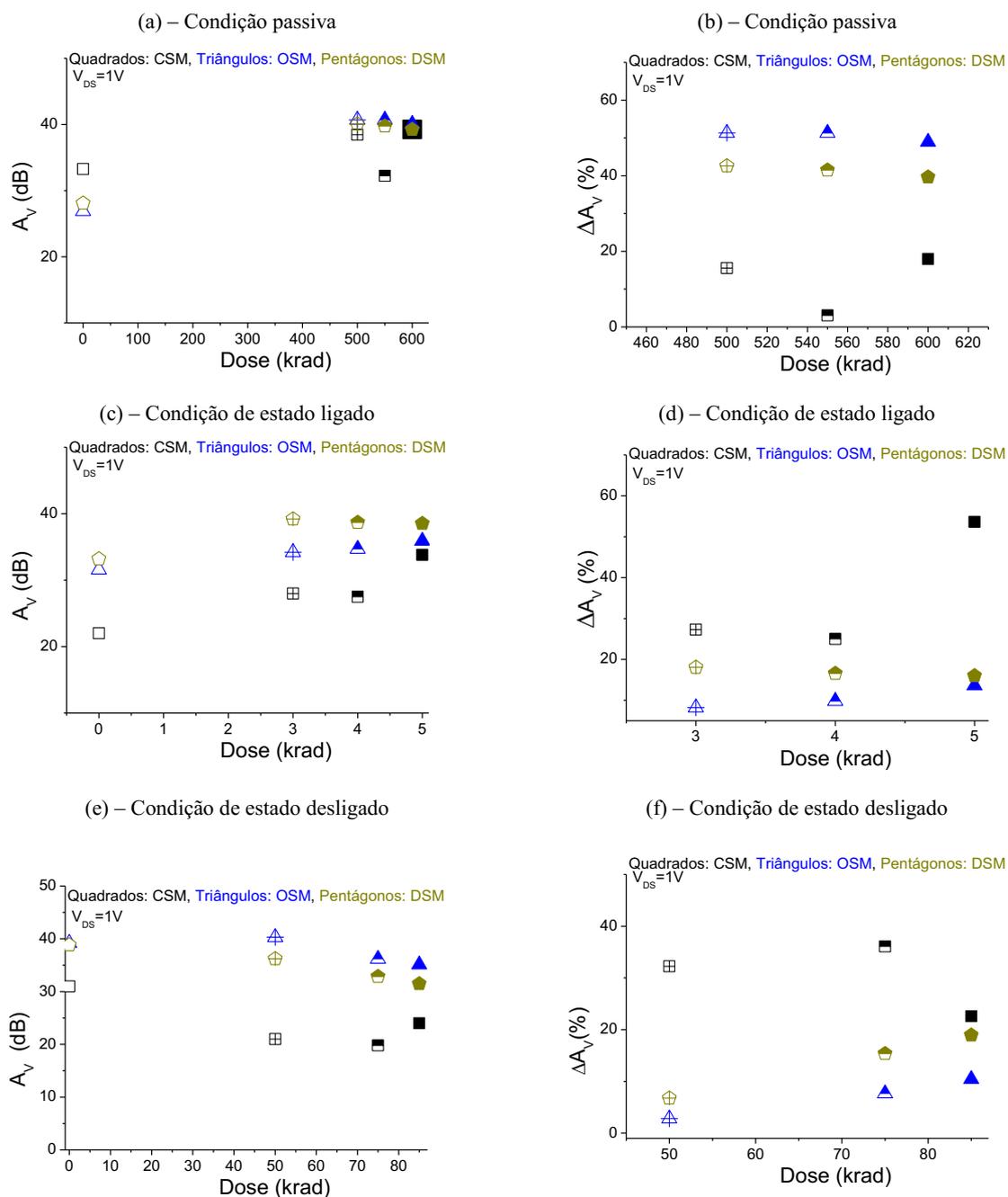
Fonte: Autor

A Figura 68 é mostrada de forma a apresentar o perfil da curva de  $A_V$ , abordando todas as regiões de inversão do SOI nMOSFET, para as diferentes TIDs.

A Figura 69 apresenta os valores experimentais das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada considerando o regime de **inversão forte**. A Figura 69.a indica os valores das  $A_V$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 69.b indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 69.c indica os valores das  $A_V$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 69.d, indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 69.e indica os valores das  $A_{V_s}$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 69.f, indica as variações percentuais das  $A_{V_s}$  de cada dose em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 69, são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 48.

Figura 69 - Resultados experimentais do comportamento das  $A_{Vs}$  em função das TIDs de raios-X para os DSM, OSM e CSM, todos operando na inversão forte, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 69.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.b, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-4}$  A), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 69.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.d, para  $I_{DS}=6 \times 10^{-5}$  A) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 69.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 69.f, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-4}$  A), considerando  $V_{DS} = 1$  V



Fonte: Autor

Considerando a Figura 69.a, nota-se que para a condição passiva ou *floating* o CSM apresentou valores de  $A_V$  1,37 e 1,24 vezes superior que ao do DSM e OSM, respectivamente na condição “Pré-rad”. Aos aplicarmos as TIDs ocorreu uma inversão nesta tendência, em que o DSM e OSM apresentaram os mesmos valores de  $A_V$  (40dB) que o CSM. Esta mudança de inversão é visualizada nas variações percentuais apresentadas na Figura 69.b, ou seja, com uma maior alteração percentual observada pra o OSM e DSM. Este resultado pode ser justificado devido aos efeitos LCE e PAMDLE, combinados com o efeito DEPAMBBRE, onde visualiza-se um mesmo comportamento para o DSM, OSM e CSM operando na região de inversão forte.

Ao analisar a condição de polarização de estado ligado, pela Figura 69.c, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$ , considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese. As diferenças foram diminuindo ao aumentarmos as TIDs, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,51 e 1,44 vezes superior que ao do CSM, respectivamente. Aos aplicarmos a última TID (5 krad), o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,14 e 1,06 vezes superior que ao do CSM. Avaliando a Figura 69.d, verifica-se que o CSM variou mais que os DSM e OSM, na média de 29%, ressaltando a influência do efeito DEMPABBRE nos OSM e DSM.

Para a polarização de estado desligado ao analisar a Figura 69.e, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$  considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese. As diferenças foram diminuindo ao aumentarmos as TIDs, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,25 vezes superior que ao do CSM, respectivamente. Aos aplicarmos a última TID (85 krad), o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,31 e 1,46 vezes superior que ao do CSM. Avaliando a Figura 69.e, verifica-se que o CSM variou mais que os DSM e OSM, na média de 30%, ressaltando a influência do efeito DEMPABBRE nos OSM e DSM.

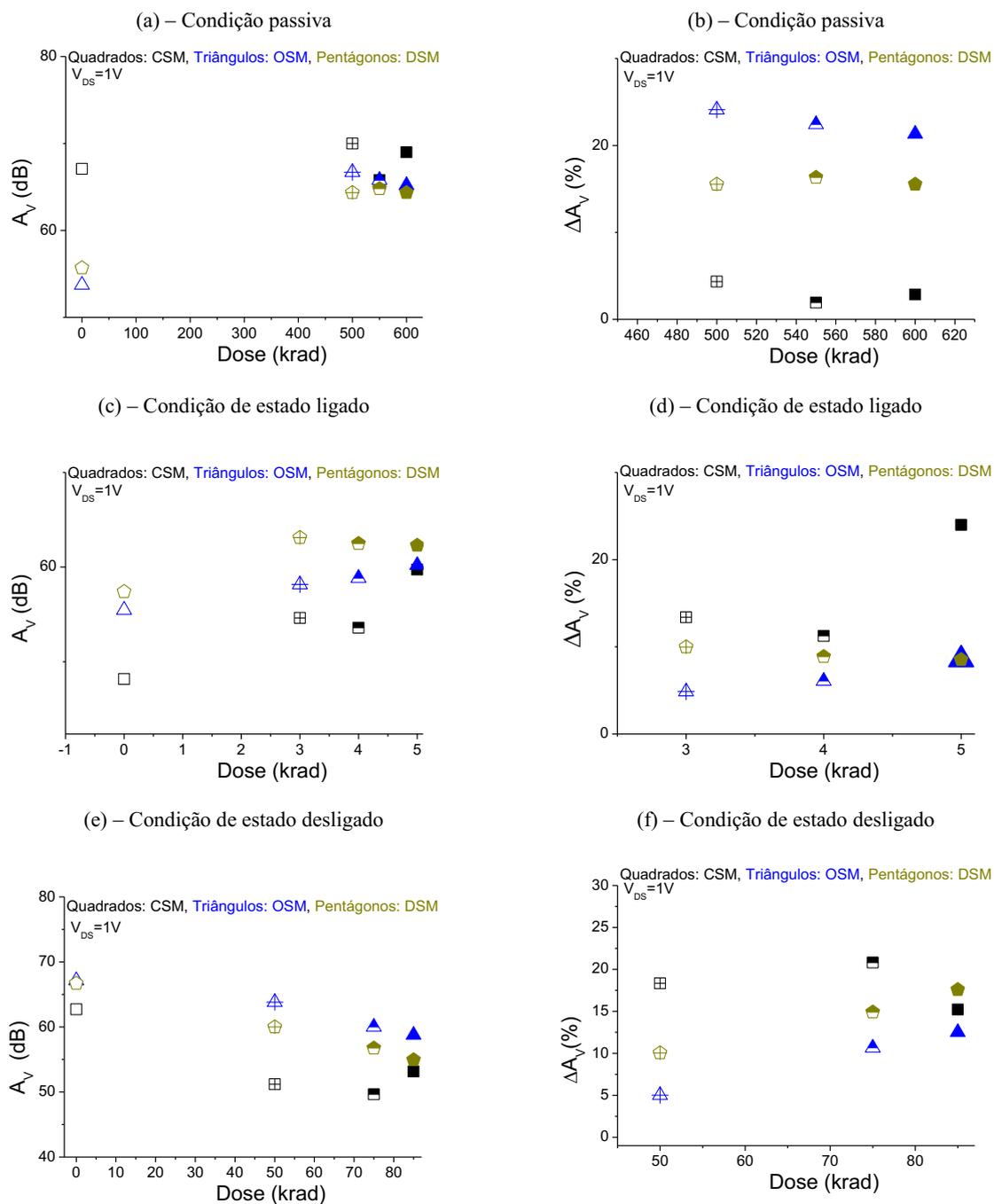
Com os resultados anteriores, conclui-se que o OSM e DSM apresentam valores de  $A_V$  superiores que aos do CSM para todas as condições de polarização, considerando a inversão forte.

A Figura 70 apresenta os valores experimentais das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada considerando o regime de **inversão moderado**. A Figura 70.a indica os valores das  $A_V$  em função da dose aplicada, enquanto que a Figura 70.b, indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada TID em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, ou

*floating* durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 70.c indica os valores das  $A_V$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 70.d indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada TID em relação aos seus valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 70.e indica os valores das  $A_V$  em função da TID aplicada, enquanto que a Figura 70.f indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 70, são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 69.

Figura 70 - Resultados experimentais do comportamento das  $A_{Vs}$  em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, todos operando na inversão moderada, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 70.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.b, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ ), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 70.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.d, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ ) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 70.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 70.f, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-7} A$ )



Considerando a Figura 70.a, nota-se que para a condição passiva o CSM apresentou valores de  $A_V$  1,20 e 1,25 vezes superior que ao do DSM e OSM, respectivamente na condição “Pré-rad”. Aos aplicarmos as TIDs, ocorreu uma inversão nesta tendência, nas duas doses intermediárias, no entanto ao considerar a TID final o CSM apresentou um valor 1,07 vezes superior que ao do o DSM e OSM. Pela Figura 70.b, nota-se a maior variação do valor de  $A_V$  para o OSM com valores na faixa de 22%, ou seja, com uma maior alteração percentual observada pra o OSM e DSM. Este resultado pode ser justificado devido aos efeitos LCE e PAMDLE, combinados com o efeito DEPAMBBRE.

Ao analisar a condição de polarização de estado ligado pela Figura 70.c, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$ , considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,19 e 1,15 vezes superior que ao do CSM, respectivamente na condição “Pré-rad”. Aos aplicarmos a última TID (5 krad), o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,04 e 1,01 vezes superior que ao do CSM, resultados similares. Avaliando a Figura 70.d, verifica-se que o CSM variou mais que os DSM e OSM, na média de 16%, ressaltando a influência do efeito DEMPABBRE nos OSM e DSM.

Para a polarização de estado desligado, ao analisar a Figura 70.e, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$  considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese, as diferenças foram diminuindo ao aumentarmos as TIDs, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,08 vezes superior que ao do CSM, respectivamente. Aos aplicarmos a última TID (85 krad), o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,07 e 1,01 vezes superior que ao do CSM. Avaliando a Figura 70.e, verifica-se que o CSM variou mais que os DSM e OSM, na média de 17%, ressaltando a influência do efeito DEMPABBRE nos OSM e DSM.

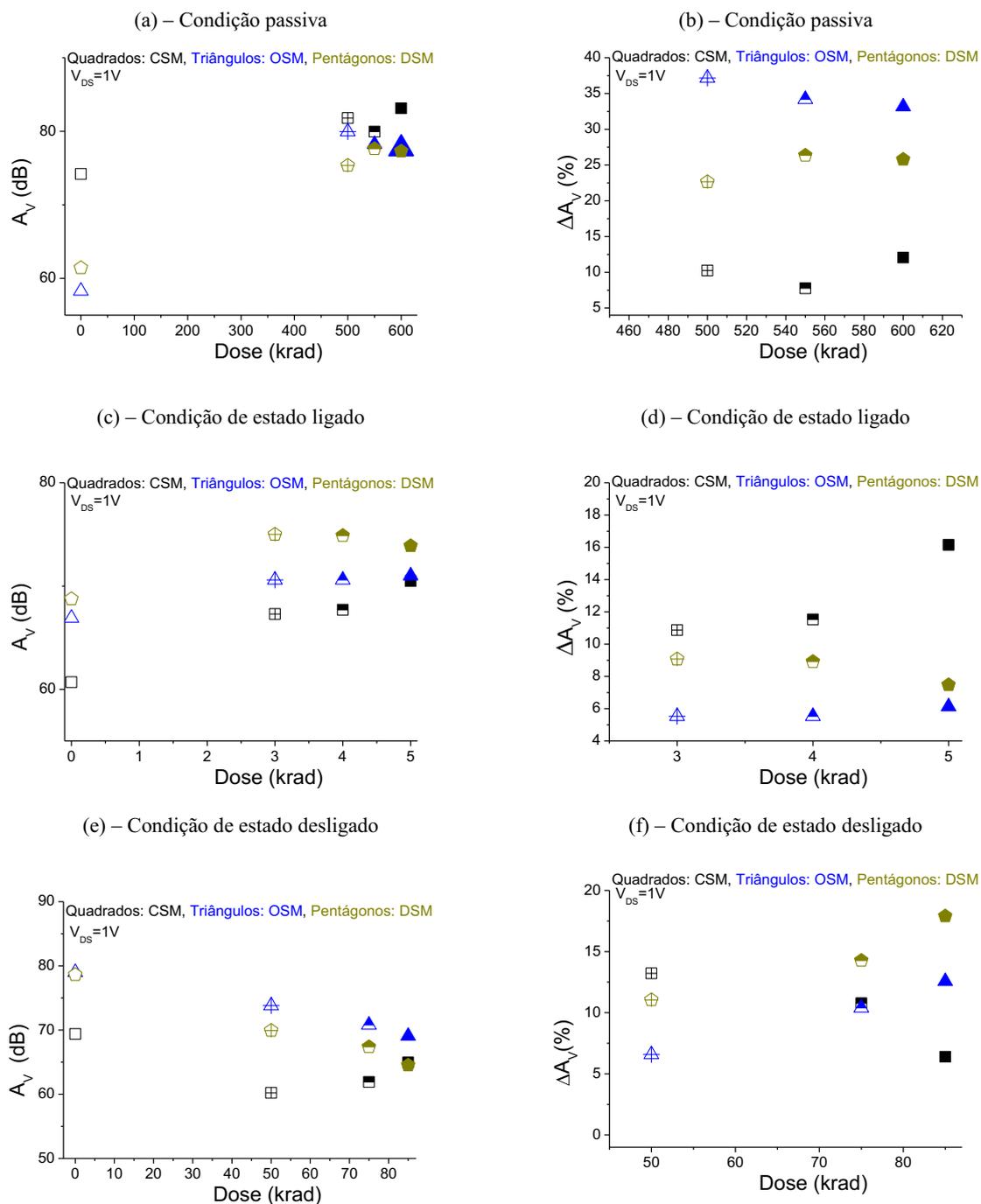
Com os resultados anteriores, conclui-se que o OSM e DSM apresentam valores de  $A_V$  superiores que aos do CSM para todas as condições de polarização, considerando a inversão moderada.

A Figura 71 apresenta os valores experimentais das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal, hexagonal e do seu equivalente implementado com geometria de porta retangular em função da TID aplicada considerando o regime de inversão fraca. A Figura 71.a indica os valores das  $A_V$  em função da dose aplicada, enquanto que a Figura 71.b indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a condição passiva, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 71.c indica os valores das  $A_V$  em

função da dose aplicada, enquanto que a Figura 71.d, indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. A Figura 71.e, indica os valores das  $A_V$  em função da dose aplicada, enquanto que a Figura 71.f, indica as variações percentuais das  $A_V$  de cada dose em relação aos valores obtidos na condição de “Pré-rad”, ambos os resultados considerando a polarização de estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Os símbolos e cores dos valores das  $A_V$  dos SOI nMOSFETs utilizados na Figura 71, são análogos as análises anteriores, correspondendo a dinâmica da Figura 70.

Figura 71 - Resultados experimentais do comportamento das  $A_V$  em função das TIDs de raios-X para os OSM, DSM e CSM, todos operando na inversão fraca, nas condições de polarizações passiva (valores absolutos, Fig. 71.a., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.b, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-9}$  A), de estado ligado, (valores absolutos, Fig. 71.c., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.d, para  $I_{DS}=1 \times 10^{-9}$  A) e de estado desligado, (valores absolutos, Fig. 71.e., e valores das variações percentuais em relação aos valores na condição de “Pré-rad”, Fig. 71.f, para  $I_{DS}= 1 \times 10^{-9}$  A)



Considerando a Figura 71.a, nota-se que para a condição passiva ou *floating* o CSM apresentou valores de  $A_V$  1,21 e 1,27 vezes superior que ao do DSM e OSM, respectivamente na condição “Pré-rad”. Ao aplicarmos as TIDs, o CSM apresentou valores de  $A_V$  1,08 e 1,7 vezes superior que ao do DSM e OSM, a variação é considerada baixa, onde podemos considerar resultados similares. Pela Figura 71.b, nota-se a maior variação do valor de  $A_V$  para o OSM com valores na faixa de 34%, ou seja, com uma maior alteração percentual observada pra o OSM e DSM. Este resultado pode ser justificado devido aos efeitos LCE e PAMDLE, combinados com o efeito DEPAMBBRE.

Ao analisar a condição de polarização de estado ligado, pela Figura 71.c, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$ , considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,13 e 1,10 vezes superior que ao do CSM, respectivamente. Aos aplicarmos a última TID (5 krad), o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,05 e 1,01 vezes superior que ao do CSM. Avaliando a Figura 71.d, verifica-se que o CSM variou mais que os DSM e OSM, na média de 12%, ressaltando a influência do efeito DEMPABBRE nos OSM e DSM.

Para a polarização de estado desligado, ao analisar a Figura 71.e, nota-se que os DSM e OSM apresentaram valores superiores de  $A_V$  considerando todas as TIDs avaliadas nesta tese, as diferenças foram diminuindo ao aumentarmos as TIDs, em que na condição “Pré-rad” o DSM e OSM apresentaram valores de  $A_V$  1,14 vezes superior que ao do CSM, respectivamente. Aos aplicarmos a última TID (85 krad), o OSM apresentou valores de  $A_V$  1,08 e vezes superior que ao do DSM e CSM. Avaliando a Figura 70.e, verifica-se que o DSM variou mais que os OSM e CSM, na média de 14%.

Com os resultados anteriores, conclui-se que o OSM e DSM apresentam valores de  $A_V$  superiores que aos do CSM para as condições de polarização de estado ligado e estado desligado.

## 6 QUADRO COMPARATIVO EXPERIMENTAL GERAL CONSIDERANDO OS EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X

As Tabelas 3 e 4 apresentam a comparação entre os valores dos principais parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal (OSM) com fator de corte “*c*” de 25% a ângulo  $\alpha$  de  $53,1^\circ$  (refere-se a topologia com o melhor comportamento elétrico) com o SOI nMOSFET com geometria de porta retangular (CSM) equivalente, na condição Pré-rad (valores sem a influência dos efeitos das radiações ionizantes de raios-X) e em função dos efeitos da TID, considerando os diferentes tipos de polarizações durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X como, passiva e TID igual a 600 krad, de estado ligado e TID igual a 5 krad e de estado desligado e TID de 85 krad. Desta maneira é possível evidenciar as vantagens e/ou desvantagens da utilização do OSM em comparação ao CSM

Os valores apresentados de cada parâmetro representam o valor relativo a dose total ionizante e a variação percentual entre os valores obtidos para a dose total acumulada e os valores obtidos na condição de Pré-rad, nas diferentes condições de polarizações.

Visando auxiliar a análise comparativa entre os parâmetros elétricos do OSM e o CSM, os primeiros valores abordados nas Tabelas 3 e 4, consideram os valores absolutos dos parâmetros elétricos na condição de Pré-rad (referente apenas ao CI utilizado para os estudos da polarização de estado ligado). Desta maneira pode-se constatar o desempenho elétrico dos SOI nMOSFETs antes e depois dos procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Considerando a transcondutância máxima ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$ ) a interpretação do resultado é conduzida da seguinte maneira: na segunda coluna (Comparação OSM x CSM PRÉ-RAD) temos o sinal de “+”, isto significa que o OSM obteve um resultado superior ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de  $154 \mu S$ ) que ao do CSM ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de  $66,5 \mu S$ ) na condição de Pré-rad. O sinal “-” refere-se a um resultado inferior do OSM e o sinal “0” refere-se a resultados similares. Analisando as próximas colunas (Comparação OSM x CSM PASSIVA) temos o sinal de “+”, isto significa que o OSM obteve um resultado superior ( $g_{m(MAX)}$  de  $157 \mu S$ ) que ao do CSM ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de  $67,8 \mu S$ ) na condição de polarização passiva. Analisando as próximas colunas (Comparação OSM x CSM ESTADO LIGADO) temos o sinal de “+”, isto significa que o OSM obteve um resultado superior ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de  $148 \mu S$ ) que ao do CSM ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de  $67,7 \mu S$ ) na condição de polarização de estado ligado (*on state*). Analisando as próximas colunas (Comparação OSM x CSM ESTADO DESLIGADO) temos o sinal de “+”, isto significa que o OSM obteve um resultado superior ( $g_{m(MAX)} / (W/L)$  de

161  $\mu\text{S}$ ) que ao do CSM ( $g_{m(\text{MAX})} / (W/L)$  de 68,5  $\mu\text{S}$ ) na condição de polarização de estado desligado (*off state*). Este resultado demonstra que o os efeitos LCE e PAMDLE permaneceram ativos após os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, mantendo os resultados obtidos na condição de “Pré-rad”, mesmo após as TIDs. Este resultado nos sugere uma vantagem elétrica ao OSM quando comparado ao seu equivalente convencional.

Tabela 3 - Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos parâmetros elétricos estudados dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e retangular equivalente nas condições de polarizações passiva (floating), de estado ligado e de estado desligado, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios X, parte 01

Parâmetro Elétrico	TID de 600 krad			TID de 5 krad			TID de 85 krad		
	Comparação OSM x CSM PASSIVA	Valores para OSM PASSIVA	Valores para CSM PASSIVA	Comparação OSM x CSM ESTADO LIGADO	Valores para OSM ESTADO LIGADO	Valores para CSM ESTADO LIGADO	Comparação OSM x CSM ESTADO DESLIGADO	Valores para OSM ESTADO DESLIGADO	Valores para CSM ESTADO DESLIGADO
$V_{TH}$ [V]		-0,79	-1,03		0,203	0,196		-0,641	-0,399
$\Delta V_{TH}$ [%]	+	404	489	+	14,3	24,6	+	1531	4090
SS [mV/dec.]		85,18	84,32		71,1	67,41		85,25	77,94
$\Delta SS$ [%]	-	34,5	26,8	0	2,26	3,25	-	31,6	14,44
$g_{m(MAX)}$ [ $\mu S$ ]	+	157	67,8	+	148	67,7	+	161	68,5
$\Delta g_{m(MAX)}$ [%]	+	3,9	5,1	+	3,9	18	0	6,62	5,54
$I_{ON/(W/L)}$ [ $\mu A$ ]	+	1310	630	+	946	437	+	1350	573
$\Delta I_{ON/(W/L)}$ [%]	+	44,4	63,2	0	1,97	0,65	0	35	28
$I_{OFF/(W/L)}$ [pA]	+	22,3	36,9	+	420	1490	-	307	112
$\Delta I_{OFF/(W/L)}$ [%]	+	66,5	381	-	432	140	-	980	201
$I_{LEAK/(W/L)}$ [pA]	+	24,6	93,7	-	88300	2310	-	2450	131
$\Delta I_{LEAK/(W/L)}$ [%]	+	63,4	70	-	704630	35	-	1945	208
$I_{ON}/I_{OFF}$	+	58,7*	17,1*	+	2,25*	0,29*	-	4,3*	5,1*
$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ [%]	-	330	66	-	81	59	-	87,4	57,5
$R_{ON}$ [K $\Omega$ ]	+	4,84	15,2	+	10	23,4	+	5	6,8
$\Delta R_{ON}$ [%]	-	67,62	58,6	0	10,6	13,34	+	43	66

\* $10^7$

Fonte: Autor

Tabela 4 - Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos parâmetros elétricos estudados dos SOI nMOSFETs com geometria de porta octogonal e retangular equivalente nas condições de polarizações passiva (floating), de estado ligado e de estado desligado, durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, parte 02

Parâmetro Elétrico	TID de 600 krad			TID de 5 krad			TID de 85 krad		
	Comparação OSM x CSM PASSIVA	Valores para OSM PASSIVA	Valores para CSM PASSIVA	Comparação OSM x CSM ESTADO LIGADO	Valores para OSM ESTADO LIGADO	Valores para CSM ESTADO LIGADO	Comparação OSM x CSM ESTADO DESLIGADO	Valores para OSM ESTADO DESLIGADO	Valores para CSM ESTADO DESLIGADO
$V_{EA}$ [V]	-	-78,86	-179	-	-26,5	-36,5	+	-38,25	-25,2
$\Delta V_{EA}$ [%]	-	350	80,7	+	69	283	+	38	58,3
$g_m/I_{DS}$ (todas regiões)	+	1,32x		+	1,08x		+	1,25x	
$g_m/I_{DS}$ [%]	+	65,67	70,78	-	56	45	0	76	79
$f_{TMAX}$ [MHz]	+	2,5	1,08	+	2,36	1,08	+	2,57	1,09
$\Delta f_{TMAX}$ [%]	0	3,79	5,24	0	3,85	1,76	0	6,98	5,47
$A_V$ [dB]fraca	0	77,64	83,47	0	71	70,5	0	69,07	64,95
$\Delta A_V$ [%] fraca	-	33	13	+	6,12	16,14	0	12,6	6,4
$A_V$ [dB]Mod	0	65,2	69	0	60,2	59,7	0	58,76	53,16
$\Delta A_V$ [%] Mod	-	21,32	2,86	-	8,53	24	0	12,51	15,21
$A_V$ [dB]forte	0	40,07	39,25	0	35,9	33,8	+	35,11	24
$\Delta A_V$ [%] forte	-	47	17	+	13,6	53,64	+	10,43	22,58

Fonte: Autor

A partir das Tabelas 3 e 4 dividiremos o comportamento do OSM em quatro vertentes, sendo a primeira referente aos dados da condição de Pré-rad, e as outras três referentes a condição de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes, sendo elas a passiva (*floating*), a de estado ligado (*on state*) e a de estado desligado (*off state*).

Na condição de Pré-rad, verifica-se que o OSM apresenta contribuições significativas ao considerar a corrente de estado ligado ( $I_{ON}/(W/L)$ ), resistência de estado ligado ( $R_{ON}$ ),  $g_m/I_{DS}$  em todas as regiões de inversão do canal (fraca moderada e forte).

Considerando-se a condição passiva (*floating*), nota-se que o OSM obteve resultados superiores ou similares que ao CSM em 92% dos parâmetros analisados (apenas com exceção da tensão Early), onde os efeitos LCD e PAMDLE permaneceram ativos mesmo após a TID, também ocorreu a desativação dos transistores parasitários na região de bico de pássaro, resultando em uma menor corrente de fuga e de estado desligado ao OSM. Vale ressaltar que mesmo o OSM obtendo valores inferiores de tensão Early, apresentou valores similares de ganho de tensão intrínseco que o CSM.

Ao considerar a condição de polarização de estado ligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, o OSM apresentou resultados superiores ou similares em 83% dos parâmetros elétricos analisados (com exceção da corrente de fuga e da tensão Early), onde mais uma vez nota-se a influência positiva do LCE e PAMDLE após a TID. Neste caso o armadilhamento de cargas positivas nos óxidos potencializados pelo campo elétrico vertical durante os procedimentos de radiação culminaram com uma maior corrente de fuga do OSM quando comparado com o CSM, isso se deve principalmente ao formato octogonal da região de porta que potencializaria os efeitos do bico de pássaro que de certa forma foram controlados pelo efeito DEPAMBBRE.

Para o OSM, a condição de polarização que potencializa os efeitos das radiações ionizantes é a de estado desligado, onde se beneficia o campo elétrico longitudinal. Esta polarização potencializa eletricamente os efeitos LCE e PAMDLE, que são originados devido ao maior campo elétrico longitudinal presente na estrutura octogonal. Nesta condição, o OSM apresentou comportamento superior ou similar em 75% dos parâmetros elétricos analisados (com exceção da corrente de fuga e de estado desligado e consequentemente da razão da corrente de estado ligado pela corrente de estado desligado).

Estes resultados nos sugerem uma maior tolerância aos efeitos dos raios-X para o dispositivo OSM quando comparado com o CSM independente da condição de polarização. E como era de se esperar, a condição de polarização de estado desligado (onde se impõe um

campo elétrico longitudinal durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X) é a que mais afeta o OSM já que o mesmo apresenta um maior campo elétrico longitudinal devido ao formato de porta octogonal, mas vale ressaltar que mesmo nesta condição, OSM, apresentou resultados superiores ao CSM equivalente.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho foca no estudo comparativo experimental do inovador SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal (OSM), sob os efeitos das radiações ionizantes de raios-X. A análise é realizada comparando-se o SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal, considerando os diferentes fatores de corte “c” (“c” igual a 25%, 50% e 75%) e ângulos  $\alpha$  ( $\alpha$  igual a 53,1°, 90° e 126,9°) com os devidos SOI nMOSFETs com geometria de porta hexagonal e retangular equivalentes.

A estrutura octogonal dá origem a três novos efeitos elétricos, dois deles, o LCE e o PAMDLE, observados pela primeira vez ao estudar o OSM em ambientes não agressivos (sem a influência das radiações ionizantes ou da temperatura). O terceiro efeito, o DEPAMBBRE foi identificado ao estudar os efeitos das radiações ionizantes de raios-X.

As correntes de fuga foram maiores nos OSMs nas condições de estado ligado e desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X. Esses resultados estão associados aos maiores perímetros das interfaces entre as regiões de dreno/fonte e canal e as maiores magnitudes dos campos elétricos longitudinais nas junções metalúrgicas dos OSMs (LCE e PAMDLE) em relação aqueles observados nos CSMs equivalentes.

Os resultados apresentados referem-se basicamente aos efeitos dos armadilhamentos de cargas positivas nos óxidos de porta, nas interfaces entre as regiões de óxido de porta e o filme de silício, no óxido enterrado, e das condições de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X.

Este trabalho realizou três diferentes estudos comparativos dos efeitos das radiações ionizante de raios-X referentes ao TID entre os OSMs e os CSMs equivalentes (condição de polarização passiva/floating, estado ligado e estado desligado durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X).

O OSM com fator de corte “c” igual a 25% e ângulo  $\alpha$  de 53,1° foi o que apresentou uma maior tolerância aos efeitos da TID em decorrência das radiações ionizantes de raios-X em relação aos equivalentes CSMs, considerando as mesmas condições de polarização e para as diferentes condições de polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, devido aos efeitos LCE, PAMDLE e DEMPAMBBRE presentes na estrutura dos OSMs.

As tolerâncias dos parâmetros elétricos em relação aos efeitos da TID dos OSMs em relação aos CSMs equivalentes, diminuem a medida que o campo elétrico longitudinal dos OSMs são intensificados em função das condições de polarização adotadas durante os

procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, sendo o pior caso a condição de polarização de estado desligado. Isto é justificado devido aos efeitos LCE e PAMDLE presentes nos OSMs. Mesmo assim o vale ressaltar que independente das condições de polarizações durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios-X, os OSMs apresentaram melhores desempenhos elétricos e tolerâncias que aquelas observadas nos CSMs equivalente. De forma quantitativa, na condição passiva, de estado ligado e de estado desligado, o OSM ( $c=25\%$  e  $\alpha=53,1^\circ$ ) apresentou um desempenho elétrico e uma tolerância aos efeitos do TID, em decorrência das radiações ionizantes de raios-X, 92%, 83% e 75%, respectivamente, maiores ou equivalentes do que aqueles observados do CSM equivalente.

Os resultados obtidos nesta tese sugerem a utilização do SOI nMOSFET com geometria de porta octogonal, principalmente para aplicações de radio frequência de CIs SOI CMOS analógicos, elementos chaveadores (baixo  $R_{ON}$ ) de conversores DC-DC, entre outros.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o comportamento elétrico do OSM em função de outras fontes de radiações ionizantes como, por exemplo, Cobalto 60;
- Estudar o comportamento do SOI pMOSFET com geometria de porta octogonal em função das radiações ionizantes.
- Projetar e estudar o comportamento elétrico de um UTBB SOI MOSFET com geometria de porta octogonal em função das radiações ionizantes;
- Conduzir um estudo para definir a condição de polarização durante os procedimentos de raios-X, que mais afeta a topologia octogonal.

## REFERÊNCIAS

- [1] **“CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres.”** [Online]. Available: <http://www.cbbers.inpe.br/index.php>. [Acessado em: 04-Out-2016].
- [2] **“Cientistas brasileiros testam resistência de satélite a radiação cósmica | GGN.”** [Online]. Available: <https://jornalggn.com.br/noticia/cientistas-brasileiros-testam-resistencia-de-satelite-a-radiacao-cosmica>. [Acessado em: 07-Out-2016].
- [3] **“Agência USP de Notícias: Cientistas testam dispositivo para satélite brasileiro.”** [Online]. Available: <http://www.usp.br/agen/?p=227603>. [Acessado em: 07-Out-2016].
- [4] BAGATIN, M.; GERARDIN, S.; INIEWSKI, K., **Ionizing Radiation Effects in Electronics from Memories to Imagers**, 1st ed. CRC Press, 2015.
- [5] MESSENGER, G. C. A., **“Summary Review of Displacement Damage from High Energy Radiation in Silicon Semiconductors and Semiconductors Device,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 39, no. 3, pp. 468–473, 1992.
- [6] MARTINO, J. A.; PAVANELO, M. A.; VERDONCK, B., **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- [7] COLINGE, J. P, **Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI**, 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] TAUR, Y; et al. **“CMOS Scaling into the Nanometer Regime,”** in IEEE, 1997, pp. 486–504.
- [9] SCHWANK, J. R; et al., **“Radiation effects in MOS oxides,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, no. 4, pp. 1833–1853, 2008.
- [10] BARNABY, H, J., **“Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 6, pp. 3103–3121, 2006.
- [11] ESQUEDA, I. S.; et al, **“Modeling the radiation response of fully-depleted SOI n-channel MOSFETs,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 56, no. 4, pp. 2247–2250, 2009.
- [12] CRISTOLOVEANU, S.; LI, S. S., **Electrical Characterization of Silicon-On-Insulator Materials and Devices**, 2nd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [13] MRSTIK, B. J.; et. al., **“The role of nanocluster in reducing holetrapping in ion implanted oxides,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, pp. 1947–53, 2003.
- [14] NISHIOKA, Y., **“Radiation Hardened micron and submicron MOSFETs contains fluorinated oxides,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 36, pp. 2116–23, 1989.
- [15] KRANTZ, R. J., SCARPULLA, J.; CABLE, J. S., **“Total dose-induced charge buildup in nitride-oxide MOS devide,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 38, pp. 1746–53, 1991.

- [16] SNOEYS, W. J., GUTIERREZ, T. A. P.; ANELLI, G. A., **“A New NMOS Layout Structure for Radiation Tolerance,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, no. 4, 2002.
- [17] VELAZCO, R., FOUILLAT, P.; REIS, R., **Radiation Effects on Embedded Systems.** Dordrecht: Springer, 2007.
- [18] FERLET-CAVROIS, V.; et. al., **“Total dose induced latch in short channel NMOS/SOI transistors, part 1,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 45, pp. 2458–66, 1998.
- [19] SCHWANK, J. R.; et. al., **“New insights into a fullydepleted SOI transistor response after total-dose irradiation,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, no. 3, pp. 604–612, 2000.
- [20] COLINGE, J. P., **FinFETS and Others multi gate transistors.** Massachussetts: Springer, 2008.
- [21] CHOI, Y. K., KING, T. J., HU, C., **“Nanoscale CMOS spacer FinFET for the terabit era,”** IEEE Electron Device Lett., vol. 23, pp. 25–7, 2002.
- [22] COLINGE, J. P., **“Multiple gate SOI MOSFETs,”** Solid State Electron., vol. 48, pp. 897–905, 2004.
- [23] GAILLARDIN, M.; et. al., **“Total ionizing dose effects mitigation strategy for nanoscaled FDSOI technologies,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 6, pp. 3023–3029, 2014.
- [24] \_\_\_\_\_, **“Radiation effects in advanced SOI devices: New insights into Total Ionizing Dose and Single-Event Effects,”** 2013 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectron. Technol. Unified Conf. S3S 2013, pp. 1–2, 2013.
- [25] MAHATME, N. N.; et. al., **“Impact of Back-Gate Bias and Device Geometry on the Total Ionizing Dose Response of 1 Transistor Floating Body RAMs,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 59, no. 6, pp. 2966–2973, 2012.
- [26] GAILLARDIN, M.; et. al., **“Impact of SOI Substrate on the Radiation Response of UltraThin Transistors Down to the 20 nm Node,”** Nucl. Sci. IEEE Trans., vol. 60, no. 4, pp. 2583–2589, 2013.
- [27] BINZAID, S.; ATTIA, J. O., **“Configurable Active-Region-Cutout-Transistor for Radiation Hardened Circuit Applications,”** in Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008.
- [28] ALEXANDER, D. R., **“Design issues for radiation tolerant microcircuits for space,”** in Nuclear and Space Radiation Effects, 1996.
- [29] SNOEYS, W. J., **“Layout Techniques to Enhance the Radiation Tolerance of Standard CMOS Technologies Demonstrated on a Pixel Detector Readout Chip,”** Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A, vol. 439, no. 2–3, pp. 349–360, 2000.

- [30] MAVIS, D.; ALEXANDER, D. R., “**Employing Radiation Hardness by Design Techniques with Commercial Integrated Circuits Processes,**” in 16th Digital Avionics Systems Conference, 1997.
- [31] LEE, M. S.; LEE, H. C., “**Dummy gate-assisted n-MOSFET layout for a radiation-tolerant integrated circuit,**” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 60, no. 4, pp. 3084–3091, 2013.
- [32] GIRALDO, A., PACCAGNELLA, A.; MINZONI, A., “**Aspect ratio calculation in n-channel MOSFET’s with a gate-enclosed,**” Solid State Electron., vol. 44, pp. 981–9, 2000.
- [33] SILVA, V. C. D., “**Estruturas cmos resistentes à radiação utilizando processos de fabricação convencionais,**” Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- [34] GIMENEZ, S. P., “**Diamond MOSFET: an innovative layout to improve performance of ICs,**” Solid State Electron., vol. 50, pp. 398–400, 2014.
- [35] GIMENEZ, S. P.; CORREIA, M. M.; NETO, E. D.; SILVA, C. R., “**An Innovative Ellipsoidal Layout Style to Further Boost the Electrical Performance of MOSFETs,**” IEEE Electron Device Lett., vol. 36, no. 7, pp. 705–707, 2015.
- [36] GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M.; SIMOEN, E.; CLAEYS, C., “**FISH SOI MOSFET: Modeling, Characterization and Its Application to Improve the Performance of Analog ICs,**” J. Electrochem. Soc., vol. 158, pp. 1258–1264, 2011.
- [37] FINO, L. N. S.; RENAUX, C.; FLANDRE, D.; GIMENEZ, S. P., “**Experimental study of the OCTO SOI nMOSFET and its application in analog integrated circuits,**” ECS Trans., vol. 49, pp. 527–34, 2012.
- [38] FINO, L. N. S.; et. al., “**Boosting the total ionizing dose tolerance of digital switches by using OCTO SOI MOSFET,**” Semicond. Sci. Technol., vol. 30, no. 10, p. 12, 2015.
- [39] FINO, L. N. S., “**ESTUDO EXPERIMENTAL DO OCTO SOI MOSFET PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE CIRCUITOS INTEGRADOS ANALÓGICOS E DIGITAIS,**” Centro Universitário da FEI, 2012.
- [40] FINO, L. N. S.; et. al, “**Improving the X-ray radiation tolerance of the analog ICs by using OCTO layout style,**” Chip Curitiba 2013 - SBMicro 2013 28th Symp. Microelectron. Technol. Devices, pp. 5–8, 2013.
- [41] WU, W, S. LAM; M. CHAN, “**A wide-band T/R switch using enhanced compact waffle MOSFETs,**” IEEE Microw. Wirel. Components Lett., vol. 16, no. 5, pp. 287–289, 2006.
- [42] NICOLAIDIS, M., “**Design for Soft Error Mitigation,**” IEEE Trans. Device Mater. Reliab., vol. 5, no. 3, pp. 405–418, 2005.

- [43] OMURA, Y., CRISTOLOVEANU, S., GÁMIZ, F.; NGUYEN, B.-Y., Eds., **Silicon-on-Insulator Technology and Device**, 19th ed. New Jersey: The Electrochemical Society, 2009.
- [44] COLINGE, J. P., **Physics on Semiconductor Device**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [45] RAHOU, F. Z.; GUEN-BOUAZZA, A.; RAHOU, M., “**using Silvaco Software,**” Glob. J. Reserches Eng. Electr. Electron. Eng., vol. 13, no. 1, 2013.
- [46] COLINGE, J. P, **FinFETs and Others MOSFET Multi-Gate Transistors**. Berlin: Springer, 2008.
- [47] GIMENEZ, S. P. ; ALATI, D. M., “**OCTO SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond to Be Used in the Analog Integrated Circuits,**” in EUROSOI, 2011, pp. 91–92.
- [48] GIMENEZ, S. P.; BELLODI, M., “**Diamond MOSFET: A New Drain and Source/Channel Interface Layout to Improve Drain Current,**” in EUROSOI, 2009.
- [49] GIMENEZ, S. P.; et. al., “**Compact diamond MOSFET model accounting for PAMDLE applicable down 150 nm node,**” Electron. Lett., vol. 50, no. 22, pp. 1618–1620, 2014.
- [50] GIMENEZ, S. P.; et. al., “**A compact diamond MOSFET model accounting for the PAMDLE applicable down the 150 nm node,**” Electron. Lett., vol. 1, no. 50, pp. 1618–20, 2014.
- [51] LIM, H. K.; FOSSUM, J. G., “**Threshold voltage of thin film Silicon on insulator (SOI),**” IEEE Trans. Electron Device, vol. 30, no. 10, pp. 1244–1451, 1983.
- [52] BALESTRA, F.; et. al., “**Double Gate Silicon on Insulator Transistor with Volume Inversion: A New Device With Greatly Enhanced Performance,**” IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-8, no. 9, pp. 410–412, 1987.
- [53] ORTIZ-CONDE, A.; et. al., “**Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods,**” Microelectron. Reliab., vol. 53, no. 1, pp. 90–104, 2013.
- [54] WONG, H. S.; WHITE, M. H.; KRUTSICK, T. J.; BOOTH, R. V., “**Modeling of Transconductance Degradation and extraction of threshold Voltage in Thin Oxide MOSFETs,**” Solid State Electron., vol. 30, no. 953, 1987.
- [55] LIOU, J. J.; ORTIZ-CONDE, A.; SANCHEZ, F. G., **Analysis and Design of Mosfets Modeling, Simulation and Parameter Extraction**. London: Academic Publishers, 1998.
- [56] SCHACHAM-DIAMAND, Y; et. al., **Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications**. New York: Springer, 2009.
- [57] KAESLIN, H., **Digital Integrated Circuit Design From VLSI Architectures to CMOS Fabrication**. New York: Cambridge Univerty, 2008.

- [58] RODDER, M., “**ON/OFF Current Ratio in p-Channel Poly-Si MOSFET’s,**” IEEE Electron Device Lett., vol. 11, no. 8, pp. 346–348, 1990.
- [59] TACHI, K., “**A study on Carrier Transport Properties of Vertically-Stacked Nenorire Transistors,**” Tokyo Institute of Technology, 2011.
- [60] BALESTRA, F., “**New Semiconductor Devices,**” Acta Physyca Pol., vol. 114, no. 5, pp. 945–974, 2008.
- [61] LI, Y.; CHOU, H.-M., “**Comparative Study of Electrical Characteristic on Sub-10-nm,**” IEEE Trans. Nanotechnol., vol. 4, no. 5, pp. 645–647, 2005.
- [62] VASHCHENKO, V.; SHIBKOV, A., **ESD Design for Analog Circuits.** New York: Springer, 2011.
- [63] RAZAVI, B., **Design of Analog CMOS Integrated Circuits.** Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [64] RASHID, M. H., **Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [65] SEDRA, A. S.; SMITH, C., **Microeletrônica.** São Paulo: MAKRON Books, 2000.
- [66] SILVEIRA, F.; FLANDRE, D.; JESPERS, P. G. A., “**A gm/ID based methodology for the design of CMOS analog circuits and its application to the synthesis of a silicon-insulator micropower OTA,**” Solid State Circuits, vol. 31, pp. 1314–1319, 1996.
- [67] BINKLEY, D. M., **Tradeoffs and Optimization in Analog CMOS Design.** England: John Wiley & Sons, 2008.
- [68] SAKURAI, S.; ISMAEL, M., **Low Voltage CMOS Operational Amplifiers Theory, Design and Implementation.** London: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [69] LIN, M. B., **Introduction to VLSI Systems. A Logic, Circuit, and System Perspective,** 2nd ed. USA: CRC Press, 2012.
- [70] FLANDRE, D.; RASKIN, J. P.; VANHOENACKER-JANVIER, D., “**SOI CMOS Transistors for RF and Microwave Applications,**” Int. J. High Speed Electron. Syst., vol. 11, no. 4, pp. 1159–1248, 2001.
- [71] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A., **Física IV: Ótica e Física Moderna,** 10th ed. Pearson Education, 2004.
- [72] HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L., “**Handbook of Radiation Effects,**” New York, 2003.
- [73] O’GORMAN, T. J., “**The effect of cosmic rays on the soft error rate of a DRAM at ground level,**” IEEE Trans. Electron Device, vol. 41, no. 4, pp. 553–557, 1994.
- [74] PROFIO, A. E., **Radiation Shielding and Dosimetry.** New York: Wiley, 1979.

- [75] CLAEYS, C.; SIMOEN, E., **Radiation effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices**, 1st ed. Berlin: Springer, 2002.
- [76] DODD, P. E., “**Basic Mechanisms for Single Event Effects**,” IEEE NSREC Short Course, vol. 1, no. 1, 1999.
- [77] CRABB, R. L., “**Solar Cell Radiation Damage**,” Radiat. Phys. Chem., 1994.
- [78] RODITI, I., **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.
- [79] STASSINOPOULOS, E.; RAYMOND, J., “**The Space Radiation Environment for Electronics**,” in IEEE, 1988, pp. 1423–1442.
- [80] SROUR, J. R.; MARSHALL, C. J.; MARSHALL, P. W., “**Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, no. 3, pp. 653–670, 2003.
- [81] WANG, F.; AGRAWAL, V. D., “**Single Event Upset: an embedded tutorial**,” in IEEE International Conference on VLSI Design, 2008, pp. 429–434.
- [82] GUENZER, C. S.; WOLICKI, E. A.; ALLAS, R. G., “**Single Event Upset of Dynamic RMs by Neutrons and Protons**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 26, no. 6, pp. 5048–5052, 1979.
- [83] BAZE, M. P.; BUCHNER, S. P., “**Attenuation of Single Event Induced Pulses in CMOS Combinational Logic**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 44, no. 6, pp. 2217–2223, 1997.
- [84] TURFLINGER, T. L., “**Single Event Effects in Analog and Mixed signal integrated circuits**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 43, no. 2, pp. 594–602, 1996.
- [85] SEXTON, F. W.; et. al., “**Single Event Gate Rupture in Thin Gate Oxides**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 44, no. 6, pp. 2345–2352, 1997.
- [86] SCHWANK, J. R., “**Basic Mechanisms of Radiation Effects in the Natural Space Environment**,” IEEE NSREC Short Course, 1994.
- [87] OLDHAM, T. R.; MCLEAN, F. B., “**Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, pp. 483–499, 2003.
- [88] MCLEAN, F. B.; OLDHAM, T. R., “**Basic Mechanisms of Radiation Effects in Electronic Materials and Devices**,” 1986.
- [89] SNOW, E. H.; GROVE, S.; FITZGERALD, D. J., “**Effects of Ionizing Radiation on Oxidized Silicon Surfaces and Planar Devices**,” Proc. IEEE, vol. 55, no. 7, pp. 1168–1185, 1967.
- [90] TUROWSKI, M.; RAMAN, A.; SCHRIMPF, R. D., “**Non unifor Total-Dose-Induced Charge Distribution in Shallow-Trench Isolation Oxides**,” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, no. 6, pp. 3166–3171, 2004.

- [91] SCHWANK, J. R.; SHANEYFELT, M. R.; DODD, P. E., **“Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronics Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance,”** Novo Mexico, 2008.
- [92] GRIFFONI, A.; et. al., **“A Statistical Approach to Microdose Induced Degradation in FinFET Devices,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 56, no. 6, pp. 3285–3292, 2009.
- [93] ADELL, P. C.; SCHEICK, L. Z., **“Radiation Effects in Power Systems: A Review,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 60, no. 3, pp. 1929–1952, 2013.
- [94] KILCHYTSKA, V.; et. al., **“Total-Dose Effects Caused by High Energy Neutrons and Y-Rays in Multiple-Gate FETs,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 57, no. 4, pp. 1764–1770, 2010.
- [95] SEXTON, F. W.; SCHWANK, J. R., **“Correlation of Radiation Effects in Transistors and Integrated Circuits,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 32, no. 6, pp. 3975–3981, 1985.
- [96] LIU, Z; et. al., **“Total Ionizing Dose Enhanced DIBL Effect,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 58, no. 3, pp. 1324–1331, 2011.
- [97] FERLET-CAVROIS, V.; et. al., **“Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, no. 6 III, pp. 2183–2188, 2000.
- [98] SCHWANK, J. R.; et. al., **“Correlation Between Co-60 and x-ray radiation-induced charge buildup in silicon-on-insulator buried oxides,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47, no. 6, pp. 2175–2182, 2000.
- [99] **X. Diffractometer**, “XRD-7000 XRD-7000.”
- [100] EL MAMOUNI, F., **“New Insights Into the Total Dose Response of Fully Depleted Planar and FINFET SOI Transistors,”** 2009.
- [101] FLAMENT, O.; TORRES, A.; FERLET-CAVROI, V., **“Bias Dependence of FD Transistor Response to Total Dose Irradiation,”** IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 50, no. 6 I, pp. 2316–2321, 2003.

## APÊNDICE A –PUBLICAÇÕES

Neste apêndice constam os artigos desenvolvidos durante o doutorado.

### Artigos publicados

1. **FINO, L. N. S.** ; Enrico Davini Neto ; Marcilei Aparecida Guazzelli da Silveira ; RENAUX, CHRISTIAN ; FLANDRE, Denis ; GIMENEZ, S. P. . Boosting the total ionizing dose tolerance of digital switches by using OCTO SOI MOSFET. Semiconductor Science and Technology (Print), v. 30, p. 105024-12p, 2015.
2. **FINO, L. N. S.** ; Marcilei Aparecida Guazzelli da Silveira ; Christian Renaux ; FLANDRE, Denis ; GIMENEZ, S. P. . The Influence of Back Gate Bias on the OCTO SOI MOSFETs Response to X-ray Radiation. JICS. Journal of Integrated Circuits and Systems (Ed. Português), v. 10, p. 43-48, 2015.
3. **FINO, L. N. S.**; SILVEIRA, M. A. G. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. . OCTO Layout Variations as an Alternative to Mitigate TID Effects. In: X Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2015, São Bernardo do Campo. X Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2015. v. 1. p. 1-2.
4. **FINO, L. N. S.** ; Marcilei Aparecida Guazzelli da Silveira ; Christian Renaux ; FLANDRE, Denis ; GIMENEZ, S. P. . Boosting the Radiation Hardness and Higher Reestablishing Pre-Rad Conditions by Using OCTO Layout Style for MOSFETs. In: SBMICRO 2014, 2014, Aracaju. SBMICRO 2014 - 29th Symposium on Microelectronics Technology and Devices. São Paulo: SBMICRO, 2014. v. 1. p. 1-8
5. **FINO, L. N. S.** ; SILVEIRA, M. A. G. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. . OCTO SOI MOSFET as Application of Hardness-By-Design to Improve X-ray Radiation Tolerance. In: IX Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2014, São Paulo. IX Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2014.v. 1. p. 1-2.
6. **FINO, L. N. S.**; SOUZA, R.N. . The Use of Advanced Silicon CMOS Transistor as Hardness-By-Design Technique to Improve Radiation Tolerance for Integrated Circuits Dedicated to Space Applications. SAE Technical Paper Series, v. 1, p. 1-6, 2014.
7. **FINO, L. N. S.**; SOUZA, R.N. Improving the ESD Performance and Its Effects in CMOS - SOI/BULK Technologies and Automotive Electronic Components. SAE Technical Paper Series, v. 1, p. 1-6, 2014
8. SOUZA, R.N. ; **FINO, L. N. S.** Understanding how to Mitigate Failures Induced by Atmospheric Radiation with New Transistors Layouts for Processors. SAE Technical Paper Series, v. 1, p. 1-6, 2014
9. **FINO, L. N. S.** ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. Improving Unit Voltage Gain Frequency of Integrated Circuits by Using OCTO Layout Style. In: EUROSIOI 2013: Ninth Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits, 2013, Paris, 2013, Paris. EUROSIOI, 2013. v. 1. p. 1-1.

10. **FINO, L. N. S.** ; SILVEIRA, M. M. A. G. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. . Comparative Experimental Study of X-Ray Radiation Effects in the Threshold Voltage between the OCTO and Conventional SOI nMOSFETs. In: VIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology, 2013, Campinas. VIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology. Campinas, 2013. v. 1. p. 1-2.
11. **FINO, L. N. S.** ; SILVEIRA, M. M. A. G. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. . Improving the X-Ray Radiation Tolerance of the Analog ICs by Using OCTO Layout Style. In: 28th Symposium on Microelectronics Technology and Device, 2013, Curitiba. SBMICRO 2013. Curitiba, 2013. v. 1. p. 1-4.
12. **FINO, L. N. S.** ; SILVEIRA, M. M. A. G. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; Gimenez, S. P. . Total Ionizing Dose Effects on the Digital Performance of Irradiated OCTO and Conventional Fully Depleted SOI MOSFET. In: Radiation Effects on Components and Systems 2013, 2013, Londres. RADECS 2013. Londres, 2013. v. 1. p. 1-4.
13. **FINO, L. N. S.** ; Gimenez, S. P. . Back-Gate Voltage Influence on the Threshold Voltage of Irradiated OCTO SOI nMOSFET. In: III Simpósio de Pesquisa do Grande ABC, 2013, São Bernardo do Campo. Back-Gate Voltage Influence on the Threshold Voltage of Irradiated OCTO SOI nMOSFET, 2013. v. 1. p. 1-2.