CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
WILLIAM SOUZA DA CRUZ

ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X EM MOSFETS COM ESTILO DE LEIAUTE DE PORTA OCTOGONAL COM TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE CIS CMOS DE SILÍCIO-GERMÂNIO DE 130 NM

São Bernardo do Campo
2019

WILLIAM SOUZA DA CRUZ

ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES DE RAIOS-X EM MOSFETS COM ESTILO DE LEIAUTE DE PORTA OCTOGONAL COM TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE CIS CMOS DE SILÍCIO-GERMÂNIO DE 130 NM

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

São Bernardo do Campo

2019

Souza da Cruz, William.
Estudo experimental da influência das radiações ionizantes de raios-X em MOSFETs com estilo de leiaute de porta octogonal com tecnologia de fabricação de CIs CMOS de silício-germânio de 130 nm / William Souza da Cruz. São Bernardo do Campo, 2019.
117 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez.

1. Leiaute de porta octogonal para MOSFETs. 2. Efeitos da dose total ionizante. 3. DEPAMBBRE. I. Pinillos Gimenez, Salvador, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Mestrado

PGE-10

Aluno: William Souza da Cruz **Matrícula:** 117123-0

Título do Trabalho: Estudo experimental da influência das radiações ionizantes de raios-x em mosfets com estilo de leiaute de porta octogonal com tecnologia de fabricação de CIS CMOS de silício-germânio de 130nm.

Área de Concentração: Nanoeletrônica e Circuitos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Data da realização da defesa: 27/02/2019

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez	Ass.:
Prof. Dr. Victor Sonnenberg	Ass.:
Profª Drª Carmen Cecília Bueno	Ass.:

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, aos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus amigos mais próximos, entre familiares e pessoas que cruzaram em minha vida, por todo o apoio dado em todos os desafios que enfrentei.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Salvador Pinillos Gimenez, pelos "puxões de orelha" e importantes ensinamentos.

Agradeço aos professores da Pós-Graduação de Engenharia Elétrica do Centro Universitário da FEI, que em sua maioria demonstraram máxima vontade em ensinar o que sabem, se mostrando sempre muito disponíveis em ajudar no que pudessem.

Agradeço em especial minha mãe, Ana Regina Oliveira de Souza, e meu pai, Vital Magela da Cruz, que fizeram o possível e o impossível para que eu pudesse chegar até onde cheguei.

Agradeço à minha tia e madrinha, Rita de Cássia de Souza Lima, por ser mais que um anjo em minha vida, estando presente desde os meus primeiros momentos de vida.

Agradeço à minha caçula, Alessandra Souza da Cruz, que teve de ouvir sobre meus estudos e até me ajudar na finalização desse ciclo tão importante.

Agradeço também à Nicole, minha pequena, por seguir comigo nesses últimos dois anos oferecendo sempre apoio e me mostrando que tudo ia dar certo.

Agradeço aos amigos, Ana Paula, Anderson Cruz, Beatriz, Danilo Polidoro, Elaine, Isabelle, Julio Cesar, Laísa, Lucas Camargo, Lucas Perez, Marco Andre, Mayara, Roberto Carlos, Roberto Gonçalves e Tainan por sempre me inspirarem a ser melhor e buscar o melhor.

Por fim, agradeço aos meus avós, Josefina Oliveira de Souza e Augusto Jorge de Souza, por terem formado uma família com tanto amor. A saudade de vocês faz morada aqui, mas também me faz lembrar da existência do amor e de como ele pode ser puro e sincero.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Os professores abrem a porta, mas você deve entrar por você mesmo.”
(Provérbio Chinês)

RESUMO

A aplicação do estilo de leiaute de porta octogonal é uma alternativa para melhorar o desempenho elétrico dos MOSFETs e aumentar a tolerância destes dispositivos às radiações ionizantes, principalmente pelos novos efeitos LCE, PAMDLE e DEPAMBBRE presentes na sua estrutura. Portanto, a aplicação deste leiaute pode melhorar o desempenho dos CIs analógicos e digitais, sem causar qualquer custo adicional para o atual, sofisticado e estabelecido processo de fabricação planar de CIs CMOS. Conhecido como MOSFET Octo (OM), esse MOSFET apresenta um melhor desempenho elétrico que os MOSFETs convencionais (CM) de leiaute de porta retangular, e se mostra uma ótima alternativa para aumentar a tolerância às radiações ionizantes. Este trabalho apresenta estudos comparativos experimentais, com dados do desempenho elétrico pré e pós-irradiação para o OM e o CM (considerando-se mesma área de porta, largura de canal e condições de polarização). O OM apresentou melhor desempenho elétrico e melhor tolerância às radiações ionizantes por raios-X que o do CM (considerando as mesmas condições de polarização e de exposição às radiações ionizantes). Quando comparado ao CM com mesmas área de porta, largura de canal e condições de polarização, o OM apresentou por exemplo, uma corrente de dreno de estado ligado 138% maior, uma corrente de dreno de estado desligado 9% menor, e uma resistência de estado ligado 48% menor. No que diz respeito às variações das características elétricas por efeito da TID, o OM também apresentou melhores resultados em comparação aos do CM, considerando as mesmas condições de polarização e de exposição às radiações ionizantes. A inclinação de sublimiar variou cerca de 2 vezes menos no OM no modo sem polarização. A I_{OFF} variou cerca de 6,5 vezes menos no OM no modo de polarização *ON*. A I_{LEAK} variou cerca de 3,5 vezes menos no OM no modo de polarização *OFF*. Os estudos dos efeitos da TID nos MOSFETs foram realizados para uma TID da ordem de Mrad no estudo quando os dispositivos estão sem polarização (em *floating*) e da ordem de krad nos estudos dos dispositivos polarizados nos modos *ON*, *OFF* e *Analog*. Os resultados deste estudo indicam o MOSFET Octo como uma alternativa para aplicações espaciais, médicas e nucleares de CIs CMOS.

Palavras-chave: Leiaute de porta octogonal para MOSFETs. Efeitos da dose total ionizante. DEPAMBBRE.

ABSTRACT

The application of the octogonal gate layout style is an alternative to improve the electrical performance of MOSFETs and increase the tolerance of these devices to ionizing radiation, mainly by the new effects LCE, PAMDLE and DEPAMBBRE present in its structure. Therefore, the application of this layout can improve the performance of analog and digital integrated circuits, without causing any additional cost to the current, sophisticated and established manufacturing processes of ICs CMOS. Known as MOSFET Octo (OM), this MOSFET presents a better electrical performance than the one found in the conventional (rectangular gate layout) MOSFETs (CM), and it is a great alternative to increase tolerance to ionizing radiations. This work presents experimental comparative studies, presenting electrical performance data before and after X-rays irradiation for OM and CM, considering the same gate area, channel widht and bias conditions. The OM presented better electrical performance and better tolerance to X-rays ionizing radiations than CM (considering the same bias conditions and same exposure to ionizing radiation conditions). When compared to the CM with the same gate area, channel width and bias conditions, the OM presented, for example, 138% higher on-state drain current, 9% lower off-state drain current and 48% lower on-state resistance. With regard to the variations of the electrical characteristics due to TID, the OM presented better results compared to the CM, considering the same bias conditions and exposure to ionizing radiation. The slope of the subthreshold varied about 2 times less in the OM in floating mode. The I_{OFF} varied about 6,5 times less in the OM in ON bias mode. The I_{LEAK} varied about 3,5 times less in the OM in OFF bias mode. The studies of the effects of TID on MOSFETs were performed for a TID of the order of Mrad in the study when the devices were non-biased (in floating) and of the order of krad in the studies of biased devices in ON, OFF and Analog modes. The results of this study indicate the Octo MOSFET as an alternative device for space, medical and nuclear CMOS ICs applications.

Keywords: Octogonal gate layout for MOSFETs. Total ionizing dose effects. DEPAMBBRE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Números de transistores por microprocessador ao longo dos anos 25
Figura 2 – Seção transversal de um nMOSFET Convencional (Bulk) 26
Figura 3 - Perfis de carga para um nMOSFET nas condições de polarização de acumulação (a), depleção (b) e inversão (c) 27
Figura 4 - Perfis de carga para um nMOSFET nas condições de polarização das regiões triodo (a), transição triodo/saturação (b) e saturação (c) 28
Figura 5 – Exemplo de uma curva característica de I_{DS} em função de V_{GS} de um nMOSFET 30
Figura 6 – Exemplo de uma curva característica de I_{DS} em função de V_{DS} de um nMOSFET 31
Figura 7 – Exemplo de uma curva da segunda derivada de I_{DS} em função de V_{GS} com V_{DS} = 50 mV, utilizada para obter o V_{TH} de um nMOSFET 32
Figura 8 – Exemplo de uma curva de I_{DS}, em escala logarítmica, em função de V_{GS} para um V_{DS} de 100 mV, com indicação da obtenção de S 33
Figura 9 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para V_{GT} = 385 mV, com indicação da obtenção de I_{DSsat} 34
Figura 10 – Exemplo de uma curva de I_{DS}, em escala logarítmica, em função de V_{GS} para um V_{DS} = 400 mV, com as indicações das obtenções de I_{ON}, I_{OFF} e I_{LEAK} 35
Figura 11 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para um V_{GT} = 385 mV, ilustrando a obtenção de R_{on} 36
Figura 12 – Exemplo de uma curva de g_m em função de V_{GS} para um V_{DS} = 100 mV, com indicação do ponto de $g_{mmáx}$ 37
Figura 13 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para um V_{GT} = 100 mV, com indicação da obtenção da V_{EA} 38
Figura 14 – Exemplo de uma curva de gm/I_{DS} em função de I_{DS}/(W/L) para um V_{DS} = 700 mV, com indicação dos diferentes regimes de inversão 39
Figura 15 – Representação gráfica do efeito fotoelétrico 43
Figura 16 – Representação gráfica do efeito Compton 43
Figura 17 – Representação gráfica da geração do par elétron-pósitron 44
Figura 18 - Esquemático de um nMOSFET com sua operação normal e após a irradiação 45
Figura 19 – Estruturas LOCOS e STI de um nMOSFETs indicando as regiões de bico de pássaro e o circuito elétrico equivalente entre o MOSFET principal e os transistores parasitários 46

Figura 20 - Curvas de I_{DS} em função de V_{GS}, indicando a variação da V_{TH} em MOSFETs submetidos às radiações ionizantes 48
Figura 21 - Curvas de I_{DS} em função de V_{GS}, indicando o aumento de S pelo efeito do aprisionamento de cargas na interface Si/SiO_2 do MOSFET 49
Figura 22 - Vista superior de um MOSFET do tipo Diamante com suas dimensões de interesse 51
Figura 23 - Vistas superiores dos MOSFETs Diamante e seu equivalente convencional, com representação das componentes de seus campos elétricos longitudinais num ponto P 52
Figura 24 - Representação do MOSFET Diamante por infinitesimais MOSFETs convencionais conectados em paralelo 53
Figura 25 - Representação do MOSFET Diamante e suas linhas de campo elétrico longitudinal ao longo da estrutura 55
Figura 26 - Vista superior do MOSFET Octo com suas dimensões de interesse e representação das componentes do seu campo elétrico longitudinal 56
Figura 27 - O campo elétrico longitudinal e o potencial elétrico (em cores) ao longo da região de canal do MOSFET Octo, obtido através de uma simulação numérica 3D 58
Figura 28 - Representação da porta de geometria octogonal com indicação das dimensões importantes 59
Figura 29 - Leiaute do chip utilizado fabricado com tecnologia de fabricação de CIs CMOS de Silício-Germânio da GlobalFoundries de 130 nm 64
Figura 30 - MOSFETs utilizados no estudo experimental com indicação dos terminais de porta, dreno e fonte 65
Figura 31 - Esquema de ligações do chip no encapsulamento 67
Figura 32 – Foto do sistema de caracterização elétrica de dispositivos semicondutores Keithley 4200-SCS 68
Figura 33 – Foto do Keithley 2636B 69
Figura 34 – Foto do difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100 69
Figura 35 - Fotos do microprovador Cascade Microtech com um chip utilizado para a caracterização elétrica dos MOSFETs: (a) Sistema completo e (b) ampliação do local que acondiciona o chip 71
Figura 36 – Conjunto utilizado para a caracterização elétrica (Keithley 2636B e Keithley LR:8028) dos MOSFETs estudados 72
Figura 37 - Representação dos modos de polarização dos MOSFETs a serem estudados durante a realização do processo de radiação de raios-X. ON (a), OFF (b), Analog (c) 75

Figura 38 - Curva de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{DS} de 50 mV 78
Figura 39 - Curva de I_{DS}/(W/L), em escala logarítmica, em função de V_{GS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{DS} de 400 mV 79
Figura 40 - Curva de I_{DS}/(W/L) em função de V_{DS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{GT} de 385 mV 80
Figura 41 – Curva da variação relativa de V_{TH} (ΔV_{TH}) em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 86
Figura 42 – Curva da variação relativa de S em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 87
Figura 43 – Curva da variação relativa de $g_{mmáx}$ em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 88
Figura 44 – Curva da variação relativa de I_{ON} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 89
Figura 45 – Curva da variação relativa de I_{OFF} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 90
Figura 46 - Variação relativa de I_{LEAK} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu equivalente convencional 91
Figura 47 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 4,5 Mrad (sem polarização) e V_{DS} = 50 mV 92
Figura 48 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{DS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 4,5 Mrad (sem polarização) e V_{GS} = 400 mV 92
Figura 49 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 40 krad (polarização do modo OFF) e V_{DS} = 100 mV 101
Figura 50 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 200 krad (polarização do modo Analog) e V_{DS} = 100 mV 105
Figura 51 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 300 krad (polarização do modo ON) e V_{DS} = 100 mV 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos MOSFETs de SiGe utilizados nos estudos experimentais 66
Tabela 2 - Dados sobre os procedimentos de irradiação dos chips 74
Tabela 3 – Parâmetros elétricos e figuras de mérito dos MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente 81
Tabela 4 – Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM sem polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 4,5 Mrad 93
Tabela 5 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo OFF durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 40 krad 98
Tabela 6 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo Analog durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 200 krad 102
Tabela 7 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo ON durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 200 krad 106
Tabela 8 - Resumo dos estudos comparativos realizados entre o OM e o CM 110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Efeito de canto (*Corner Effect*)
CI	Circuito Integrado
CITAR	Circuitos Integrados Tolerantes à Radiação
CM	MOSFET do tipo convencional (leiaute de porta retangular)
CMOS	Metal-óxido-semicondutor complementar (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*)
CTI	Centro de Tecnologia da Informação
DEPAMBBRE	Efeito da desativação dos MOSFETs parasitários das regiões de bico de pássaro (*Deactivation of the Parasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect*)
DLECRE	Efeito da redução da corrente de fuga (*Drain Leakage Current Reduction Effect*)
DM	MOSFET do tipo Diamante (leiaute de porta hexagonal)
ECS	*The Electrochemical Society*
ELT	*Enclosed Layout Transistors*
ESD	Cargas eletrostáticas (*Electrostatic Discharge*)
FEI	Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros
FET	Transistor de efeito de campo (*Field Effect Transistor*)
IBM	*International Business Machines*
LCE	Efeito de canto longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*)
LOCOS	Oxidação local do sílicio (*LOCal Oxidation of Silicon*)
LERI	Laboratório de Efeitos da Radiação Ionizante
MEP	Programa educacional MOSIS (*MOSIS Educational Program*)
MIL-STD	*Military Test Guideline*
MOS	Metal óxido semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor*)
MOSFET	Transistor de efeito de campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*)

OM	MOSFET do tipo Octo (leiaute de porta octogonal)
PAMDLE	Efeito das conexões paralelas de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*Parallel connections of MOSFETs with Different channel Lenghts Effect*)
RF	Rádio frequência
SEE	Efeito por evento único (*Single Event Effect*)
SOI	Silício sobre isolante (*Silicon On Insulator*)
STI	Isolamento por trincheira (*Shallow Trench Isolation*)
ULSI	Escala de integração ultra grande (*Ultra Large Scale Integration*)
TID	Dose total ionizante (*Total Ionizing Dose*)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_G	Área da porta do MOSFET [m²]
A_V	Ganho de tensão intrínseco do MOSFET [V/V]
BV_{DS}	Tensão de ruptura entre dreno e fonte [V]
c	Fator de corte do MOSFET do tipo Octo [%]
C_L	Capacitância de carga [F]
DP	Desvio padrão
f_T	Frequência de ganho de tensão unitário [Hz]
g_m	Transcondutância [S]
$g_{mmáx}$	Máxima transcondutância [S]
I_{DS}	Corrente entre dreno e fonte [A]
I_{DSsat}	Corrente de dreno de saturação [A]
I_{LEAK}	Corrente de fuga [A]
I_{OFF}	Corrente de dreno de estado desligado [A]
I_{ON}	Corrente de dreno de estado ligado [A]
k	Constante dielétrica
L	Comprimento do canal do MOSFET [m]
L_{eff}	Comprimento efetivo do canal do MOSFET [m]
L_{eff_DM}	Comprimento efetivo do canal para o MOSFET do tipo Diamante [m]
L_{eff_OM}	Comprimento efetivo do canal para o MOSFET do tipo Octo [m]
P_{on}	Potência dissipada de estado ligado [W]
R_{on}	Resistência de estado ligado [Ω]
S	Inclinação de sublimiar [mV/década]
t_{ox}	Espessura do óxido de porta [m]
V_{DD}	Tensão de alimentação [V]
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte [V]
V_{DSsat}	Tensão de saturação do MOSFET [V]
V_{EA}	Tensão Early [V]
V_{FB}	Tensão de faixa plana [V]
V_G	Tensão aplicada à porta [V]
V_{GS}	Tensão entre porta e fonte [V]
V_{GT}	Sobretensão de porta [V]
V_{TH}	Tensão de limiar [V]

W	Largura do canal do MOSFET [m]
α	Ângulo de abertura das geometrias hexagonal e octogonal de porta de um MOSFET do tipo Diamante e do tipo Octo, respectivamente [°]
$\Delta g_{mmáx}$	Variação da máxima transcondutância em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔI_{DSsat}	Variação da corrente de dreno de saturação em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔV_{TH}	Variação da tensão de limiar em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔI_{LEAK}	Variação da corrente de fuga em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔI_{OFF}	Variação da corrente de dreno de estado desligado em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔI_{ON}	Variação da corrente de dreno de estado ligado em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ΔS	Variação da inclinação de sublimiar em relação ao seu valor antes da irradiação [%]
ε	Campo elétrico longitudinal [V/m]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

1.1 MOTIVAÇÃO 22

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS 24

2.1 TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO METAL-ÓXIDO-SEMICONDUTOR 24

2.1.1 Estrutura e funcionamento do MOSFET do tipo enriquecimento 25

2.1.2 Curvas características do nMOSFET 29

2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS ELÉTRICOS E FIGURAS DE MÉRITO ANALÓGICOS E DIGITAIS DE UM MOSFET 31

2.2.1 Tensão de limiar (V_{TH}) 31

2.2.2 Inclinação de sublimiar (S) 32

2.2.3 Corrente de dreno de saturação (I_{DSsat}) 33

2.2.4 Correntes de dreno de estado ligado (I_{ON}), desligado (I_{OFF}), e de fuga (I_{LEAK}) 34

2.2.5 Razão I_{ON}/I_{OFF} 35

2.2.6 Resistência de estado ligado (R_{on}) 36

2.2.7 Máxima transcondutância ($g_{mmáx}$) 37

2.2.8 Tensão Early (V_{EA}) 37

2.2.9 Razão entre a transcondutância e a corrente elétrica entre dreno e fonte (g_m/I_{DS}) 38

2.2.10 Frequência de ganho de tensão unitário (f_T) 40

2.2.11 Ganho de tensão intrínseco (A_V) 40

2.3 RADIAÇÕES IONIZANTES E SEUS EFEITOS EM MOSFETS 40

2.3.1 As radiações ionizantes 41

2.3.1.1 Radiação por próton 41

2.3.1.2 Radiação por nêutron 41

2.3.1.3 Radiação por partícula α 41

2.3.1.4 Radiação por partícula β 42

2.3.1.5 Radiação por raios-X e raios-gama 42

2.3.2 Raios-X 42

2.3.3 Efeitos da TID 44

2.4 INFLUÊNCIA DA TID NOS PARÂMETROS DOS MOSFETS 47

2.4.1 Desvio da tensão de limiar 47

2.4.2 Redução da transcondutância 48

2.4.3 Aumento da inclinação de sublimiar 48

2.4.4 Aumento da corrente de fuga 49

3 LEIAUTES INOVADORES PARA MOSFETS 50

3.1 ORIGEM DOS NOVOS LEIAUTES DE PORTA PARA MOSFETS 50

3.2 MOSFET DE LEIAUTE DE PORTA HEXAGONAL (MOSFET DIAMANTE) 50

3.3 MOSFET DE LEIAUTE DE PORTA OCTOGONAL (MOSFET OCTO) 56

3.3.1 Determinação do comprimento de canal de um MOSFET convencional que apresente uma mesma área de porta e mesma largura de canal que de um MOSFET Octo 58

3.3.2 Estudos realizados com o MOSFET Octo 60

4 METODOLOGIA E MATERIAIS PARA O ESTUDO COMPARATIVO EXPERIMENTAL ENTRE O MOSFET OCTO E O MOSFET CONVENCIONAL 63

4.1 DETALHES SOBRE OS DISPOSITIVOS UTILIZADOS 63

4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 67

4.2.1 Keithley 4200-SCS 67

4.2.2 Keithley 2636B 68

4.2.3 Difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100 69

4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 70

4.3.1 Caracterização elétrica dos dispositivos não encapsulados 71

4.3.2 Caracterização elétrica dos dispositivos encapsulados 72

4.3.3 Processo de irradiação por raios-X dos dispositivos 73

5 ANÁLISE DE RESULTADOS 77

5.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MOSFET OCTO E SEU CONVENCIONAL EQUIVALENTE SEM RADIAÇÃO 77

5.2 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA TID ENTRE UM MOSFET OCTO E SEU MOSFET CONVENCIONAL EQUIVALENTE SEM QUE OS DISPOSITIVOS ESTIVESSEM POLARIZADOS DURANTE OS PROCEDIMENTOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES 85
5.3 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA TID ENTRE UM MOSFET OCTO E SEU MOSFET CONVENCIONAL EQUIVALENTE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE POLARIZAÇÃO DURANTE OS PROCEDIMENTOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES 97
5.3.1 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo OFF durante os procedimentos das radiações ionizantes 97
5.3.2 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo Analog durante os procedimentos das radiações ionizantes 101
5.3.3 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo ON durante os procedimentos das radiações ionizantes 106
6 CONCLUSÕES 111
REFERÊNCIAS 114

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico na microeletrônica, esforços contínuos em pesquisas e altíssimos investimentos vêm sendo realizados tanto pela comunidade científica mundial, quanto pelas empresas de dispositivos semicondutores e circuitos integrados (CIs), visando aumentar o desempenho elétrico e reduzir as dimensões dos dispositivos, como os transistores de efeito de campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET) planares e não planares (*FinFETs, Multi-Gates, Surrouding-Gate,* etc.) para alcançar a redução dos custos dos equipamentos eletrônicos que fazem parte do cotidiano do ser-humano (microcomputadores pessoais, telefones celulares, televisores, marca-passos, etc.). (1; 2). Além disso, há também uma preocupação para mitigar os efeitos das radiações ionizantes em tais dispositivos quando operam nesse tipo de ambiente. (3; 4; 5).

Estudos sobre os efeitos das radiações ionizantes em dispositivos eletrônicos são de grande interesse para as áreas aeroespacial, médica, de física nuclear e de partículas. (3; 4; 5; 6; 7; 8). É importante assegurar que mesmo sob a influência das radiações ionizantes, os dispositivos eletrônicos continuem funcionando dentro do projetado, trazendo confiabilidade aos sistemas onde são aplicados. (4; 5).

As abordagens encontradas para atingir esses objetivos são as mais diversas, como o uso de novos materiais de fabricação dos dispositivos semicondutores e CIs (9; 10), novas estruturas planares e tridimensionais de MOSFETs (11; 12), e novos processos de fabricação (13; 14).

Estudos mostram que a utilização de materiais com uma alta constante dielétrica k (comparado ao dióxido de silício) faz com que os MOSFETs apresentem um melhor desempenho. Essa abordagem é utilizada para diminuir as dimensões dos MOSFETs sem aumentar as correntes de fuga. (9; 10).

Tecnologias SOI (*Silicon-On-Insulator*) e FinFET (e várias outras arquiteturas relacionadas, como *TriGate*, *Omega-FET* e *Pi-Gate*) se mostram como alternativas à estrutura *bulk* convencional. (11; 12). Enquanto os MOSFETs com tecnologia SOI possuem menores capacitâncias parasitárias, os FinFETs possuem dimensões ainda mais reduzidas. (11; 12).

Dentre as abordagens para mudança de leiaute do MOSFET, há o MOSFET *Dog-Bone* e os ELTs. (13; 14). O MOSFET *Dog-Bone* apresenta uma menor corrente de dreno de estado desligado que a observada no MOSFET convencional, isso ocorre devido ao MOSFET *Dog-Bone* apresentar um comprimento de canal maior nas extremidades da região da porta que o do MOSFET convencional. (13). Os ELTs apresentam uma menor corrente de fuga que a do

MOSFET convencional, isso é explicado pela ausência das regiões de bico de pássaro nesse tipo de dispositivo. (14). Essas duas abordagens são interessantes para a aplicação de MOSFETs em ambientes de exposição às radiações ionizantes. (13; 14).

Em paralelo aos meios comumente utilizados, há uma alternativa para se atingir tais objetivos, sem adicionar qualquer custo para o atual processo de fabricação *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) de CIs. Essa abordagem ainda pouco explorada é chamada de "Engenharia de Junção PN entre as regiões de Dreno-Canal e Canal-Fonte do MOSFET", que se traduz simplesmente pelo uso de novos e diferentes estilos de leiaute de porta para a implementação desses transistores, que nos transistores convencionais possuem formato retangular. (15). Entre os leiautes já propostos estão o hexagonal (Diamante) (16; 17; 18), *Fish* (19; 20), *Wave* (21; 22), octogonal (Octo) (23; 24; 25; 26; 27; 28; 29) e o elipsoidal (30; 31). Todos esses MOSFETs com diferentes geometrias de porta podem ser utilizados tanto em aplicações de CIs CMOS analógicos, como também para as aplicações digitais dentro de determinadas considerações, em decorrência dos estudos por simulação numérica tridimensional e por dados experimentais obtidos até então. (15).

A mudança da geometria convencional de porta retangular para essas novas geometrias de porta, faz com que novos efeitos sejam incorporados à estrutura do MOSFET, os quais são capazes de potencializar o seu desempenho elétrico e sua tolerância às radiações ionizantes. São exemplos desses novos efeitos que potencializam o desempenho elétrico dos MOSFETS, o efeito de canto longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE), efeito de conexões paralelas de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*PArallel connections of MOSFETs with Different channel Lengths Effect*, PAMDLE), efeito da redução da corrente de fuga (*Drain LEakage Current Reduction Effect*, DLECRE), e quanto a melhorar a robustez às radiações ionizantes, o efeito de desativação dos MOSFETs parasitários nas regiões de bico de pássaro (*DEactivation of the PArasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect*, DEPAMBBRE). (15).

O MOSFET de leiaute de porta octogonal (MOSFET Octo), que é foco deste estudo, já foi objeto de alguns estudos comparativos anteriores. Entre os trabalhos publicados, houve estudo comparativo através de simulação tridimensional com seu MOSFET convencional equivalente (MOSFET convencional de porta retangular com mesma área de porta e largura de canal do MOSFET não convencional em questão) (23), estudos experimentais para comparação das características elétricas do MOSFET Octo com seu MOSFET convencional equivalente (24; 25), e estudos comparativos experimentais sobre a influência das radiações ionizantes no MOSFET Octo e seu MOSFET convencional equivalente (26; 27; 28; 29). Todos esses estudos

foram realizados com MOSFETs do tipo SOI e com tecnologias de 0,35 µm (24) e de 0,5 µm (25; 26; 27; 28; 29).

O estudo de simulação tridimensional mostrou que o MOSFET Octo com ângulo α de 90° e fator de corte de 50% apresentou ganhos em diversos parâmetros elétricos em comparação ao MOSFET convencional equivalente (MOSFET com mesma área e largura de porta, e mesmas condições de polarização que o MOSFET Octo). Quando comparado a um MOSFET convencional com mesma área e largura de porta, e nas mesmas condições de polarização que o MOSFET Octo, o MOSFET Octo apresentou uma corrente de dreno de saturação 30% maior, uma transcondutância máxima 26% maior, uma tensão Early 19% menor e uma resistência de estado ligado 21% menor. (23).

Estudos experimentais confirmaram o melhor desempenho elétrico do MOSFET Octo em comparação a um MOSFET convencional equivalente (com mesma área e largura de porta que o MOSFET Octo), com as mesmas condições de polarização. (24; 25). Em comparação ao MOSFET convencional equivalente nas mesmas condições de polarização, foram observados no MOSFET Octo com ângulo α de 53,1° e fator de corte de 25%, uma transcondutância 137% maior (24), e uma frequência de ganho de tensão unitário 128% maior (25).

Estudos experimentais sobre os efeitos das radiações ionizantes no MOSFET Octo e no seu MOSFET convencional equivalente, indicaram uma maior tolerância do MOSFET Octo às radiações ionizantes que o MOSFET convencional equivalente. (26; 27; 28; 29). Entre os resultados obtidos, o MOSFET Octo apresentou uma corrente de fuga quase sem variação, enquanto no MOSFET convencional equivalente ela aumentou mais de 9 vezes. (26). A inclinação de sublimiar apresentou uma variação cerca de 8% menor no MOSFET Octo em comparação ao seu MOSFET convencional equivalente, nas mesmas condições de polarização e de exposição às radiações ionizantes. (28).

1.1 MOTIVAÇÃO

Esse trabalho tem como objetivos analisar as características elétricas dos MOSFETs com leiaute de porta octogonal em condições normais e sob a influência das radiações ionizantes de raios-X, para então compará-las com aquelas observadas no seu MOSFET convencional equivalente. Então com os resultados obtidos, verificar se todos os efeitos observados na estrutura do MOSFET de leiaute de porta octogonal em trabalhos anteriores continuam sendo válidos na tecnologia mais sofisticada utilizada nesse estudo. Para os estudos

experimentais realizados neste trabalho, foram utilizados MOSFETs de topologia convencional *Bulk* de CIs CMOS de 130 nm de Silício-Germânio (SiGe) da *Global Foundries*.

O estudo comparativo se deu através da análise dos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito dos MOSFETs com leiaute octogonal e seu MOSFET convencional equivalente, considerando-se sempre as mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

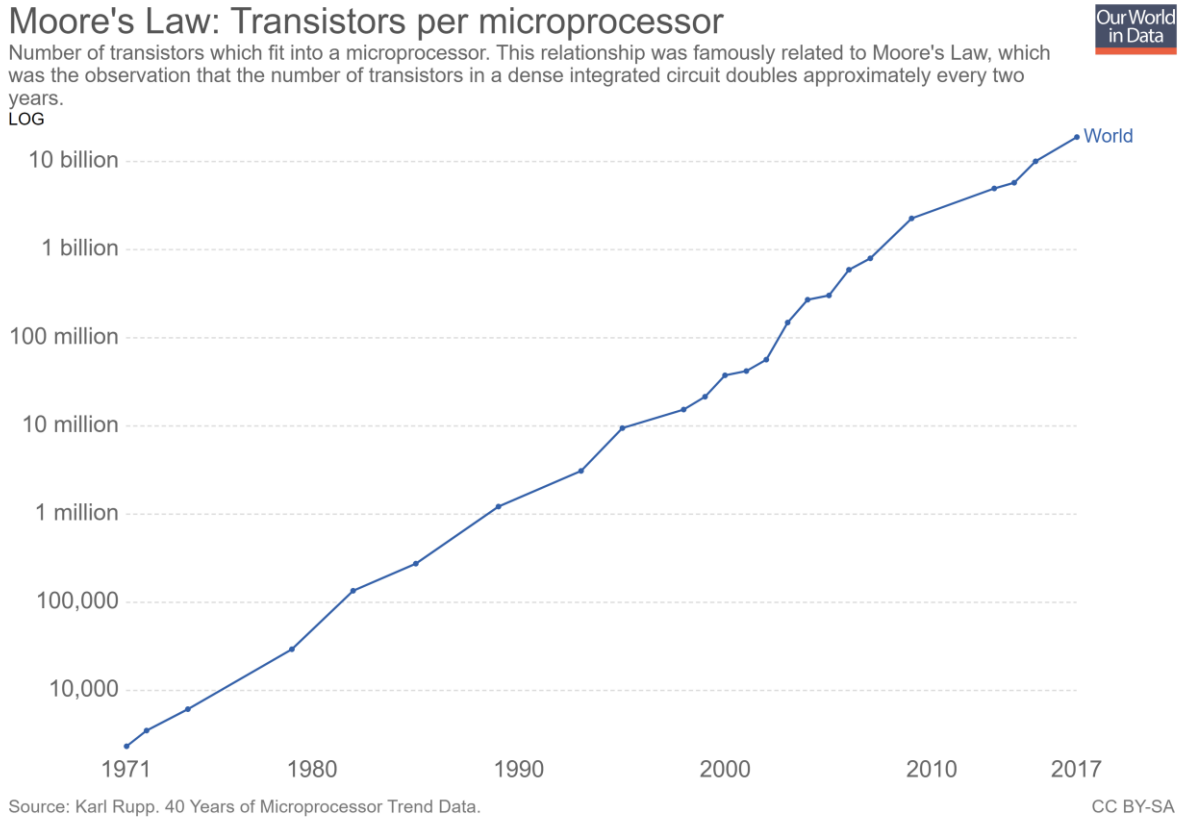
Nesta seção serão abordados conceitos fundamentais sobre os MOSFETs, alguns de seus parâmetros e os efeitos de sua exposição às radiações que degradam seu funcionamento, de forma que possibilitem o entendimento e análise dos dados experimentais obtidos.

2.1 TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO METAL-ÓXIDO-SEMICONDUTOR

O MOSFET é o dispositivo semicondutor mais utilizado no mundo e pode se dizer que estes dispositivos estão presentes em todo circuito integrado digital. Sem o MOSFET muitos dos avanços tecnológicos não seriam possíveis, sendo ele o coração dos circuitos integrados digitais, impulsiona o avanço de indústrias como a da informática, videogames e telefones celulares. (1). Os MOSFETs também vêm sendo cada vez mais utilizados nas aplicações de CIs CMOS analógicas. (2). Os MOSFETs apresentam vantagens que impulsionaram os investimentos em estudos e pesquisas, como o fato de possuírem dimensão muito pequena (necessitando assim de uma pequena área na pastilha de silício do CI), baixa potência de operação e um processo de fabricação relativamente simples e já muito bem estabelecido. (1; 2).

Nos últimos anos a capacidade de integração dos MOSFETs teve um crescimento exponencial e nos dias atuais, a quantidade de MOSFETs que pode integrar um CI simples ultrapassa os 200 milhões, portanto, é possível implementar CIs CMOS muito sofisticados em escala de integração muito ampla (*Ultra Large Scale Integration*, ULSI), como por exemplo, as memórias e os microprocessadores. (1, 2). A figura 1 apresenta a evolução da quantidade de MOSFETs integrados num circuito integrado de microprocessador.

Figura 1 - Números de transistores por microprocessador ao longo dos anos



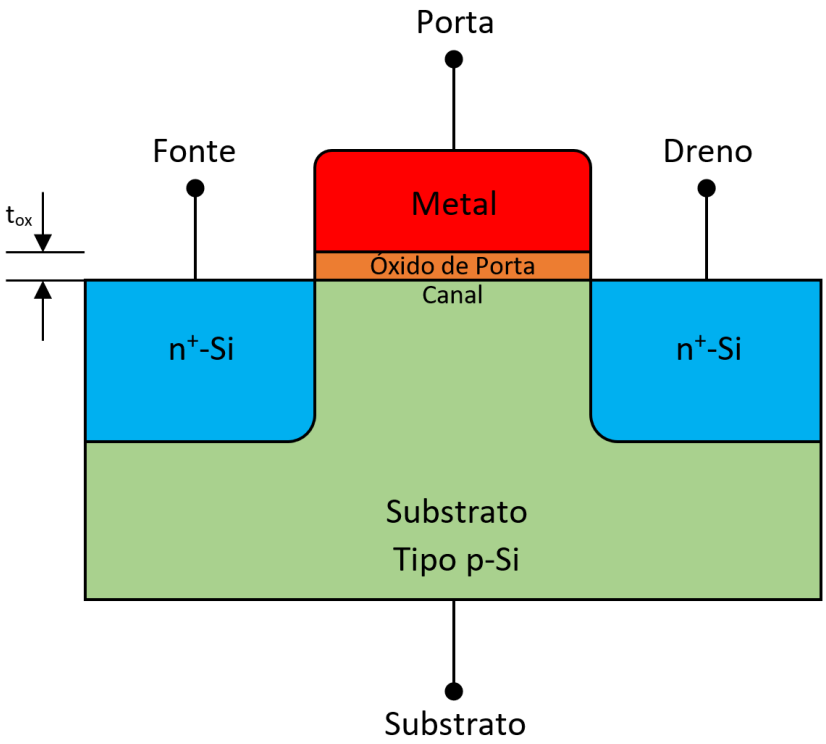
Fonte: (32), 2018

É possível observar através da figura 1 o nítido crescimento exponencial na capacidade de integração dos MOSFETs. Este crescimento na densidade de integração destes dispositivos é conhecido como a lei de Moore e ele se deu essencialmente pela constante redução nas dimensões desses dispositivos. (1).

2.1.1 Estrutura e funcionamento do MOSFET do tipo enriquecimento

A figura 2 ilustra um corte transversal numa clássica estrutura de um MOSFET de canal n (nMOSFET) do tipo enriquecimento, que é comumente utilizado em CIs CMOS analógicos e digitais. O MOSFET é composto basicamente por um capacitor MOS, ou seja, um eletrodo de metal é depositado em cima de uma camada fina de óxido térmico, no qual é criada a partir de um substrato com dopagem constituída de impurezas aceitadoras (p-Si) entre duas regiões altamente dopadas complementadas com impurezas doadoras (n^+-Si) e seus respectivos eletrodos. (1).

Figura 2 – Seção transversal de um nMOSFET Convencional (*Bulk*)

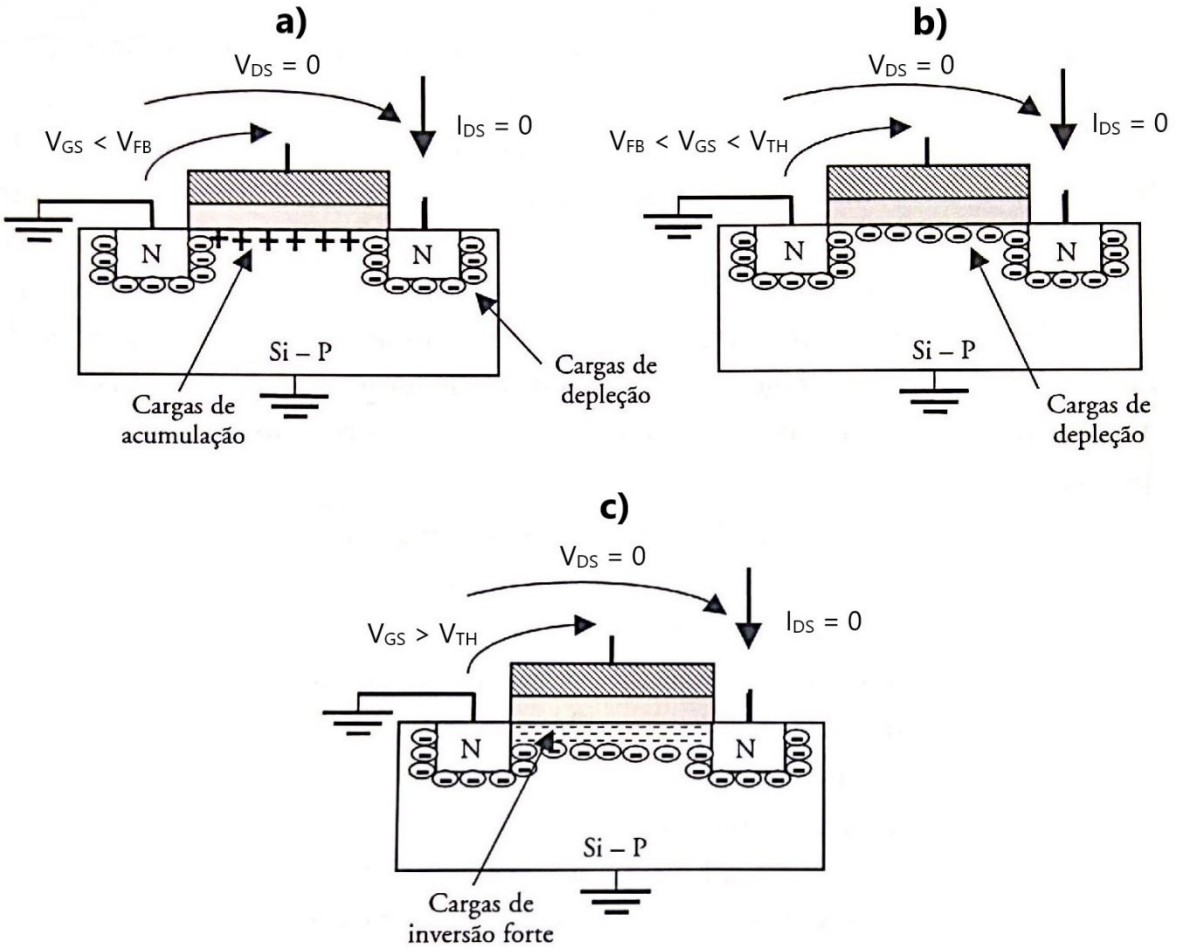


Fonte: Autor

Na figura 2, t_{ox} é a dimensão da espessura do óxido de porta, que é tipicamente uma camada fina de dióxido de silício (SiO_2). (2). Como ilustra a figura 2, um MOSFET (seja ele tipo P ou N) é composto por quatro terminais: substrato (*bulk* ou *well*), porta (*gate*), fonte (*source*) e dreno (*drain*), e seu funcionamento consiste no controle da corrente elétrica entre os terminais de dreno e fonte, através do campo elétrico vertical gerado por uma tensão aplicada entre os terminais de porta e fonte, daí o nome de transistor de efeito de campo. (1; 2). Outro nome dado ao MOSFET é FET de porta isolada, isso por causa do óxido isolante de porta, que faz com que a porta seja isolada eletricamente do substrato. A corrente elétrica de porta é extremamente pequena (da ordem de 10^{-15} A) por razão desse isolamento. (2).

Os regimes de operação de um nMOSFET do tipo enriquecimento são divididos em acumulação, depleção e inversão. (33). A figura 3 ilustra os perfis de cargas para cada um desses regimes de operação.

Figura 3 - Perfis de carga para um nMOSFET nas condições de polarização de acumulação (a), depleção (b) e inversão (c)



Fonte: Autor "adaptado de" (33), 2003, p. 80

Na figura 3, V_{GS} é a tensão aplicada entre os terminais de porta e fonte, V_{FB} é a tensão de faixa plana, que é definida como a tensão que quando aplicada na porta, resulta num potencial de superfície nulo, V_{TH} é a tensão de limiar do transistor, V_{DS} é a tensão entre os terminais de dreno e fonte, e I_{DS} é a corrente entre dreno e fonte. (33).

A figura 3(a) ilustra um V_{GS} menor que V_{FB} sendo aplicado, fazendo com que sejam atraídas para a região de superfície, as lacunas (cargas positivas) do substrato, neste momento o MOSFET opera na região de corte e no regime de acumulação. (33).

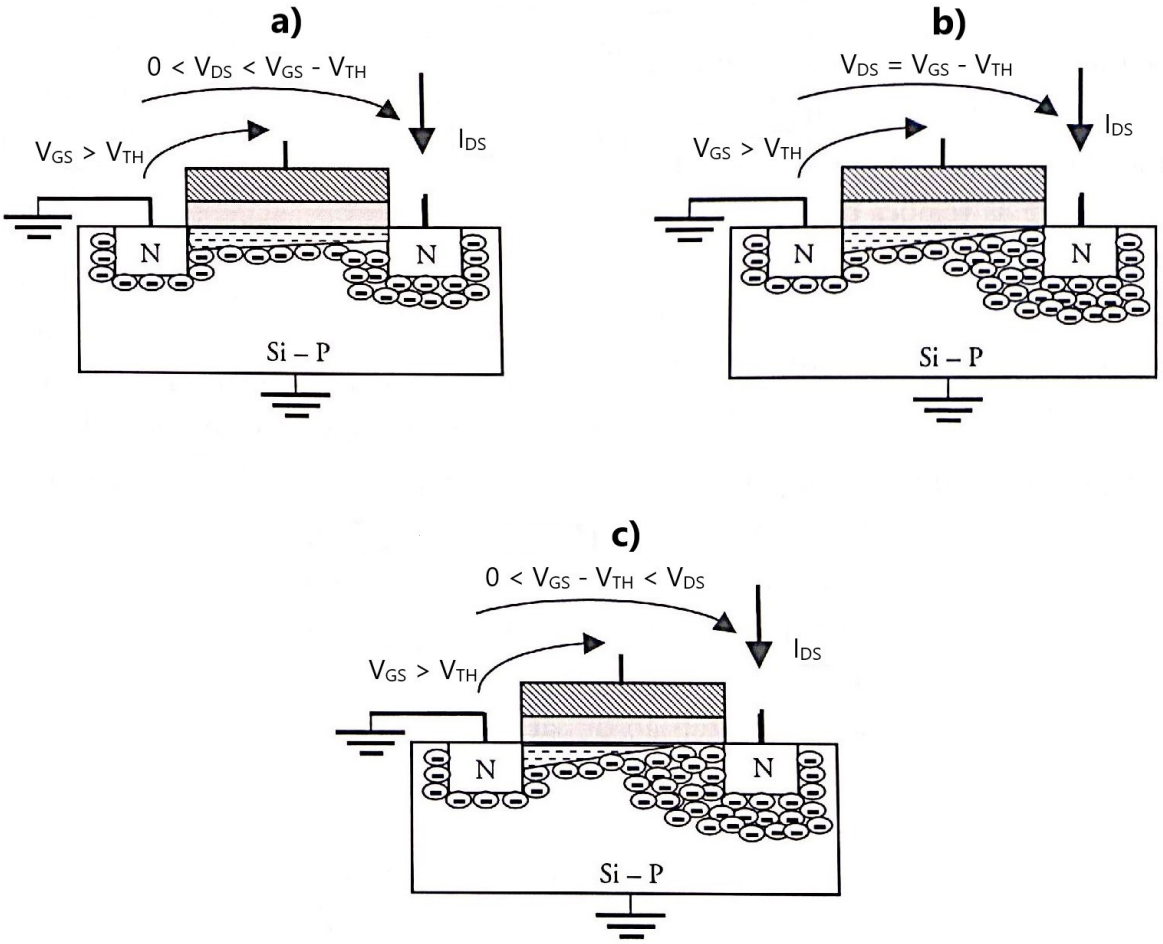
A figura 3(b) ilustra o regime de depleção, onde V_{GS} assume valor maior que V_{FB}, porém menor que V_{TH}, nesta situação o MOSFET continua operando na região de corte. (33).

Caso uma tensão igual ou superior a V_{TH} seja aplicada entre os terminais de porta e fonte, então ocorre a inversão da superfície, que fica com elétrons (cargas negativas) livres para a condução de corrente elétrica entre as regiões de fonte e dreno. A figura 3(c) ilustra o regime

de inversão e nela o MOSFET permanece operando na região de corte apenas porque V_{DS} é igual a zero. (33).

No entanto, as regiões de operação no regime de inversão também podem ser classificadas como região de triodo e região de saturação. (33). A figura 4 apresenta os perfis de carga para a região de triodo, transição triodo/saturação e região de saturação.

Figura 4 - Perfis de carga para um nMOSFET nas condições de polarização das regiões triodo (a), transição triodo/saturação (b) e saturação (c)



Fonte: Autor "adaptado de" (33), 2003, p. 80

Na figura 4 são ilustradas as regiões de operação para um nMOSFET com V_{GS} maior que V_{TH} e diferentes valores de V_{DS} sendo aplicados ao dispositivo. (33).

Na condição de polarização onde V_{DS} é menor ou igual a diferença entre V_{GS} e V_{TH} (essa diferença é conhecida como sobretensão de porta, V_{GT}), ocorre a passagem de corrente elétrica entre o dreno e a fonte (I_{DS}) e o nMOSFET é considerado no estado ligado (*ON state*).

Essa condição de polarização é observada na figura 4(a) e é quando o nMOSFET é considerado na região de triodo. (33).

Na figura 4(b) o nMOSFET se encontra em transição da região de triodo para a região de saturação. Isso ocorre quando V_{DS} é igual à V_{GT} e a camada de inversão do lado do dreno está prestes a desaparecer, ocorrendo assim o estrangulamento da camada de inversão (*pinch-off*). Esse valor de V_{DS}, quando igual à V_{GT}, leva o nome de tensão de saturação (V_{DSsat}). (33).

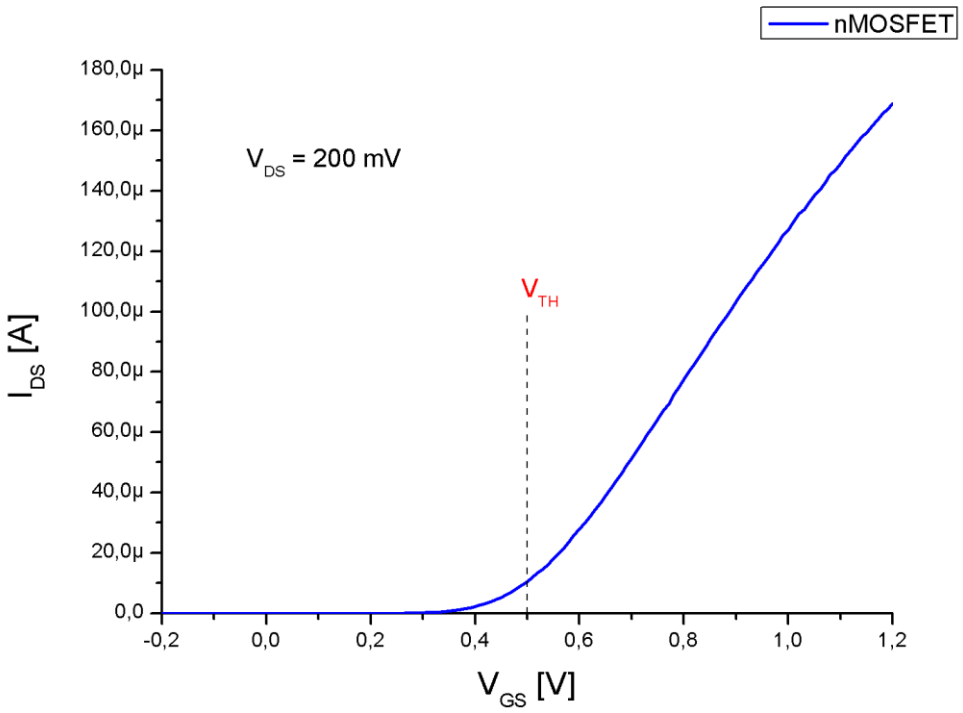
No último caso, para V_{DS} com tensões superiores ao valor de V_{GT}, o nMOSFET já opera na região de saturação e o ponto de estrangulamento do canal desloca-se na direção da fonte, como pode ser observado na figura 4(c). Nesta região de operação, o aumento da tensão entre dreno e fonte praticamente já não provoca aumento da corrente elétrica entre o dreno e a fonte, atingindo assim um valor conhecido como corrente elétrica entre dreno e fonte de saturação (I_{DSsat}). Nessa situação de polarização, é o campo elétrico longitudinal elevado que faz com que os elétrons atravessem a região entre o final da camada de inversão e a região de dreno. (33).

2.1.2 Curvas características do nMOSFET

Nesta seção são apresentadas as duas principais curvas características do funcionamento de um nMOSFET.

A figura 5 apresenta um exemplo de uma curva característica I_{DS} x V_{GS}, que é a curva da corrente elétrica entre o dreno e a fonte em função da tensão aplicada entre porta e fonte (V_{GS}), para uma dada tensão V_{DS}.

Figura 5 – Exemplo de uma curva característica de I_{DS} em função de V_{GS} de um nMOSFET

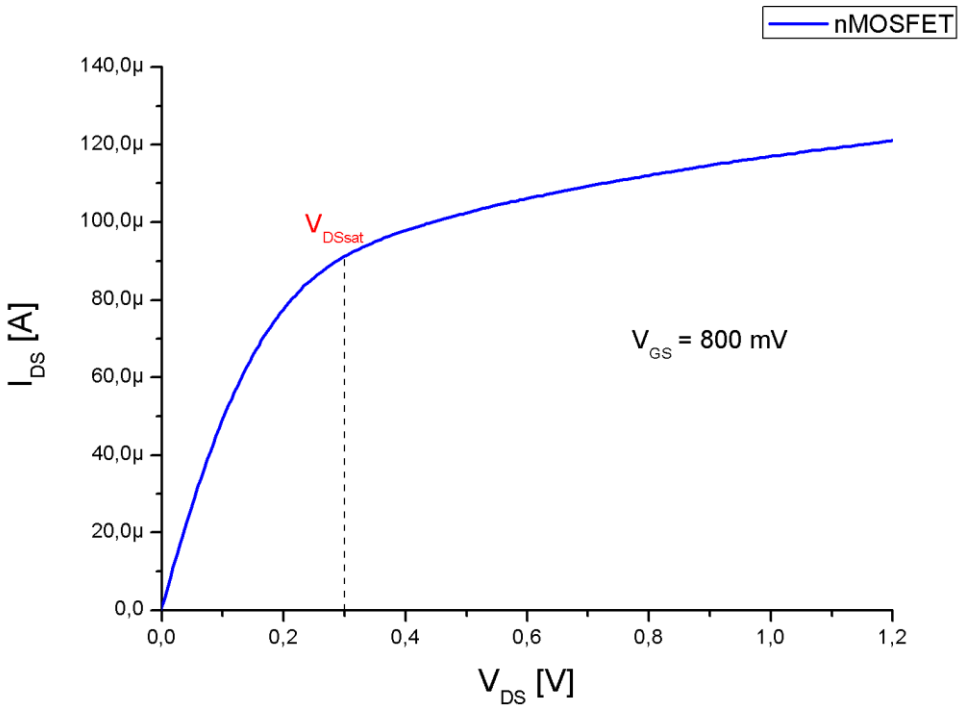


Fonte: Autor

Na figura 5 é possível observar o comportamento esperado para um nMOSFET quando há a variação de V_{GS} para um V_{DS} fixo, com a indicação do valor de V_{TH}.

Outra importante curva para análise do desempenho elétrico é ilustrada na figura 6. Essa curva característica apresenta I_{DS} em função da tensão entre o dreno e a fonte (I_{DS} x V_{DS}), para um certo valor de polarização de V_{GS}.

Figura 6 – Exemplo de uma curva característica de I_{DS} em função de V_{DS} de um nMOSFET



Fonte: Autor

A figura 6 ilustra o comportamento esperado para um nMOSFET quando há a variação de V_{DS} para um V_{GS} fixo, com a indicação do valor de V_{DSsat}.

Nas seções seguintes serão apresentadas formas de extração de importantes parâmetros elétricos e figuras de mérito dos dispositivos através dessas duas curvas.

2.2 PRINCIPAIS PARÂMETROS ELÉTRICOS E FIGURAS DE MÉRITO ANALÓGICOS E DIGITAIS DE UM MOSFET

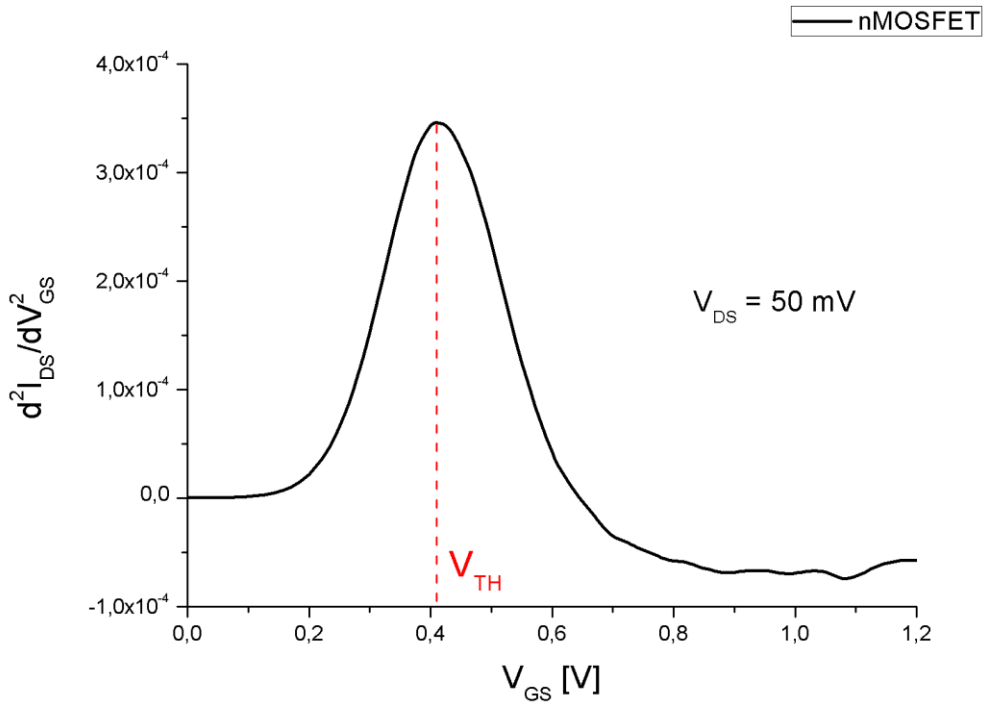
A seguir são apresentados os principais parâmetros elétricos e figuras de mérito analógicos e digitais estudados e a forma de obtenção utilizada para os mesmos.

2.2.1 Tensão de limiar (V_{TH})

A tensão de limiar (V_{TH}), é a tensão mínima (ou máxima para o pMOSFET), que ao ser aplicada entre os terminais da porta e fonte, permite a formação de uma camada de inversão, ou seja, de uma grande quantidade de portadores livres, podendo considerar assim que o

MOSFET está “ligado”. (33). Neste trabalho, os valores para as tensões de limiar foram obtidos através do método da segunda derivada da curva de I_{DS} em função de V_{GS}, um método muito eficiente que se dá pelo valor de V_{GS} onde ocorre o pico máximo (em módulo para um transistor pMOS) da segunda derivada da curva de I_{DS} x V_{GS}, que significa o ponto de máxima variação da transcondutância em função da tensão entre a porta e a fonte. (33). É importante que esse parâmetro seja extraído com baixo valor de V_{DS}, garantindo que o MOSFET opere na região de triodo. (33). A figura 7 ilustra a segunda derivada da curva de I_{DS} x V_{GS} de um nMOSFET e o ponto da máxima variação da transcondutância, para a obtenção do V_{TH}.

Figura 7 – Exemplo de uma curva da segunda derivada de I_{DS} em função de V_{GS} com V_{DS} = 50 mV, utilizada para obter o V_{TH} de um nMOSFET



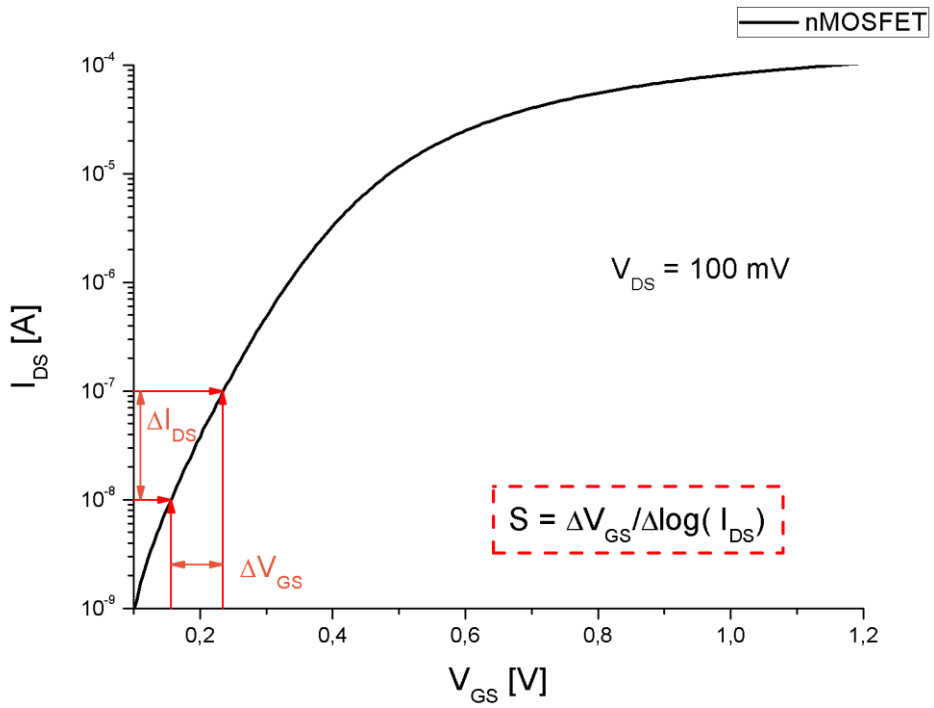
Fonte: Autor

2.2.2 Inclinação de sublimiar (S)

A inclinação de sublimiar representa a capacidade do MOSFET em ir do estado desligado para o estado ligado. Esse parâmetro é extraído pela tensão entre porta e fonte necessária para o acréscimo de uma década na corrente elétrica entre dreno e fonte do MOSFET na região de sublimiar. Logo, quanto menor for o valor de S, mais eficiente e rápido é o MOSFET no que se diz respeito a ele ir do estado desligado para o estado ligado. (2). Tal valor

pode ser obtido através da curva de I_{DS} x V_{GS} (com baixo valor de V_{DS}), na região onde V_{GS} é menor que V_{TH}. Como nessa condição a corrente entre o dreno e a fonte depende exponencialmente de V_{GS}, pode-se fazer um gráfico da corrente elétrica entre o dreno e a fonte em escala logarítmica em função da tensão de porta e fonte, para então obter S por meio do inverso do coeficiente angular da região de sublimiar da curva. (2). A figura 8 ilustra a obtenção de S para um nMOSFET.

Figura 8 – Exemplo de uma curva de I_{DS}, em escala logarítmica, em função de V_{GS} para um V_{DS} de 100 mV, com indicação da obtenção de S



Fonte: Autor

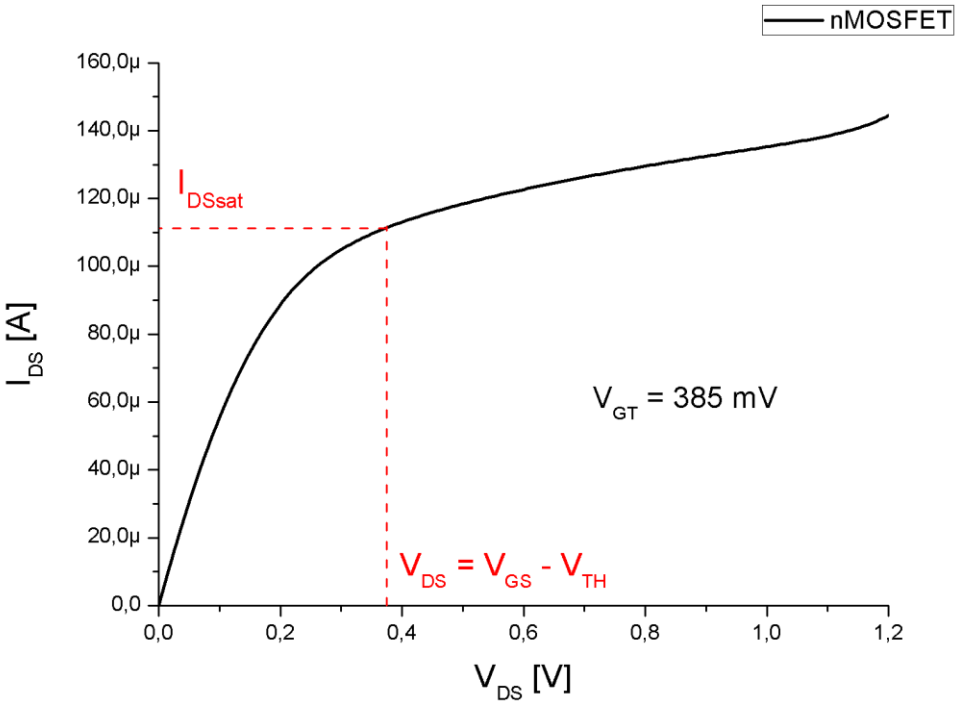
Na figura 8, ΔV_{GS} é a diferença entre dois valores de V_{GS} para o intervalo de 1 década de I_{DS}.

2.2.3 Corrente de dreno de saturação (I_{DSsat})

A corrente entre dreno e fonte de saturação é o valor da corrente elétrica entre dreno e fonte que o MOSFET apresenta após V_{DS} superar o valor da tensão de dreno de saturação (V_{DSsat}). Para tensões entre o dreno e a fonte maiores que V_{DSsat}, a corrente elétrica entre o dreno e a fonte é pouco influenciada por V_{DS}, sendo controlada exclusivamente pela polarização entre

a porta e a fonte. (1). Sendo assim, I_{DSsat} é extraído para uma tensão entre o dreno e a fonte maior que V_{DSsat}, que é aproximadamente igual a $V_{GS} – V_{TH}$. (1). A figura 9 ilustra um exemplo de uma curva característica de I_{DS} em função de V_{DS} para um determinado valor de V_{GT}, indicando onde o valor de I_{DSsat} é obtido.

Figura 9 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para V_{GT} = 385 mV, com indicação da obtenção de I_{DSsat}



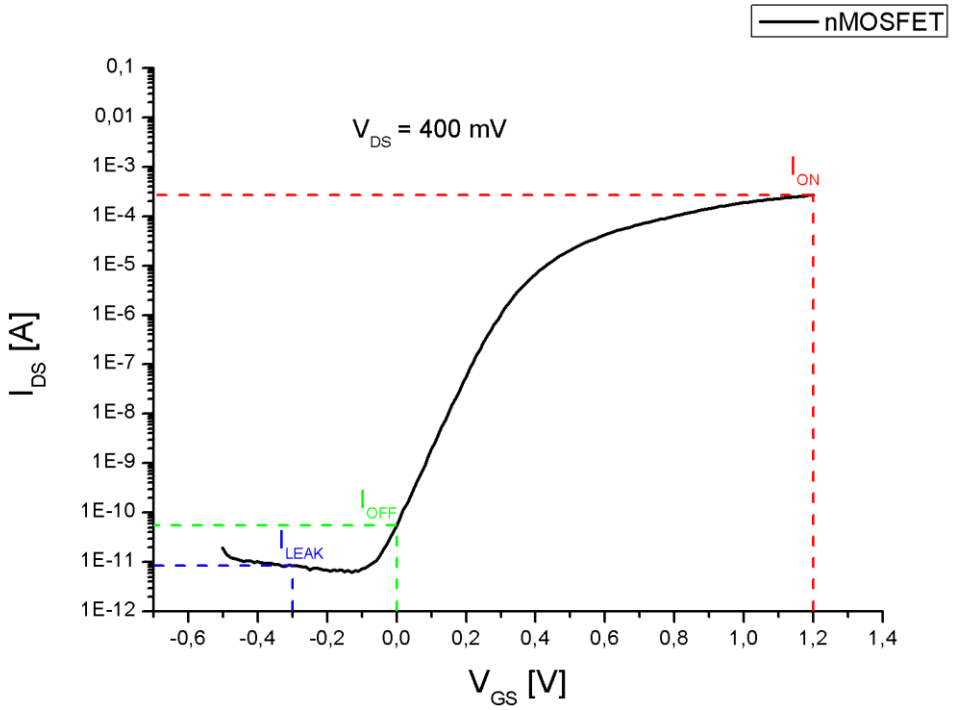
Fonte: Autor

2.2.4 Correntes de dreno de estado ligado (I_{ON}), desligado (I_{OFF}), e de fuga (I_{LEAK})

A corrente de dreno de estado ligado é a corrente elétrica entre dreno e fonte que o MOSFET é capaz de fornecer quando funcionando no estado ligado, ou seja, para um certo valor de V_{DS} e V_{GS} positivo, sendo V_{GS} maior que V_{TH}. (1). A corrente de dreno de estado desligado por sua vez, é a corrente elétrica entre dreno e fonte observada no MOSFET para um certo valor de V_{DS} quando V_{GS} = 0 V. (1). Por fim, a corrente de fuga entre dreno e fonte é medida para valores negativos de V_{GS} e assim como a corrente de dreno de estado desligado, representa uma corrente elétrica indesejada presente no dispositivo quando o mesmo não deveria estar conduzindo eletricamente. Valores realmente muito baixos de I_{LEAK} são esperados em MOSFETs com bom desempenho elétrico. (1).

A figura 10 apresenta uma curva de I_{DS} em escala logarítmica em função de V_{GS}, com a indicação da obtenção de I_{ON}, I_{OFF} e I_{LEAK}.

Figura 10 – Exemplo de uma curva de I_{DS}, em escala logarítmica, em função de V_{GS} para um V_{DS} = 400 mV, com as indicações das obtenções de I_{ON}, I_{OFF} e I_{LEAK}



Fonte: Autor

Para esse trabalho I_{ON} foi obtido como sendo a corrente elétrica entre dreno e fonte para um V_{GS} de 1,2 V, e I_{LEAK} foi obtido pelo valor de I_{DS} para um V_{GS} de -0,3 V. Em ambos os casos o valor de V_{DS} usado foi sempre igual a 400 mV.

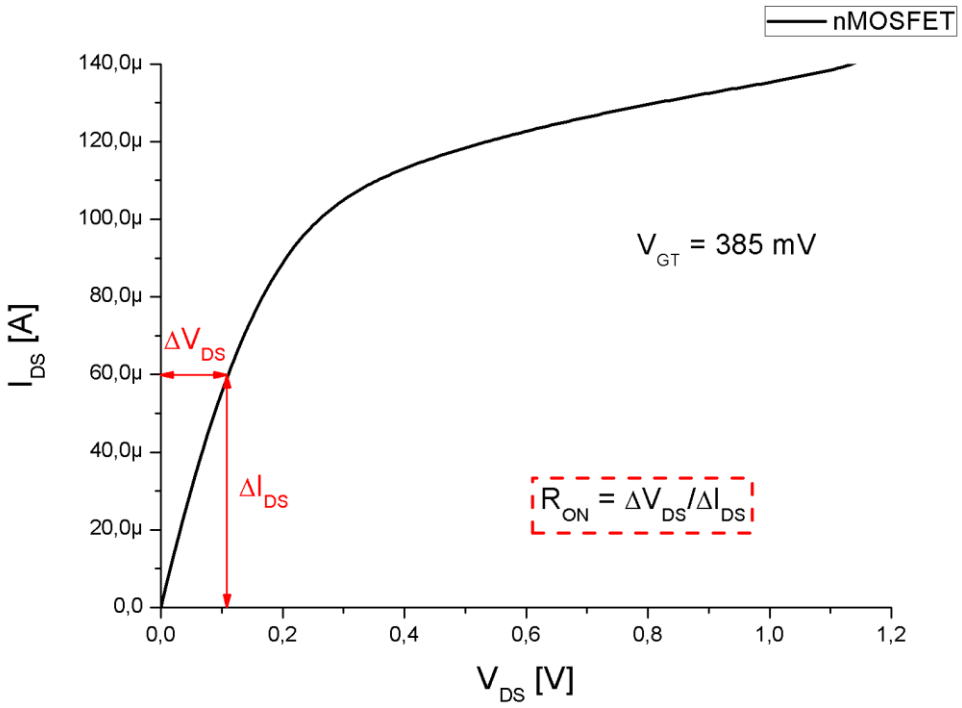
2.2.5 Razão I_{ON}/I_{OFF}

A razão I_{ON}/I_{OFF} indica o comprometimento do MOSFET com as correntes de dreno de estado ligado (I_{ON}) e desligado (I_{OFF}), sendo que quanto maior essa razão, melhor é o desempenho elétrico do dispositivo quando ele opera em altas frequências e também quanto ao consumo de energia elétrica. (15; 23; 24).

2.2.6 Resistência de estado ligado (R_{on})

A resistência de estado ligado é definida como a resistência entre dreno e fonte do MOSFET quando ele está ligado. (2). A R_{on} está diretamente ligada à velocidade de chaveamento do MOSFET e à potência dissipada pelo mesmo quando em estado ligado (P_{on}). Sua obtenção se dá através da inclinação na região de triodo da curva de I_{DS} x V_{DS} para um determinado valor de V_{GS}. (2). A figura 11 ilustra a extração de R_{on}.

Figura 11 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para um V_{GT} = 385 mV, ilustrando a obtenção de R_{on}



Fonte: Autor

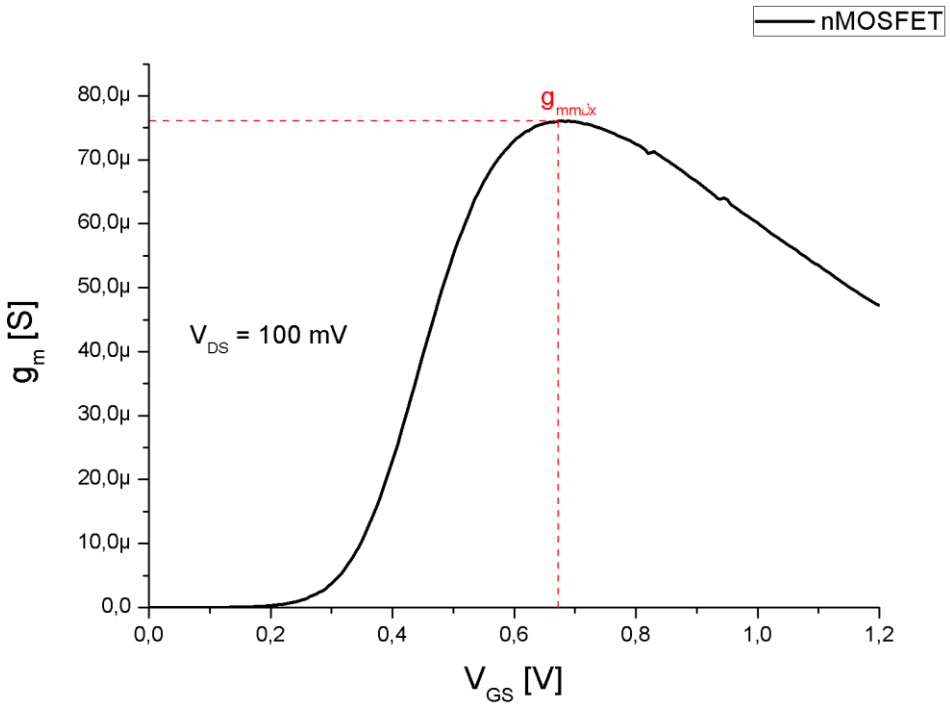
Na figura 11, ΔV_{DS} é a diferença de dois valores de V_{DS} para dois pontos de uma curva, e ΔI_{DS} é a diferença de dois valores de I_{DS} para os mesmos pontos de ΔV_{DS} na curva.

Como pode ser observado na figura 11, o MOSFET se comporta de maneira similar à de um resistor quando ele opera na região de triodo, apresentando certa dependência linear entre a corrente elétrica entre o dreno e a fonte, e a tensão entre o dreno e a fonte. (2).

2.2.7 Máxima transcondutância ($g_{mmáx}$)

A transcondutância representa a efetividade do controle da corrente elétrica entre o dreno e a fonte pela tensão aplicada entre a porta e a fonte. (33). A figura 12 ilustra a curva característica de g_m x V_{GS} para um determinado valor de V_{DS}, que é obtida através da derivada da corrente elétrica entre o dreno e a fonte em função da tensão entre a porta e a fonte, sendo indicado na figura o ponto da máxima transcondutância. (33).

Figura 12 – Exemplo de uma curva de g_m em função de V_{GS} para um V_{DS} = 100 mV, com indicação do ponto de $g_{mmáx}$



Fonte: Autor

É possível observar na figura 12, que o valor de g_m aumenta até um valor máximo ($g_{mmáx}$) e então decai. Isso se dá por conta da degradação da mobilidade dos portadores. (33).

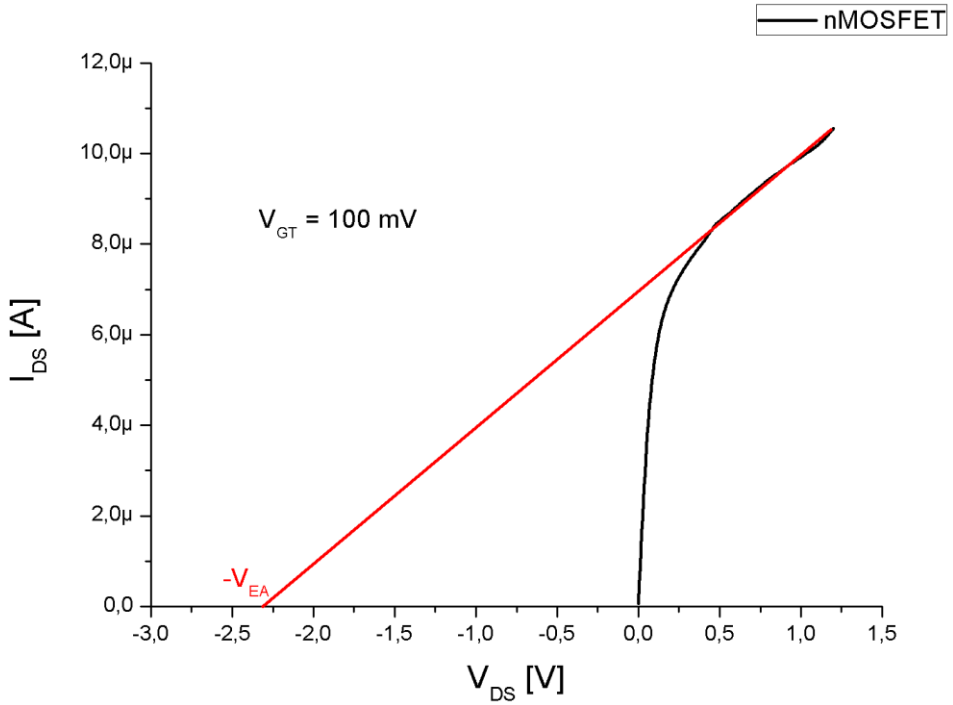
2.2.8 Tensão Early (V_{EA})

A tensão Early (V_{EA}) é um parâmetro muito importante para as aplicações CIs CMOS analógicas, quando configurados como amplificadores. Esse parâmetro permite mensurar o efeito da modulação do comprimento de canal no MOSFET. (1). A tensão Early é dependente

dos elementos dopantes nas regiões de dreno e de fonte, e é também proporcional ao comprimento efetivo do canal (L_{eff}) do MOSFET. (2). Quando a tensão V_{DS} aumenta até o valor de V_{DSsat}, ocorre o estrangulamento do canal. Aumentando-se ainda mais a V_{DS}, é possível notar que o comprimento do canal do MOSFET diminui. Com a diminuição do L_{eff}, a corrente elétrica entre dreno e fonte na região de saturação aumenta, não permanecendo exatamente constante. (1). A influência deste efeito é a inclinação da curva de I_{DS} em função de V_{DS} na região de saturação. (1).

A extração da V_{EA} se dá através da extrapolação da inclinação na região de saturação até o eixo das abscissas (V_{DS}). A tensão onde há o cruzamento desta extrapolação é definido como a tensão Early. (2). A figura 13 ilustra um exemplo de extração da V_{EA}.

Figura 13 – Exemplo de uma curva de I_{DS} em função de V_{DS} para um V_{GT} = 100 mV, com indicação da obtenção da V_{EA}



Fonte: Autor

2.2.9 Razão entre a transcondutância e a corrente elétrica entre dreno e fonte (g_m/I_{DS})

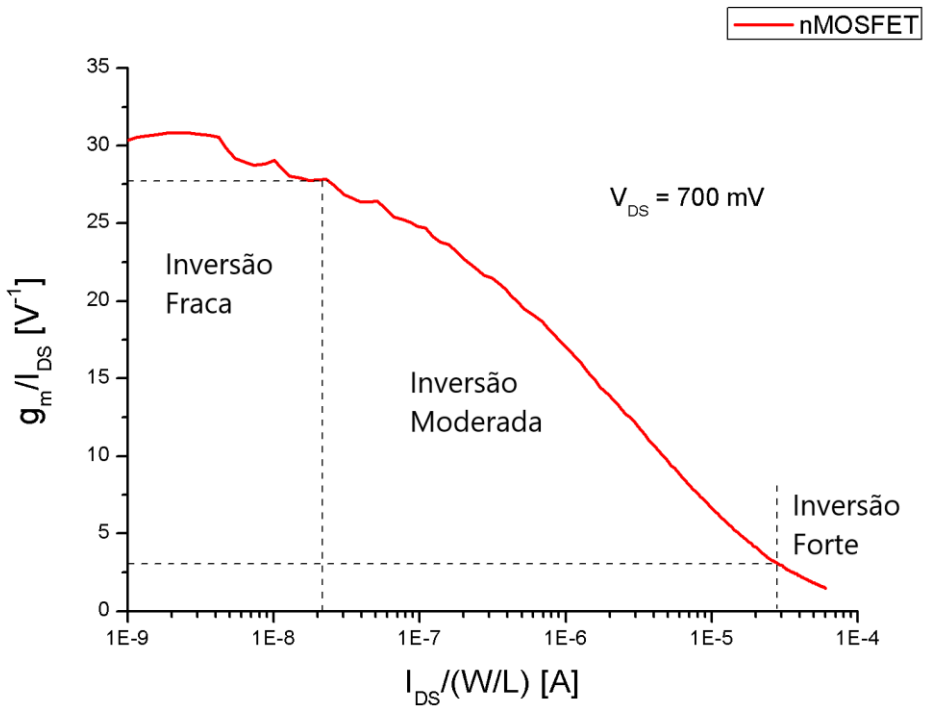
Muito importante no projeto de CIs CMOS analógicos, como em amplificadores operacionais, a razão entre a transcondutância e a corrente elétrica entre dreno e fonte indica a eficiência de amplificação de um MOSFET para uma determinada I_{DS}. (34).

Nos projetos analógicos de amplificadores operacionais, é utilizada a curva de g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$, desta forma a análise da eficiência do MOSFET independe de seu comprimento de canal (L) e sua largura de canal (W), tornado a curva dependente apenas do processo de fabricação do dispositivo. (34). A curva é traçada através da equação (1).

$$\frac{g_m}{I_{DS}} = \frac{1}{I_{DS}}\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{\partial(lnI_{DS})}{\partial V_{GS}} = \frac{\partial\left[ln\left(\frac{I_{DS}}{W/L}\right)\right]}{\partial V_{GS}} \quad (1)$$

A figura 14 ilustra um exemplo de curva de g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$.

Figura 14 – Exemplo de uma curva de gm/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ para um V_{DS} = 700 mV, com indicação dos diferentes regimes de inversão



Fonte: Autor

Através da figura 14 é possível distinguir os 3 regimes de inversão do MOSFET: inversão fraca, inversão moderada e inversão forte. Esses regimes podem ser determinados em função de $(g_m/I_{DS})_{máx}$, que é o valor máximo de g_m/I_{DS}. A inversão fraca é determinada entre os valores de 100 e 90% de $(g_m/I_{DS})_{máx}$, enquanto a inversão forte é determinada para valores iguais ou abaixo dos 10% de $(g_m/I_{DS})_{máx}$. (34).

Cada regime de inversão do MOSFET pode servir para um propósito, já que cada um apresenta seus próprios benefícios. No regime de inversão fraca, o MOSFET pode gerar altos

ganhos de tensão, porém apresenta baixa frequência de operação. (34). No regime de inversão forte, já é observada uma elevada frequência de ganho de tensão unitário no MOSFET, mas por sua vez, produz um baixo ganho de tensão. (34). Entre os dois regimes extremos, há o regime de inversão moderada, que apresenta um bom compromisso entre o ganho de tensão e a resposta em frequência do MOSFET. (34).

2.2.10 Frequência de ganho de tensão unitário (f_T)

A frequência de ganho de tensão unitário define a eficiência de um MOSFET em aplicações como amplificador em altas frequências. (2). A frequência de ganho unitário é dada pela equação (2). (2; 34).

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

Na equação (2), C_L representa a capacitância de carga.

2.2.11 Ganho de tensão intrínseco (A_V)

O ganho de tensão intrínseco do MOSFET é um importante parâmetro em projetos analógicos de amplificadores. O ganho A_V é definido pela equação (3). (34)

$$A_V = \frac{g_m}{I_{DS}} V_{EA} \tag{3}$$

2.3 RADIAÇÕES IONIZANTES E SEUS EFEITOS EM MOSFETS

Quando submetidos às radiações ionizantes, os MOSFETs podem apresentar diversos efeitos que alteram suas características. Essas alterações podem levar a falhas e à degradação dos MOSFETs. As formas de atuação das radiações ionizantes nos MOSFETs podem ser classificadas em efeitos acumulados e efeitos singulares. (35).

Nesta seção serão apresentados conceitos de radiação, a maneira como a radiação ionizante atua nos dispositivos e os principais efeitos decorrentes dela a que estes dispositivos estão sujeitos.

2.3.1 As radiações ionizantes

Radiação é definida como a energia que se propaga através do espaço ou matéria em forma de partícula ou onda. (36). Ela pode ser produzida de duas maneiras: através do decaimento radioativo de um átomo instável, ou pela interação de uma partícula com a matéria. A radiação pode ser classificada como ionizante ou não ionizante, dependendo de sua energia e capacidade de penetrar a matéria. (36). Neste trabalho o foco de estudo é a radiação ionizante, que é a principal fonte de radiação espacial. (3).

A radiação ionizante tem como principal característica, partículas com alta energia e velocidade, que ao se chocarem com estruturas, podem remover elétrons das órbitas dos átomos, gerando átomos carregados positivamente (ionizados). (3; 36). A seguir são apresentados os tipos de radiações que podem afetar o funcionamento dos MOSFETs.

2.3.1.1 Radiação por próton

Se dá pela interação do núcleo de hidrogênio com a matéria e é a radiação mais abundante nos raios cósmicos. Sua energia está na faixa de MeV. Fazendo com que seja capaz de penetrar dezenas de micrometros no alumínio. (3).

2.3.1.2 Radiação por nêutron

Geralmente ocorre pela quebra de um núcleo atômico, de forma natural ou induzida. O nêutron possui a mesma massa que o próton, porém com carga nula. A ausência de carga dificulta o freamento dessa partícula. Uma blindagem eficiente contra este tipo de radiação é a água. (3).

2.3.1.3 Radiação por partícula α

É resultado da interação do núcleo do átomo de hélio (dois prótons e dois nêutrons) com a matéria. Com uma energia na faixa de MeV, a partícula α tem forte interação com a matéria. No silício, pode penetrar até 23 μm. (3).

2.3.1.4 Radiação por partícula β

A partícula β possui massa igual à do elétron, porém pode possuir carga positiva (pósitron) ou negativa (elétron). Em comparação à partícula α, a partícula β pode facilmente penetrar no material e ser defletida. (3).

2.3.1.5 Radiação por raios-X e raios-gama

São ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda. Os raios-X são obtidos através do choque de partículas carregadas com uma superfície, enquanto os raios-gama ocorrem durante as interações nucleares. Os raios-X e os raios-gama interagem de forma similar com a matéria e possuem alto poder de penetração, causando ionização dos átomos do material. (3; 36).

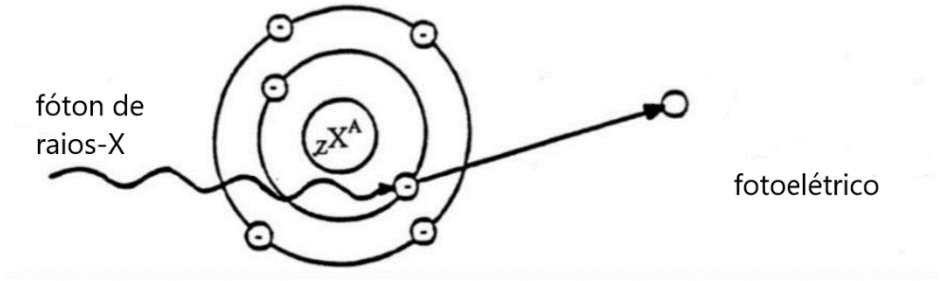
Os conceitos da radiação por raios-X são aprofundados na seção seguinte, já que esse é o tipo de radiação ionizante que foi utilizada nos experimentos conduzidos para este trabalho.

2.3.2 Raios-X

Os raios-X são ondas eletromagnéticas extremamente penetrantes. Eles interagem com a matéria por meio dos efeitos fotoelétrico e Compton, ou pela produção de pares elétron-pósitron. (36). Um fóton de radiação X pode perder toda ou quase toda energia numa única interação, e a distância que ele percorre antes de interagir não pode ser prevista. (36).

Em um dos mecanismos de interação, denominada de efeito fotoelétrico, um átomo absorve um fóton, e o elétron ligado a uma órbita interna é ejetado dessa órbita. Ocorrendo então, a liberação de energia por meio de colisões (ionização do meio). (35). A figura 15 ilustra a interação de um fóton com um átomo.

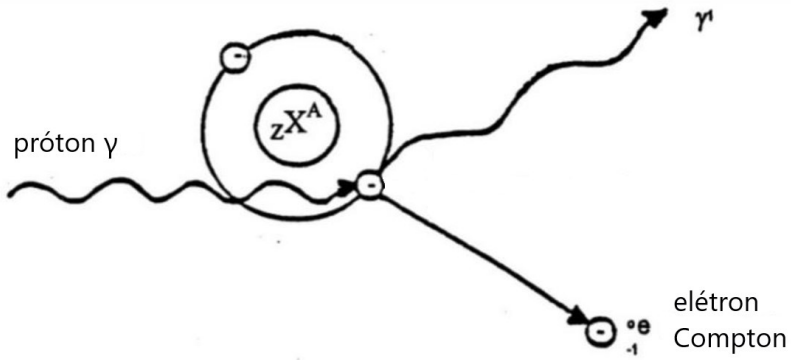
Figura 15 – Representação gráfica do efeito fotoelétrico



Fonte: Autor "adaptado de" (36), 2012, p. 2-14

No segundo mecanismo de interação, denominado de efeito Compton, há o espalhamento elástico do fóton com um elétron fracamente ligado ao átomo. Isso faz com que o fóton mude de direção com menor energia e o elétron seja ejetado da órbita do átomo. (36). Neste efeito, o elétron perde sua energia por meio de colisões (ionização do meio) e o fóton espalhado interage com o meio novamente. (36). A figura 16 ilustra o efeito Compton nos átomos.

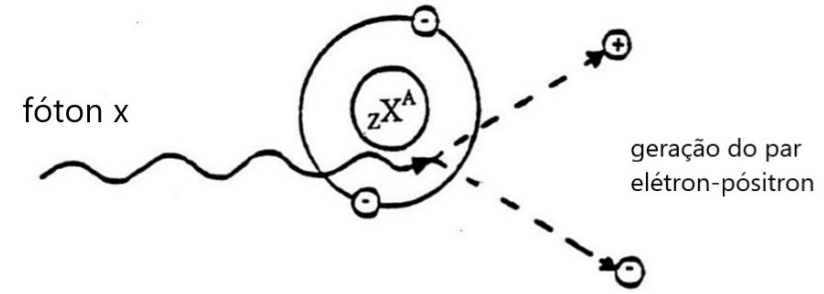
Figura 16 – Representação gráfica do efeito Compton



Fonte: Autor "adaptado de" (36), 2012, p. 2-15

Completando os três mecanismos, pode ocorrer também a produção de pares elétron-pósitron (desde que se tenha uma energia maior que 1,022 MeV). (36). Uma alta energia de raios-X interage com o núcleo do material e desaparece, dando origem assim a um par elétron-pósitron. A interação deve ocorrer em uma região com campo elétrico, normalmente próxima do núcleo do átomo. (36). A figura 17 ilustra a geração do par elétron-pósitron.

Figura 17 – Representação gráfica da geração do par elétron-pósitron



Fonte: Autor "adaptado de" (36), 2012, p. 2-16

Os MOSFETs em ambientes radioativos podem ser degradados por efeitos classificados como efeitos acumulados ou efeitos singulares. (35).

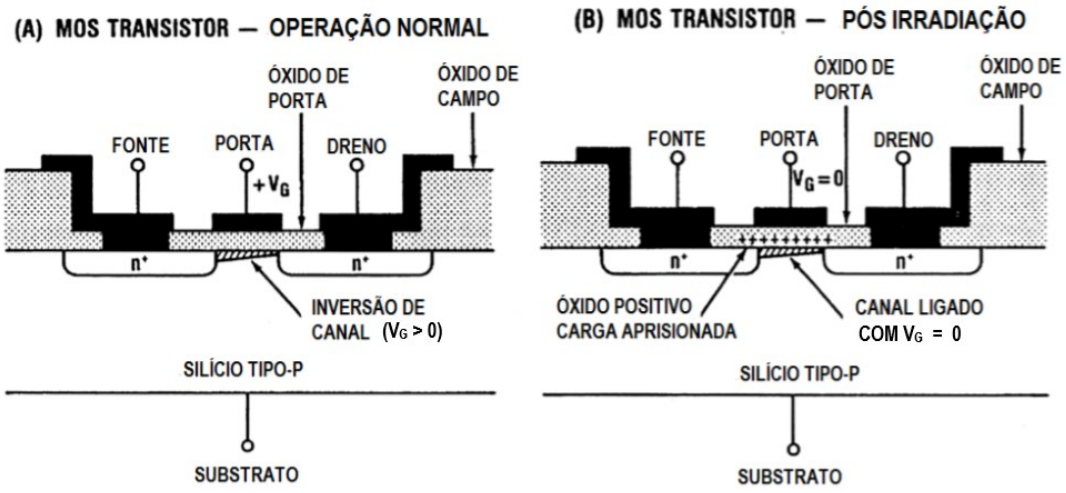
Os efeitos singulares (SEE, *Single Event Effects*) são causados pelo impacto de partículas ionizantes de elevada energia no silício, resultando em eventos transientes. Estes eventos podem ser classificados de acordo com os danos causados: falhas permanentes (*hard erros*), não permanentes (*soft erros*), ou sem resultar em falha. (35).

Os efeitos acumulados, são resultados de defeitos relativamente estáveis e que provocam a degradação de parâmetros elétricos do dispositivo. (35). Estes efeitos podem ser classificados como danos por deslocamento (*displacement damage*) e efeitos de dose total ionizante (TID, *Total Ionizing Dose effects*) (35), que é o foco deste trabalho.

2.3.3 Efeitos da TID

A dose total ionizante (TID, *Total Ionizing Dose*) se dá pelo longo tempo de exposição da matéria às radiações ionizantes e seus efeitos ocorrem principalmente, por consequência do acúmulo de cargas nos dielétricos dos dispositivos semicondutores. (35). Nos MOSFETs, a TID provoca um acúmulo de cargas positivas armadilhadas no óxido (*oxide-trapped charge*) e a geração de armadilhadas na interface (*interface traps*). (4; 5). A figura 18 ilustra o acúmulo de cargas armadilhadas no óxido e sua influência no funcionamento do MOSFET.

Figura 18 - Esquemático de um nMOSFET com sua operação normal e após a irradiação

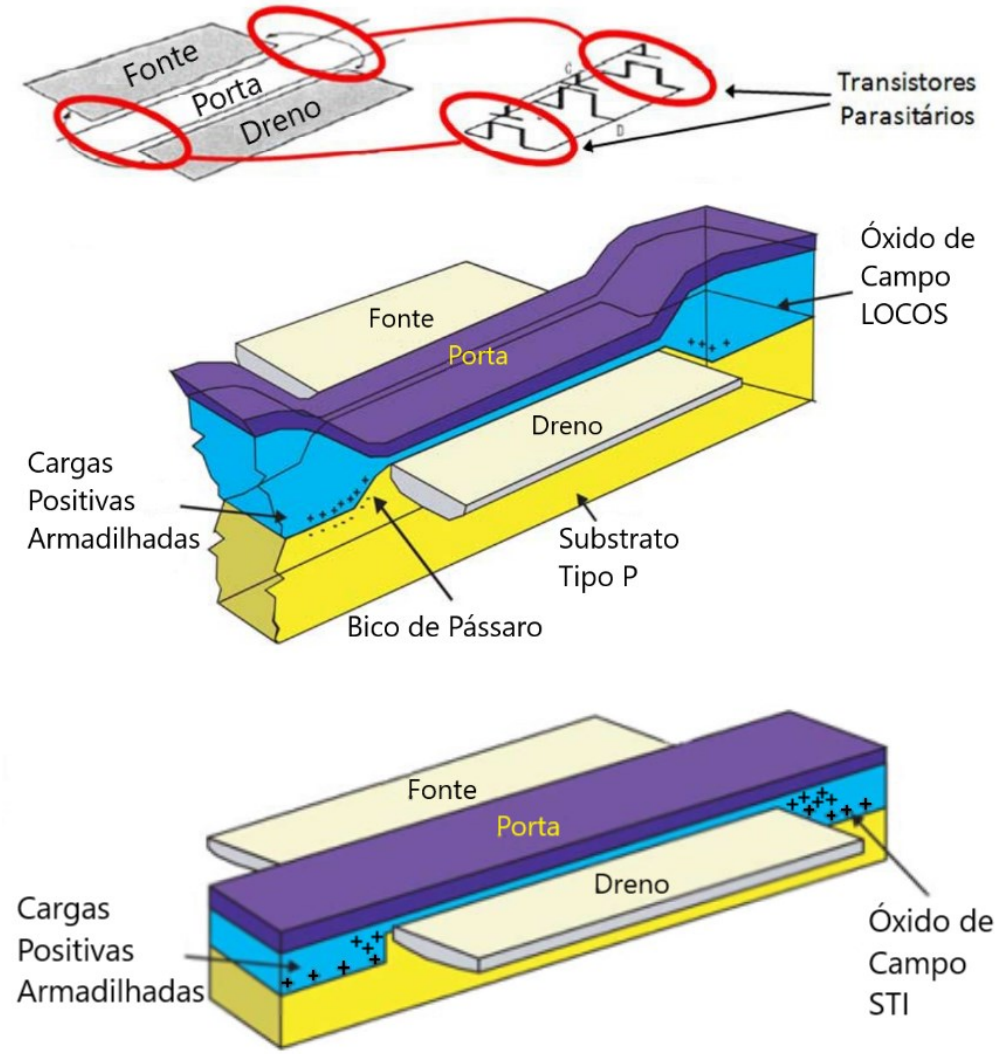


Fonte: Autor “adaptado de” (4), 2003, p. 484

Como visto na figura 18, o aprisionamento das cargas positivas no óxido, resulta num menor potencial necessário entre porta e dreno para a formação do canal entre dreno e fonte no MOSFET, podendo causar por exemplo, que o dispositivo esteja ligado quando deveria estar desligado.

Além do acúmulo de cargas positivas no óxido entre a região de porta e canal, ilustrado na figura 18, outras regiões que também são muito afetadas pelo aprisionamento dessas cargas devido às radiações ionizantes, são as chamadas regiões de bico de pássaro. (37). Essas regiões são geradas na fabricação do óxido de campo do MOSFET. (37). A figura 19 apresenta as regiões de bico de pássaro em duas diferentes estruturas (LOCOS e STI) e o problema das cargas armadilhadas nestas regiões.

Figura 19 – Estruturas LOCOS e STI de um nMOSFETs indicando as regiões de bico de pássaro e o circuito elétrico equivalente entre o MOSFET principal e os transistores parasitários



Fonte: Autor "adaptado de" (37), 2008, p. 1841

Na figura 19 são apresentadas as estruturas LOCOS e STI para MOSFETs. Neste trabalho os dispositivos são da estrutura STI (trincheira), que é uma alternativa utilizada para diminuir a região de bico de pássaro formada nos dispositivos. Como pode ser observado na figura 19, essas regiões de bico de pássaro nas extremidades do canal funcionam como transistores paralelos ao dispositivo principal. (37). A exposição do MOSFET às radiações ionizantes aumenta a influência desses transistores parasitários, podendo causar um aumento da corrente de fuga entre as regiões de dreno e fonte. O aumento da corrente de fuga, por consequência, resulta num maior consumo de energia elétrica quando o MOSFET está desligado. (37).

A intensidade do acúmulo de cargas no óxido depende do campo elétrico vertical aplicado ao MOSFET (campo elétrico por razão da tensão aplicada entre os terminais da porta e fonte), do processo de fabricação do dispositivo e da espessura do óxido de porta do MOSFET. (37).

A geração de armadilhas na interface é tipicamente um efeito menos efetivo que o acúmulo de cargas no óxido, e os mecanismos para sua ocorrência ainda são estudados. A quantidade de armadilhas geradas na interface Si/SiO_2 de um MOSFET dependerá de fatores como a dose total absorvida, o campo elétrico vertical aplicado, a espessura do óxido de porta e o material de porta do MOSFET. (4; 37).

2.4 INFLUÊNCIA DA TID NOS PARÂMETROS DOS MOSFETS

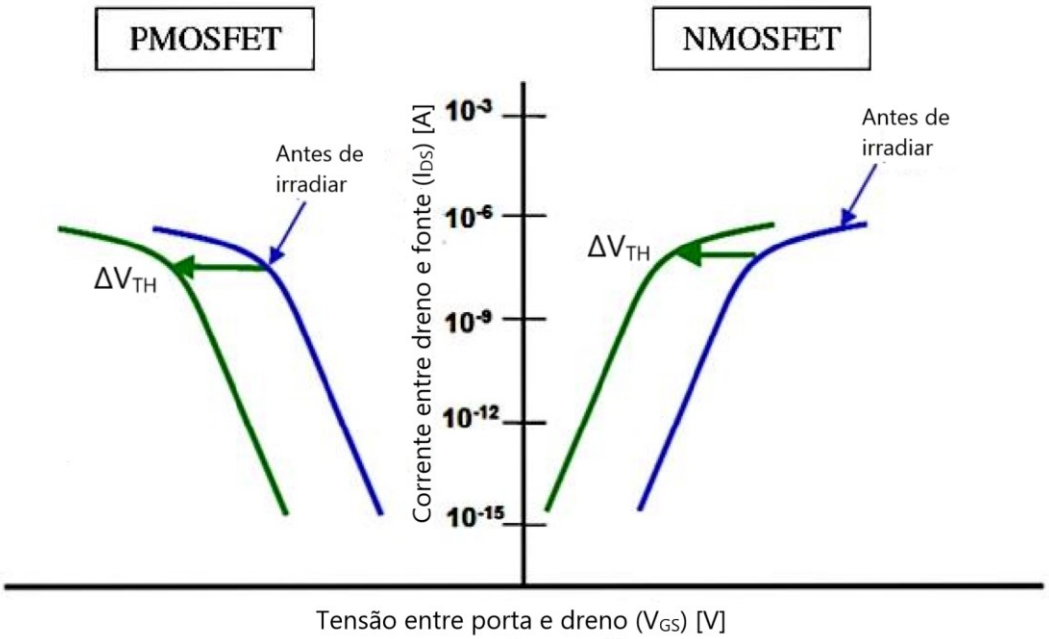
As cargas armadilhadas no óxido e na interface do MOSFET se mostram um grande problema no funcionamento desses dispositivos, já que além do aumento da corrente de fuga e desvio da tensão de limiar, também podem causar a degradação da mobilidade de portadores do canal. (37). Nas seções seguintes, são apresentadas as influências diretas nos principais parâmetros elétricos dos MOSFETs.

2.4.1 Desvio da tensão de limiar

É um dos efeitos mais importantes levando em conta um projeto eletrônico, já que a tensão de limiar (V_{TH}) é a tensão necessária para ligar o transistor. (1). A alteração desta tensão pode fazer com que o MOSFET não funcione da maneira com que foi planejado num circuito ou até inutilizá-lo completamente. (4; 37).

Com o aprisionamento de cargas no dióxido de silício, torna-se mais fácil atingir o limiar de inversão do substrato, ou seja, a tensão de limiar se torna menor. (37). Num nível de extrema radiação, este efeito pode fazer com que nMOSFETs não possam ser desligados e pMOSFETs necessitem de uma tensão muito negativa para serem ligados. (5; 35; 37). A figura 20 ilustra a variação de V_{TH} em MOSFETs expostos às radiações ionizantes.

Figura 20 - Curvas de I_{DS} em função de V_{GS}, indicando a variação da V_{TH} em MOSFETs submetidos às radiações ionizantes



Fonte: Autor "adaptado de" (5), 2006, p. 3109

Na figura 20, ΔV_{TH} representa a variação de $V_{TH,}$ considerando os valores antes e depois do processo de irradiação. (5).

2.4.2 Redução da transcondutância

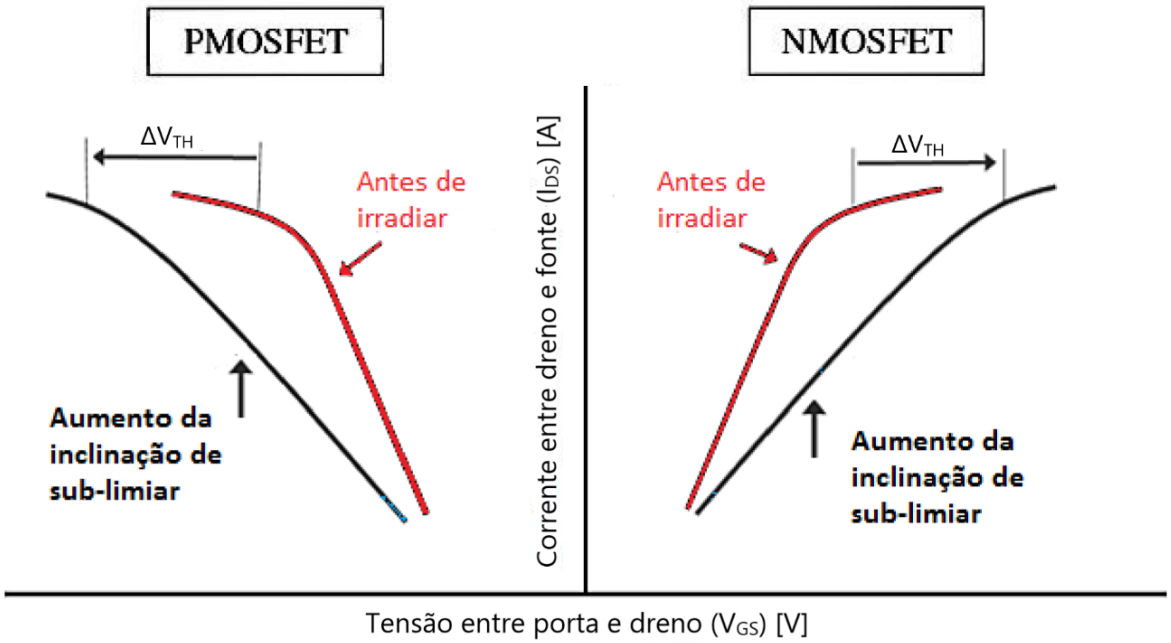
As cargas armadilhadas na interface Si/SiO_2 do MOSFET diminuem a mobilidade dos portadores no canal. Isso ocasiona a redução na condutância do canal e na transcondutância do MOSFET, que por sua vez resulta numa redução do ganho do dispositivo. (4; 35).

A queda na velocidade dos portadores acaba aumentando o tempo de trânsito, levando a uma redução direta na velocidade do dispositivo. (4).

2.4.3 Aumento da inclinação de sublimiar

As cargas armadilhadas na interface tendem a alargar a curva característica na região de sublimiar. Dessa forma, são necessárias maiores variações de tensão entre a porta e a fonte para atingir as mesmas variações de corrente elétrica entre dreno e fonte da situação pré-irradiação. (5; 35). A figura 21 ilustra como o armadilhamento de cargas na interface Si/SiO_2 afeta a inclinação de sublimiar (S).

Figura 21 - Curvas de I_{DS} em função de V_{GS}, indicando o aumento de S pelo efeito do aprisionamento de cargas na interface Si/SiO_2 do MOSFET



Fonte: Autor "adaptado de" (5), 2006, p. 3111

2.4.4 Aumento da corrente de fuga

A corrente de fuga dos MOSFETs aumenta tanto pelo aprisionamento de cargas no óxido, como pela geração de armadilhas na interface. Além disso, há também o problema dos transistores parasitários. (5; 37). A radiação ionizante é capaz de aumentar a influência dos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro. (5; 37). Esse aumento de corrente de fuga pode levar à elevada dissipação de potência e falhas funcionais em CIs. (4; 35).

O acúmulo de cargas nos espaços entre os transistores ou nas regiões de bico de pássaro, torna o problema dos transistores parasitários ainda mais grave. Isso porque há a formação de transistores parasitários que podem formar caminhos de condução fora de controle entre dreno e fonte do mesmo MOSFET, ou até mesmo entre MOSFETs diferentes. (5; 35; 37).

3 LEIAUTES INOVADORES PARA MOSFETS

Esta seção apresenta a origem dos leiautes inovadores, ajudando na compreensão dos efeitos presentes em suas estruturas e focando no MOSFET de leiaute de porta octogonal (MOSFET Octo).

3.1 ORIGEM DOS NOVOS LEIAUTES DE PORTA PARA MOSFETS

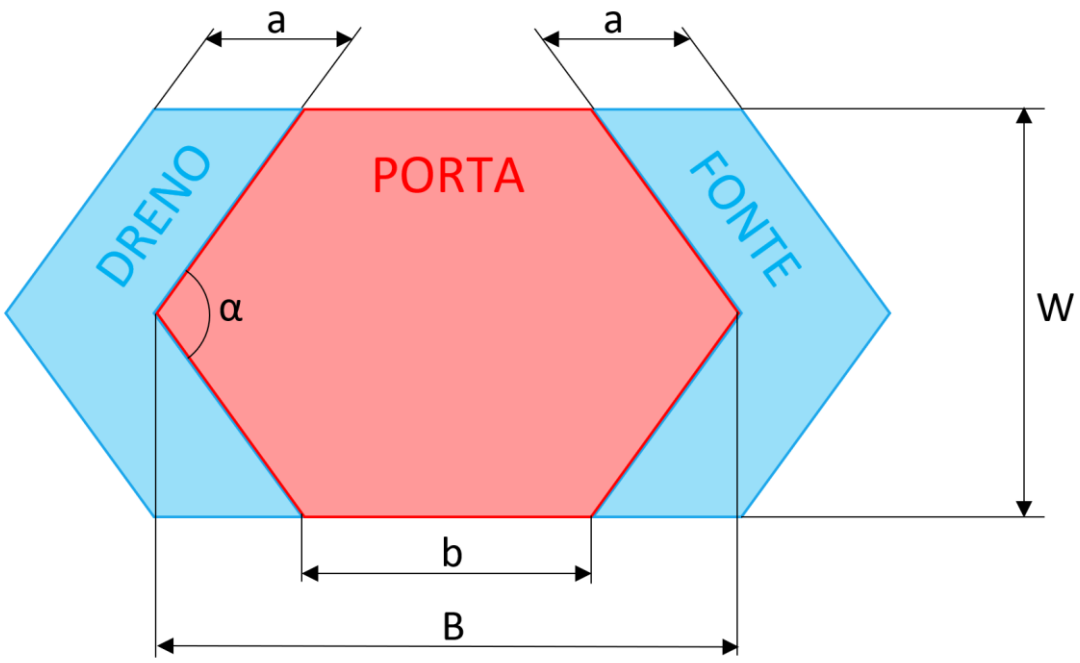
A principal motivação para o estudo e desenvolvimento dos novos leiautes de porta para MOSFETs se deu pela observação do efeito de canto (CE, *Corner Effect*). (15). O efeito de canto é responsável por aumentar o campo elétrico resultante em regiões próximas aos vértices das regiões de junção. Aplicando esse conceito na direção longitudinal do canal do MOSFET, visando potencializar o campo elétrico longitudinal, surge o efeito conhecido como efeito longitudinal de canto (LCE, *Longitudinal Corner Effect*). (15).

O LCE resulta num aumento da velocidade de deriva média das cargas móveis entre dreno e fonte em MOSFETs com leiaute de porta que se aproveitam deste efeito (como o MOSFET Octo). A presença do LCE em um MOSFET com leiaute de porta não convencional, resulta em um melhor desempenho elétrico em comparação ao MOSFET com geometria de porta retangular. (15).

3.2 MOSFET DE LEIAUTE DE PORTA HEXAGONAL (MOSFET DIAMANTE)

O MOSFET de leiaute de porta hexagonal (MOSFET Diamante) foi o primeiro leiaute inovador a ser idealizado. Seu desenvolvimento se baseou na ideia de aproveitar o campo elétrico longitudinal resultante para potencializar suas características elétricas. (15; 16). A figura 22 ilustra um exemplo desse estilo de leiaute de porta para MOSFETs.

Figura 22 - Vista superior de um MOSFET do tipo Diamante com suas dimensões de interesse

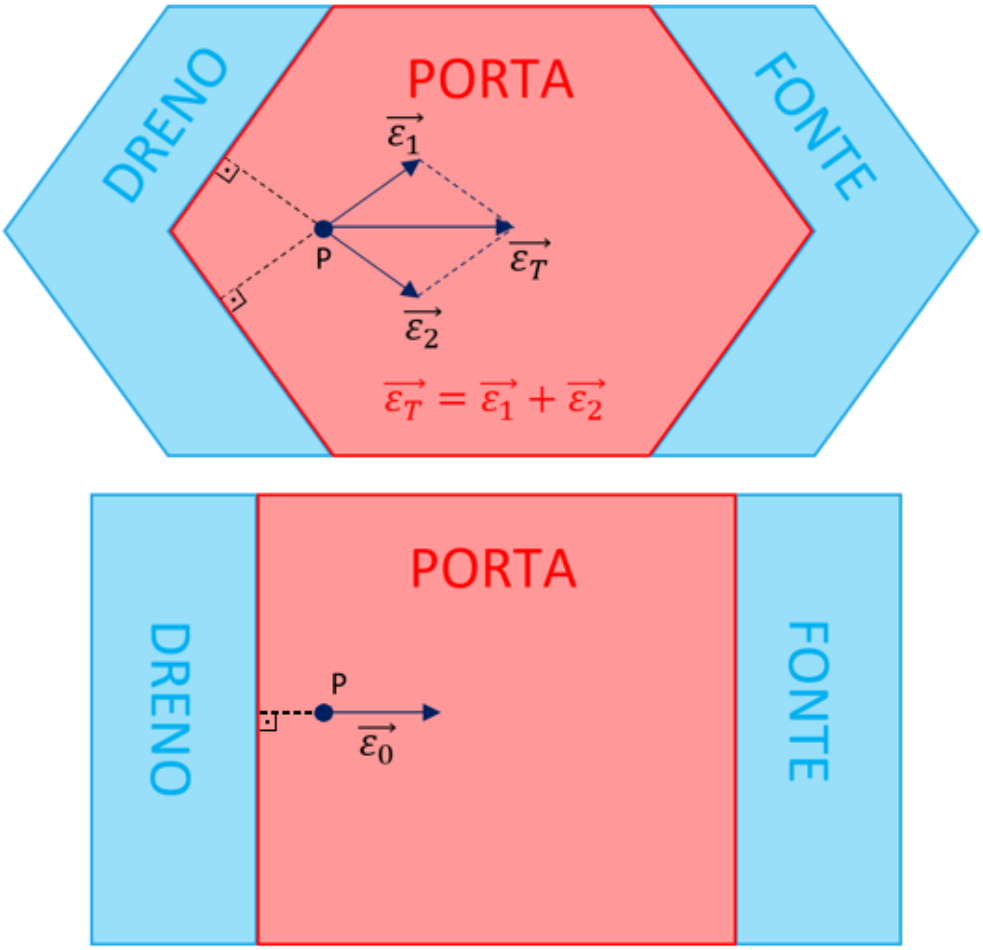


Fonte: Autor

Na figura 22, b e B são o menor e o maior comprimento de canal da região de porta do MOSFET Diamante, respectivamente, W é a largura do canal do MOSFET, α é o ângulo entre as junções metalúrgicas do filme de silício (região do canal) e as regiões de dreno e fonte, decorrente da geometria de porta hexagonal do MOSFET Diamante, e "a" é o comprimento das regiões de dreno e de fonte.

Essa mudança do leiaute de porta retangular para o hexagonal, considerando-se a mesma área de porta (A_G) e largura de canal (W), faz com que através do efeito de canto longitudinal, obtenha-se um aumento do campo elétrico longitudinal $(\overrightarrow{\varepsilon_{//}})$ ao longo do comprimento do canal (L) e consequentemente, num aumento da velocidade de deriva média das cargas móveis no canal. Esses efeitos resultam numa maior corrente elétrica entre dreno e fonte, maior transcondutância e menor resistência de estado ligado. (15). A figura 23 apresenta um exemplo do MOSFET Diamante e seu MOSFET equivalente convencional, ou seja, MOSFET de leiaute de porta retangular considerando as mesmas A_G, W e regras de projeto correspondente a um determinado processo de fabricação de CIs CMOS.

Figura 23 - Vistas superiores dos MOSFETs Diamante e seu equivalente convencional, com representação das componentes de seus campos elétricos longitudinais num ponto P



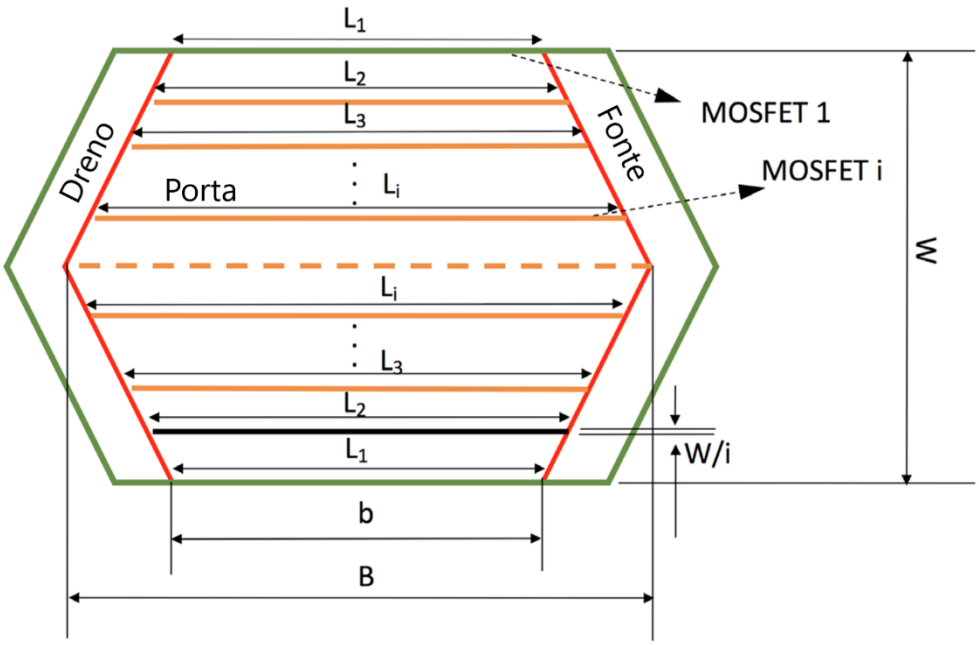
Fonte: Autor

Na figura 23, $\vec{\varepsilon_1}$, $\vec{\varepsilon_2}$ são as componentes do campo elétrico longitudinal no ponto P, que são geradas através da aplicação de uma tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) e pelas interfaces formadas pelas regiões de dreno e o filme de silício da região de canal do MOSFET Diamante, $\vec{\varepsilon_T}$ é o vetor resultante da composição dessas componentes longitudinais de campo elétrico, que é maior que aquela observada no MOSFET convencional equivalente ($\vec{\varepsilon_0}$), considerando-se a mesma área de porta, largura de canal e condições de polarização. (15). O desempenho elétrico do MOSFET Diamante ainda pode ser potencializado com a redução do ângulo α de sua estrutura, já que quanto menor o ângulo α, maior é o campo elétrico longitudinal resultante. No entanto, o projeto de dispositivos com leiaute não convencionail é limitado pelas regras do processo de fabricação de CIs CMOS, o que pode limitar o ângulo α do MOSFET. (15).

É possível notar na figura 24 que o MOSFET Diamante apresenta diferentes comprimentos de canal ao longo de sua largura, variando de b até B. (15). Essa variação no seu comprimento de canal faz com que o comprimento efetivo de canal do dispositivo seja maior que o mínimo comprimento permitido pelo processo de fabricação de CIs CMOS. (15). No entanto, essa variação também gera um novo efeito no MOSFET, chamado de efeito das conexões paralelas de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*PArallel connections of MOSFETs with Different channel Lengths Effect*, PAMDLE). (15; 16). O PAMDLE é responsável por potencializar ainda mais a corrente elétrica entre dreno e fonte dos MOSFETs, principalmente nas regiões em torno das margens dos dispositivos. (15; 16).

O MOSFET Diamante pode ser representado como conexões paralelas de MOSFETs convencionais infinitesimais com diferentes comprimentos de canal. (15). A figura 24 ilustra essa representação do dispositivo.

Figura 24 - Representação do MOSFET Diamante por infinitesimais MOSFETs convencionais conectados em paralelo



Fonte: Autor “adaptado de” (15), 2016, p. 11

Na figura 24, “i” é o índice para indicar os infinitos MOSFETs de largura de canal infinitesimal. Esses vários MOSFETs infinitesimais que compõem o MOSFET Diamante têm seus diferentes comprimentos de canal (L_1, L_2, L_3,...,L_i) e correntes elétricas entre dreno e fonte, que juntas são iguais à corrente elétrica entre dreno e fonte da estrutura inteira do MOSFET

Diamante. (15). Baseado nesse funcionamento, o comprimento efetivo de canal de um MOSFET Diamante (L_{eff_DM}) pode ser calculado pela equação (4). (15; 16).

$$L_{eff_DM} = \frac{B-b}{ln\left(\frac{B}{b}\right)} \quad (4)$$

Se considerarmos então um MOSFET de leiaute de porta retangular com a mesma área de porta (A_G) e mesma largura de canal (W) que um MOSFET Diamante, é possível notar que o L_{eff_DM} é sempre menor que o comprimento efetivo de canal de seu MOSFET convencional (L) equivalente (mesma área de porta e mesma largura de canal), que é dado pela equação (5). (15; 16).

$$L = \frac{B+b}{2} \quad (5)$$

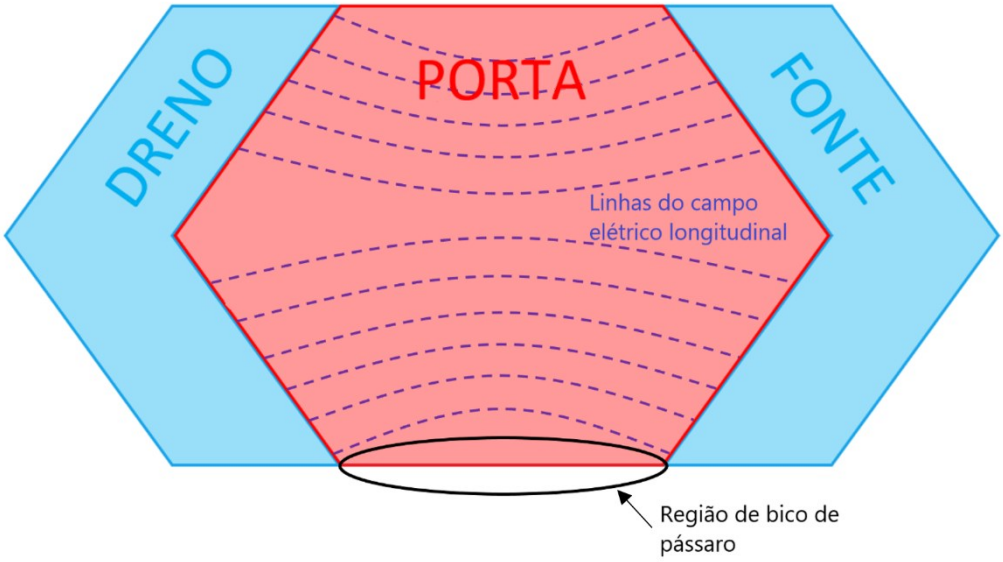
Portanto, o MOSFET de leiaute de porta hexagonal é capaz de fornecer um comprimento de canal efetivo (L_{eff}) menor que o do seu MOSFET convencional equivalente, considerando que ambos tenham as mesmas áreas de porta e larguras de canal. (15; 16). O cálculo do comprimento de canal (L) do MOSFET convencional equivalente é importante, porque ele permite quantificar o quanto o efeito PAMDLE é capaz de potencializar o MOSFET Diamante, permitindo que sejam feitas comparações do MOSFET Diamante e o MOSFET convencional retangular, considerando as mesmas áreas de porta e larguras de canal. Como o MOSFET Diamante tem um comprimento de canal menor em suas extremidades, a corrente elétrica entre dreno e fonte tende a fluir mais por essas regiões. Esse efeito faz com que a corrente elétrica entre dreno e fonte do MOSFET Diamante seja sempre maior que a de seu MOSFET convencional equivalente, quando consideradas as mesmas A_G, mesmos W e as mesmas condições de polarização. (15; 16).

Ambos os efeitos, o LCE e o PAMDLE, ocorrem simultaneamente no MOSFET Diamante e ambos são responsáveis por melhorar seu comportamento elétrico em comparação ao do MOSFET retangular convencional, considerando-se que ambos apresentam as mesmas áreas de porta (A_G) e largura de canal (W). (15; 16).

Foram realizados estudos para verificar como esses efeitos agiam em tais estruturas quando os dispositivos são expostos a altas temperaturas. Os resultados mostraram que mesmo em tais condições, os efeitos presentes na estrutura do MOSFET Diamante continuam a fornecer um melhor desempenho para ele quando comparado ao do seu MOSFET convencional equivalente, considerando-se as mesmas A_G e mesmos W. (17). Foi verificado por exemplo, que em diferentes temperaturas o R_{ON} do MOSFET Diamante permanece cerca de 2 vezes menor que o do MOSFET convencional (considerando mesma área de porta e largura de canal). (17).

Além dos dois efeitos já mencionados, um terceiro efeito presente em tal estrutura e muito importante quando considerado dispositivos para as aplicações em ambientes de radiações ionizantes, é o efeito da desativação dos MOSFETs parasitários nas regiões de bico de pássaro (*DEactivation the PArasitic MOSFETs in the Bird's Beak Regions Effect*, DEPAMBBRE). (15; 18). O DEPAMBBRE é responsável por desativar eletricamente os transistores parasitários existentes na estrutura dos MOSFETs quando operam em ambientes radioativos. (15; 18). A desativação dos transistores parasitários se dá pelo fato de que as linhas do campo elétrico longitudinal no MOSFET Diamante são curvas e acabam não passando pelas regiões de bico de pássaro. Sendo assim, esses dispositivos também se mostram mais tolerantes às radiações ionizantes que o MOSFET retangular convencional. (15; 18). Estudos mostraram por exemplo que a I_{OFF} do MOSFET Diamante teve uma variação 240% menor que a do seu MOSFET convencional equivalente após a exposição às radiações ionizantes (considerando a mesma área de porta, largura de canal e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes). A figura 25 ilustra como o efeito DEPAMBBRE atua no dispositivo.

Figura 25 - Representação do MOSFET Diamante e suas linhas de campo elétrico longitudinal ao longo da estrutura



Fonte: Autor

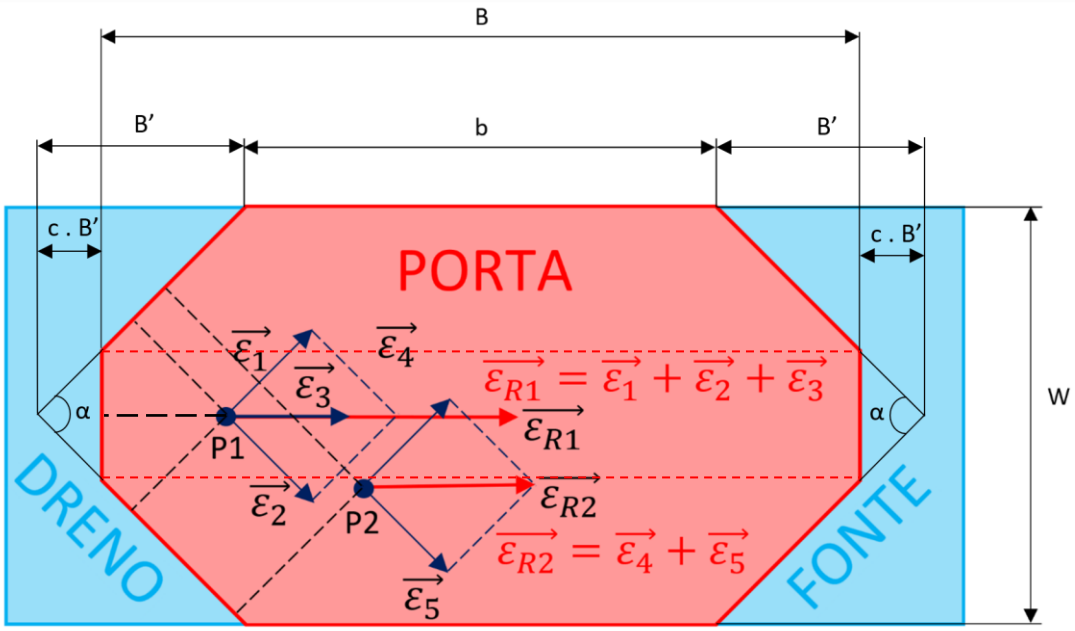
Vale notar também que o MOSFET Diamante possui regiões de bico de pássaro menores que seu MOSFET convencional equivalente (MOSFET retangular com mesma área de porta e mesma largura de canal que o MOSFET Diamante), propiciando uma menor corrente de dreno de estado desligado (I_{OFF}). (15).

3.3 MOSFET DE LEIAUTE DE PORTA OCTOGONAL (MOSFET OCTO)

Partindo do leiaute de porta hexagonal para MOSFETs, foram propostos e estudados também os leiautes de porta octogonal e elipsoidal. (15; 23; 30). O MOSFET de leiaute de porta octogonal (MOSFET Octo) pode ser visto como uma forma simplificada do MOSFET de leiaute de porta elipsoidal e é ele o foco de estudo neste trabalho.

O MOSFET Octo foi desenvolvido com a ideia de se eliminar os cantos obtusos da geometria hexagonal, aumentando assim sua tensão de ruptura entre dreno e fonte (BV_{DS}), e melhorar sua tolerância a descargas eletrostáticas (ESD). (15). Esta mudança de leiaute de porta é feita pelo corte dos cantos da geometria hexagonal por um fator de corte "c". (15). A figura 26 apresenta o MOSFET de leiaute de porta octogonal e suas componentes do campo elétrico longitudinal.

Figura 26 - Vista superior do MOSFET Octo com suas dimensões de interesse e representação das componentes do seu campo elétrico longitudinal



Fonte: Autor

Na figura 26, b e B são respectivamente, o menor e o maior comprimento de canal do MOSFET Octo, B' é a altura da parte triangular da geometria hexagonal de porta, c é o fator de corte para os cantos da geometria hexagonal de porta, W é a largura de canal do MOSFET Octo e α é o ângulo entre as junções metalúrgicas do filme de silício (região do canal) e as regiões de dreno e fonte, decorrente da geometria de porta hexagonal. Na figura 26, $\vec{\varepsilon_1}$, $\vec{\varepsilon_2}$ e $\vec{\varepsilon_3}$ são as

componentes do campo elétrico longitudinal no ponto P1, que sofre a influência de 3 diferentes componentes pela sua localização na estrutura. No ponto P2, por exemplo, só existem duas componentes ($\overrightarrow{\varepsilon_4}$ e $\overrightarrow{\varepsilon_5}$), decorrentes da polarização entre dreno e fonte (V_{DS}). (15; 23). Os vetores $\overrightarrow{\varepsilon_{R1}}$ e $\overrightarrow{\varepsilon_{R2}}$ são respectivamente, os vetores resultantes das componentes do campo elétrico longitudinal nos pontos P1 e P2. (15; 23).

O leiaute de porta octogonal para MOSFETs, assim como o leiaute do tipo Diamante, também apresenta os efeitos LCE, PAMDLE e DEPAMBBRE incorporado em sua estrutura. (15; 23; 29). Da mesma forma que o MOSFET Diamante, o campo elétrico longitudinal resultante do MOSFET Octo é ainda maior, se o seu ângulo α for ainda menor. O ângulo α pode ser limitado pelas regras de projeto do fabricante (15).

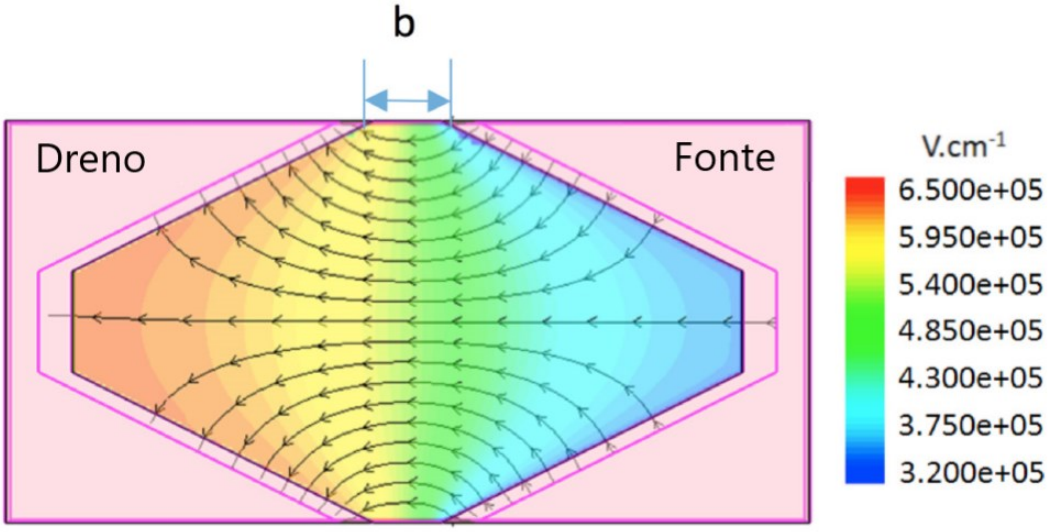
Podendo também ser decomposto em infinitesimais MOSFETs retangulares convencionais, o comprimento efetivo de canal (L_{eff_OM}) do MOSFET Octo é dado pela equação (6). (15)

$$L_{eff_OM} = \frac{1}{\frac{1-c}{B-b} ln\left(\frac{B}{b}\right) + \frac{c}{B}} \tag{6}$$

Pela equação (6) é possível observar que quando c é igual a 1, então L_{eff_OM} é igual ao L_{eff} de um MOSFET convencional retangular, que é igual a B. Já quando c é igual a 0, L_{eff_OM} é igual a L_{eff_DM}, pois não há corte algum realizado na estrutura hexagonal. (15). Sendo o comprimento efetivo de canal do MOSFET Octo sempre menor que o do seu MOSFET equivalente convencional (considerando as mesmas A_G e mesmos W), há um ganho na sua corrente elétrica entre dreno e fonte em comparação à do seu equivalente convencional. (15; 23). Será apresentado neste trabalho o desenvolvimento de uma equação para a obtenção do comprimento de canal (L) de um MOSFET convencional que apresente a mesma área de porta e a mesma largura de canal que de um MOSFET Octo.

Como as regiões de bico de pássaro do MOSFET Octo são idênticas às vistas no MOSFET Diamante, os mesmos efeitos já discutidos e considerações são válidos para este leiaute. (15; 29). A figura 27 apresenta uma simulação numérica tridimensional ilustrando o potencial elétrico (em cores) ao longo da região de canal do MOSFET Octo. (12).

Figura 27 - O campo elétrico longitudinal e o potencial elétrico (em cores) ao longo da região de canal do MOSFET Octo, obtido através de uma simulação numérica 3D

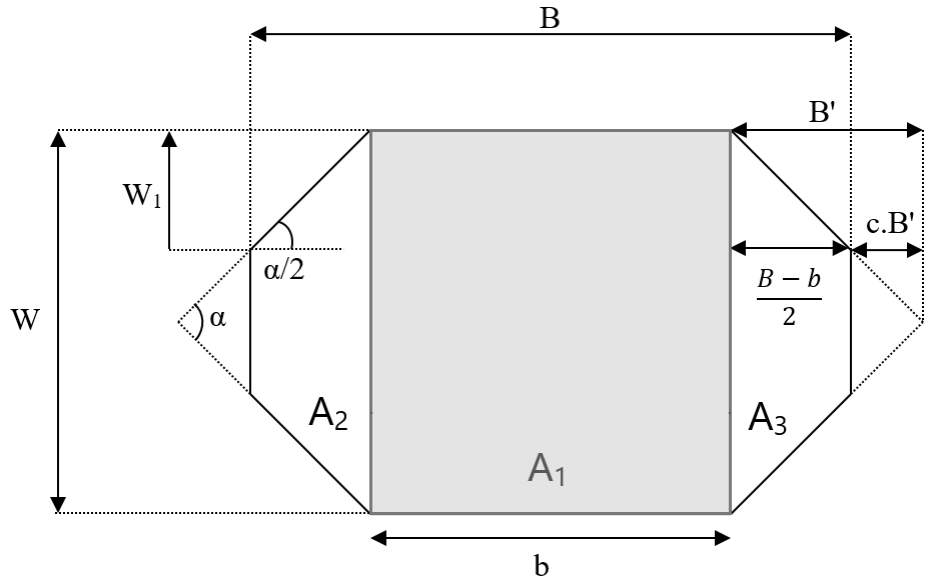


Fonte: Autor "adaptado de" (15), 2016, p. 27

3.3.1 Determinação do comprimento de canal de um MOSFET convencional que apresente uma mesma área de porta e mesma largura de canal que de um MOSFET Octo

A figura 28 indica as dimensões de interesse para o desenvolvimento da equação de L para um MOSFET convencional que apresenta uma mesma área de porta e mesma largura de canal que de um MOSFET Octo.

Figura 28 - Representação da porta de geometria octogonal com indicação das dimensões importantes



Fonte: Autor

Na figura 28, W_1 é uma fração da largura de canal do MOSFET Octo. Para esta abordagem, a geometria octogonal de porta é dividida em 3 áreas: uma área retangular ao centro da geometria octogonal (A_1) e duas áreas trapezoidais em suas laterais (A_2 e A_3).

As áreas trapezoidais podem ser obtidas através da equação (7), que é a equação para cálculo da área de A_2 e A_3.

$$A_2 = A_3 = \frac{[W+(W-2W_1)]}{2} \cdot \frac{B-b}{2} = (W - W_1) \cdot \frac{B-b}{2} \quad (7)$$

A área da porta do MOSFET Octo (A_{G_OM}), é dada pela soma das 3 áreas ($A_1 + A_2 + A_3$), substituindo-se o valor de W_1 como dado pela equação (8).

$$W_1 = \left(\frac{B-b}{2}\right) . tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (8)$$

A A_{G_OM} é definida pela equação (9).

$$A_{G_OM} = b.W + \left[W - \left(\frac{B-b}{2}\right) . tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right] . (B - b) \quad (9)$$

Como a área de um MOSFET retangular (A_G) é definida pelo produto de W por L, o L de um MOSFET convencional de porta retangular que apresenta a mesma área de porta e mesma largura de canal (W) que um MOSFET Octo, é obtido após dividir a área da porta do MOSFET Octo (A_{G_OM}) pela sua largura de canal (W). Portanto, o L do MOSFET convencional equivalente (mesma A_G e W que de um MOSFET Octo) pode ser obtido através da equação (10).

$$L = b + \left[1 - \left(\frac{B-b}{2W}\right).tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right].(B-b) \quad (10)$$

3.3.2 Estudos realizados com o MOSFET Octo

No primeiro trabalho realizado com o MOSFET Octo, foram realizadas simulações tridimensionais (3D) e algumas análises experimentais visando comparar os MOSFETs Diamante, Octo e convencional retangular, considerando as mesmas condições de polarização e normalizando-se as curvas da corrente elétrica entre dreno e fonte pela razão de aspecto dos dispositivos (W/L), removendo assim os efeitos das dimensões dos dispositivos. (23). Neste estudo, foi considerado apenas o efeito LCE sobre a estrutura e tanto os resultados das simulações, quanto os resultados experimentais indicaram que o MOSFET Octo era uma alternativa para aplicações em CIs CMOS analógicos, já que houve melhoria nos seus parâmetros quando comparado a um MOSFET convencional equivalente (considerando as mesmas áreas de porta e larguras de canal), tais como I_{DS} (28% maior que do seu MOSFET convencional equivalente), I_{DSsat} (30% maior que do seu MOSFET convencional equivalente), g_m (26% maior que do seu MOSFET convencional equivalente) e R_{on} (21% menor que do seu MOSFET convencional equivalente). (15; 23).

Trabalhos experimentais posteriores sobre o MOSFET Octo produzido numa tecnologia de 0,5 µm, também demonstraram os benefícios do MOSFET Octo em relação ao MOSFET de leiaute de porta retangular. (24; 25). Os resultados experimentais apresentados, indicaram que um MOSFET Octo com ângulo α de 53,1° e fator de corte c igual a 25 % apresenta praticamente a mesma corrente elétrica entre dreno e fonte (apenas 2,2 % menor) que a observada em um MOSFET Diamante com mesmo ângulo α, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização. No entanto, a área de porta do MOSFET Octo com ângulo α de 53,1° e fator de corte de 25%, é 27 % menor quando comparada ao MOSFET Diamante com mesmo ângulo α, mesmo b e mesmo W que o MOSFET Octo. (24). Também foi verificado que o valor da I_{DS} normalizada pelo aspecto de razão de um MOSFET Octo com ângulo α de 53,1° e fator de corte c igual a 25 %, é 98 % maior que a observada em seu convencional equivalente, considerando as mesmas A_G, mesmos W e mesmas condições de polarização. (24). Neste estudo foram observados ganhos em diversos parâmetros elétricos do MOSFET Octo em comparação a seu convencional equivalente, considerando a mesma área de porta, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização, como melhoras significativas no $g_{mmáx}$ (137% maior no MOSFET Octo), g_m/I_{DS} (47% maior no MOSFET Octo) e f_T (128% maior no MOSFET Octo).

(15; 24). Estes trabalhos foram importantes para consolidar o MOSFET Octo como uma ótima alternativa em aplicações de CIs CMOS RF (rádio frequência) e quantificar a redução de área possível com sua aplicação em comparação ao MOSFET convencional equivalente. (15; 24; 25).

Os estudos experimentais mais recentes, também utilizando MOSFETs SOI de tecnologia de 0,5 µm tiveram como objetivo o estudo comparativo entre o MOSFET Octo e o seu MOSFET convencional equivalente, considerando-se a influência das radiações ionizantes. (15; 26; 27; 28; 29). Todos esses estudos demonstraram que o MOSFET Octo é capaz de mitigar os efeitos das radiações ionizantes quando comparado ao MOSFET convencional de porta retangular, considerando mesma área de porta, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização que o MOSFET Octo. (15; 26; 27; 28; 29).

No primeiro estudo sobre os efeitos das radiações ionizantes, foi observado que um MOSFET Octo com ângulo α de 53,1° e fator de corte c igual a 25 %, apresentou melhor tolerância em relação aos efeitos da TID em seus parâmetros elétricos que um MOSFET convencional retangular com mesmas A_G, W e condições de polarização. (26). Após o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente serem expostos às radiações ionizantes, o MOSFET Octo apresentou uma menor degradação de V_{TH} (cerca de 40 % menor), menor degradação de S (cerca de 20 % menor) e uma menor degradação de I_{LEAK} (cera de 2,7 vezes menor) que o MOSFET convencional equivalente (MOSFET convencional com mesma A_G, mesmo W e mesmas condições de polarização que o MOSFET Octo). (15, 26). Esses resultados podem ser explicados pela menor região de bico de pássaro encontrada no MOSFET Octo, em relação ao MOSFET convencional equivalente, e o efeito DEPAMBBRE presente na estrutura do MOSFET Octo. (15; 26).

Num segundo estudo foi confirmado que o MOSFET Octo é capaz de potencializar as características elétricas e melhorar a tolerância aos efeitos das radiações ionizantes quando comparado a seu MOSFET convencional equivalente. (27). Neste estudo foi observado que o MOSFET Octo obteve menor variação no V_{TH} (40 %), menor variação de I_{DSsat} (106 %), g_m/I_{DS} (cerca de 6,7 %) e um maior valor de A_V no regime de inversão forte (10 %) que os observados no seu convencional equivalente, considerando as mesmas áreas de porta, larguras de canal, condições de polarização e exposição às radiações por raios-X. (27).

Outros trabalhos mostraram ainda como os efeitos LCE e PAMDLE continuam válidos no MOSFET Octo, mesmo após a sua exposição às radiações ionizantes. O MOSFET Octo apresentou um melhor desempenho elétrico levando em conta a figura de mérito I_{ON}/I_{OFF}, e a menor polarização necessária de *back-gate* para que V_{TH} e S voltem a seus valores pré-radiação,

quando comparado a um MOSFET convencional com mesma área de porta, mesma largura de canal, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações por raios-X que o MOSFET Octo. (28; 29).

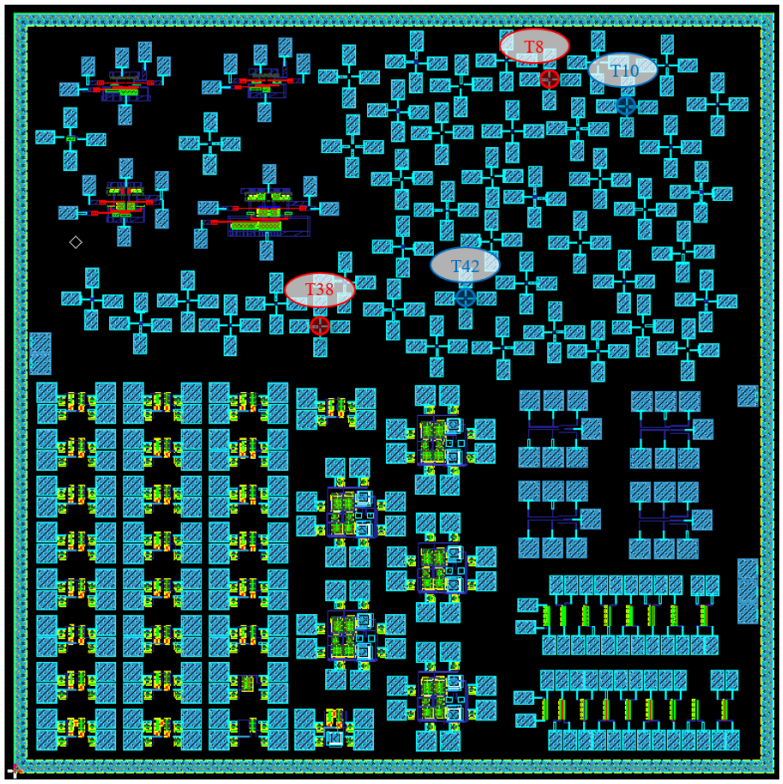
4 METODOLOGIA E MATERIAIS PARA O ESTUDO COMPARATIVO EXPERIMENTAL ENTRE O MOSFET OCTO E O MOSFET CONVENCIONAL

Esta seção apresenta os materiais e equipamentos utilizados, assim como os métodos e procedimentos experimentais para a caracterização dos MOSFETs, aplicação das doses de radiações ionizantes de raios-X e comparação dos resultados experimentais obtidos. A explicação detalhada das condições e métodos do estudo permite a validação dos resultados obtidos.

4.1 DETALHES SOBRE OS DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Os *chips* utilizados para os procedimentos experimentais deste trabalho são de tecnologia de Silício-Germânio fabricação da *GlobalFoundries* (IBM), com dimensão mínima de 130 nm. Esse *chip* foi fabricado via MOSIS, por meio do programa MEP (*MOSIS Educational Program*). O *chip* fornece acesso a vários dispositivos, entre eles, os MOSFETs de leiaute de porta hexagonal (MOSFET Diamante), octogonal (MOSFET Octo) e retangular (MOSFET convencional). Foram utilizados apenas os dispositivos T8, T38, T10 e T42, sendo os dois primeiros MOSFETs convencionais e os outros dois MOSFETs Octo. A figura 29 apresenta o *chip* utilizado, com destaque aos dispositivos utilizados nesse estudo.

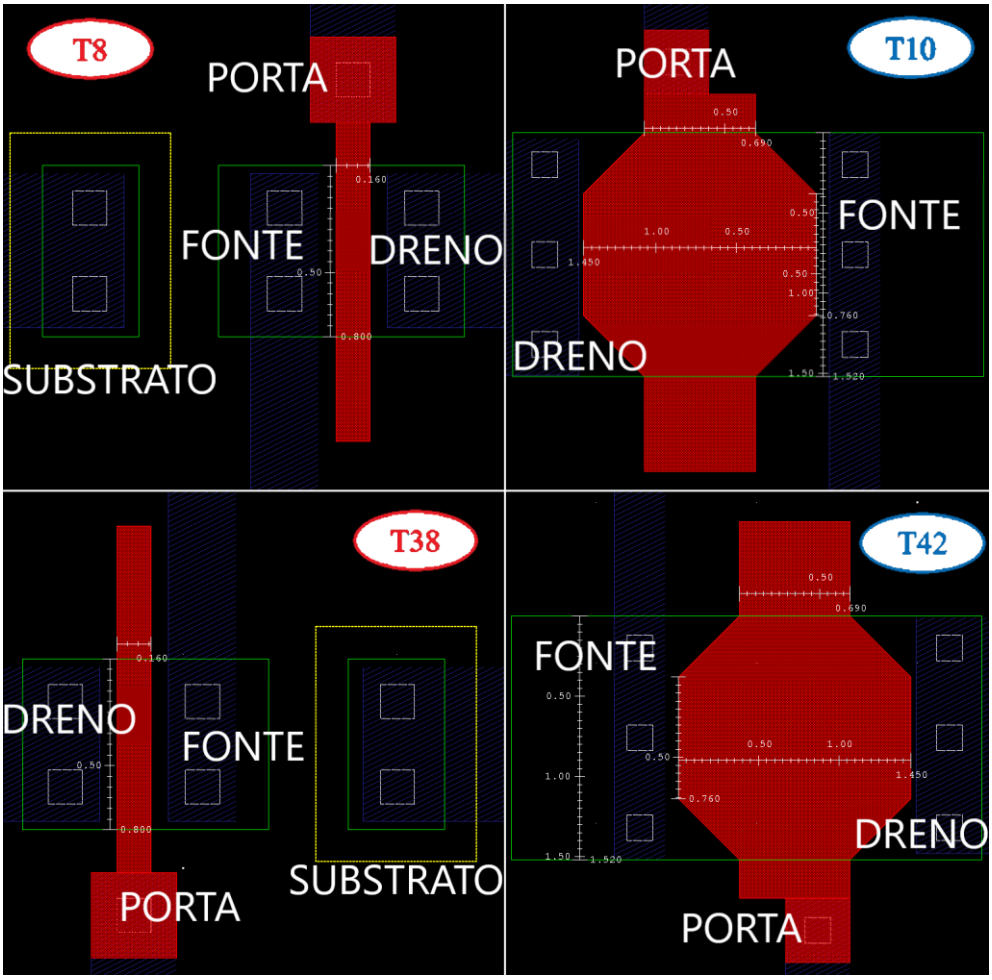
Figura 29 - Leiaute do *chip* utilizado fabricado com tecnologia de fabricação de CIs CMOS de Silício-Germânio da *GlobalFoundries* de 130 nm



Fonte: Autor

Os leiautes dos MOSFETs estudados neste trabalho podem ser vistos na figura 30.

Figura 30 - MOSFETs utilizados no estudo experimental com indicação dos terminais de porta, dreno e fonte



Fonte: Autor

Na figura 30 é possível notar as diferentes dimensões dos dispositivos, assim como suas geometrias de porta (em vermelho). Os dispositivos T8 e T38 são MOSFETs de leiaute de porta retangular (MOSFET convencional, CM) e suas dimensões de porta são as mesmas. Os dispositivos T10 e T42 são MOSFETs de leiaute de porta octogonal (MOSFET Octo, OM) e possuem as mesmas dimensões de porta. Vale notar que os dispositivos de leiaute de porta octogonal possuem ângulo α igual a 90° e fator de corte c igual a 50%. O ângulo α é limitado a 90° nesta tecnologia impedindo estudos com diferentes geometrias octogonais. Na tabela 1 são apresentadas as dimensões dos MOSFETs em estudo.

Tabela 1 - Dimensões dos MOSFETs de SiGe utilizados nos estudos experimentais

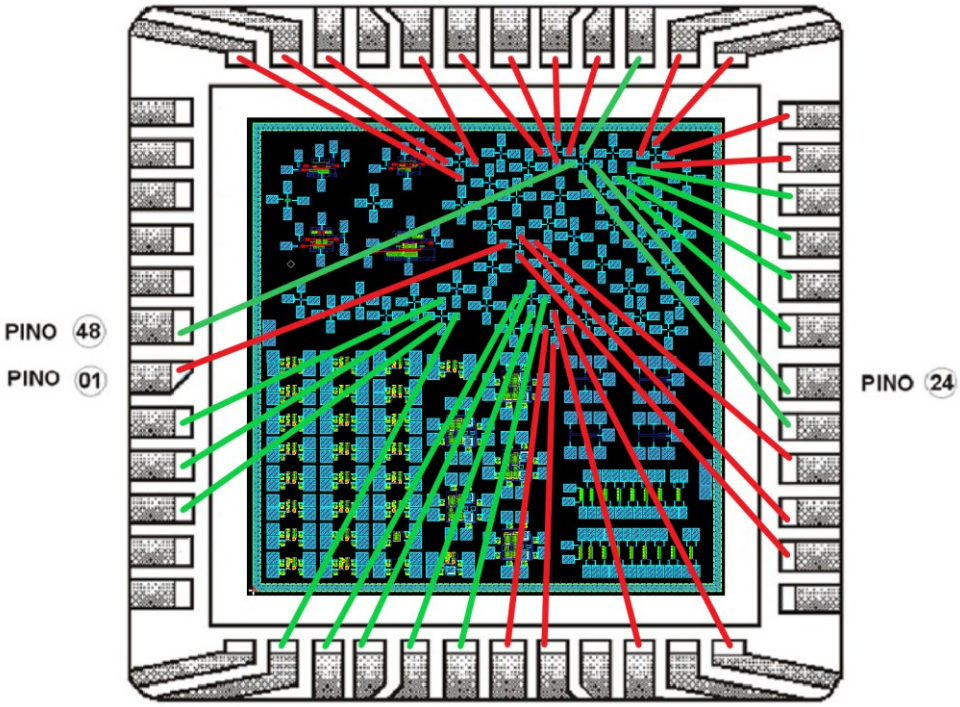
Parâmetro	nMOSFETs de porta retangular (MOSFET Convencional, CM)	nMOSFETs de porta octogonal (MOSFET Octo, OM)
Largura de canal (W)	0,8 µm	1,52 µm
Comprimento de canal (L)	0,16 µm	1,26 µm (b = 0,69 µm, B = 1,49 µm, c = 50%, α = 90°)
W/L	5	1,21

Fonte: Autor

Como pode ser observado na tabela 1, os MOSFETs convencionais não têm mesma área de porta que os MOSFETs Octo, desta forma alguns parâmetros elétricos necessitam ser normalizados pela razão de aspecto (W/L) do dispositivo. O comprimento de canal (L) utilizado para o cálculo da razão de aspecto do MOSFET Octo foi calculado através da equação (10) apresentada anteriormente.

Foram utilizados nesse estudo 8 *chips*, onde 3 foram encapsulados para execução de um estudo mais completo acerca da influência das radiações ionizantes por raios-X nesses dispositivos. Prioritariamente foram utilizados para os estudos comparativos os dispositivos T8 e T10 de cada *chip*, caso fosse notado um funcionamento fora do padrão de algum dos dispositivos, era usado então um dispositivo similar disponível no *chip* (T38 ou T42). O processo de encapsulamento foi realizado pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), com apoio do projeto CITAR (Circuitos Integrados Tolerantes a Radiação). A figura 31 ilustra o esquema de ligações entre os dispositivos e os terminais do encapsulamento.

Figura 31 - Esquema de ligações do *chip* no encapsulamento



Fonte: Autor

Na figura 31, são indicadas por linhas verdes as ligações para os dispositivos utilizados neste trabalho e em vermelho as ligações para outros dispositivos que não foram usados nesse estudo. No encapsulamento há uma janela que pode ser aberta permitindo que o *chip* seja exposto diretamente às radiações ionizantes por raios-X. A janela pode ser fechada para eliminar influência da luz ambiente durante as caracterizações elétricas.

4.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Todos os equipamentos utilizados para os experimentos deste trabalho se encontram no Centro Universitário da FEI. Entre os equipamentos usados durante o estudo experimental, os principais, e que serão tratados nesta seção, foram os sistemas de caracterização elétrica de dispositivos semicondutores e o difratômetro de raios-X.

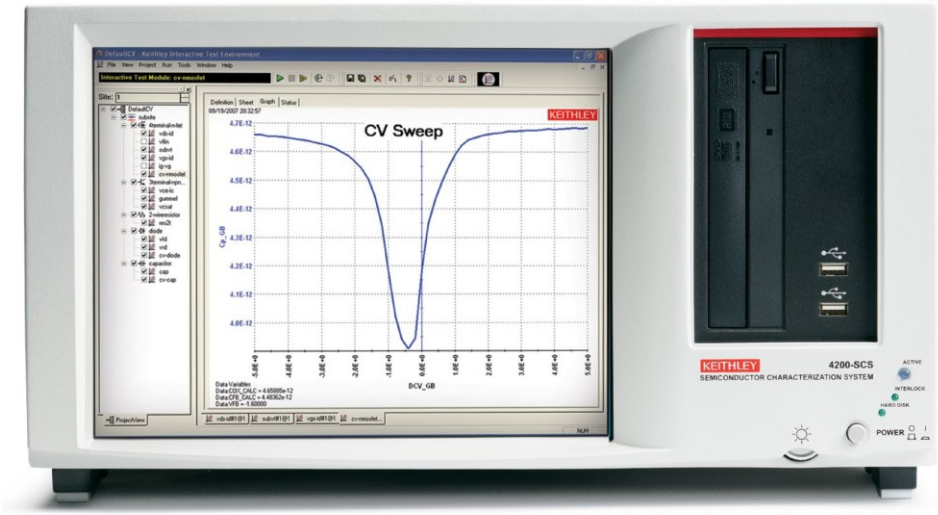
4.2.1 Keithley 4200-SCS

O sistema de caracterização Keithley 4200 é um analisador de parâmetros modular capaz de realizar a caracterização elétrica de materiais e dispositivos semicondutores. Com um

sistema operacional integrado baseado no *Windows*, o *software* do equipamento fornece uma interface para configuração dos testes de caracterização serem realizados para um determinado objetivo. (38).

A figura 32 é uma imagem do equipamento Keithley 4200-SCS.

Figura 32 – Foto do sistema de caracterização elétrica de dispositivos semicondutores Keithley 4200-SCS



Fonte: (38), 2017, p. 1

A resolução de medidas do Keithley 4200-SCS é de 0,2 µV para tensões e de 100 fA para correntes elétricas. (38).

4.2.2 Keithley 2636B

O Keithley 2636B é um instrumento de caracterização com muitas tecnologias integradas em 2 canais, como fonte de alimentação de precisão, fonte de corrente e gerador de pulso. (39). É um equipamento que se mostra mais portátil que o modelo 4200-SCS, não tendo um sistema operacional embarcado, sendo necessário a instalação de seus *softwares* e *drivers* num computador para o seu uso. A figura 33 apresenta a foto do equipamento Keithley 2636B.

Figura 33 – Foto do Keithley 2636B

Fonte: (39), 2017, p. 7

O instrumento de medidas Keithley 2636B tem resolução de medida de 0,1 fA para correntes elétricas e 100 mV para tensões. (39).

4.2.3 Difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100

Os ensaios de TID nos MOSFETs foram realizados utilizando o difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100, conforme está ilustrado na figura 34.

Figura 34 – Foto do difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100

Fonte: Autor “adaptado de” (40), 2015, p. 2

O XRD-6100 é um equipamento que permite realizar processos de irradiação por raios-X, em que o seu gerador de raios-X apresenta uma tensão máxima de 60 kV e uma corrente elétrica máxima de 80 mA. Os ajustes são realizados via computador, enquanto a amostra a ser irradiada permanece dentro do compartimento. (40).

4.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para o completo estudo comparativo entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional retangular, tanto em condições normais, como em condições de exposição às radiações ionizantes por raios-X, foram seguidas algumas etapas e metodologias.

Os estudos dos efeitos da TID nos MOSFETs são realizados em quatro condições de polarização desses dispositivos, sendo elas: não polarizado durante o procedimento de radiações ionizantes por raios-X, polarizado no modo *ON* durante o procedimento de radiações ionizantes por raios-X, polarizado no modo *OFF* durante o procedimento de radiações ionizantes por raios-X e polarizado no modo *Analog* durante o procedimento de radiações ionizantes por raios-X. Em seções seguintes são apresentadas as diferenças entre as formas de polarização dos MOSFETs e como elas influenciam os MOSFETs.

Para a realização dos estudos dos MOSFETs em condições normais, e em ambientes de radiações ionizantes de raios-X sem qualquer polarização nesses dispositivos, foram utilizados os *chips* não encapsulados. Para as demais formas de polarização nesses dispositivos durante os procedimentos de radiações ionizantes por raios-X, foram utilizados os *chips* encapsulados. Em ambos os casos, as etapas de caracterização elétrica e irradiação por raios-X foram realizadas de forma similar. Primeiramente foi realizada a caracterização elétrica dos MOSFETs convencionais, extraindo suas curvas de I_{DS} em função de V_{GS} e de I_{DS} em função de V_{DS}, com diferentes condições de polarização. Após a obtenção de tais curvas, foram extraídos os valores de V_{TH} para estes dispositivos e então foram obtidas as curvas de I_{DS} em função de V_{GS} e de I_{DS} em função de V_{DS} dos MOSFETs Octo, de forma que as curvas de I_{DS} em função de V_{DS} tivessem os mesmos valores de V_{GT} para ambos os MOSFETs.

Após a obtenção das curvas características de todos os MOSFETs, foi então realizado um procedimento de irradiação por raios-X em um *chip* para uma certa dose ionizante acumulada decidida previamente, baseando-se em estudos do grupo (da ordem de Mrad para o estudo em *floating* e da ordem de krad para os estudos em *ON*, *OFF* e *Analog*). Logo em seguida ao término do processo de irradiação, as curvas características dos dispositivos do *chip* irradiado

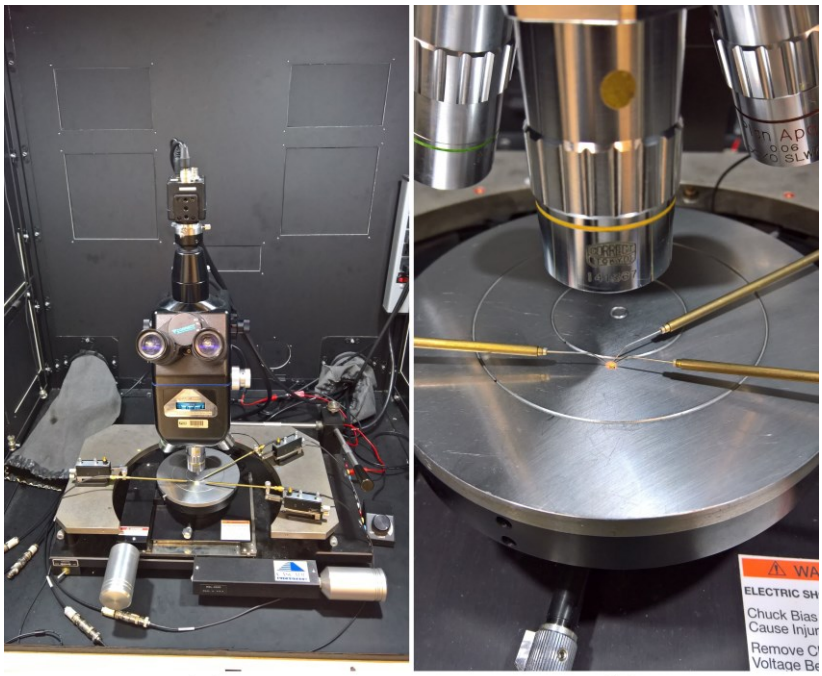
são novamente levantadas. Esse processo de se irradiar e caracterizar um mesmo *chip* seguiu até que um dos MOSFETs parasse totalmente de funcionar como deveria.

Com tais dados, foi possível realizar a comparação dos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito em condições normais e sobre os efeitos da TID entre o MOSFET Octo e o seu MOSFET convencional equivalente, considerando-se as mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal e mesmas condições de polarização.

4.3.1 Caracterização elétrica dos dispositivos não encapsulados

A caracterização elétrica dos dispositivos não encapsulados nas duas condições consideradas (pré-radiação ou pós-radiação) foi realizada com o equipamento Keithley 4200-SCS e um microprovador *Cascade Microtech*. Todos os MOSFETs foram caracterizados em temperatura controlada de 22ºC, sem polarização e numa cabine sem incidência de luz alguma. A figura 35 apresenta fotos do microprovador preparado para realizar as caracterizações elétricas dos dispositivos desse estudo.

Figura 35 - Fotos do microprovador Cascade Microtech com um *chip* utilizado para a caracterização elétrica dos MOSFETs: (a) Sistema completo e (b) ampliação do local que acondiciona o *chip*



(a) (b)

Fonte: Autor

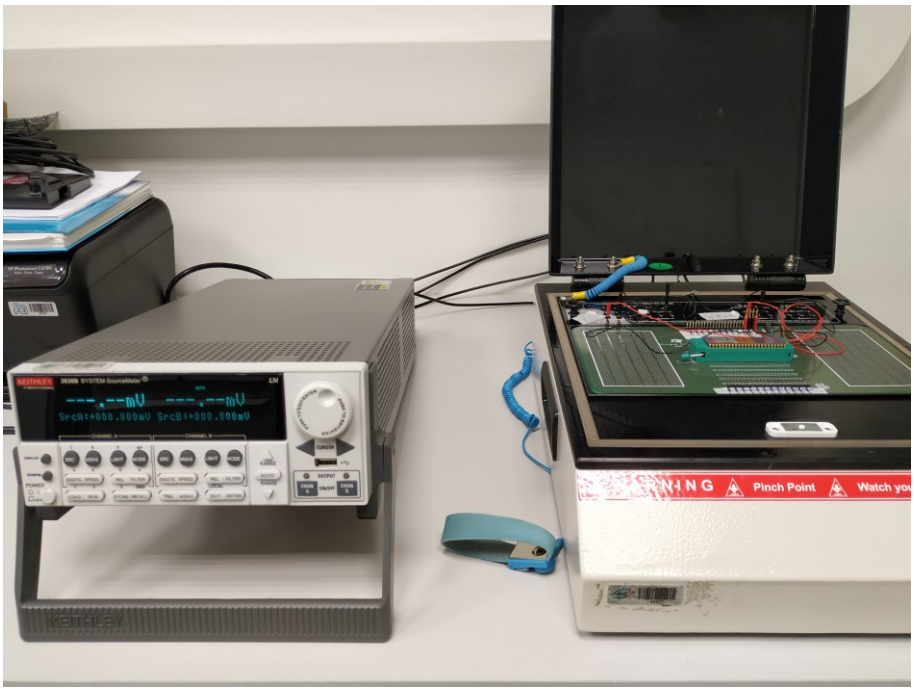
As caracterizações elétricas se deram pela obtenção de curvas características dos dispositivos, sendo elas: uma de I_{DS} em função de V_{GS} para obtenção de V_{TH}, com V_{GS} variando de 0 à 1,2 V e V_{DS} de 50 mV, uma de I_{DS} em função de V_{GS} com V_{GS} de -0,5 à 1,2 V e diferentes valores de V_{DS}, e uma de I_{DS} em função de V_{DS} com V_{DS} variando de 0 à 1,2 V e diferentes valores de V_{GS}, de forma que ambos os MOSFETs tivessem os mesmos valores de V_{GT}.

Estes equipamentos se encontram disponíveis para uso no Laboratório de Microeletrônica do Centro Universitário da FEI, localizado na sala K4-06, do prédio K no campus de São Bernardo do Campo.

4.3.2 Caracterização elétrica dos dispositivos encapsulados

Os dispositivos encapsulados foram caracterizados através do sistema Keithley 2636B e com auxílio de um acessório de teste da Keithley (*fixture* modelo LR:8028). Com o Keithley LR:8028 é possível fixar o encapsulamento e realizar a conexão entre os pinos desejados com os cabos de testes que são ligados ao Keithley 2636B. A figura 36 apresenta uma foto desse conjunto que foi utilizado para realizar a caracterização elétrica dos *chips* encapsulados.

Figura 36 – Conjunto utilizado para a caracterização elétrica (Keithley 2636B e Keithley LR:8028) dos MOSFETs estudados



Fonte: Autor

As mesmas curvas que foram obtidas para o estudo dos MOSFETs não encapsulados foram obtidas para os MOSFETs encapsulados.

Estes equipamentos se encontram disponíveis no Laboratório de Efeitos da Radiação Ionizante (LERI) do Centro Universitário da FEI, que fica no prédio D do campus de São Bernardo do Campo.

4.3.3 Processo de irradiação por raios-X dos dispositivos

O processo de irradiação por raios-X de todos os dispositivos, encapsulados ou não, se deu através do difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-6100. As taxas de dose para realizar as radiações ionizantes foram definidas de forma experimental, por técnicos e professores do laboratório (LERI) considerando-se a distância entre o feixe e o sensor utilizado (câmara de ionização do tipo cilíndrica), a corrente elétrica do gerador de raios-X e a tensão do gerador de raios-X. Com tais valores de taxas de dose, foram definidos os tempos de exposição às radiações por raios-X, afim de alcançar a TID desejada em cada procedimento. Por exemplo, se a taxa de dose é de 250 krad/h, o dispositivo deve ser exposto por 2h para que ele alcance uma TID de 500 krad.

O dispositivo a ser estudado é colocado sob as mesmas condições que o sensor estava na medida experimental que foi realizada para a determinação da taxa de dose pelos técnicos e professores do laboratório (mesma distância do feixe de raios-X, mesma corrente elétrica do gerador de raios-X e mesma tensão do gerador de raios-X).

A única diferença no processo de irradiação por raios-X dos *chips* encapsulados para os não encapsulados, é que por seu processo ser realizado com alguma polarização, é necessária a ligação de uma fonte de tensão externa, para polarizar os MOSFETs a serem estudados nos modos de polarização desejados em cada procedimento (*ON*, *OFF* e *Analog*).

A tabela 2 apresenta as distâncias entre a saída do feixe de raios-X e o *chip*, a tensão utilizada no gerador de raios-X, a corrente elétrica utilizada no gerador de raios-X, a taxa de dose medida experimentalmente pelos técnicos do laboratório (LERI) e os tempos médios entre o fim do procedimento de irradiação e o início das caracterizações elétricos dos MOSFETs estudados.

Tabela 2 - Dados sobre os procedimentos de irradiação dos *chips*

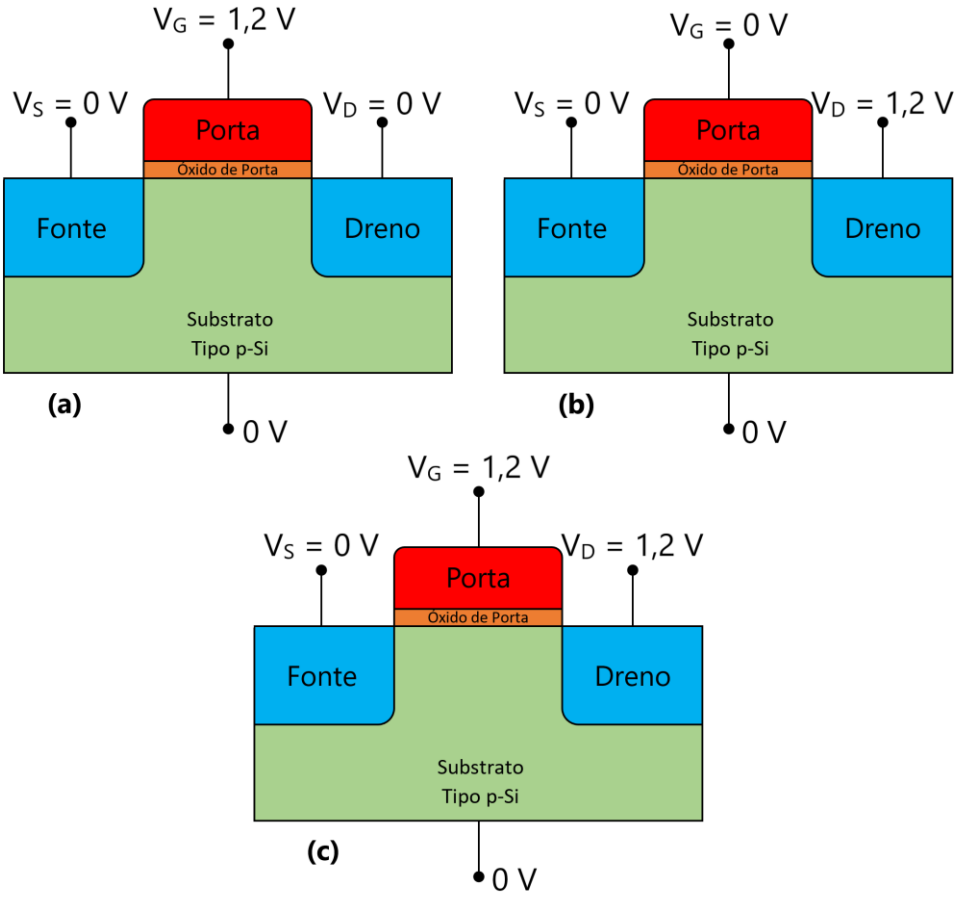
Irradiação de *chips* desencapsulados	
Corrente elétrica do gerador de raios-X do difratômetro	30 mA
Tensão do gerador de raios-X do difratômetro	40 kV
Distância do *chip* para a saída do feixe de raios-X	2,5 cm
Taxa de dose	207 krad/h
Tempo médio entre o fim da irradiação de raios-X e o início da caracterização elétrica	14 min 11 s
Irradiação de *chips* encapsulados	
Corrente elétrica do gerador de raios-X do difratômetro	40 mA
Tensão do gerador de raios-X do difratômetro	20 kV
Distância do *chip* para a saída do feixe de raios-X	26 cm
Taxa de dose	70,22 krad/h
Tempo médio entre o fim da irradiação de raios-X e o início da caracterização elétrica	56 s

Fonte: Autor

A diferença mostrada no tempo médio entre o fim da irradiação de raios-X e o início das caracterizações elétricas para os *chips* encapsulados e os não encapsulados se dá pelo fato de que era necessário levar os *chips* não encapsulados de um laboratório para outro ao fim dos procedimentos de irradiação por raios-X.

A figura 37 ilustra os diferentes modos de polarização dos MOSFETs a serem estudados quando eles são submetidos às radiações ionizantes de raios-X.

Figura 37 - Representação dos modos de polarização dos MOSFETs a serem estudados durante a realização do processo de radiação de raios-X. *ON* (a), *OFF* (b), *Analog* (c)



Fonte: Autor

Partindo de normas e procedimentos de teste do padrão militar dos Estados Unidos da América (*Military Test Guideline*, MIL-STD), foram definidos esses três modos de polarização dos MOSFETs durante o procedimento de radiação de raios-X. (41). Em conjunto com os testes sem polarização (*floating*), esses três modos [*on-state* na figura 37(a), *off-state* na figura 37(b) e *analog-state* na figura 37(c)], permitem qualificar os MOSFETs para aplicações de CIs CMOS operando em ambientes sujeitos às radiações ionizantes.

A condição passiva (*floating*), é aquela quando o MOSFET está com todos os seus terminais desconectados (ou flutuando), enquanto exposto às radiações ionizantes. (41). Esse procedimento não tem a influência dos campos elétricos na região de canal do MOSFET gerados pelos potenciais elétricos aplicados em seus terminais. (41). Os estudos dos efeitos da TID quando o MOSFET não está polarizado durante a radiação ionizante é importante para analisar o comportamento de dispositivos de reposição. Dispositivos de reposição (ou de

redundância) permanecem desligados até que numa eventual falha de um outro dispositivo, eles possam substituir o dispositivo com mau funcionamento.

A condição de estado ligado (*on-state*), é dada pela aplicação de V_{DD} (1,2 V) ao terminal da porta e 0 V nos demais terminais, enquanto o MOSFET é exposto às radiações ionizantes. No modo de polarização *ON* há a presença de um campo elétrico vertical na região de canal do MOSFET que é capaz de aumentar os efeitos das radiações ionizantes no dispositivo em estudo em comparação aos efeitos vistos na condição passiva. (41). Nesse modo de polarização o MOSFET opera como "chave fechada", sendo uma importante condição de operação digital estudada.

A condição de estado desligado (*off-state*), é a configuração do MOSFET exposto às radiações ionizantes quando há a aplicação de V_{DD} (1,2 V) ao terminal de dreno e 0 V aos demais terminais. Essa configuração gera um campo elétrico longitudinal na região de canal pela polarização entre dreno e fonte, e é capaz de potencializar os efeitos da TID nos dispositivos. (41). Nesse modo de polarização o MOSFET opera como "chave aberta", sendo outra importante condição de operação digital estudada.

É denominada como a condição de estado analógico (*analog-state*), quando V_{DD} (1,2 V) é aplicado aos terminais de porta e de dreno do MOSFET, e fonte e substrato são polarizados com 0 V. Por consequência dessa polarização, há a influência dos campos elétricos vertical e longitudinal ao mesmo tempo na região de canal do MOSFET, potencializando os efeitos das radiações ionizantes no dispositivo. (41). Na condição de estado analógico o campo elétrico vertical é maior na região de canal próximo ao terminal de dreno e menor quanto mais se aproxima do terminal de fonte. (41). Nesse modo de polarização o MOSFET opera na região de saturação, como normalmente é utilizado em aplicações de CIs CMOS analógicas.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados de todos os experimentos realizados para a realização do estudo comparativo entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente.

Inicialmente é apresentado um estudo comparativo do desempenho elétrico entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional sem a exposição dos dispositivos às radiações ionizantes de raios-X. Foram utilizados 10 MOSFETs, no qual 5 MOSFETs apresentam leiautes de porta retangular e 5 MOSFETs apresentam leiautes de porta octogonal. Para a realização do estudo comparativo foi calculada a média entre os parâmetros e as figuras de mérito obtidas para cada tipo de MOSFET.

Para o estudo da influência da TID nos MOSFETs Octo e convencional nas 4 diferentes condições de polarização (*floating*, *ON*, *OFF* e *Analog*) foram utilizados 8 MOSFETs, sendo 1 MOSFET Octo e 1 MOSFET convencional para cada condição de polarização.

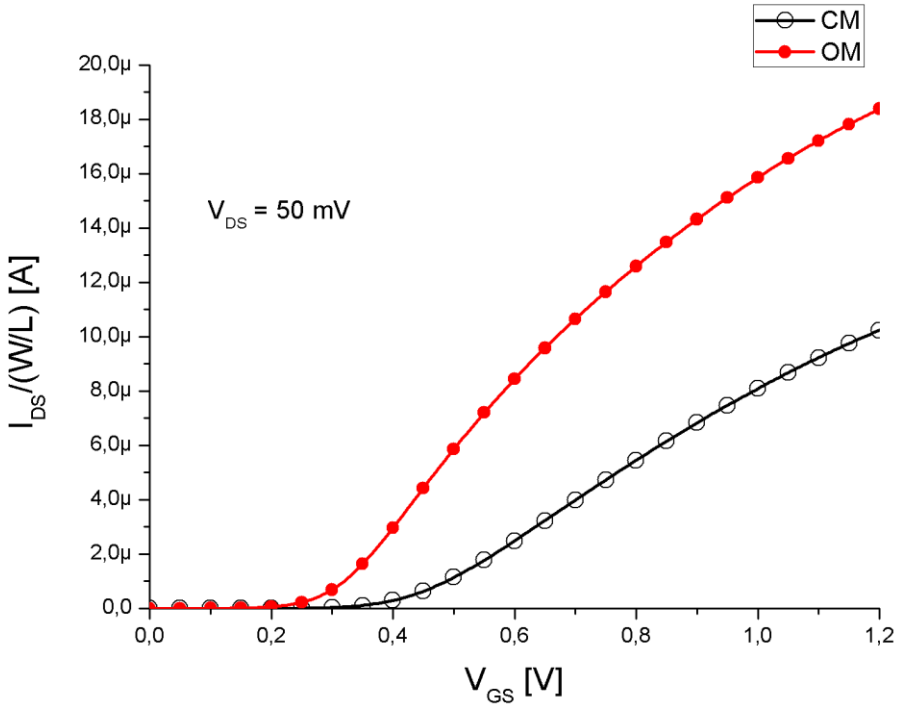
Todos os MOSFETs utilizados têm suas dimensões conforme os dados apresentados anteriormente na tabela 1.

5.1 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MOSFET OCTO E SEU CONVENCIONAL EQUIVALENTE SEM RADIAÇÃO

Através da metodologia relatada anteriormente, foram caracterizados eletricamente 10 dispositivos não encapsulados e sem exposição às radiações ionizantes por raios-X, no qual 5 MOSFETs de leiaute de porta retangular (MOSFET convencional, CM) e 5 MOSFETs de leiaute de porta octogonal (MOSFET Octo, OM).

A figura 38 apresenta um exemplo de duas curvas de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS}, com V_{DS} de 50 mV obtidas para um MOSFET Octo e um MOSFET convencional. Os MOSFETs caracterizados eletricamente têm dimensões conforme a tabela 1 apresentada anteriormente.

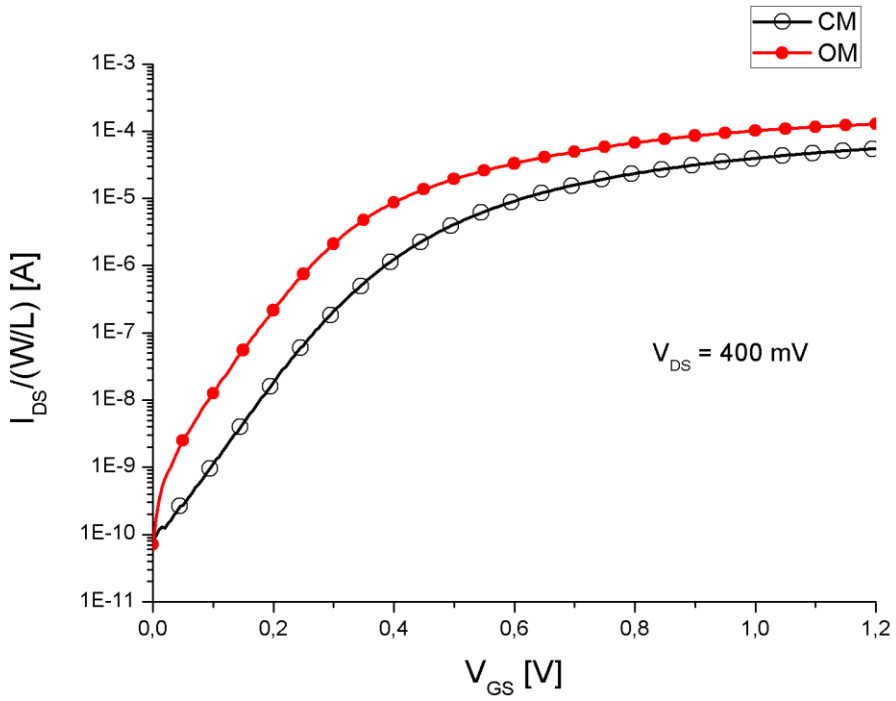
Figura 38 - Curva de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{DS} de 50 mV



Fonte: Autor

A figura 39 apresenta um exemplo de duas curvas de $I_{DS}/(W/L)$ em escala logarítmica em função de V_{GS}, com V_{DS} de 400 mV obtidas para um MOSFET Octo e um MOSFET convencional. Os MOSFETs caracterizados eletricamente têm dimensões conforme a tabela 1 apresentada anteriormente.

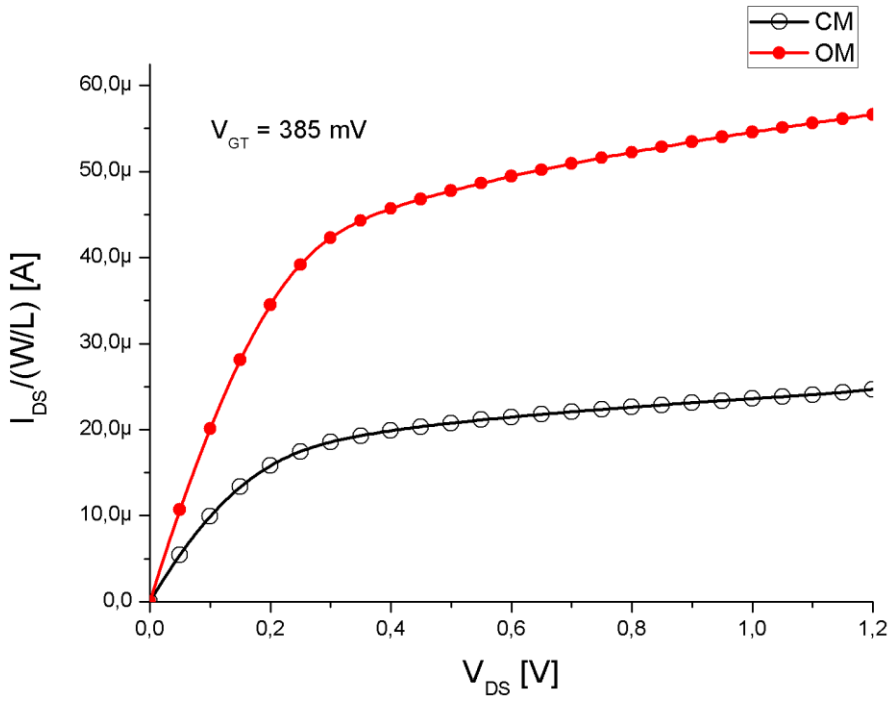
Figura 39 - Curva de I_{DS}/(W/L), em escala logarítmica, em função de V_{GS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{DS} de 400 mV



Fonte: Autor

A figura 40 apresenta um exemplo de duas curvas de I_{DS}/(W/L) em função de V_{DS}, com V_{GT} de 385 mV obtidas para um MOSFET Octo e um MOSFET convencional. Os MOSFETs caracterizados eletricamente têm dimensões conforme a tabela 1 apresentada anteriormente.

Figura 40 - Curva de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} para os MOSFETs Octo (OM) e convencional (CM), com V_{GT} de 385 mV



Fonte: Autor

Analisando-se as figuras 38, 39 e 40, é possível notar que o desempenho elétrico do MOSFET Octo é melhor do que aquele medido no MOSFET convencional equivalente. Da mesma forma que foi realizada em todo este estudo, todas as comparações são feitas considerando-se as mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal e mesmas condições de polarização dos dispositivos.

A figura 39 também ilustra um melhor desempenho elétrico do MOSFET Octo quando funcionando no estado desligado, apresentando uma menor corrente elétrica entre fonte e dreno que o MOSFET convencional equivalente. Para análise das características elétricas dos MOSFETs Octo e convencional, foram caracterizados 5 dispositivos de cada tipo. Foram extraídos e calculada a média de vários parâmetros elétricos e figuras de mérito dos dispositivos estudados com os métodos já discutidos anteriormente. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos e o ganho comparativo entre os MOSFETS Octo e o MOSFET convencional equivalente.

Tabela 3 – Parâmetros elétricos e figuras de mérito dos MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente

Parâmetro / Figura de Mérito	**CM**		**OM**		**Diferença entre os valores médios do OM e do CM**	**Justificativa**
	Valores médios	**Desvio Padrão**	**Valores médios**	**Desvio Padrão**		
V_{TH} (V_{DS} = 50 mV)	0,415 V	0,009 V	0,305 V	0,009 V	- 26,51 %	Padrão do processo
S (V_{DS} = 100 mV)	81,03 mV/déc	0,88 mV/déc	80,51 mV/déc	0,65 mV/déc	- 0,64 %	-
$g_{mmáx}$/(W/L) (V_{DS} = 100 mV)	30,17 µS	0,53 µS	58,24 µS	0,72 µS	+ 93,04 %	LCE PAMDLE
I_{ON}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 1,2 V)	52,98 µA	1,47 µA	126,15 µA	1,82 µA	+ 138,11 %	LCE PAMDLE
I_{OFF}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 0 V)	173,24 pA	-	157,79 pA	-	- 8,92 %	DEPAMBRRE
I_{LEAK}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = -0,3 V)	212,00 pA	-	387,68 pA	-	+ 82,87 %	Perímetro da junção PN

Parâmetro / Figura de Mérito	CM		OM		Diferença entre os valores médios do OM e do CM	Justificativa
	Valores médios	Desvio Padrão	Valores médios	Desvio Padrão		
I_{ON}/I_{OFF} (V_{DS} = 400 mV)	3,06 x 10^5	-	7,99 x 10^5	-	+ 162,09 %	-
$I_{DSsat}/(W/L)$ (V_{GT} = 385 mV)	21,58 µA	1,22 µA	47,22 µA	1,42 µA	+ 118,81 %	LCE PAMDLE
R_{on} (V_{GT} = 385 mV)	9,33 kΩ	0,46 kΩ	4,82 kΩ	0,09 kΩ	- 48,34 %	LCE PAMDLE
V_{EA} (V_{GT} = 385 mV)	3,77 V	0,12 V	3,52 V	0,13 V	- 6,63 %	LCE PAMDLE (L_{eff})
g_m/I_{DS} (inversão fraca, V_{DS} = 700 mV)	31,69 V^{-1}	-	33,06 V^{-1}	-	+ 4,32 %	LCE PAMDLE
g_m/I_{DS} (inversão moderada, V_{DS} = 700 mV)	18,13 V^{-1}	-	20,31 V^{-1}	-	+ 12,02 %	LCE PAMDLE
g_m/I_{DS} (inversão forte, V_{DS} = 700 mV)	2,24 V^{-1}	-	2,34 V^{-1}	-	+ 4,46 %	LCE PAMDLE

Parâmetro / Figura de Mérito	CM		OM		Diferença entre os valores médios do OM e do CM	Justificativa
	Valores médios	Desvio Padrão	Valores médios	Desvio Padrão		
Av (inversão moderada)	68,35 V/V	-	71,49 V/V	-	+ 4,59 %	V_{EA} LCE PAMDLE
f_T (adotando C_L = 10 pF)	480,17 MHz	8,43 MHz	926,92 MHz	11,45 MHz	+ 93,04 %	LCE PAMDLE

Fonte: Autor

A tabela 3 destaca as diferenças entre os parâmetros do MOSFET Octo e o MOSFET convencional com mesma área de porta, largura de canal e condições de polarização, sendo destacadas em verde as diferenças significativas que se mostraram positivas para o MOSFET de leiaute de porta octogonal, em vermelho as diferenças negativas para o MOSFET Octo e sem destaque as diferenças pouco significativas (abaixo de 5% ou que não representam necessariamente um melhor desempenho em um dos dispositivo). Também são indicados na tabela 3 os desvios padrão dos parâmetros extraídos, podendo assim analisar o grau de dispersão dos dados experimentais obtidos. Alguns parâmetros elétricos e figuras de mérito não apresentam o desvio padrão na tabela 3 porque foram extraídos de um único dispositivo para cada tipo de MOSFET (MOSFET Octo e MOSFET convencional), isso ocorreu porque algumas medidas estavam com muito ruído pelos valores muito baixos de corrente elétrica. Com os dados obtidos é possível notar um desempenho elétrico superior do MOSFET Octo quando comparado ao seu equivalente convencional. O MOSFET Octo apresenta melhores resultados em 8 dos parâmetros apresentados e piores resultados em apenas 2 (sendo que em um desses, teve uma diferença de menos de 7%), quando comparado ao MOSFET convencional equivalente.

O MOSFET Octo apresentou menores valores para V_{TH} e para S que seu convencional equivalente. O menor valor de V_{TH} do MOSFET Octo não significa que o dispositivo apresenta melhores características elétricas, sendo que ambos os valores estão dentro da margem garantida para essa tecnologia pelo seu fabricante.

Apesar de um menor valor de S significar um melhor desempenho elétrico, a diferença não foi significativa, sendo apenas 0,64 % menor no MOSFET Octo que no seu MOSFET convencional equivalente.

Quando analisada a máxima transcondutância dos MOSFETs Octo e convencional, é observado um ganho de cerca de 93% para o MOSFET Octo em relação ao do seu MOSFET convencional equivalente. O MOSFET Octo apresenta um $g_{mmáx}$ de quase o dobro que o seu MOSFET convencional equivalente e esse ganho é devido aos efeitos LCE e PAMDLE presentes na estrutura do MOSFET Octo, que incrementam o valor do campo elétrico longitudinal resultante.

No MOSFET de leiaute de porta octogonal, as correntes $I_{ON}/(W/L)$ e $I_{OFF}/(W/L)$ apresentaram respectivamente, um aumento de 138% e uma redução de cerca de 9% em relação ao MOSFET retangular, considerando mesma área de porta, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização. Esses ganhos nas correntes de estado ligado e desligado do MOSFET Octo em relação ao seu convencional equivalente, se dão principalmente pelo maior campo elétrico longitudinal resultante na estrutura do MOSFET de leiaute de porta octogonal. Por consequência do melhor desempenho do MOSFET Octo em relação a I_{ON} e I_{OFF}, o MOSFET Octo apresenta um ganho de mais de 162% na figura de mérito I_{ON}/I_{OFF} que em seu MOSFET convencional equivalente. Esses parâmetros elétricos especificamente, mostram o desempenho elétrico superior do MOSFET Octo em relação ao seu MOSFET convencional equivalente, principalmente para aplicações de CIs CMOS digitais.

O MOSFET Octo apresentou piores resultados para a corrente de fuga, apresentando uma corrente de fuga cerca de 82% superior que a encontrada no MOSFET convencional equivalente, considerando mesmas áreas de porta, larguras de canal e condições de polarização. Esse resultado está de acordo com trabalhos anteriores sobre a geometria, podendo ser explicado pelo maior perímetro da região de junção entre porta e dreno do leiaute de porta octogonal quando comparado ao de seu MOSFET convencional equivalente.

A corrente de dreno de saturação do MOSFET Octo apresentou um valor cerca de 118% superior ao do seu MOSFET convencional equivalente. Isso ocorre devido aos efeitos LCE e PAMDLE que potencializam o campo elétrico longitudinal na estrutura do MOSFET Octo.

O MOSFET Octo apresenta uma resistência de estado ligado cerca de 48% menor que do seu MOSFET convencional equivalente. O menor valor da resistência de estado ligado do MOSFET Octo é consequência dos efeitos PAMDLE e LCE presentes em sua estrutura. Por apresentar uma menor resistência de estado ligado, o MOSFET Octo tende a apresentar melhor velocidade de chaveamento e menor potência dissipada que o seu MOSFET convencional

equivalente, considerando-se a mesma área de porta, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização.

A tensão Early no MOSFET Octo é um parâmetro que teve uma pequena degradação observada quando comparada ao valor obtido no MOSFET convencional. Essa degradação da tensão Early foi de cerca de 6% comparado ao seu MOSFET convencional equivalente e isso pode ser explicado pelo menor comprimento efetivo de canal do MOSFET Octo comparado ao seu MOSFET convencional equivalente. (15).

Através da análise de g_m/I_{DS} dos dispositivos, é possível observar que o MOSFET Octo apresenta melhores resultados em todos os regimes de inversão em relação ao seu MOSFET convencional equivalente. O MOSFET Octo apresenta um g_m/I_{DS} cerca de 4,3% maior na inversão fraca, 12% maior na inversão moderada e 4,5% maior na inversão forte que seu MOSFET convencional equivalente. Analisando-se esses dados experimentais é possível notar que mesmo apresentando ganhos em todos os regimes de inversão quando comparado ao seu MOSFET convencional equivalente, é no regime de inversão moderada que o MOSFET Octo apresenta ganhos mais significativos.

O MOSFET Octo apresentou um ganho de A_V (na inversão moderada) de apenas 4,6% em comparação ao do seu MOSFET convencional equivalente. É possível notar que o melhor desempenho elétrico com MOSFET Octo no regime de inversão moderada fez com que mesmo com um menor valor de tensão Early, o dispositivo ainda apresente um A_V pouco melhor que o do seu MOSFET convencional equivalente.

O MOSFET Octo apresentou ainda uma f_T cerca de 93% maior que o seu MOSFET convencional equivalente. A frequência de ganho unitário do MOSFET Octo tem influência dos efeitos LCE e PAMDLE presentes na sua estrutura, que potencializam seu campo elétrico longitudinal. Esse significativo ganho na frequência de ganho unitário do MOSFET Octo mostra o seu potencial para aplicações como amplificador em altas frequências.

5.2 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA TID ENTRE UM MOSFET OCTO E SEU MOSFET CONVENCIONAL EQUIVALENTE SEM QUE OS DISPOSITIVOS ESTIVESSEM POLARIZADOS DURANTE OS PROCEDIMENTOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

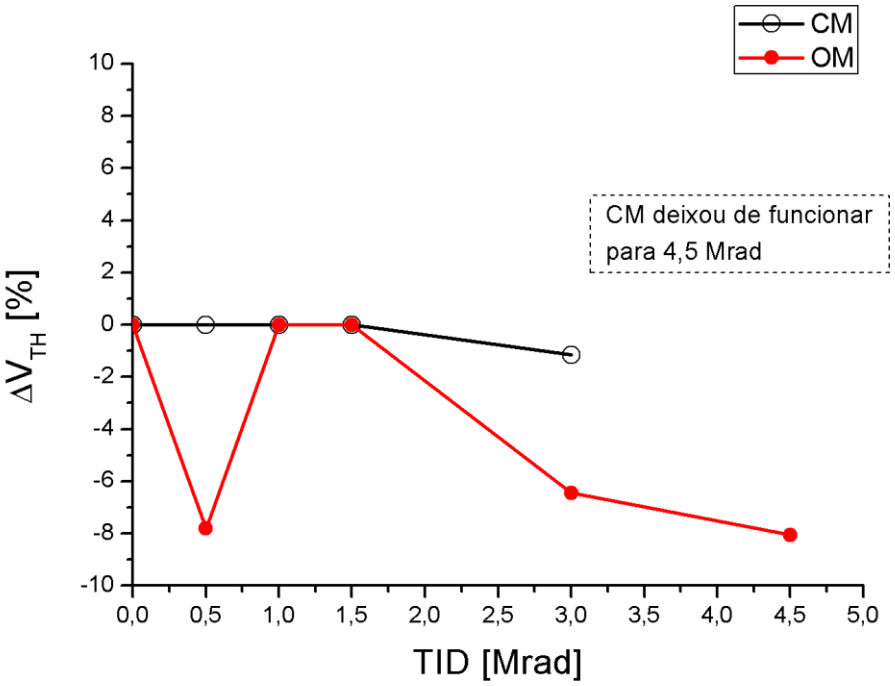
Para análise dos efeitos da TID nos MOSFETs quando submetidos às radiações ionizantes por raios-X e sem que os dispositivos estivessem polarizados durante o procedimento das radiações ionizantes (*floating*), foram utilizados um MOSFET Octo e um MOSFET

convencional não encapsulados (com dimensões de acordo com a tabela 1). Para o estudo nesse modo de polarização durante as radiações ionizantes foram realizadas cinco doses de irradiação por raios-X. As doses de irradiação por raios-X foram divididas em três doses de 0,5 Mrad e duas de 1,5 Mrad, resultando numa dose total acumulada de 4,5 Mrad ao final dos experimentos.

Abaixo são apresentados diversos gráficos que ilustram as variações de alguns parâmetros elétricos e figuras de mérito considerados nesse estudo após cada dose de irradiação por raios-X em relação aos seus valores antes da irradiação.

A figura 41 apresenta a variação de V_{TH} em relação ao valor pré-irradiação, em função da dose total acumulada.

Figura 41 – Curva da variação relativa de V_{TH} (ΔV_{TH}) em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente



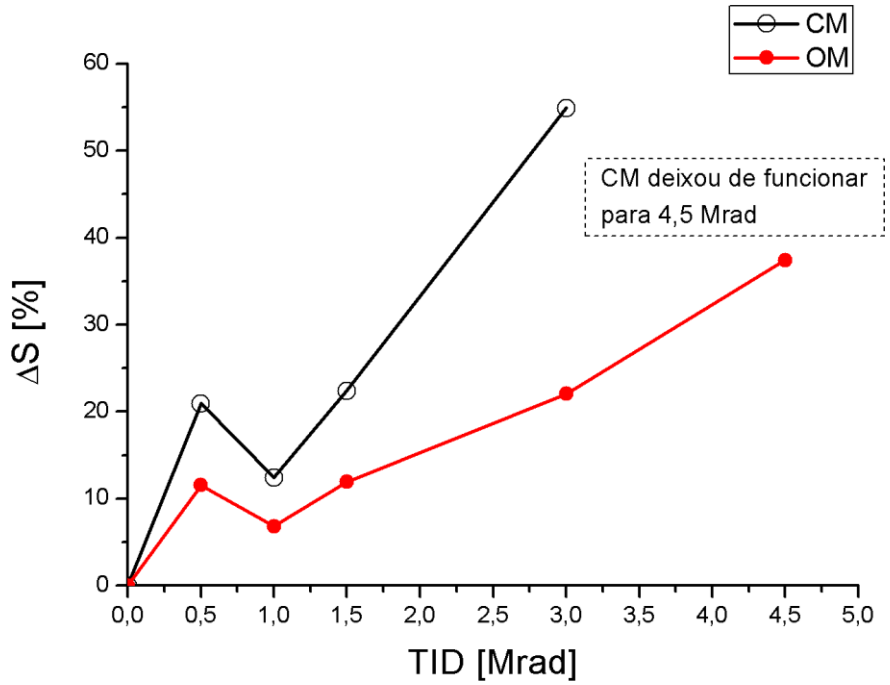
Fonte: Autor

A figura 41 mostra uma maior variação de V_{TH} em relação ao valor pré-irradiação (ΔV_{TH}) no MOSFET Octo, com -8 % (aproximadamente -25 mV), enquanto o seu MOSFET convencional equivalente, teve uma variação máxima de aproximadamente -1 % (aproximadamente -5 mV). No entanto, é importante notar que o MOSFET convencional deixou de funcionar completamente após atingir uma TID de 4,5 Mrad. O MOSFET de leiaute de porta octogonal manteve seu funcionamento com alguma variação nos parâmetros elétricos mesmo após alcançar uma TID de 4,5 Mrad. Como em todo o estudo, as comparações dos

efeitos da TID nos dispositivos são feitas considerando-se as mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes.

A figura 42 apresenta a variação da inclinação de sublimiar em relação ao valor pré-irradiação (ΔS) dos MOSFETs Octo e convencional.

Figura 42 – Curva da variação relativa de S em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente

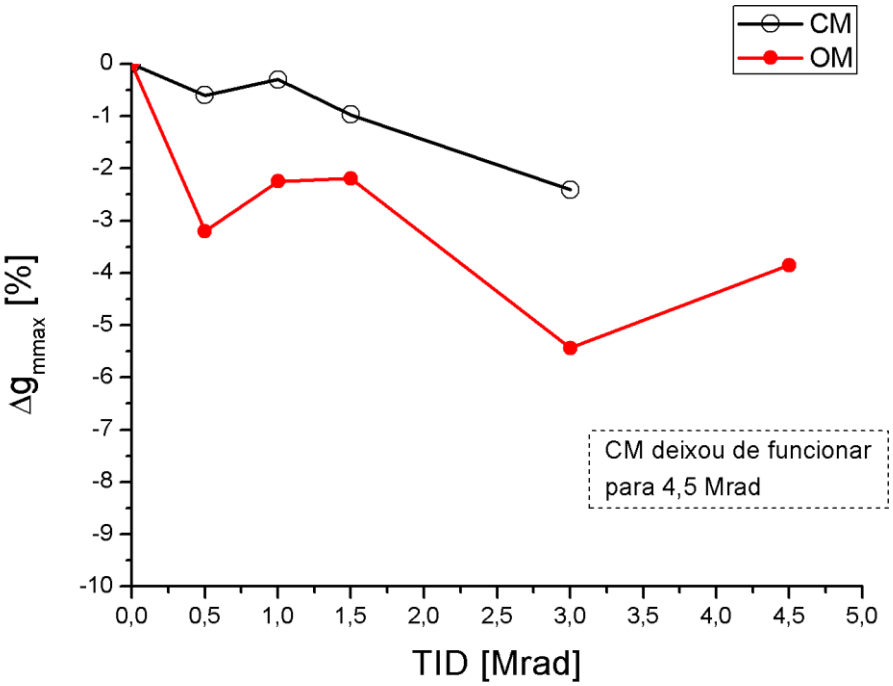


Fonte: Autor

A figura 42 apresenta uma variação relativa de S (ΔS) de aproximadamente 2 vezes menor para o OM, em comparação à variação vista no CM. Analisando-se a figura 43, é possível notar que com uma TID de 3 Mrad, o MOSFET convencional já havia atingido uma variação máxima maior que a do MOSFET Octo com uma TID de 4,5 Mrad. A variação de S do CM com uma TID de 3 Mrad foi de quase 55%, contra apenas 35% no OM para uma TID de 4,5 Mrad. Isso pode ser explicado pelos efeitos presentes na estrutura do OM, como o DEPAMBBRE, o LCE e o PAMDLE, que fazem com que exista uma menor degradação na capacidade do MOSFET Octo ir do estado desligado para o estado ligado em comparação ao seu MOSFET convencional equivalente. Também é possível observar pela figura 42, a tendência do aumento de S para maiores doses acumuladas pelo dispositivo, tendendo a deteriorar o desempenho do MOSFET após sua exposição às radiações ionizantes.

A figura 43 apresenta a variação da máxima transcondutância em relação ao valor pré-irradiação ($\Delta g_{mmáx}$) para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente após as doses de radiações ionizantes por raios-X.

Figura 43 – Curva da variação relativa de $g_{mmáx}$ em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente

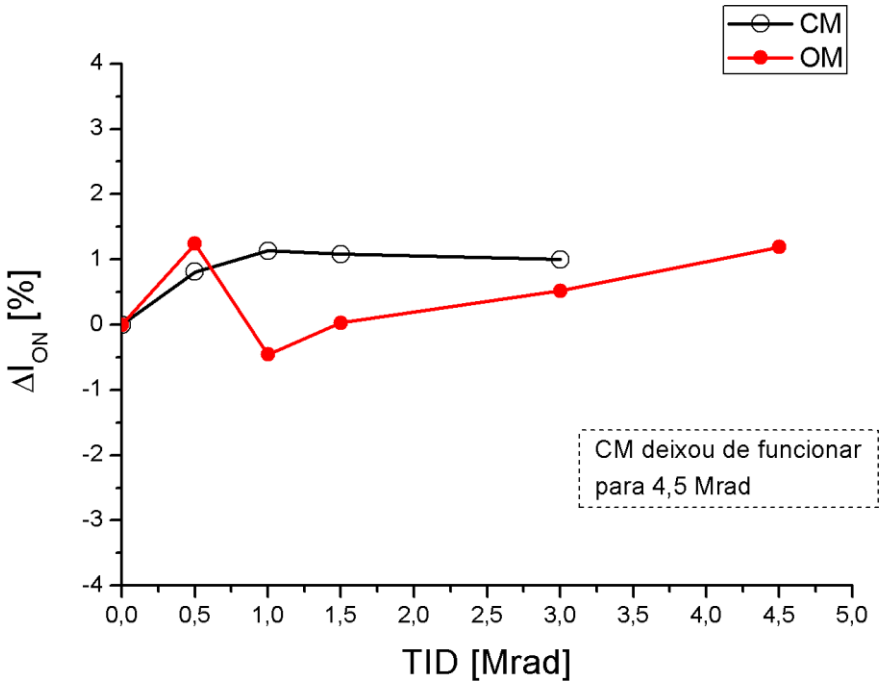


Fonte: Autor

A figura 43 mostra uma tendência em diminuir o valor de $g_{mmáx}$ com a exposição dos dispositivos às radiações ionizantes por raios-X, consequentemente piorando o desempenho elétrico dos dispositivos. A figura 43 mostra uma maior variação relativa de $g_{mmáx}$ ($\Delta g_{mmáx}$) no OM em relação ao seu MOSFET convencional equivalente, porém a diferença nas variações relativas de $g_{mmáx}$ do OM para o CM é baixa (de aproximadamente -3 %).

A figura 44 ilustra a variação de I_{ON} em relação ao valor pré-irradiação (ΔI_{ON}) para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente em função da dose total acumulada.

Figura 44 – Curva da variação relativa de I_{ON} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente

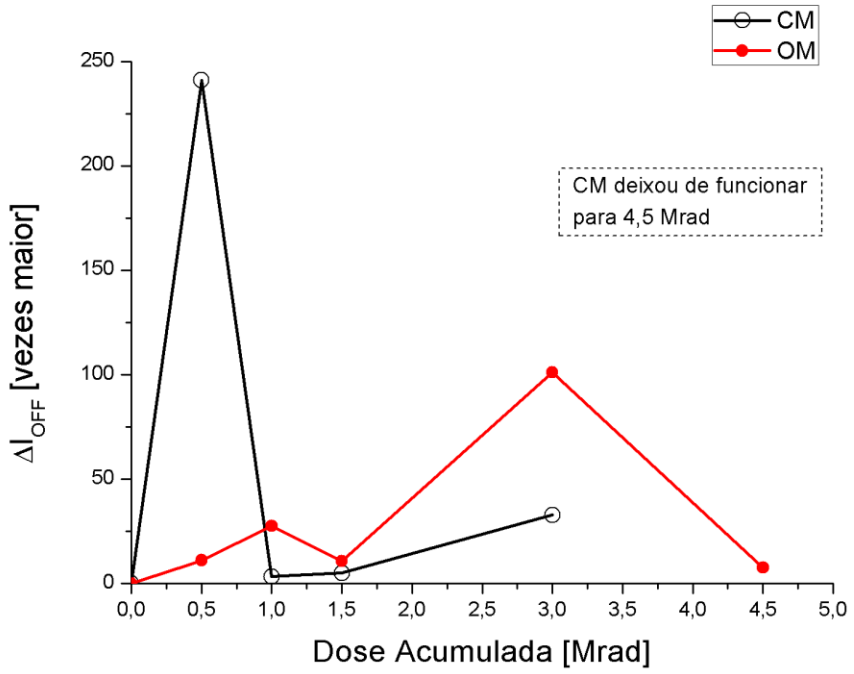


Fonte: Autor

Analisando-se a figura 44, é possível notar que as variações relativas de I_{ON} (ΔI_{ON}) tanto para o OM, quanto para o CM, nas mesmas condições de polarização e de exposição às radiações ionizantes, não foram significativas. Nos dois MOSFETs estudados a máxima variação relativa de I_{ON} foi menor que 2% do valor pré-irradiação.

A figura 45 apresenta a variação de I_{OFF} em relação ao valor pré-irradiação (ΔI_{OFF}) em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente.

Figura 45 – Curva da variação relativa de I_{OFF} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu MOSFET convencional equivalente

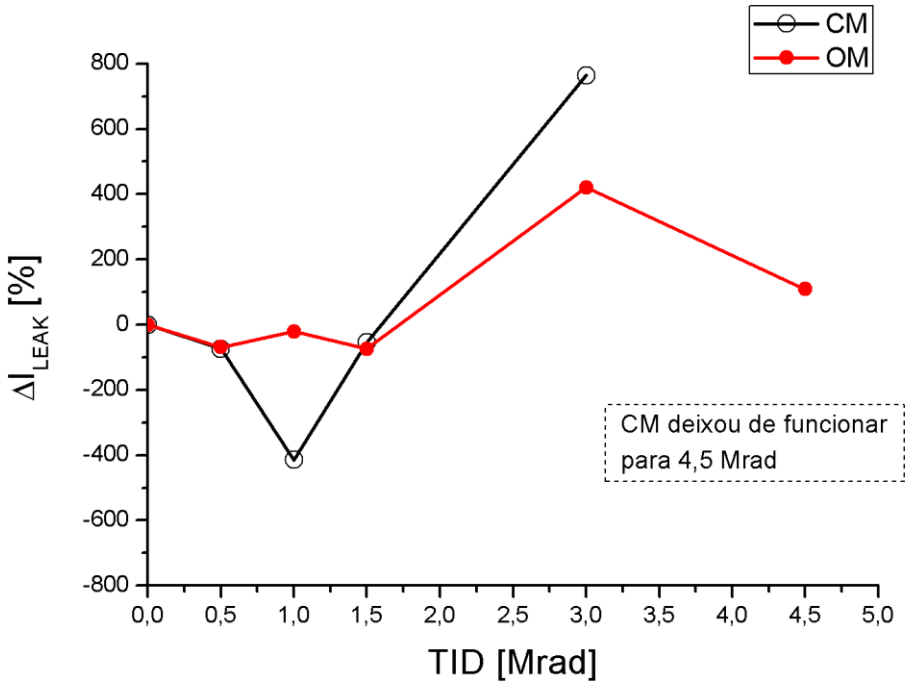


Fonte: Autor

A figura 45 mostra as variações relativas da corrente de dreno de estado desligado (ΔI_{OFF}), apresentando uma tendência a aumentar o valor de I_{OFF} com o aumento da TID. O MOSFET Octo apresentou uma máxima variação cerca de 2,4 vezes menor que o MOSFET convencional equivalente (I_{OFF} teve um aumento de até 99 vezes no OM e de 240 vezes no CM). Essa menor variação relativa de I_{OFF} no MOSFET Octo pode ser explicada pelo efeito DEPAMBBRE presente na sua estrutura, que diminui os efeitos dos transistores parasitários na região de bico de pássaro.

A figura 46 ilustra a variação da corrente de fuga em relação ao valor pré-irradiação (ΔI_{LEAK}) do MOSFETs Octo e do seu MOSFET convencional equivalente em função da dose total acumulada.

Figura 46 - Variação relativa de I_{LEAK} em função da TID para os MOSFETs Octo e seu equivalente convencional

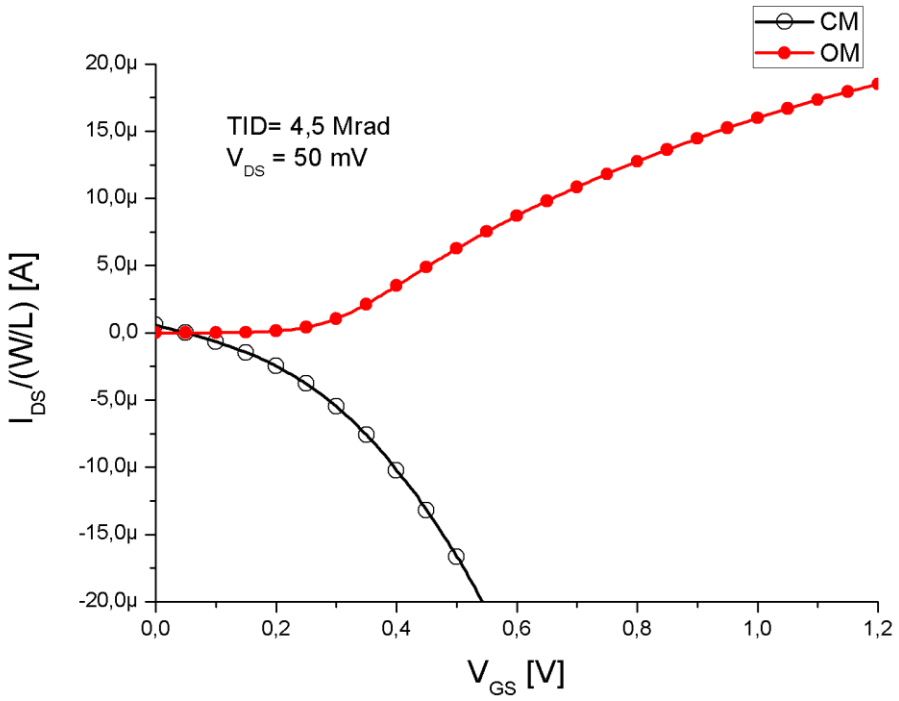


Fonte: Autor

Analisando-se a figura 46, é possível observar que no CM houve uma máxima variação relativa de I_{LEAK} cerca de 2 vezes maios que no OM, considerando-se as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Esse resultado se mostra interessante porque esse foi o único parâmetro onde o OM apresentou um pior desempenho elétrico quando comparado ao seu MOSFET convencional equivalente antes das irradiações por raios-X. Em trabalhos anteriores, foi observado que essa variação maior no CM pode resultar numa corrente de fuga maior que a do OM após certa TID, considerando mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Essa menor variação relativa de I_{LEAK} do MOSFET Octo é resultado principalmente do efeito DEPAMBBRE presente em sua estrutura, que é capaz de diminuir a influência dos transistores parasitários no MOSFET Octo. Também pode ser observado na figura 46 que I_{LEAK} tem uma tendência a aumentar no MOSFET com o aumento da TID.

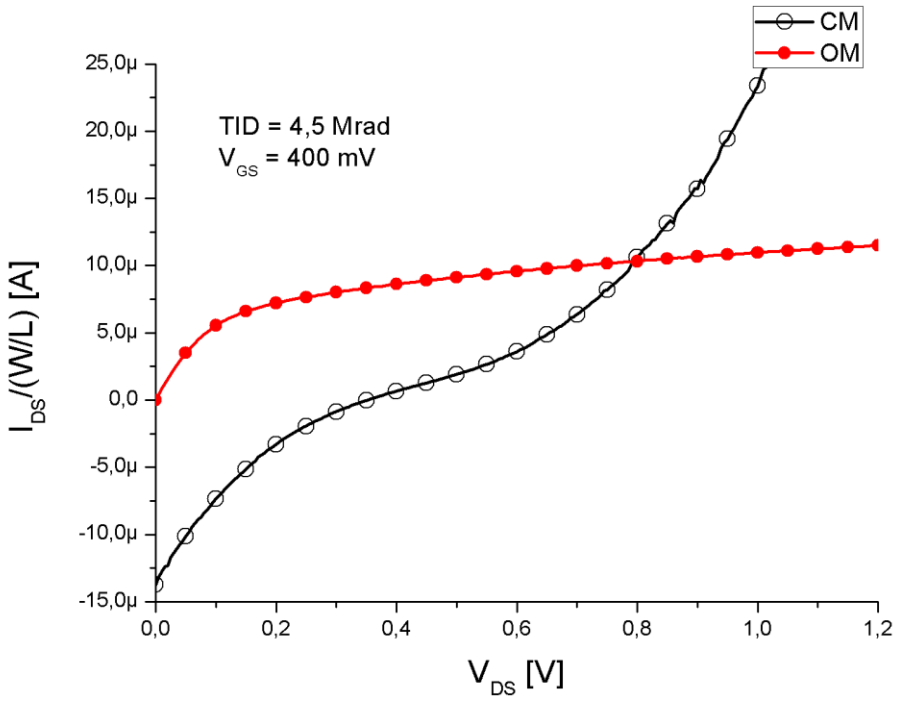
As figuras 47 e 48 apresentam as curvas características do MOSFETs Octo e de seu MOSFET convencional equivalente após serem expostos à uma TID de 4,5 Mrad.

Figura 47 - Curvas características de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 4,5 Mrad (sem polarização) e V_{DS} = 50 mV



Fonte: Autor

Figura 48 - Curvas características de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 4,5 Mrad (sem polarização) e V_{GS} = 400 mV



Fonte: Autor

As figuras 47 e 48 mostram que o MOSFET convencional perde totalmente suas características de funcionamento após atingir uma dose total acumulada de radiação ionizantes por raios-X de 4,5 Mrad. O MOSFET de leiaute de porta octogonal continua com o funcionamento característico de um MOSFET mesmo após atingir uma TID de 4,5 Mrad, considerando as mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes que o MOSFET convencional. Analisando esses resultados é possível notar como esse inovador leiaute de porta para MOSFETs pode mitigar os efeitos das radiações ionizantes nos MOSFETs, fazendo com que o MOSFET Octo por exemplo, seja capaz de funcionar em situações mais extremas que um MOSFET convencional, considerando-se as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes.

A tabela 4 aponta as máximas variações relativas dos parâmetros elétricos e figuras de mérito considerados nesse estudo para o MOSFETs Octo e o MOSFET convencional equivalente.

Tabela 4 – Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM sem polarização durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 4,5 Mrad

Parâmetro / Figura de Mérito	**Máxima variação no CM (TID de até 3 Mrad)**	**Máxima variação no OM (TID de até 4,5 Mrad)**	**Diferença (em %) entre as máximas variações do CM e o OM**	**Justificativa**
V_{TH} (V_{DS} = 50 mV)	- 1,16 % 0,410 V (TID = 3 Mrad)	- 8,06 % 0,280 V (TID = 4,5 Mrad)	+ 6,9 %	Qte. cargas no óxido
S (V_{DS} = 100 mV)	+ 54,91 % 125,52 mV/déc (TID = 3 Mrad)	+ 37,42 % 110,64 mV/déc (TID = 4,5 Mrad)	- 17,49 %	DEPAMBBRE
$g_{mmáx}$/(W/L) (V_{DS} = 100 mV)	- 2,41 % 29,44 µS (TID = 3 Mrad)	- 5,44 % 55,07 µS (TID = 3 Mrad)	+ 3,03 %	-

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 3 Mrad)	Máxima variação no OM (TID de até 4,5 Mrad)	Diferença (em %) entre as máximas variações do CM e o OM	Justificativa
I_{ON}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 1,2 V)	+ 1,13 % 53,58 µA (TID = 1 Mrad)	+ 1,24 % 127,71 µA (TID = 0,5 Mrad)	+ 0,11 %	-
I_{OFF}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 0 V)	Aumento de 240 vezes 41,58 nA (TID = 0,5 Mrad)	Aumento de 100 vezes 15,78 nA (TID = 3 Mrad)	- 14000 %	DEPAMBBRE
I_{LEAK}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = -0,3 V)	Aumento de 8,64 vezes 1,83 nA (TID = 3 Mrad)	Aumento de 5,21 vezes 2,01 nA (TID = 3 Mrad)	- 343 %	DEPAMBBRE
I_{DSsat}/(W/L) (V_{GT} = 385 mV)	+ 3,43 % 22,32 µA (TID = 3 Mrad)	+ 7,51 % 50,77 µA (TID = 0,5 Mrad)	+ 3,78 %	-
R_{ON} (V_{GT} = 385 mV)	- 1,55 % 9,18 kΩ (TID = 1 Mrad)	- 3,42 % 4,65 kΩ (TID = 0,5 Mrad)	+ 1,87 %	-
V_{EA} (V_{GT} = 385 mV)	+ 13,92 % 4,29 V (TID = 3 Mrad)	+ 12,82 % 3,97 V (TID = 0,5 Mrad)	- 1,1 %	-

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 3 Mrad)	Máxima variação no OM (TID de até 4,5 Mrad)	Diferença (em %) entre as máximas variações do CM e o OM	Justificativa
g_m/I_{DS} (inversão moderada, V_{DS} = 700 mV)	- 37,45 % 11,34 V^{-1} (TID = 3 Mrad)	- 20,85 % 16,08 V^{-1} (TID = 3 Mrad)	- 16,6 %	DEPAMBBRE
Av (inversão moderada)	- 28,74 % 48,70 V/V (TID = 3 Mrad)	- 17,02 % 59,32 V/V (TID = 3 Mrad)	- 11,72 %	g_m/I_{DS}

Fonte: Autor

A tabela 4 destaca as diferenças entre as máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados em relação aos valores pré-irradiação do MOSFET Octo e do MOSFET convencional equivalente, considerando-se a mesma área de porta, mesma largura de canal, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes de raios-X. Na tabela 4 são destacadas em verde as diferenças significativas que se mostraram positivas para o MOSFET Octo, em vermelho as diferenças negativas para o MOSFET Octo e sem destaque as diferenças com menos de 5% entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente. Analisando-se a tabela 4, pode-se observar que o MOSFET Octo teve um melhor desempenho em 5 dos parâmetros e figuras de mérito analisados em relação ao MOSFET convencional equivalente, tendo um pior desempenho em apenas um parâmetro.

É possível notar pela tabela 4 que o MOSFET Octo tem uma variação maior para V_{TH} quando comparado ao seu convencional equivalente, considerando-se as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Isso pode ser explicado por uma maior quantidade de cargas aprisionadas no óxido em relação a quantidade de cargas armadilhadas na interface do MOSFET.

Analisando-se as máximas variações de S em relação ao valor pré-irradiação na tabela 4, é possível notar que, mesmo para uma TID de 4,5 Mrad o MOSFET Octo apresentou um ΔS máximo de 37,42%, enquanto o MOSFET convencional para uma TID de 3 Mrad apresentou um ΔS de 54,91%. No estudo de ΔS observa-se que o MOSFET Octo apresentou uma maior

tolerância às radiações ionizantes de raios-X, devido ao efeito DEPAMBBRE que não permite um aumento em I_{OFF} (e consequentemente de S) como visto no MOSFET convencional.

Verifica-se pela tabela 4 que a ΔI_{OFF} apresentou a maior diferença entre o MOSFET Octo e o MOSFET convenciona equivalente. O MOSFET Octo apresentou um aumento de até 100 vezes de I_{OFF}, enquanto o MOSFET convencional apresentou um aumento de 240 vezes no valor de I_{OFF} em relação ao valor pré-irradiação. Isso se deve principalmente ao efeito DEPAMBBRE que evita a ativação dos transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro do MOSFET Octo.

Analisando-se a tabela 4, nota-se que o MOSFET convencional obteve maior variação de I_{LEAK} (aumento de 8,64 vezes de I_{LEAK} no CM) se comparado ao MOSFET Octo (aumento de 5,21 vezes de I_{LEAK} no OM). Esses resultados são explicados pelo efeito DEPAMBBRE que desativa os transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro.

Observa-se na tabela 4 que os valores máximos de ΔV_{EA} para os MOSFETs estudados foram significativos. Porém os valores de ΔV_{EA} foram similares para o MOSFET Octo e o MOSFET convencional (ΔV_{EA} máximo de cerca de 13% em ambos os dispositivos). Esse aumento de V_{EA} é explicado pelo aumento de I_{DSsat} após a exposição dos dispositivos às radiações ionizantes por raios-X.

Como mencionado anteriormente e analisando a tabela 4, pode-se observar que I_{DSsat} aumenta em ambos os dispositivos estudados após a exposição às radiações ionizantes de raios-X. A diferença entre as máximas variações de I_{DSsat} (em relação ao valor pré-irradiação) do MOSFET Octo e do MOSFET convencional não foi significativa, sendo a variação de I_{DSsat} obtida no MOSFET Octo de cerca de 7,5% e no MOSFET convencional de cerca de 3,4%. Esse aumento de I_{DSsat} se deve pelas cargas armadilhadas nas imperfeições do óxido de porta dos dispositivos.

Analisando-se a tabela 4, é possível notar que o MOSFET convencional apresentou maiores variações de g_m/I_{DS} (no regime de inversão moderada) em relação ao valor pré-irradiação [$\Delta(g_m/I_{DS})$] (diminuiu cerca de 37%) que o MOSFET Octo (diminui cerca de 20%). Esse melhor desempenho do MOSFET Octo em relação $\Delta(g_m/I_{DS})$ se explica pelo efeito DEPAMBBRE, que faz com que as variações de I_{LEAK} e I_{OFF} sejam menores no MOSFET Octo em comparação ao MOSFET convencional e, consequentemente, faz com que a variação de g_m/I_{DS} seja menor nas inversões moderada e fraca.

Na tabela 4 é possível observar uma menor variação de A_V (no regime de inversão moderada), em relação ao valor pré-irradiação, para o MOSFET Octo (de cerca de 17%) em comparação ao do MOSFET convencional (que variou cerca de 29%). O melhor desempenho

do MOSFET Octo em relação a ΔA_V se explica pelo efeito DEPAMBBRE e a menor variação já observada no estudo da variação de g_m/I_{DS}.

Observa-se na tabela 4 que as variações de R_{ON} e I_{ON} para os MOSFETs Octo e MOSFET convencional foram pouco significativas, apresentando menos de 4% de variação.

Assim como em condições normais (sem exposição às radiações ionizantes), o MOSFET Octo apresentou resultados consideravelmente melhores que seu MOSFET convencional equivalente no estudo dos efeitos da TID enquanto os MOSFETs não estão polarizados (*floating*). Esses resultados se devem aos efeitos incorporados à estrutura do MOSFET Octo pela adoção da geometria octogonal para o leiaute de porta, principalmente o DEPAMBBRE.

5.3 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA TID ENTRE UM MOSFET OCTO E SEU MOSFET CONVENCIONAL EQUIVALENTE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE POLARIZAÇÃO DURANTE OS PROCEDIMENTOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Nesta seção são apresentados os estudos experimentais comparativos para os efeitos das radiações ionizantes por raios-X nos dispositivos CM e OM, com as condições de polarização *ON*, *OFF* e *ANALOG* durante os procedimentos das radiações ionizantes. Foram utilizados em cada modo de polarização um MOSFET Octo e um MOSFET convencional encapsulados (com dimensões iguais as apresentadas anteriormente na tabela 1). Assim como no estudo sem polarização, foram aplicadas doses de radiações por raios-X nos dispositivos até que um deles parasse de funcionar. Serão apresentadas as curvas características dos MOSFETs para a TID onde o primeiro dispositivo tenha deixado de funcionar e as máximas variações nos parâmetros e figuras de mérito do OM e do CM (em relação aos valores pré-irradiação) abordados nesse estudo.

5.3.1 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo OFF durante os procedimentos das radiações ionizantes

No estudo comparativo dos efeitos da TID no MOSFET Octo e no MOSFET convencional polarizados no modo *OFF* durante os procedimentos das radiações ionizantes, os dispositivos foram expostos a três doses de radiação ionizante. As doses de radiação ionizante por raios-X foram divididas de forma que os dispositivos estudados atingissem uma TID de 10 krad na primeira dose, uma TID de 20 krad na segunda dose e uma TID de 40 krad na terceira

dose. Assim como nas radiações em *floating*, o CM parou de funcionar antes do OM. O MOSFET convencional deixou de funcionar após alcançar uma TID de 40 krad. O MOSFET Octo por sua vez, continuou funcionando com algumas variações nos parâmetros estudados mesmo após atingir uma TID de 40 krad, nas mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes de raios-X.

A tabela 5 aponta as máximas variações dos parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, do MOSFETs Octo e do MOSFET convencional equivalente quando polarizados no modo *OFF* durante os procedimentos de irradiações ionizantes.

Tabela 5 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo *OFF* durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 40 krad

Parâmetro / Figura de Mérito	**Máxima variação no CM (TID de até 20 krad)**	**Máxima variação no OM (TID de até 40 krad)**	**Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM**	**Justificativa**
V_{TH} (V_{DS} = 50 mV)	0 % 0,415 V	+ 3,63 % 0,316 V (TID = 40 krad)	+ 3,63%	-
S (V_{DS} = 100 mV)	- 1,72 % 80,04 mV/déc (TID = 10 krad)	- 1,12 % 80,01 mV/déc (TID = 40 krad)	- 0,60 %	-
$g_{mmáx}$/(W/L) (V_{DS} = 100 mV)	+ 1,25 % 30,55 µS (TID = 20 krad)	+ 3,27 % 60,14 µS (TID = 40 krad)	+ 2,02%	-
I_{ON}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 1,2 V)	+ 1,07 % 53,55 µA (TID = 10 krad)	+ 2,70 % 129,56 µA (TID = 40 krad)	+ 1,63 %	-
I_{OFF}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 0 V)	+ 96,36 % 334,98 pA (TID = 20 krad)	- 17,41 % 130,32 pA (TID = 40 krad)	- 78,95 %	DEPAMBBRE

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 20 krad)	Máxima variação no OM (TID de até 40 krad)	Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM	Justificativa
I_{LEAK}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = -0,3 V)	Aumento de 14,46 vezes 3,07 nA (TID = 20 krad)	Aumento de 11,94 vezes 4,63 nA (TID = 20 krad)	- 252 %	DEPAMBBRE
I_{DSsat}/(W/L) (V_{GT} = 385 mV)	+ 1,31 % 21,86 µA (TID = 20 krad)	+ 1,76 % 48,05 µA (TID = 40 krad)	+ 0,45 %	-
R_{ON} (V_{GT} = 385 mV)	- 1,13 % 9,22 kΩ (TID = 20 krad)	- 1,96 % 4,72 kΩ (TID = 40 krad)	+ 0,83 %	-
V_{EA} (V_{GT} = 385 mV)	- 5,03 % 3,58 V (TID = 20 krad)	- 2,97 % 3,42 V (TID = 40 krad)	- 2,06 %	-
g_m/I_{DS} (inversão moderada, V_{DS} = 700 mV)	- 6,19 % 17,01 V^{-1} (TID = 20 krad)	+ 2,17 % 20,75 V^{-1} (TID = 40 krad)	- 4,02 %	-
A_V (inversão moderada)	- 10,91 % 60,89 V/V (TID = 20 krad)	- 1,84 % 70,17 V/V (TID = 20 krad)	- 9,07 %	DEPAMBBRE

Fonte: Autor

A tabela 5 destaca as diferenças entre as máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados em relação aos valores pré-irradiação do MOSFET Octo e do MOSFET convencional equivalente, considerando-se a mesma área de porta, mesma largura de canal, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes de raios-X. Na tabela 5 são destacadas em verde as diferenças significativas que se mostraram positivas para o MOSFET Octo e sem destaque as diferenças com menos de 5% entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente.

Analisando-se a tabela 5, pode-se observar que o MOSFET Octo teve um melhor desempenho em 3 dos parâmetros e figuras de mérito analisados em relação ao MOSFET convencional equivalente, nos outros parâmetros e figuras de mérito não houve variação significante.

Na tabela 5 nota-se que quando os MOSFETs foram polarizados no modo *OFF* houve pouca variação nos parâmetros e das figuras de mérito estudados do OM e do CM, com exceção das correntes I_{OFF} e I_{LEAK}, e do ganho de tensão intrínseco.

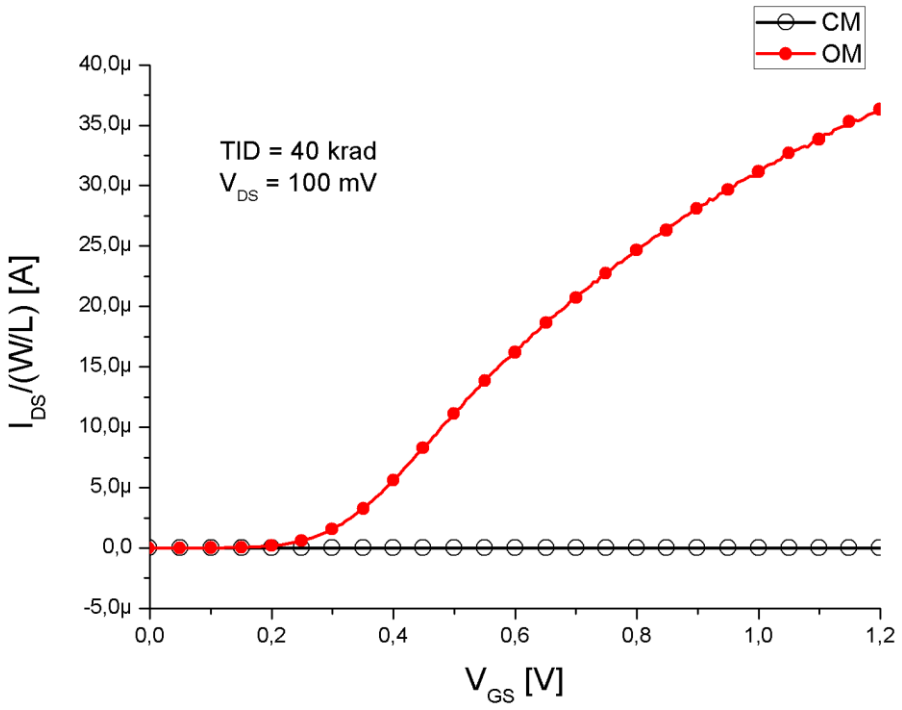
Analisando-se a tabela 5, verifica-se que a I_{OFF} do OM variou cerca de -17% em relação ao valor pré-irradiação, contra os mais de 96% do CM. A variação muito menor apresentada pelo MOSFET Octo é explicada pelo efeito DEPAMBBRE presente em sua estrutura.

Na tabela 5 pode-se observar que a I_{LEAK} aumentou cerca de 12 vezes no MOSFET Octo em relação ao valor medido na condição de pré-irradiação, enquanto que no CM a corrente de fuga (I_{LEAK}) aumentou cerca de 14,5 vezes. O melhor desempenho do MOSFET Octo se deve principalmente pelo efeito DEPAMBBRE, que diminui a influência dos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro, fazendo com que essas correntes indesejadas sejam menores nesta estrutura.

Nota-se na tabela 5 que houve uma maior variação de A_V no MOSFET convencional (cerca de 11%) em comparação ao MOSFET Octo (cerca de 2%), considerando-se as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. A pequena variação de A_V no MOSFET Octo pode ser explicada pelas variações de V_{EA} e g_m/I_{DS} do OM, enquanto a V_{EA} teve variações negativas, g_m/I_{DS} teve variações positivas e, consequentemente um praticamente anulou a variação do outro.

A figura 49 apresenta as curvas características de I_{DS} em função de V_{GS} do MOSFET Octo e de seu MOSFET convencional equivalente após serem expostos à uma TID de 40 krad enquanto estavam polarizados no modo *OFF*.

Figura 49 - Curvas características de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 40 krad (polarização do modo *OFF*) e V_{DS} = 100 mV



Fonte: Autor

5.3.2 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo Analog durante os procedimentos das radiações ionizantes

No estudo comparativo dos efeitos da TID no MOSFET Octo e no MOSFET convencional polarizados no modo *Analog* durante os procedimentos das radiações ionizantes, os dispositivos foram expostos a cinco doses de radiação ionizante. As doses de radiação ionizante por raios-X foram divididas de forma que os dispositivos estudados atingissem uma TID de 37 krad na primeira dose, uma TID de 70 krad na segunda dose, uma TID de 100 krad na terceira dose, uma TID de 150 krad na quarta dose e uma TID de 200 krad na última dose. Nesse estudo o MOSFET convencional deixou de funcionar após alcançar uma TID de 200 krad. O MOSFET Octo por sua vez, continuou funcionando com algumas variações nos parâmetros estudados mesmo após atingir uma TID de 200 krad, nas mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes de raios-X.

A tabela 6 aponta as máximas variações dos parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, do MOSFETs Octo e do MOSFET

convencional equivalente quando polarizados no modo *Analog* durante os procedimentos de irradiações ionizantes.

Tabela 6 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo *Analog* durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 200 krad

Parâmetro / Figura de Mérito	**Máxima variação no CM (TID de até 150 krad)**	**Máxima variação no OM (TID de até 200 krad)**	**Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM**	**Justificativa**
V_{TH} (V_{DS} = 50 mV)	+ 7,23 % 0,445 V (TID = 100 krad)	0 % 0,305 V	- 7,23 %	Qte. cargas na interface
S (V_{DS} = 100 mV)	+ 7,40 % 87,03 mV/déc (TID = 150 krad)	+ 19,69 % 96,36 mV/déc (TID = 70 krad)	+ 12,29 %	Qte. cargas na interface
$g_{mmáx}$/(W/L) (V_{DS} = 100 mV)	- 7,58 % 27,86 µS (TID = 150 krad)	+ 2,47 % 59,68 µS (TID = 200 krad)	- 5,11 %	LCE PAMDLE
I_{ON}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 1,2 V)	- 8,65 % 48,40 µA (TID = 150 krad)	+ 1,76 % 128,37 µA (TID = 200 krad)	- 6,89 %	LCE PAMDLE
I_{OFF}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 0 V)	+ 98,49 % 343,86 pA (TID = 150 krad)	- 15,57 % 133,22 pA (TID = 200 krad)	- 82,92 %	DEPAMBBRE

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 150 krad)	Máxima variação no OM (TID de até 200 krad)	Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM	Justificativa
I_{LEAK}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = -0,3 V)	Aumento de 26,28 vezes 5,57 nA (TID = 150 krad)	- 16,09 % 325,30 pA (TID = 200 krad)	- 2511 %	DEPAMBBRE
I_{DSsat}/(W/L) (V_{GT} = 385 mV)	+ 12,41 % 24,26 µA (TID = 150 krad)	+ 0,70 % 47,55 µA (TID = 200 krad)	- 11,71 %	LCE PAMDLE
R_{ON} (V_{GT} = 385 mV)	+ 15,80 % 10,80 kΩ (TID = 150 krad)	- 0,94 % 4,77 kΩ (TID = 200 krad)	- 14,86 %	LCE PAMDLE
V_{EA} (V_{GT} = 385 mV)	- 35,16 % 2,44 V (TID = 150 krad)	- 14,36 % 3,01 V (TID = 200 krad)	- 20,80 %	LCE PAMDLE
g_m/I_{DS} (inversão moderada, V_{DS} = 700 mV)	- 10,36 % 16,25 V^{-1} (TID = 150 krad)	- 6,04 % 19,08 V^{-1} (TID = 70 krad)	- 4,32 %	-
A_V (inversão moderada)	- 41,88 % 39,72 V/V (TID = 150 krad)	- 19,12 % 57,82 V/V (TID = 70 krad)	- 22,76 %	V_{EA}

Fonte: Autor

A tabela 6 destaca as diferenças entre as máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados em relação aos valores pré-irradiação do MOSFET Octo e do MOSFET

convencional equivalente. Na tabela 6 são destacadas em verde as diferenças significativas que se mostraram positivas para o MOSFET Octo, em vermelho as diferenças negativas para o MOSFET Octo e sem destaque as diferenças com menos de 5% entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente. Conforme os dados apresentados na tabela 6, o MOSFET Octo apresentou um desempenho elétrico superior ao do MOSFET convencional quando polarizado no modo *Analog* durante a exposição às radiações ionizantes de raios-X.

É possível observar na tabela 6 que MOSFET Octo teve menor variação significativa em 9 parâmetros e figuras de mérito, enquanto o MOSFET convencional se saiu melhor em apenas 1.

Analisando-se a tabela 6 é possível verificar que o V_{TH} teve uma variação de mais de 7% em relação ao valor pré-irradiação no CM, enquanto que no OM ela foi praticamente nula. A maior variação de V_{TH} no MOSFET convencional pode ser explicada por uma maior quantidade de cargas armadilhadas na interface em comparação com a quantidade de cargas aprisionadas no óxido de porta.

Com os dados apresentados na tabela 6 verifica-se que o MOSFET Octo apresentou uma maior variação de S máxima (cerca de 19%) que a do MOSFET convencional (cerca de 7%). Os dados da variação de S nos MOSFETs estudados indicam que o MOSFET Octo foi mais afetado pelas cargas armadilhadas na interface.

Analisando-se a tabela 6, nota-se que o MOSFET Octo apresentou menor degradação do $g_{mmáx}$ (cerca de 2%) quando comparado ao MOSFET convencional (cerca de 7,5%). Isso se deve aos efeitos LCE e PAMDLE presentes na estrutura do MOSFET Octo que, com o aumento de g_m faz que sua degradação percentual tenda a ser menor.

É verificado pela tabela 6 que o MOSFET Octo apresentou uma variação de I_{ON} de cerca de 1,76%, enquanto no MOSFET convencional I_{ON} diminuiu cerca de 8,6%. A I_{OFF} apresentou uma máxima variação maior, em relação ao valor pré-irradiação, no MOSFET convencional (cerca de 98%) que no MOSFET Octo (cerca de 15%). Na tabela 6 os dados apresentam uma menor variação da corrente de fuga (I_{LEAK}), em relação ao valor pré-irradiação, no MOSFET Octo (cerca de 16%) em comparação ao MOSFET convencional (aumentou cerca de 26 vezes). Esses ganhos do OM se dão principalmente pelo efeito DEPAMBBRE presente na sua estrutura, que faz com que os transistores parasitários das regiões de bico de pássaro dos MOSFETs não degradem o funcionamento do dispositivo com o aumento das correntes de fuga.

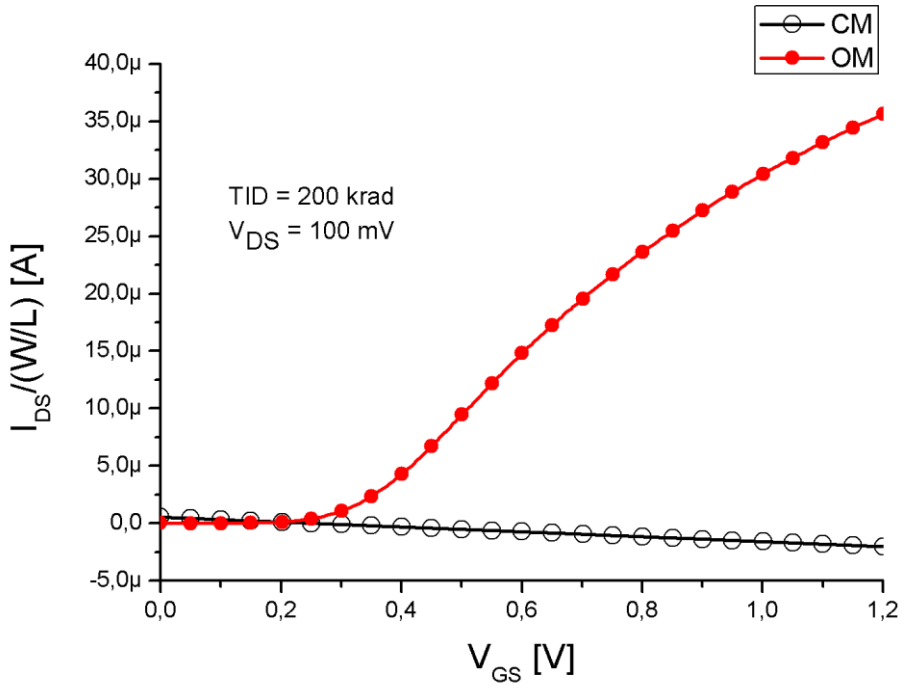
A tabela 6 apresenta resultados que mostram uma menor variação de I_{DSsat} para o MOSFET Octo (cerca de 0,70%) quando comparado ao MOSFET convencional (cerca de 12,41%). O MOSFET Octo apresentou menor variação de V_{EA} (cerca de 14,36%), em relação

ao valor pré-irradiação, quando comparado ao MOSFET convencional (cerca de 35,16%). Nota-se na tabela 6 que R_{ON} apresentou uma maior máxima variação, em relação ao valor pré-irradiação, para o MOSFET convencional (cerca de 15,8%) em comparação ao MOSFET Octo (cerca de 0,94%). Em decorrência dos efeitos LCE e PAMDLE presentes na estrutura do MOSFET Octo, verifica-se que esse estilo de leiaute de porta para MOSFETs é mais tolerante aos efeitos da TID que o MOSFET convencional.

Analisando-se as máximas variações de g_m/I_{DS} para o MOSFET Octo (cerca de 6%) e o MOSFET convencional (cerca de 10%) na tabela 6, é possível notar que esta figura de mérito teve variações parecidas em ambos os dispositivos estudados. Analisando-se às máximas variações de A_V em relação ao valor pré-irradiação, nota-se que o MOSFET Octo teve um melhor desempenho (A_V variou cerca de 19%) quando comparado ao MOSFET convencional (A_V variou cerca de 41%). Essa maior variação de A_V no MOSFET convencional se explica pela variação de V_{EA}, que nesse estudo das radiações ionizantes para quando os MOSFETs são polarizados no modo *Analog*, foi de mais de 35% para o CM (como mencionado anteriormente).

A figura 50 apresenta as curvas características de I_{DS} em função de V_{GS} do MOSFET Octo e de seu MOSFET convencional equivalente após serem expostos à uma TID de 200 krad enquanto estavam polarizados no modo *Analog*.

Figura 50 - Curvas características de $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 200 krad (polarização do modo *Analog*) e V_{DS} = 100 mV



Fonte: Autor

5.3.3 Estudo comparativo dos efeitos da TID em MOSFETs polarizados no modo ON durante os procedimentos das radiações ionizantes

Completando os modos de polarização para o estudo dos efeitos da TID, no estudo comparativo dos efeitos da TID no MOSFET Octo e no MOSFET convencional polarizados no modo *ON* durante os procedimentos das radiações ionizantes, os dispositivos foram expostos a cinco doses de radiação ionizante. As doses de radiação ionizante por raios-X foram divididas de forma que os dispositivos estudados atingissem uma TID de 20 krad na primeira dose, uma TID de 50 krad na segunda dose, uma TID de 100 krad na terceira dose, uma TID de 200 krad na quarta dose e uma TID de 300 krad na última dose. Nesse estudo ambos os MOSFETs estudados (MOSFET Octo e MOSFET convencional) deixaram de funcionar após a última dose de radiações ionizantes de raios-X. Após atingir uma TID de 300 krad o MOSFET convencional não apresentou mais o funcionamento esperado e o MOSFET Octo apresentou variações muito altas em seus parâmetros elétricos.

A tabela 7 aponta as máximas variações dos parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, do MOSFETs Octo e do MOSFET convencional equivalente quando polarizados no modo *ON* durante os procedimentos de irradiações ionizantes.

Tabela 7 - Máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados, em relação aos valores pré-irradiação, dos dispositivos OM e CM com polarização no modo *ON* durante os procedimentos de radiações ionizantes com uma TID de até 200 krad

Parâmetro / Figura de Mérito	**Máxima variação no CM (TID de até 200 krad)**	**Máxima variação no OM (TID de até 200 krad)**	**Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM**	**Justificativa**
V_{TH} (V_{DS} = 50 mV)	0 % 0,415 V	+ 2,53 % 0,313V (TID = 200 krad)	+ 2,53 %	-

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 200 krad)	Máxima variação no OM (TID de até 200 krad)	Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM	Justificativa
S (V_{DS} = 100 mV)	+ 12,22 % 90,93 mV/déc (TID = 100 krad)	+ 11,17 % 89,50 mV/déc (TID = 200 krad)	- 1,05 %	-
$g_{mmáx}$/(W/L) (V_{DS} = 100 mV)	- 1,34 % 29,76 µS (TID = 200 krad)	- 2,97 % 56,51 µS (TID = 200 krad)	+ 1,63 %	-
I_{ON}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 1,2 V)	- 0,49 % 52,72 µA (TID = 20 krad)	- 1,61 % 124,12 µA (TID = 200 krad)	+ 1,12 %	-
I_{OFF}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = 0 V)	+ 1022,13 % 1,94 nA (TID = 100 krad)	+ 460,31 % 0,88 nA (TID = 200 krad)	- 561,82 %	DEPAMBBRE
I_{LEAK}/(W/L) (V_{DS} = 400 mV V_{GS} = -0,3 V)	+ 3694,02 % 8,04 nA (TID = 100 krad)	+ 3260,91 % 13,02 nA (TID = 200 krad)	- 433,11 %	DEPAMBBRE
I_{DSsat}/(W/L) (V_{GT} = 385 mV)	+ 1,76 % 21,96 µA (TID = 100 krad)	- 3,49 % 45,57 µA (TID = 200 krad)	+ 1,73 %	-
R_{ON} (V_{GT} = 385 mV)	+ 0,57 % 9,38 kΩ (TID = 20 krad)	+ 2,25 % 4,71 kΩ (TID = 200 krad)	+ 1,68 %	-

Parâmetro / Figura de Mérito	Máxima variação no CM (TID de até 200 krad)	Máxima variação no OM (TID de até 200 krad)	Diferença (em %) entre máximas variações do OM e o CM	Justificativa
V_{EA} (V_{GT} = 385 mV)	+ 1,51 % 3,83 V (TID = 50 krad)	- 8,63 % 3,22 V (TID = 200 krad)	+ 7,12 %	LCE
g_m/I_{DS} (inversão moderada, V_{DS} = 700 mV)	- 15,43 % 15,33 V^{-1} (TID = 100 krad)	- 16,79 % 16,90 V^{-1} (TID = 100 krad)	+ 1,36 %	-
A_V (inversão moderada)	- 16,18 % 57,29 V/V (TID = 50 krad)	- 21,04 % 56,45 V/V (TID = 200 krad)	+ 4,86 %	-

Fonte: Autor

A tabela 7 destaca as diferenças entre as máximas variações dos parâmetros e figuras de mérito estudados em relação aos valores pré-irradiação do MOSFET Octo e do MOSFET convencional equivalente. Na tabela 4 são destacadas em verde as diferenças significativas que se mostraram positivas para o MOSFET Octo, em vermelho as diferenças negativas para o MOSFET Octo e sem destaque as diferenças com menos de 5% entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional equivalente.

Analisando-se os dados da tabela 7, é possível notar que na maioria dos parâmetros houve pouca variação ou houve variação similar entre o MOSFET Octo e o MOSFET convencional, como no caso da inclinação de sublimiar (S).

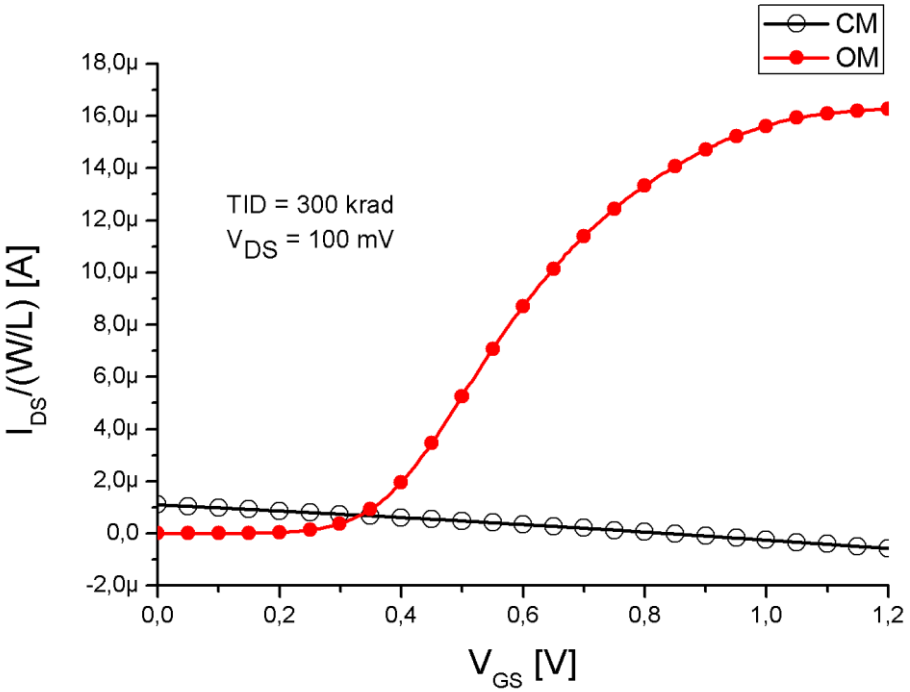
Pode-se notar pela tabela 7 que o MOSFET Octo teve um melhor desempenho em relação às máximas variações de I_{OFF} e I_{LEAK}, que variaram respectivamente 561,82% e 433,11% menos que no MOSFET convencional equivalente. Esses resultados mostram que mesmo quando polarizados no modo *ON* durante os procedimentos de radiações ionizantes, onde os dois dispositivos tiveram degradação bem parecida na maioria dos parâmetros, o efeito

DEPAMBBRE fez com que o MOSFET Octo tivesse melhor desempenho em relação às correntes I_{OFF} e I_{LEAK}.

Analisando os dados apresentados na tabela 7, nota-se uma maior variação de V_{EA} no MOSFET Octo (cerca de 8,5%) em comparação ao MOSFET convencional (cerca de 1,5%). A maioria dos outros parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados tiveram variação menor do que 2%, em relação ao valor pré-irradiação, em ambos os MOSFETs estudados.

A figura 51 apresenta as curvas características de I_{DS} em função de V_{GS} do MOSFET Octo e de seu MOSFET convencional equivalente após serem expostos à uma TID de 300 krad enquanto estavam polarizados no modo *ON*.

Figura 51 - Curvas características de I_{DS}/(W/L) em função de V_{GS} dos dispositivos OM e CM, para uma TID de 300 krad (polarização do modo ON) e V_{DS} = 100 mV



Fonte: Autor

Os estudos sobre os efeitos da TID para os diferentes modos de polarização (*OFF*, *Analog* e *ON*) durante os procedimentos de radiações ionizantes mostraram como os efeitos presentes na estrutura do MOSFET Octo (principalmente o DEPAMBBRE) são capazes de melhorar a sua tolerância às radiações ionizantes em comparação ao seu MOSFET convencional equivalente. Em todos os modos de polarização realizados durante os procedimentos de radiações ionizantes o MOSFET Octo apresentou variações muito menores nas correntes I_{OFF} e I_{LEAK} quando comparado ao MOSFET convencional. O efeito

DEPAMBBRE é capaz de desativar os transistores parasitários das regiões de bico de pássaro. Esses transistores parasitários são os responsáveis por aumentar as correntes de fuga quando o MOSFET está desligado (I_{OFF}) ou reversamente polarizado (I_{LEAK}). Esses resultados indicam que o efeito DEPAMBBRE continua ativo na estrutura em todos os diferentes casos estudados, fazendo com que o MOSFET Octo seja uma alternativa para aplicações de CIs CMOS analógicas e digitais em ambientes de exposição às radiações ionizantes.

A tabela 8 apresenta um panorama geral dos resultados comparativos desse estudo, mostrando em quantos parâmetros ou figuras de mérito o MOSFET Octo teve melhor desempenho que o MOSFET convencional equivalente, e mostrando as TIDs máximas onde os dispositivos foram caracterizados ainda em funcionamento normal.

Tabela 8 - Resumo dos estudos comparativos realizados entre o OM e o CM

Estudo experimental entre o OM e o CM	**Qte. de parâmetros/figuras de mérito que o OM apresentou melhor desempenho**	**Qte. de parâmetros/figuras de mérito que o OM apresentou pior desempenho**	**Máxima TID em que o CM funcionou**	**Máxima TID em que o OM funcionou**
Sem radiação	8/15	2/15	-	-
Radiação sem polarização (*floating*)	5/11	1/11	3 Mrad	4,5 Mrad
Radiação com polarização no modo *OFF*	3/11	0/11	20 krad	40 krad
Radiação com polarização no modo *Analog*	9/11	1/11	150 krad	200 krad
Radiação com polarização no modo *ON*	2/11	1/11	200 krad	200 krad

Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

O trabalho realizado foi focado no estudo comparativo experimental entre o MOSFET de leiaute de porta octogonal (OM) e seu equivalente convencional de porta retangular (CM), considerando-se as mesmas áreas de porta e mesmas larguras de canal, para anular os efeitos geométricos, mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Foi observado e quantificado como os efeitos presentes na estrutura do OM potencializam seu desempenho elétrico (LCE e PAMDLE) e tornam o dispositivo mais robusto às radiações ionizantes (DEPAMBBRE).

No estudo comparativo experimental do desempenho elétrico dos MOSFETs quando não são expostos às radiações ionizantes, o OM se mostrou uma alternativa ao CM, considerando mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal e mesmas condições de polarização. O MOSFET Octo apresentou ganhos significantes em diversos parâmetros elétricos e figuras de mérito, como uma corrente de estado ligado (I_{ON}) 138% maior que a do seu MOSFET convencional equivalente e uma corrente de estado desligado (I_{OFF}) 69% menor que a do seu MOSFET convencional equivalente, considerando mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal e mesmas condições de polarização. No geral o MOSFET Octo apresentou um melhor desempenho em 8 parâmetros elétricos ou figuras de mérito, e um pior desempenho em outros 2 comparado ao MOSFET convencional com mesma área de porta, mesmo largura de canal e mesmas condições de polarização que o OM.

A maior desvantagem para o OM em comparação ao CM, observando apenas os parâmetros e figuras de mérito analisados, foi em relação a corrente de fuga (I_{LEAK}), que apresentou um valor cerca de 80% maior no OM que o observado no CM, considerando as mesmas áreas de porta, mesmas larguras de canal e mesmas condições de polarização. Isso está relacionado ao maior perímetro das interfaces entre as regiões de dreno/fonte e canal do OM e a amplitude dos campos elétricos longitudinais das regiões metalúrgicas do OM, em comparação ao que é observado no MOSFET convencional com mesma área de porta, mesma largura de canal e mesmas condições de polarização.

Os resultados apresentados nos estudos dos efeitos das radiações ionizantes no MOSFET Octo e no MOSFET convencional, mostram as variações dos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito quando os MOSFETs não estão polarizados ou estão polarizados em três diferentes modos (*ON*, *OFF*, *Analog*), e são expostos a diferentes doses de radiações ionizantes de raios-X. Os dados obtidos permitiram notar maiores e consideráveis variações principalmente nas correntes de dreno de estado desligado (I_{OFF}) e de fuga (I_{LEAK}) do MOSFET

convencional que no MOSFET Octo, considerando as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Isso pode ser explicado pelo efeito DEPAMBBRE presente na estrutura do MOSFET Octo que é capaz de desativar os transistores parasitários das regiões de bico de pássaro. Esses transistores parasitários são os responsáveis por aumentar as correntes de fuga quando o MOSFET está desligado (I_{OFF}) ou reversamente polarizado (I_{LEAK}).

Na condição de irradiação enquanto os MOSFETs não estavam polarizados (*floating*), o MOSFET Octo apresentou um pior resultado apenas na variação da V_{TH} em comparação ao MOSFET convencional, considerando as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. No entanto, a variação de V_{TH} no MOSFET Octo foi de apenas -8% e não fez com que o dispositivo parasse de funcionar. Após alcançar uma TID de 4,5 Mrad em *floating*, o MOSFET convencional apresentou uma variação da inclinação de sublimiar (S), em relação ao valor pré-irradiação, de praticamente o dobro da variação do MOSFET Octo, com as mesmas condições de polarização e as mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. No estudo dos efeitos da TID para quando os MOSFET são polarizados no modo *floating* durante os procedimentos das radiações ionizantes, o MOSFET convencional deixou de funcionar completamente ao alcançar uma TID de 4,5 Mrad, o que não aconteceu com o MOSFET Octo.

Nos modos de polarização *ON*, *OFF* e *Analog*, os dados obtidos mostraram como o efeito DEPAMBBRE presente na estrutura do MOSFET Octo realmente permite que ele seja menos afetado pelos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro. Nos três modos de polarização o aumento observado nas correntes I_{OFF} e I_{LEAK} do MOSFET Octo foi consideravelmente menor do que o observado no seu MOSFET convencional equivalente, considerando as mesmas condições de polarização e mesmas condições de exposição às radiações ionizantes. Com a polarização em *OFF* a I_{OFF} teve uma variação quase 80% menor no MOSFET Octo em comparação a do MOSFET convencional, e a I_{LEAK} aumentou cerca de 12 vezes no MOSFET Octo e mais de 14 vezes no MOSFET convencional. Na polarização em *Analog* a I_{OFF} variou cerca de 83% menos no MOSFET Octo em comparação ao MOSFET convencional, e a I_{LEAK} aumentou cerca de 2600% no MOSFET convencional e apenas 16% no MOSFET Octo. Na polarização em *ON* o MOSFET Octo teve menor variação de I_{OFF} e I_{LEAK}, que variaram respectivamente 561,82% e 433,11% menos que no MOSFET convencional equivalente. Vale notar que nos modos de polarização *OFF* e *Analog*, o MOSFET Octo continuou funcionando com pouca variação nos seus principais parâmetros elétricos mesmo após o MOSFET convencional deixar de funcionar. Na polarização em *ON* o MOSFET Octo

continuou funcionando após o MOSFET convencional parar, mas com variações consideráveis em praticamente todos os seus parâmetros elétricos.

Esses diferentes casos estudados nos procedimentos de radiações ionizantes demonstram a maior robustez do MOSFET Octo para aplicações em ambientes com radiações ionizantes em comparação ao MOSFET convencional, que deixou de funcionar antes que o OM na maioria dos casos estudados, além de apresentar maiores variações em seus parâmetros.

Os resultados obtidos nesse estudo sugerem o MOSFET Octo como uma alternativa de MOSFET para utilização em circuitos analógicos e digitais, elementos chaveadores (pelo seu baixo R_{ON}) e também aplicações em áreas sujeitas às radiações ionizantes, como nas aplicações aeroespaciais. Sendo essa estrutura possível de ser aplicada apenas pela mudança do leiaute de porta, não gerando custos aos processos de fabricação já utilizados amplamente pela indústria.

Mais pesquisas em ambientes de radiações ionizantes quando os MOSFETs estão polarizados e estudos utilizando a mesma metodologia em um maior número de dispositivos devem complementar os estudos dos efeitos da TID nesses leiautes, permitindo verificar se realmente o MOSFET Octo sempre tende a ter um melhor comportamento nos diferentes casos deste estudo.

REFERÊNCIAS

1 COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices**. S.l.: Kluwer Academic Publishers, 2002.

2 SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5. ed. S.l.: Prentice Hall Brasil, 2007.

3 HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L. **Handbook of Radiation Effects**. 2. ed. New York: Oxford, 2002.

4 OLDHAM, T. R.; MCLEAN, F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [s.l.], v. 50, n. 3, p. 483-499, jun. 2003.

5 BARNABY, H. J. Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [s.l.], v. 53, n. 6, p. 3103-3121, dez. 2006.

6 CAMPBELL, J. P. et al. Random Telegraph Noise in Highly Scaled nMOSFETs. In: RELIABILITY PHYSICS SYMPOSIUM, 2009 IEEE INTERNATIONAL, 2009, Quebec. **Proceedings...** New York: IEEE, 2009. p. 382-388.

7 JARRON, P. et al. Deep submicron CMOS technologies for the LHC experiments. **Nuclear Physics B – Proceedings Supplements**, [s.l.], v. 78, n. 1-3, p. 625-634, 1999.

8 GONELLA, L. et al. Total Ionizing Dose effects in 130-nm comercial CMOS technologies for HEP experiments. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s.l.], v. 582, n. 3, p. 750-754, 2007.

9 CHAU, R. et al. Gate dieletric scaling for high-performance CMOS: from SiO2 to high-K. **Extend Abstracts of International Workshop on Gate Insulator (IEEE Cat.No.03ex765)**, [s.l.], p. 124-126, 2003.

10 MISTRY, K. et al. A 45nm Logic Technology with High-k+Metal Gate Transistors, Strained Silicon, 9 Cu Interconnect Layers, 193nm Dry Patterning, and 100% Pb-free Packaging. **2007 IEEE International Electron Devices Meeting**, [s.l.], p. 247-250, dez. 2007.

11 HU, Chenming at al. FinFET-a self-aligned double-gate MOSFET scalable to 20 nm. **IEEE Transactions on Electron Devices**, [s.l.], v. 47, n. 12, p. 2320-2325, 2000.

12 KUHN, K. J. Considerations for Ultimate CMOS Scaling. **IEEE Transactions on Electron Devices**, [s.l.], v. 59, n. 7, p. 1813-1828, jul. 2012.

13 MCLAIN, M. et al. Modeling “Dog Bone” Gate Geometry n-Channel MOSFETs. In: RADECS 2005 Cap D’ Agde, France, 2005.

14 SNOEYS, W. J.; GUTIERREZ, T. A. P.; ANELLI, G. A New NMOS Layout Structure for Radiation Tolerance. **IEEE Trans Nucl Sci**, [s.l.], v. 49 (4), p. 1829-1833, ago. 2002.

15 GIMENEZ, S. P. **Layout Techniques for MOSFETs**. 1. ed. S.l.: Morgan & Claypool Publishers, 2016.

16 GIMENEZ, S. P. Diamond MOSFET: An innovative layout to improve performance of ICs. **Solid-State Electronics**, [s.l.], v. 54, p. 1690-1699, dez. 2010.

17 GALEMBECK, E. H. S. et al. Experimental comparative study between the diamond MOSFET and its conventional counterpart in high temperatures environment. **2013 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S)**, [s.l.], p. 1-2, out. 2013.

18 GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. Electrical behavior of the diamond layout style for MOSFETs in X-rays ionizing radiation environments. **Microelectronic Engineering**, v. 148, p. 85-90, 2015.

19 GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. FISH SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond SOI Transistor for Digital ICs Applications. **ECS Transactions**, v. 35, n. 5, p. 163-168, 2011.

20 GIMENEZ, S. P. et al. FISH SOI MOSFET: Modeling, Characterization and Its Application to Improve the Performance of Analog ICs. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 158, p. H1258-H1264, 2011.

21 GIMENEZ, S. P. The Wave SOI MOSFET: A New Accuracy Transistor Layout to Improve Drain Current and Reduce Die Area for Current Drivers Applications. **ECS Transactions**, v. 19, n. 4, p. 153-158, 2009.

22 SOUZA, R. N.; SILVEIRA, M. A. G.; GIMENEZ, S. P. Mitigating MOSFET Radiation Effects by Using the Wave Layout in Analog ICs Applications. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 10, p. 30-37, 2015.

23 GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. OCTO SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond to Be Used in the Analog Integrated Circuits. In: EUROSOI, Granada, Spain, 2011.

24 FINO, L. N. S. et al. Experimental Study of the OCTO SOI nMOSFET to Improve Device Performance. In: EUROSOI, Montpellier, France, 2012.

25 FINO, L. N. S. et al. Improving Unit Voltage Gain Frequency of Integrated Circuits by Using OCTO Layout Style. In: EUROSOI, Paris, France, 2013.

26 FINO, L. N. S. et al. Total ionizing dose effects on the digital performance of irradiated OCTO and conventional fully depleted SOI MOSFET. **14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)**, [s.l.], C-4, p. 1-4, set. 2013.

27 FINO, L. N. S. et al. Improving the X-Ray Radiation Tolerance of the Analog ICs by Using OCTO Layout Style. In: SBMICRO, Paraná, Brazil, 2013.

28 FINO, L. N. S. et al. Boosting the Radiation Hardness and Higher Reestablishing Pre-Rad Conditions by Using OCTO Layou Style for MOSFETs. In: SBMICRO, Sergipe, Brazil, 2014.

29 FINO, L. N. S. et al. Boosting the total ionizing dose tolerance of digital switches by using OCTO SOI MOSFET. **Semiconductor Science and Technology**, v. 30, n. 10, 105024, 2015.

30 GIMENEZ, S. P. et al. An Innovative Ellipsoidal Layout Style to Further Boost the Electrical Performance of MOSFETs. **IEEE Electron Device Letters**, [s.l.], v. 36, n. 7, p. 705-707, jul. 2015.

31 CORREIA, M. M.; GIMENEZ, S. P. Boosting the electrical performance of MOSFET switches by applying Ellipsoidal layout style, In: SBMICRO, Bahia, Brazil, 2015.

32 RUPP, K. Moore's Law: Transistors per microprocessor. Gráfico. Disponível em: <https://ourworldindata.org>. Acesso em: 28 dez. 2018.

33 MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. S.l.: Thomson, 2003.

34 SILVEIRA, F.; FLANDRE, D.; JESPERS, P. G. A. A g_m/I_D Based Methodology for the Design of CMOS Analog Circuits and Its Application to the Systhesis of a Silicon-on-Insulator Micropower OTA. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, [s.l.], v. 31, n. 9, p. 1314-1319, 1996.

35 SCHRIMPF, R. D. **Radiation Effects in Microelectronics**. S.l.: Springer, Dordrecht, 2007.

36 FUNDAMENTAL Radiation Concepts. In: RSSC FUNDAMENTAL RADIATION CONCEPTS: RADIATION SAFETY SHORT COURS, 2012, Florida. Florida: University of Florida, 2012. Cap. 2. p. 1-21.

37 SCHWANK, J. R. et al. Radiation Effects in MOS Oxides. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [s.l.], v. 55, n. 4, p. 1833-1853, ago. 2008.

38 KEITHLEY. **4200-SCS**: Parameter Analyzer Technical Data. S.l., 2017.

39 KEITHLEY. **Models 2634B, 2635B, and 2636B System SourceMeter Instruments**: Quick Start Guide. S.l., 2017.

40 SHIMADZU. **X-ray Diffractometer**: XRD-6100. Manual. S.l., 2015.

41 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. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [s.l.], v. 60, n. 3, p. 2074-2100, jun. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).