

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

DANIEL MANHA ALATI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE ESTRUTURAS MOSFETs NÃO
CONVENCIONAIS E DO MOSFET DIAMANTE EM AMBIENTES RADIOATIVOS**

São Bernardo do Campo
2012

DANIEL MANHA ALATI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE ESTRUTURAS MOSFETs NÃO
CONVENCIONAIS E DO MOSFET DIAMANTE EM AMBIENTES RADIOATIVOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Centro Universitário da FEI como parte dos
requisitos necessários para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos
Gimenez

São Bernardo do Campo

2012

Alati, Daniel Manha.

Estudo do comportamento elétrico de estruturas MOSFETs não convencionais e do MOSFET Diamante em ambientes radioativos / Daniel Manha Alati. São Bernardo do Campo, 2012. 197 f.

Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário da FEI.
Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

1. MOSFET Diamante. 2. MOSFET Octo. 3. SOI MOSFET Fish. 4. Efeitos da radiação em dispositivos eletrônicos. I. Gimenez, Salvador Pinillos, orient. II. Título.

CDU 621.381



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

Programa de Mestrado de Engenharia Elétrica

Aluno: Daniel Manha Alati

Matrícula: 1101039

Título do Trabalho: ESTUDO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE ESTRUTURAS MOSFETs NÃO CONVENCIONAIS E DO MOSFET DIAMANTE EM AMBIENTES RADIOATIVOS.

Área de Concentração: Dispositivos Eletrônicos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Data da realização da defesa: 28 / fevereiro / 2012

ORIGINAL ASSINADA

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao candidato o seguinte:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 28 / fevereiro / 2012.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Ass.: _____

Prof. Dr. Marcello Bellodi

Ass.: _____

Prof. Dr. José Alexandre Diniz

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Ao meu avô, João da Rocha Manha Junior, que lutou bravamente contra várias enfermidades. Infelizmente ele faleceu, deixando saudades e uma grande lição de vida: embora a dor e o sofrimento tenham lhe acompanhado durante 22 dias, ele sempre se manteve firme ao tratamento. Eu guardo comigo as gargalhadas que ele dava quando eu e meu irmão íamos visitá-lo na UTI.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus por ter iluminado meu caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez, pois me deu voto de confiança ao me iniciar na microeletrônica.

Aos professores de mestrado da FEI Marcello Bellodi, Renato Camargo Giacomini, Paula Ghedini Der Agopian, Salvador Pinillos Gimenez, Michelly de Sousa e Marcelo Antonio Pavanello que me deram todo o embasamento técnico para escrever essa dissertação.

Ao Acácio Nunes Pereira, à Paula Przybysz Martim e ao Prof. Dr. Devair Aparecido Arrabaça que sempre confiaram no meu trabalho, suprimo nossa equipe com dispositivos eletrônicos e equipamentos para nossos experimentos.

A todos os técnicos do Centro de Laboratórios Elétricos da FEI (CLE) que, por diversas vezes, foram atenciosos com os trabalhos do mestrado. Gostaria de fazer um agradecimento especial aos técnicos Moacir, Alexandre e Ari.

Aos técnicos do Centro de Laboratórios Mecânicos da FEI (CLM), em especial ao técnico Daniel, operador da máquina de raios-X.

Ao meu pai, Girolamo Alati (Gino), pelas dicas e auxílio na confecção das blindagens e suportes das placas.

À Katie Sickels, funcionária da Kycon, que nos forneceu soquetes que não encontrávamos em território nacional.

Ao meu amigo Raffaello Claser que me ensinou a utilizar o programa *IC Station*.

Aos mestres Felipe Neves Souza, Márcio Alves Sodré de Souza, Renan Trevisoli Doria e Rodrigo Trevisoli Doria que sanaram minhas d vidas quanto   utilização do simulador da *Synopsys*.

Ao Klaus Huscher Cirne que foi pioneiro no Centro Universitário da FEI na área de radiação em dispositivos eletrônicos. O Klaus foi intermediador no processo de encapsulamento dos MOSFETs Diamantes e convencionais.

  Profa. Dr^a. Marcilei Aparecida Guazzelli da Silveira por ter me acompanhado e auxiliado por diversas vezes nos ensaios de raios-X.

Aos servidores do CTI Wellington Romeiro de Melo e Luís Eduardo Seixas Júnior que deram sugestões valiosas para o meu trabalho. Eu não posso deixar de fazer um agradecimento especial ao Wellington e ao Seixas, pois eles foram responsáveis pelo encapsulamento dos *chips* da FEI.

Aos professores doutores do IFUSP Nilberto Heder Medina, Nemitala Added e Manfredo Harri Tabacniks pela colaboração no trabalho ao oferecer todo o suporte para irradiação de dispositivos eletrônicos no LAMFI.

Aos técnicos e alunos do IFUSP: Marcel Barbosa, Marcos Antônio, Renan e Thiago.

A minha mãe (Regina Ferreira Manha Alati), avó (Conceição Ferreira Manha), avô (João da Rocha Manha Junior) e irmão (Ricardo Manha Alati) que sempre me incentivaram quando tudo parecia perdido.

A todos os meus familiares que contribuíram indiretamente com meu lado profissional.

Aos meus amigos, “velhos companheiros de guerra”, que sempre estiveram ao meu lado desde o ciclo básico da graduação em engenharia. São eles: André Viviani Kawakami, Endrigo Moreira Cavinato e Francisco Pompeo Neto.

A minha amiga Viviane da Silva Nobre que me acompanhou na fase final do trabalho. Obrigado pelas palavras de apoio e pelas orações.

Eu não me esqueci de vocês, alunos de mestrado. Vocês são muitos valiosos, pois criamos vínculo forte de amizade nesses dois anos de caminhada. Meus amigos do mestrado são: Eduardo Luiz Ronchete da Silva, Ingrid Catherine Baptista dos Santos, Juliana Ferreira Pinheiro, Arianne Soares do Nascimento Pereira, João Felipe Fernandes Coghi, Cristiano Tavares Malheiro, Genaro Mariniello da Silva, Vinícius Vono Peruzzi, Geisa Moreira de Andrade, André Luiz Perin e Rodrigo D’Angelo.

Aos companheiros de equipe Rafael Navarenho de Souza e Leonardo Navarenho de Souza Fino que me auxiliaram na fase conclusiva desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente com meu trabalho. Por favor, me perdoe pelo esquecimento involuntário do seu nome.

Obrigado por tudo,
Daniel Manha Alati

*Ninguém poderá jamais aperfeiçoar-se,
se não tiver o mundo como mestre. A
experiência se adquire na prática.*

William Shakespeare

RESUMO

Esse trabalho apresenta novas possibilidades de construção de MOSFETs com estilo de *layout* diferenciado, aos quais foram projetados e patenteados pelo Centro Universitário da FEI. Os MOSFETs do tipo Diamante e Octo possuem geometria de porta hexagonal e octogonal, respectivamente, e o SOI MOSFET *Fish* possui formato de porta semelhante ao sinal matemático “menor que” ($<$). Os MOSFETs com geometria de porta não convencional foram estudados comparativamente com os MOSFETs de geometria convencional (retangular). Os resultados simulados e experimentais mostram que essas novas geometrias de porta podem aumentar o desempenho dos dispositivos e, conseqüentemente, dos circuitos integrados (CIs) analógicos e digitais, quando comparado aos transistores convencionais equivalentes. O CI que contém os MOSFETs Diamantes (DMs), os MOSFETs Octos (OMs) e os MOSFETs convencionais (CMs) foi manufaturado utilizando processo de fabricação convencional CMOS comercial de $0,35\ \mu\text{m}$ da *On Semiconductor*, por intermédio do *MOSIS Educational Program*. Considerando as mesmas condições de polarização, áreas de porta e fatores geométricos entre transistores equivalentes, o MOSFET Diamante foi concebido com o intuito de aumentar o campo elétrico longitudinal resultante na região de canal, quando comparado ao MOSFET convencional equivalente. Isso tudo é possível, pois o DM possui duas componentes vetoriais de campo elétrico longitudinal, enquanto que o CM equivalente possui somente uma componente. O aumento do campo elétrico longitudinal resultante do DM garante melhorias na corrente de dreno (I_{DS}), na transcondutância (g_m), na razão g_m/I_{DS} , na resistência entre dreno e fonte de estado ligado (R_{on}), no ganho de tensão do amplificador fonte comum (A_{VO}) e na frequência de ganho de tensão unitário (f_T), quando comparado ao respectivo CM equivalente. Como exemplo, pode-se citar o aumento de 168% no valor de I_{DS} (triódo) do DM com ângulo α de $36,9^\circ$, em relação ao valor obtido do CM equivalente. O MOSFET Octo, que é obtido quando os vértices do transistor hexagonal são cortados, foi projetado com o objetivo de aumentar a robustez contra descargas eletrostáticas e elevar a tensão de ruptura do transistor, considerando as mesmas condições de polarização entre o OM e o DM equivalentes. Essa nova estrutura contém três componentes de campo elétrico longitudinal. Comparado ao CM equivalente, o OM associa melhorias de vários parâmetros elétricos com significativa redução na área de silício ocupada pelo transistor, considerando as mesmas condições de polarização. O SOI MOSFET *Fish* (FSM) preserva o conceito de efeito de canto longitudinal (LCE) do DM e pode ser construído com a dimensão mínima permitida pela tecnologia CMOS, ou seja, o FSM foi especialmente projetado para aplicações digitais de CIs. Considerando as mesmas condições de polarização e áreas de porta, o FSM possui melhor desempenho que o seu equivalente SOI MOSFET convencional (CSM) para a corrente de dreno normalizada pelo fator geométrico, transcondutância normalizada pelo fator geométrico, R_{on} , tensão Early, ganho de tensão intrínseco do transistor (A_V) e f_T . Para ilustrar, o valor de A_V do FSM com ângulo α de 45° foi 47,9% maior que o valor obtido para o CSM equivalente. Visando a aplicação aeroespacial de CIs, o estudo comparativo dos efeitos da radiação nos DMs e nos seus respectivos CMs equivalentes foi realizado. O primeiro ensaio de radiação foi feito com raios-X no Centro Universitário da FEI, enquanto que o segundo ensaio foi feito com feixe de prótons no Laboratório de Materiais e Feixes Iônicos (LAMFI), que está contido nas dependências do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Foi constatado, experimentalmente, que o Diamante é mais robusto aos efeitos da radiação (raios-X e prótons) que o CM equivalente, devido a menor região de bico de pássaro presente na estrutura hexagonal, considerando as mesmas condições de polarização.

Palavras-chave: MOSFET Diamante. MOSFET Octo. SOI MOSFET *Fish*. Efeitos da Radiação em Dispositivos Eletrônicos.

ABSTRACT

This work presents new possibilities of MOSFETs layout styles, which were designed and patented by the Centro Universitário da FEI. The Diamond MOSFET and the Octo MOSFET have hexagonal and octagonal gate geometric shape, respectively, and the *Fish* SOI MOSFET presents a gate geometric shape similar to a “smaller than” ($\lessdot$) mathematical symbol. The MOSFETs with unconventional gate geometry were studied comparatively with the MOSFETs with conventional gate geometry (rectangular). The simulated and experimental results show that these new gate geometries can increase the devices performance of analog and digital integrated circuits (ICs), when compared to the conventional transistors counterparts. The IC that contains the Diamond MOSFETs (DMs), the Octo MOSFETs (OMs) and the conventional MOSFETs (CMs) were manufactured by On Semiconductor, using a 0.35 μm commercial bulk CMOS manufacturing process, via MOSIS Educational Program. Considering the same bias conditions, gate areas and geometric factors between equivalent transistors, the Diamond MOSFET was designed in order to increase the longitudinal electric field in the channel region when compared to the conventional MOSFET counterpart. This is possible, because the DM has two vector components of longitudinal electric field, while the CM counterpart has only one vector component. The increase of the DM resultant longitudinal electric field ensures improvements in the drain current (I_{DS}), the transconductance (g_{m}), the $g_{\text{m}}/I_{\text{DS}}$ ratio, the on-resistance (R_{on}), voltage gain (A_{VO}) and the unit voltage gain frequency (f_{T}), when compared to CM counterpart. As an example, the DM (α angle equal to 36.9°) I_{DS} (triode) increased around 168% when compared to the drain current obtained of the CM counterpart. The Octo MOSFET, which is obtained when the hexagonal transistor vertices are cut, was originated in order to increase the robustness in terms of the electrostatic discharges and increase the breakdown drain voltage, considering the same bias conditions between the equivalents OM and DM. This new structure has three longitudinal electric field components. Compared to the CM counterpart, the OM associated improvements in several electrical parameters with significant reduction in silicon die area occupied by the transistor, considering the same bias conditions. The SOI MOSFET Fish (FSM) maintains the concept of the DM longitudinal corner effect (LCE) and the FSM can be designed by using the minimum dimension allowed by the CMOS technology, in other words, the FSM was specially designed for digital ICs applications. Considering the same bias conditions and gate areas, the FSM has better performance than its conventional SOI MOSFET (CSM) counterpart for the drain current normalized by the geometric factor, transconductance normalized by the geometric factor, R_{on} , Early voltage (V_{EA}), transistor intrinsic voltage gain (A_{V}) and f_{T} . To illustrate, the FSM (α angle equal to 45°) had an increase of 47.9% in A_{V} when compared to the value obtained for the CSM counterpart. Aiming to aerospace application of ICs, the comparative study of the radiation effects on DMs and CMs counterparts were conducted. The first experiment was done with X-rays at Centro Universitário da FEI and the second experiment was done with protons beam at Laboratório de Materiais e Feixes Iônicos (LAMFI), inside the Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Experimental results show that the Diamond MOSFET presents higher radiation robustness (X-rays and protons) than the one observed in the CM counterpart, due to the smaller bird's beak region present in the hexagonal structure, in comparison to the CM counterpart, considering the same bias conditions.

Keywords: Diamond MOSFET. Octo MOSFET. Fish SOI MOSFET. Radiation Effects in Electronic Devices.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_G	Área de porta [μm^2]
A_V	Ganho de tensão intrínseco do transistor [V/V]
A_{VO}	Ganho de tensão do amplificador [dB]
B	Contato de substrato ou maior comprimento de canal do MOSFET Diamante e MOSFET Octo
b	Menor comprimento de canal do Diamante ou Octo
C	Capacitância [F]
C_{it}	Capacitância das armadilhas na interface Si/SiO ₂ [F]
$C_{m\acute{a}x}$	Capacitância máxima do capacitor MOS [F]
$C_{m\acute{i}n}$	Capacitância mínima do capacitor MOS [F]
Co	Cobalto
C_{ox}	Capacitância devida ao óxido de porta [F]
C_{Si}	Capacitância devida à região de depleção do silício [F]
D	Contato de dreno
$\overrightarrow{E_0}$	Campo elétrico longitudinal resultante do MOSFET Convencional [kV/cm]
$\overrightarrow{E_T}$	Campo elétrico longitudinal resultante do MOSFET Diamante, MOSFET Octo e MOSFET <i>Fish</i> [kV/cm]
$\overrightarrow{E_1}$	Campo elétrico longitudinal do MOSFET Diamante, MOSFET Octo e MOSFET <i>Fish</i> [kV/cm]
$\overrightarrow{E_2}$	Campo elétrico longitudinal do MOSFET Diamante, MOSFET Octo e MOSFET <i>Fish</i> [kV/cm]
$\overrightarrow{E_3}$	Campo elétrico longitudinal do MOSFET Octo [kV/cm]
e^+	Pósitron
e^-	Elétron
f	Frequência [Hz]
f_g	Fator geométrico (razão de aspecto do transistor)
f_T	Frequência de ganho de tensão unitário [Hz]
G	Contato de porta
g_m	Transcondutância de entrada [S]
$g_{m_m\acute{a}x}$	Transcondutância de entrada máxima [S]
g_m/I_{DS}	Razão entre a transcondutância de entrada e a corrente de dreno [V^{-1}]

I_{DS}	Corrente entre dreno e fonte [A]
I_{DS_CSM}	Corrente entre dreno e fonte do SOI MOSFET Convencional [A]
I_{DS_FSM}	Corrente entre dreno e fonte do SOI MOSFET <i>Fish</i> [A]
I_{DS_sat}	Corrente entre dreno e fonte na saturação [A]
I_G	Corrente de porta [A]
I_{leak}	Corrente de fuga [A]
I_{off}	Corrente de estado desligado [A]
I_{on}	Corrente de estado ligado [A]
I_{on}/I_{off}	Razão entre a corrente de estado ligado e a corrente de estado desligado [A/A]
k	Constante de Boltzmann [J/K]
L	Comprimento de canal do MOSFET [μm]
L_{eff}	Comprimento efetivo de canal do MOSFET [μm]
n	Nêutron
p	Próton
Q_d	Carga de depleção [C]
Q_i	Carga efetiva do armadilhamento na interface e no óxido [C]
q	Carga elementar do elétron [C]
$R_{_}$	Resistor número $_$
r_o	Resistência diferencial de saída na região de saturação [Ω]
R_{on}	Resistência entre dreno e fonte de estado ligado [Ω]
S	Contato de fonte ou inclinação de sublimar [mV/déc]
Si	Silício
Si p	Silício dopado com material tipo p
Si n^+	Silício fortemente dopado com material tipo n
SiO_2	Dióxido de silício (vulgarmente conhecido como óxido de silício)
T	Temperatura [K]
$t_{1/2}$	Tempo de meia-vida [s]
V	Tensão [V]
V_{DD}	Tensão positiva de alimentação de um inversor CMOS [V]
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte [V]
V_{EA}	Tensão Early [V]
V_{FB}	Tensão de faixa plana [V]
V_G	Tensão de porta [V]
V_{GS}	Tensão entre porta e fonte [V]

V_{GS1}	Tensão entre porta e fonte número 1 [V]
V_{GS2}	Tensão entre porta e fonte número 2 [V]
V_{GT}	Sobretensão de porta [V]
V_{in}	Sinal de entrada de um inversor CMOS [V]
V_{out}	Sinal de saída de um inversor CMOS [V]
V_{SS}	Tensão negativa de alimentação de um inversor CMOS [V]
V_{Th}	Tensão de limiar [V]
V_{Th_CSM}	Tensão de limiar do SOI MOSFET convencional [V]
V_{Th_DSM}	Tensão de limiar do SOI MOSFET Diamante [V]
V_{Th_OSM}	Tensão de limiar do SOI MOSFET Octo [V]
V_t	Tensão de limiar [V]
W	Largura de canal do MOSFET [μm]
W_r	Largura de canal da região retangular do MOSFET Octo [μm]
W_t	Largura de canal região trapezoidal do MOSFET Octo [μm]
W/L	Razão de aspecto do transistor
$(W/L_{eff})_{Octo}$	Razão de aspecto do MOSFET Octo
x_{ox}	Espessura do óxido de silício [nm]
z	Número atômico
α	Ângulo de abertura do MOSFET Diamante e <i>Fish</i>
ΔI_{DS}	Variação de I_{DS} [A]
ΔV_{GIDL}	Variação da tensão V_{GS} para mesma corrente I_{DS} quando ocorre o fenômeno GIDL [V]
ΔV_{DS}	Variação de V_{DS}
ΔV_t	Variação de V_{Th} [V]
ϵ_{ox}	Permissividade do óxido de silício [F/cm]
Φ_F	Potencial de Fermi [V]
Φ_{ms}	Diferença da função trabalho entre o metal e o semiconductor [V]
γ	Relativo a raios- γ
λ	Dimensão mínima permitida pela tecnologia [μm] e fator de modulação do comprimento de canal [V^{-1}]
μ_n	Mobilidade dos elétrons no silício [$cm^2/V.s$]
μ^-	Partícula fundamental múon de carga negativa
π^-	Partícula fundamental pión de carga negativa

π^0	Partícula fundamental pión de carga neutra
π^+	Partícula fundamental pión de carga positiva
τ	Constante de decaimento do processo de rearranjo nuclear [s^{-1}]

LISTA DE ABREVIATURAS

BBR	Região de bico de pássaro
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor Bipolar de Junção)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CI	Circuito Integrado
CM	MOSFET Convencional
CGT	<i>Circular Gate Transistor</i> (Transistor de Porta Circular)
CSM	SOI MOSFET Convencional
CTI	Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Metal-Óxido-Semicondutor Complementar)
DA	Dose Acumulada
DIP	<i>Dual-In-Line Package</i>
DM	MOSFET Diamante
ddp	Diferença de Potencial
DSM	SOI MOSFET Diamante
ELT	<i>Enclosed Layout Transistor</i> (Transistor de Layout Fechado)
FET	<i>Field-Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo)
FSM	SOI MOSFET <i>Fish</i>
GIDL	<i>Gate-Induced Drain Leakage</i>
IFUSP	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LET	<i>Linear Energy Transfer</i> (Transferência Linear de Energia)
LAMFI	Laboratório de Materiais e Feixes Iônicos
LOCOS	<i>Local Oxidation of Silicon</i>
MEP	<i>MOSIS Educational Program</i>
MOS	<i>Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Metal-Óxido-Semicondutor)
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)
MOSIS	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Implementation Service</i>
NPN	BJT do tipo NPN
NMOS	MOSFET tipo n

nMOSFET	MOSFET tipo n
OM	MOSFET Octo
OM_	MOSFET Octo número _
OSM	SOI MOSFET Octo
OTA	<i>Operational Amplifier Transconductance</i> (Amplificador Operacional de Transcondutância)
O-CGT	<i>Overlapping-Circular Gate Transistor</i> (Transistor Circular de Portas Sobrepostas)
PD	MOSFET do tipo SOI parcialmente depletado
PCI	Placa de Circuito Impresso
PNP	BJT do tipo PNP
PEL	Pares elétrons-lacunas
PNPN	Analogia ao tiristor
PMOS	MOSFET tipo p
pMOSFET	MOSFET tipo p
SI	Sistema Internacional de Unidades
SAA	<i>South Atlantic Anomaly</i> (Anomalia Magnética do Atlântico Sul)
STI	<i>Shallow-Trench Isolation</i>
SN3D	Simulação Numérica Tridimensional
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior
SOI MOSFET	<i>Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor do tipo Silício Sobre Isolante)
TID	<i>Total Ionizing Dose</i>
USP	Universidade de São Paulo
UV	Raios Ultravioletas

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Primeiro BJT produzido [1]	38
Figura 1.2 – Imagem do MOSFET Diamante [14].....	40
Figura 2.1 – Capacitor MOS (a), capacitor MOS operando no regime de acumulação (V_G menor que V_{FB}) (b), capacitor MOS com região de depleção formada (V_G entre V_{FB} e V_{Th}) (c) e capacitor MOS invertido (d)	45
Figura 2.2 – Curva C em função de V (Curva C-V) do capacitor MOS	46
Figura 2.3 – MOSFET tipo enriquecimento (a) e depleção (b).....	47
Figura 2.4 – Simbologia dos transistores MOSFETs	47
Figura 2.5 – nMOSFET tipo enriquecimento polarizado	48
Figura 2.6 – nMOSFET operando com baixo valor de V_{DS} (a) e exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{GS} , para V_{DS} constante (b).....	48
Figura 2.7 – nMOSFET operando na saturação (a) e exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{DS} (b).....	49
Figura 2.8 – Modelo equivalente para pequenos sinais do nMOSFET	50
Figura 2.9 – MOSFETs do tipo n e p que foram implementados com processo de fabricação CMOS	51
Figura 2.10 – Exemplo de curva I_{DS} em função de V_{GS} e derivada de segunda ordem da curva citada para obtenção de V_{Th}	52
Figura 2.11 – Curva $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} com indicação da região sublimiar para obtenção de S.....	53
Figura 2.12 – Exemplo de curva g_m em função de V_{GS}	54
Figura 2.13 – Exemplo de curva g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$	55
Figura 2.14 – Exemplo de curva I_{DS} em função de V_{DS} que mostra o efeito da modulação do comprimento de canal atuando no nMOSFET	55
Figura 2.15 – Curva I_{DS} em função de V_{DS} que mostra o local de extração de R_{on}	56
Figura 2.16 – Curva $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} que mostra os pontos de extração de I_{leak} , I_{off} e I_{on}	57
Figura 2.17 – Região onde ocorre o GIDL (adaptado de [48])	58
Figura 2.18 – Visualização do tiristor parasitário no inversor CMOS	59
Figura 2.19 – Exemplo de estrutura SOI nMOSFET	60
Figura 2.20 – Comparação entre a área ocupada pelo inversor SOI MOSFET e inversor MOSFET convencional, respectivamente (adaptado de [50]).....	61

Figura 2.21 – Exemplo de uma estrutura planar DM (a) e CM (b)	62
Figura 2.22 – Densidade de corrente no SOI MOSFET Diamante (adaptado de [9]).....	63
Figura 2.23 – Exemplo de uma estrutura planar OM	64
Figura 2.24 – Exemplo de uma estrutura FSM.....	66
Figura 2.25 – Abundância relativa dos elementos presentes nos raios cósmicos solares e galácticos (adaptado da referência [68]).....	69
Figura 2.26 – Raio cósmico terrestre (adaptado da referência [69])	70
Figura 2.27 – SAA e trajetória do telescópio espacial Hubble (adaptado da referência [70]).	71
Figura 2.28 – Esquema ilustrativo de como a radiação ionizante atua no óxido de porta (adaptado da referência [74]).....	72
Figura 2.29 – Influência da radiação ionizante no comportamento elétrico do MOSFET quando as cargas estão armadilhadas no óxido de porta (a) e na interface Si/SiO ₂ (b) (adaptado da referência [73]).....	73
Figura 2.30 – Fração de lacunas que não se recombinaram em função do campo elétrico aplicado no SiO ₂ (adaptado da referência [75]).....	73
Figura 2.31 – Região de bico de pássaro que ocasiona elevação da corrente de fuga (adaptado da referência [76])	74
Figura 2.32 – Curvas log(I _{DS}) em função de V _{GS} de um nMOSFET irradiado várias vezes (adaptado da referência [77]).....	74
Figura 2.33 – Densidade espectral de ruído em função da frequência obtido de um nMOSFET que foi irradiado diversas vezes (adaptado da referência [78])	75
Figura 2.34 – Exemplo de um MOSFET do tipo ELT	76
Figura 2.35 – Canal parasita de condução entre transistores (a) e inserção do anel de guarda para eliminação desse canal (b) (adaptado da referência [82])	76
Figura 2.36 – Local de corte do MOSFET com isolamento STI (a) e imagem da estrutura cortada (adaptado da referência [84]).....	77
Figura 2.37 – Fração de lacunas que não conseguiram se recombinar em função do tempo e da temperatura. A estrutura em estudo é o silício, a qual foi dopada com 10 ¹⁴ cm ⁻³ de fósforo (adaptado da referência [88]).....	78
Figura 2.38 – Curva C-V de um capacitor MOS que foi irradiado com raios γ (adaptado da referência [73])	79
Figura 2.39 – Influência da radiação sobre a corrente I _{DS} na região onde ocorre o fenômeno GIDL (adaptado da referência [96])	80

Figura 3.1 – Curvas experimentais I_{DS} em função de V_{GT} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV, para ângulo α igual a 144,1° (a), 126,9° (b), 90,0° (c), 53,1° (d) e 36,9° (e) [14]	82
Figura 3.2 – Curvas experimentais g_m em função de V_{GT} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV, para ângulo α igual a 144,1° (a), 126,9° (b), 90,0° (c), 53,1° (d) e 36,9° (e) [14]	84
Figura 3.3 – Curvas experimentais I_{DS} em função de V_{DS} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{GT} igual a 500 mV, para ângulo α igual a 144,1° (a), 126,9° (b), 90,0° (c), 53,1° (d) e 36,9° (e) [14]	85
Figura 3.4 – Curva simulada g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ de DSM e CSM equivalentes, para V_{DS} igual a 10 mV [57].....	88
Figura 3.5 – Amplificador fonte comum [57]	89
Figura 3.6 – Curvas experimentais A_V em função de f de DMs e CMs equivalentes, para α igual a 36,9° (a) e 53,1° (b) [57]	90
Figura 3.7 – Curvas simuladas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} (a) e V_{DS} (b) do OSM, DSM e CSM [59].....	92
Figura 3.8 – Curvas experimentais $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GT} (a) e V_{DS} (b) do OM1, do OM2, do OM3, do DM e do CM [59]	93
Figura 3.9 – Curvas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61].....	95
Figura 3.10 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L_{eff})]$ em função de V_{GS} dos FSMs e do CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61].....	97
Figura 3.11 – Curvas g_m em função de V_{GS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]	97
Figura 3.12 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]	98
Figura 3.13 – Curvas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{DS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{GS} igual a 400 mV [61].....	98
Figura 3.14 – Locais onde foram feitos os cortes nos transistores para obtenção de ET (adaptado de [61]).....	99
Figura 3.15 – Campo elétrico longitudinal resultante do FSM com ângulo α de 90° e do CSM equivalente [61]	100
Figura 4.1 – Diagrama esquemático de encapsulamento (a) e <i>chip</i> encapsulado (b).....	103
Figura 4.2 – Placa de medição (a) e sistema de medição (b).....	104

Figura 4.3 – PCIs utilizadas para polarizar os nMOSFETs durante as irradiações.....	105
Figura 4.4 – Difratrômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000	105
Figura 4.5 – PCI conectada a fonte de alimentação para polarizar os nMOSFETs e osciloscópio para monitorar V_{GS} e V_{DS} (a) e CI posicionado no bocal de saída dos raios-X (b)	106
Figura 4.6 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	111
Figura 4.7 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	112
Figura 4.8 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	113
Figura 4.9 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	114
Figura 4.10 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	115
Figura 4.11 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	117
Figura 4.12 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	118
Figura 4.13 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	120
Figura 4.14 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	121
Figura 4.15 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	123
Figura 4.16 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	125
Figura 4.17 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	126
Figura 4.18 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	127
Figura 4.19 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	128

Figura 4.20 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	129
Figura 4.21 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	130
Figura 4.22 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	131
Figura 4.23 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	132
Figura 4.24 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	133
Figura 4.25 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações	134
Figura 4.26 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações	135
Figura 4.27 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações	136
Figura 4.28 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações	137
Figura 4.29 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações	138
Figura 4.30 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações	139
Figura 5.1 – Acelerador de partículas do LAMFI [104].....	153
Figura 5.2 – Mesa de controle do acelerador de partículas do LAMFI [104]	153
Figura 5.3 – CI posicionado na saída do feixe de prótons.....	154
Figura 5.4 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	156
Figura 5.5 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	157
Figura 5.6 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	158
Figura 5.7 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	160

Figura 5.8 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	161
Figura 5.9 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	163
Figura 5.10 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	164
Figura 5.11 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	165
Figura 5.12 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação	166
Figura 5.13 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	167
Figura 5.14 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	168
Figura 5.15 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação.....	169
Figura 5.16 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação.....	170
Figura 5.17 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação	171
Figura 5.18 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação	172

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1.1 – Balança comercial brasileira de produtos eletrônicos (em US\$ milhões) [22] ...	41
Tabela 3.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes presentes no <i>chip</i> que foi fabricado pela <i>On Semiconductor</i>	81
Tabela 3.2 – I_{DS} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 800$ mV e $V_{DS} = 200$ mV (região triodo) [14].....	83
Tabela 3.3 – $g_{m_máx}$ de DMs e CMs equivalentes, para $V_{DS} = 200$ mV [14].....	84
Tabela 3.4 – I_{DS_sat} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV e $V_{DS} = 1,50$ V (região de saturação) [14]	86
Tabela 3.5 – R_{on} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV [14]	86
Tabela 3.6 – V_{EA} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV [14]	87
Tabela 3.7 – Dimensões do CSM e do DSM simulados no <i>Sentaurus Device</i> [57].....	88
Tabela 3.8 – g_m/I_{DS} para $I_{DS}/(W/L_{eff}) = 130$ nA, V_{EA} e A_V do DSM de 90° e CSM equivalente [57]	88
Tabela 3.9 – Tensões de polarização em corrente contínua do amplificador fonte comum.....	89
Tabela 3.10 – A_{VO} e f_T do DM de $36,9^\circ$ e $53,1^\circ$ e dos seus respectivos CMs equivalentes	90
Tabela 3.11 – Tabela comparativa de desempenho dos parâmetros elétricos do DM e do CM (adaptada da referência [14]).....	91
Tabela 3.12 – Dimensões do CSM, do DSM (α igual a 90°) e do OSM [59]	92
Tabela 3.13 – $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$, $g_{m_máx}/(W/L_{eff})$, V_{EA} e R_{on} dos dispositivos CSM, DSM e OSM [59]	92
Tabela 3.14 – Dimensão do CM, do DM (α igual a $36,9^\circ$), do OM1, do OM2 e do OM3 fabricados pela <i>On Semiconductor</i> [59]	93
Tabela 3.15 – Tabela comparativa do desempenho dos parâmetros elétricos e geométricos do OSM, DSM e CSM.....	94
Tabela 3.16 – Dimensões dos FSMs e CSM utilizados nas SN3D [61].....	95
Tabela 3.17 – Parâmetros elétricos dos FSMs e do CSM equivalente [61]	96
Tabela 3.18 – Campo elétrico longitudinal máximo do FSM com ângulo α de $90,0^\circ$ e CSM equivalente, para V_{DS} igual a $1,50$ V e V_{GS} igual a 400 mV [61]	100
Tabela 3.19 – Tabela comparativa dos parâmetros elétricos do FSM e CSM [61].....	101
Tabela 4.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes que foram irradiados com raios-X (λ é igual a $0,35$ μm).....	104
Tabela 4.2 – Tempo de radiação e dose acumulada pelo <i>chip</i>	107

Tabela 4.3 – V_{Th} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	108
Tabela 4.4 – V_{Th} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	109
Tabela 4.5 – V_{Th} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	109
Tabela 4.6 – V_{Th} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	110
Tabela 4.7 – V_{Th} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	110
Tabela 4.8 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV	111
Tabela 4.9 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV	112
Tabela 4.10 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV	113
Tabela 4.11 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV	114
Tabela 4.12 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV	115
Tabela 4.13 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V.....	116
Tabela 4.14 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V	117
Tabela 4.15 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V.....	118
Tabela 4.16 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V	118
Tabela 4.17 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V.....	119
Tabela 4.18 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V	119
Tabela 4.19 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V.....	120

Tabela 4.20 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V	121
Tabela 4.21 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V	122
Tabela 4.22 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V	122
Tabela 4.23 – Razão I_{on}/I_{off} de DMs e CMs equivalentes antes e pós-irradiações	123
Tabela 4.24 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV	125
Tabela 4.25 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV	126
Tabela 4.26 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV	127
Tabela 4.27 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV	128
Tabela 4.28 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV	129
Tabela 4.29 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	131
Tabela 4.30 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	132
Tabela 4.31 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	133
Tabela 4.32 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	134
Tabela 4.33 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	135
Tabela 4.34 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	136

Tabela 4.35 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	137
Tabela 4.36 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	138
Tabela 4.37 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	139
Tabela 4.38 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	140
Tabela 4.39 – R_{on} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	140
Tabela 4.40 – R_{on} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	141
Tabela 4.41 – R_{on} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	141
Tabela 4.42 – R_{on} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	142
Tabela 4.43 – R_{on} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	142
Tabela 4.44 – V_{EA} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	143
Tabela 4.45 – V_{EA} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	143
Tabela 4.46 – V_{EA} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	144
Tabela 4.47 – V_{EA} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	144
Tabela 4.48 – V_{EA} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	145
Tabela 4.49 – A_V do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	145
Tabela 4.50 – A_V do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	146
Tabela 4.51 – A_V do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	146

Tabela 4.52 – A_V do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações.....	147
Tabela 4.53 – A_V do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiações.....	147
Tabela 4.54 – Tabela de desempenho dos DMs e dos respectivos CMs equivalentes após irradiações por raios-X	148
Tabela 5.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes que foram irradiados com prótons (λ é igual a $0,35 \mu\text{m}$).....	152
Tabela 5.2 – V_{Th} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	155
Tabela 5.3 – V_{Th} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	155
Tabela 5.4 – V_{Th} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	156
Tabela 5.5 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a $1,95 \text{ V}$ e V_{DS} igual a 200 mV	157
Tabela 5.6 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a $1,95 \text{ V}$ e V_{DS} igual a 200 mV	158
Tabela 5.7 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a $1,95 \text{ V}$ e V_{DS} igual a 200 mV	159
Tabela 5.8 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $-1,50 \text{ V}$	159
Tabela 5.9 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $0,00 \text{ V}$	160
Tabela 5.10 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $-1,50 \text{ V}$	161
Tabela 5.11 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $0,00 \text{ V}$	161
Tabela 5.12 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $-1,50 \text{ V}$	162
Tabela 5.13 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a $0,00 \text{ V}$	162
Tabela 5.14 – Razão I_{on}/I_{off} de DMs e CMs equivalentes antes e pós-irradiação.....	163

Tabela 5.15 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV	164
Tabela 5.16 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV	165
Tabela 5.17 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV	166
Tabela 5.18 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	167
Tabela 5.19 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	168
Tabela 5.20 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)	169
Tabela 5.21 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	170
Tabela 5.22 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	171
Tabela 5.23 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV	172
Tabela 5.24 – R_{on} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	173
Tabela 5.25 – R_{on} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	173
Tabela 5.26 – R_{on} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	174
Tabela 5.27 – V_{EA} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	174
Tabela 5.28 – V_{EA} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	175
Tabela 5.29 – V_{EA} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiação	175

Tabela 5.30 – A_V do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	176
Tabela 5.31 – A_V do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	176
Tabela 5.32 – A_V do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação	176
Tabela 5.33 – Tabela de desempenho dos DMs e dos respectivos CMs equivalentes após irradiação por prótons	177

SUMÁRIO

ARTIGOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS E PERIÓDICOS.....	37
1 INTRODUÇÃO	38
1.1 Breve História sobre Transistores	38
1.2 Raios Cósmicos e Relação com Circuitos Integrados.....	40
1.3 Panorama Político do Brasil nos Setores da Microeletrônica e Aeroespacial.....	41
1.4 Motivação e Objetivos	42
1.5 Estrutura da Dissertação	43
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	44
2.1 Introdução ao MOSFET	44
2.1.1 Princípio de Funcionamento do Capacitor MOS.....	44
2.1.2 MOSFET Tipo Enriquecimento e Depleção (Estruturas e Simbologias).....	47
2.1.3 Funcionamento do nMOSFET Tipo Enriquecimento	48
2.1.4 Expressando I_{DS} em Função de V_{GS} e de V_{DS} de um nMOSFET.....	49
2.1.5 Modelo Equivalente para Pequenos Sinais do nMOSFET Tipo Enriquecimento.....	50
2.1.6 O Processo de Fabricação CMOS	50
2.1.7 Parâmetros Elétricos dos MOSFETs	51
2.1.7.1 Tensão de Limiar (V_{Th})	51
2.1.7.2 Inclinação de Sublimiar (S)	52
2.1.7.3 Transcondutância de Entrada (g_m).....	54
2.1.7.4 Razão g_m/I_{DS}	54
2.1.7.5 V_{EA} , λ e r_o	55
2.1.7.6 Ganho de Tensão Intrínseco do Transistor	56
2.1.7.7 Resistência entre Dreno e Fonte de Estado Ligado (R_{on})	56
2.1.7.8 Corrente de Fuga (I_{leak}), Corrente de Estado Desligado (I_{off}), Corrente de Estado Ligado (I_{on}) e Razão I_{on}/I_{off}	57
2.1.8 Efeitos Adversos ao Funcionamento Normal (ou Ideal) dos MOSFETs	57
2.1.8.1 Efeito dos Elétrons Quentes	58
2.1.8.2 <i>Gate-Induced Drain Leakage</i> (GIDL).....	58
2.1.8.3 O Tiristor Parasitário Presente no Inversor CMOS	59
2.1.9 Benefícios dos MOSFETs Implementados em Lâmina SOI.....	59

2.2 Estilo de <i>Layout</i> do Tipo Diamante, Octo e <i>Fish</i> para Implementação de MOSFETs	61
2.2.1 Estilo de <i>Layout</i> do Tipo Diamante para a Construção de MOSFETs	62
2.2.2 Estilo de <i>Layout</i> do Tipo Octo para a Construção de MOSFETs	64
2.2.3 Estilo de <i>Layout</i> do Tipo <i>Fish</i> para a Construção de SOI MOSFETs	65
2.3 Conceitos Fundamentais de Radiação em MOSFETs	67
2.3.1 Conceitos de Radiação	67
2.3.2 Radiação Aeroespacial	69
2.3.2.1 Raios Cósmicos	69
2.3.2.2 Campo Magnético Terrestre	70
2.3.3 <i>Total Ionizing Dose</i> (TID)	71
2.3.3.1 Técnicas Utilizadas para Redução da Corrente de Fuga em MOSFETs	75
2.3.3.2 Recozimento (<i>Annealing</i>) da Estrutura Cristalina	78
2.3.4 Danos por Deslocamento	78
2.3.5 Radiação por Nêutrons	79
2.3.6 Efeitos da Radiação no Capacitor MOS e Influência da Radiação nos Portadores Quentes e GIDL	79
 3 ESTUDO DOS MOSFETs COM GEOMETRIAS NÃO CONVENCIONAIS	 81
3.1 Estudo Comparativo entre os Transistores Diamantes e os Seus Respectivos Transistores Convencionais Equivalentes	81
3.1.1 Estudo Experimental Comparativo Entre os nMOSFETs Diamantes e os Seus Respectivos nMOSFETs Convencionais Equivalentes	81
3.1.2 Estudo Comparativo da Resposta em Frequência entre os nMOSFETs Diamantes e os Seus Respectivos nMOSFETs Convencionais Equivalentes	87
3.1.3 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o MOSFET Diamante e o MOSFET Convencional	90
3.2 Estudo Comparativo entre os Transistores do Tipo Octo e os Seus Respectivos Transistores Diamantes e Convencionais Equivalentes	91
3.2.1 Estudos Simulados Comparativos entre o SOI nMOSFET Octo, o SOI nMOSFET Diamante e o SOI nMOSFET Convencional	91
3.2.2 Estudo Experimental Comparativo entre os MOSFETs Octos, o MOSFET Diamante e o MOSFET Convencional	93

3.2.3 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o SOI MOSFET Octo, Diamante e Convencional (Simulação).....	94
3.3 Estudo Comparativo entre os SOI nMOSFETs do Tipo <i>Fish</i> e o Respetivo Transistor Convencional Equivalente	94
3.3.1 Estudos Simulados Comparativos entre os SOI nMOSFETs do Tipo <i>Fish</i> e o Respetivo SOI nMOSFET Convencional Equivalente.....	95
3.3.2 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o SOI MOSFET <i>Fish</i> e o SOI MOSFET Convencional	101
 4 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO POR RAIOS-X ENTRE OS nMOSFETs DIAMANTES E OS SEUS RESPECTIVOS nMOSFETs CONVENCIONAIS EQUIVALENTES.....	103
4.1 Detalhes sobre o <i>Chip</i>, o Encapsulamento e os MOSFETs Diamantes e Convencionais	103
4.2 Procedimento Experimental	104
Tabela 4.2 – Tempo de radiação e dose acumulada pelo <i>chip</i>	107
4.3 Resultados Experimentais.....	107
4.3.1 V_{Th}	107
4.3.1.1 Extração dos V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente.....	107
4.3.1.2 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 126,9° e do CM Equivalente	108
4.3.1.3 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 90,0° e do CM Equivalente	109
4.3.1.4 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 53,1° e do CM Equivalente	109
4.3.1.5 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 36,9° e do CM Equivalente	110
4.3.2 $I_{on}/(W/L)$	110
4.3.2.1 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente..	111
4.3.2.2 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 126,9° e do CM Equivalente..	112
4.3.2.3 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 90,0° e do CM Equivalente...	113
4.3.2.4 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 53,1° e do CM Equivalente...	114
4.3.2.5 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 36,9° e do CM Equivalente...	115
4.3.3 $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$	116
4.3.3.1 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente	116
4.3.3.2 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 126,9° e do CM Equivalente	117

4.3.3.3 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	119
4.3.3.4 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	120
4.3.3.5 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	122
4.3.4 Razão I_{on}/I_{off}	123
4.3.5 $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$	124
4.3.5.1 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM equivalente	124
4.3.5.2 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM equivalente	125
4.3.5.3 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM equivalente	126
4.3.5.4 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM equivalente	127
4.3.5.5 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM equivalente	129
4.3.6 g_m/I_{DS}	130
4.3.6.1 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	130
4.3.6.2 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente	131
4.3.6.3 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	132
4.3.6.4 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	133
4.3.6.5 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	134
4.3.7 $I_{DS_sat}/(W/L)$	135
4.3.7.1 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	135
4.3.7.2 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente	136

4.3.7.3 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	137
4.3.7.4 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	138
4.3.7.5 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	139
4.3.8 R_{on}	140
4.3.8.1 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	140
4.3.8.2 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente	141
4.3.8.3 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	141
4.3.8.4 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	142
4.3.8.5 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	142
4.3.9 V_{EA}	143
4.3.9.1 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	143
4.3.9.2 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente	143
4.3.9.3 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	144
4.3.9.4 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	144
4.3.9.5 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	145
4.3.10 A_V	145
4.3.10.1 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	145
4.3.10.2 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente	146
4.3.10.3 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	146
4.3.10.4 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente	147
4.3.10.5 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	147
4.4 Tabela Geral do Desempenho do MOSFET Diamante e do MOSFET Convencional Após Irradiação por Raios-X	147
4.4.1 Análise de V_{Th}	148
4.4.2 Análise de $I_{on}/(W/L)$	148
4.4.3 Análise de $I_{leak}/(W/L)$ e de $I_{off}/(W/L)$	149
4.4.4 Análise da razão I_{on}/I_{off}	149
4.4.5 Análise de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$	149
4.4.6 Análise de g_m/I_{DS}	150
4.4.7 Análise de $I_{DS_sat}/(W/L)$	150
4.4.8 Análise de R_{on}	151
4.4.9 Análise de V_{EA}	151
4.4.10 Análise de A_V	151

5 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO POR PRÓTONS ENTRE OS nMOSFETs DIAMANTES E OS SEUS RESPECTIVOS nMOSFETs CONVENCIONAIS EQUIVALENTES.....	152
5.1 Detalhes sobre o <i>Chip</i>	152
5.2 Procedimento Experimental	152
5.3 Resultados Experimentais.....	154
5.3.1 V_{Th}	154
5.3.1.1 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente.....	155
5.3.1.2 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente.....	155
5.3.1.3 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente.....	155
5.3.2 $I_{on}/(W/L)$	156
5.3.2.1 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente ..	156
5.3.2.2 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	157
5.3.2.3 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	158
5.3.3 $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$	159
5.3.3.1 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	159
5.3.3.2 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	160
5.3.3.3 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	162
5.3.4 Razão I_{on}/I_{off}	163
5.3.5 $g_{m_máx}/(W/L)$	164
5.3.5.1 Extração de $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	164
5.3.5.2 Extração de $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	165
5.3.5.3 Extração de $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	166
5.3.6 g_m/I_{DS}	167
5.3.6.1 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e CM Equivalente	167
5.3.6.2 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	168
5.3.6.3 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	169
5.3.7 $I_{DS_sat}/(W/L)$	170

5.3.7.1 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	170
5.3.7.2 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	171
5.3.7.3 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	172
5.3.8 R_{on}	172
5.3.8.1 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	173
5.3.8.2 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	173
5.3.8.3 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	173
5.3.9 V_{EA}	174
5.3.9.1 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	174
5.3.9.2 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	174
5.3.9.3 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	175
5.3.10 A_V	175
5.3.10.1 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente	175
5.3.10.2 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente	176
5.3.10.3 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente	176
5.4 Tabela Geral do Desempenho do MOSFET Diamante e do MOSFET Convencional Após Irradiação por Prótons	177
5.4.1 Análise de V_{Th}	177
5.4.2 Análise de $I_{on}/(W/L)$	178
5.4.3 Análise de $I_{leak}/(W/L)$ e de $I_{off}/(W/L)$	178
5.4.4 Análise de I_{on}/I_{off}	178
5.4.5 Análise de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$	178
5.4.6 Análise de g_m/I_{DS}	179
5.4.7 Análise de $I_{DS_sat}/(W/L)$	179
5.4.8 Análise de R_{on}	179
5.4.9 Análise de V_{EA}	179
5.4.10 Análise de A_V	180
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	181
REFERÊNCIAS	185

APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS DO <i>CHIP</i> FABRICADO PELA ON <i>SEMICONDUCTOR</i>	195
--	------------

ARTIGOS PUBLICADOS EM CONGRESSOS E PERIÓDICOS

Durante a pesquisa, os seguintes artigos foram publicados em congressos e periódicos. O artigo número 1 é o mais importante, pois possui fator de impacto igual a 2,42.

- 1) GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M.; SIMOEN, E.; CLAEYS, C. FISH SOI MOSFET: Modeling, Characterization and Its Application to Improve the Performance of Analog ICs. **Journal of the Electrochemical Society**, 158, 2011. H1258-H1264.
- 2) GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. Comparative Experimental Study between Diamond and Conventional MOSFET. **ECS Transactions: SiGe, Ge, and Related Compounds 4: Materials, Processing, and Devices**, Las Vegas, 33, 2010. 121-132.
- 3) CLASER, R.; ALATI, D. M.; GIMENEZ, S. P. Layout, Manufacture and Experimental Characterization of the Octo MOSFET. **Microelectronics Student Forum (SForum)**, São Paulo, 2010.
- 4) GIMENEZ, S. P.; CLASER, R.; ALATI, D. M. Using Diamond SOI nMOSFETs to Improve the Frequency Response of the Analog Integrated Circuits. **Seventh Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Granada, January 2011.
- 5) GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. OCTO SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond to Be Used in the Analog Integrated Circuits. **Seventh Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Granada, January 2011.
- 6) GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. FISH SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond SOI Transistor for Digital ICs Applications. **ECS Transactions**, 35, 2011. 163-168.
- 7) ALATI, D. M. et al. Estudo do Comportamento Elétrico do MOSFET não Convencional do Tipo Diamante em Ambientes Radioativos. **Simpósio de Pesquisa do Grande ABC**, 2011.
- 8) ALATI, D. M. et al. Experimental Comparative Study of the X-Ray Radiation Effects between the Threshold Voltages of the Diamond and Conventional Layout Styles. **Eighth Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Montpellier, January 2012.

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta um pequeno histórico de transistores, novas estruturas MOSFETs e conceitos sobre raios cósmicos. O panorama político brasileiro também foi citado, pois o governo federal está injetando recursos financeiros para a consolidação da microeletrônica no Brasil. Este capítulo se encerra descrevendo a motivação, os objetivos do trabalho e como a dissertação está estruturada.

1.1 Breve História sobre Transistores

Em 1947, John Bardeen e Walter Brattain produziram o primeiro transistor do mundo [1] (Figura 1.1), e esse novo dispositivo ficou conhecido como transistor bipolar de junção (*Bipolar Junction Transistor*, BJT) [1]. Após esse grande feito, Walter Schottky desenvolveu a teoria do BJT [1].

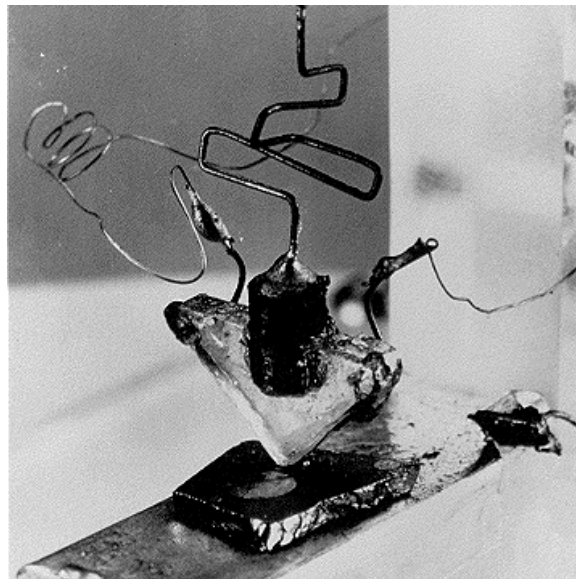


Figura 1.1 – Primeiro BJT produzido [1]

O transistor de efeito de campo (*Field-Effect Transistor*, FET) foi proposto primeiramente por Lilienfeld em 1925 [2]. Embora o projeto do FET já existisse desde a década de 1920, neste período não havia aparato tecnológico para a confecção desse tipo de transistor [1]. Somente no final da década de 1950, alguns pesquisadores começaram a desenvolver estudos sobre o processo de oxidação do silício, sendo essa técnica extremamente importante para o desenvolvimento dos FETs sobre o substrato de silício [1]. Devido aos

problemas no controle da qualidade do óxido de porta nos FETs, esse tipo de transistor se tornou popular somente no início da década de 1970 [1].

Os FETs são atualmente empregados na maioria dos circuitos eletrônicos. Isso se deve aos benefícios que essa tecnologia tem frente aos BJTs. Dentre elas, podem-se citar:

- a) A fabricação dos FETs é mais simples que a dos BJTs [3];
- b) os MOSFETs (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*), apresentam maior capacidade de integração que os BJTs, ou seja, numa mesma pastilha de silício cabem mais MOSFETs do que BJTs [3];
- c) a impedância de entrada dos FETs é consideravelmente maior [4]. A entrada desses transistores está associada ao regime de trabalho do capacitor MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*), enquanto que a entrada dos BJTs está associada à injeção ou ejeção de portadores pelo terminal de base;
- d) para criar circuitos digitais utilizando BJTs, é necessário a utilização de resistores e diodos associados a esses transistores, enquanto que para circuitos digitais utilizando FETs, não há necessidade de utilização de outros dispositivos [3].

O MOSFET apresenta substrato espesso que origina efeitos parasitários não desejados [5], como a capacitância de depleção abaixo da região de canal. Essa capacitância é diretamente proporcional à concentração de dopantes, tornando-se um problema atual, pois a concentração de dopantes vem aumentando devido à miniaturização dos MOSFETs [5] [6]. Além desse efeito, existe associado ao CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) um tiristor parasitário que pode ser disparado em dispositivos com pequenas dimensões [5], ou quando o circuito é utilizado em ambientes radioativos [7].

Para atenuar os efeitos parasitários associados aos MOSFETs, o SOI MOSFET (*Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) apresenta melhor desempenho devido à existência de uma camada de isolante entre a região ativa do dispositivo e a região de substrato [5], a qual provoca uma diminuição nas capacitâncias parasitas [8], além de eliminar a possibilidade de acionamento do transistor parasitário [8].

Estudos demonstram que MOSFETs com geometria de porta não convencional (ou não retangular) podem melhorar diversas características elétricas do dispositivo [9]. Os MOSFETs *Wave* [10], *Diamante* [11], *Octo* [12] e *Fish* [13] são exemplos de dispositivos com geometria não convencional de porta. A Figura 1.2 apresenta a imagem de um transistor que possui geometria não convencional de porta: o MOSFET *Diamante*.



Figura 1.2 – Imagem do MOSFET Diamante [14]

1.2 Raios Cósmicos e Relação com Circuitos Integrados

O estudo aprofundado sobre a influência dos raios cósmicos é recente, assim como a invenção do transistor. No eletroscópio de folhas, a radiação natural proveniente do solo pode ionizar o ar dentro do aparelho, fazendo com que as finas folhas de metal se movimentem sem a presença de uma amostra para o teste [15]. Em 1910, Father Thomas Wolf levou seu eletroscópio para o topo da Torre Eiffel, local onde ele observou uma diminuição de 64% na dispersão de sua medição, concluindo que a radiação natural proveniente do solo diminui gradualmente à medida que a altitude aumenta [15].

Em 1911, Victor Hess iniciou seus estudos sobre a radiação na atmosfera terrestre [15]. Ele observou, utilizando balões, que a radiação na atmosfera diminuía quando o balão começava subir [15], fato que já tinha sido observado por Wolf. A 1500 m de altura, a radiação era mais intensa que ao nível do mar e acima de 5300 m, a radiação aumentava drasticamente [15]. Hess concluiu que existia uma “fonte extraterrestre de radiação” [15]. Werner Kolhörster, Robert Millikan e Ira S. Bowen confirmaram a presença da radiação espacial e Millikan deu o nome de *raios cósmicos* à descoberta de Hess [15].

Estudos concluíram que os raios cósmicos são formados por partículas e ondas eletromagnéticas [15]. As partículas são formadas por núcleos de diversos átomos, sendo 85% de hidrogênio, 14% de partículas α e 1% de núcleos pesados [7]. Já as ondas eletromagnéticas são compostas de raios γ [15], raios-X [7], raios ultravioletas [7], dentre outros.

Circuitos integrados (CI) são utilizados em diversos tipos de ambientes. Expor componentes eletrônicos em ambientes radioativos exige certas técnicas de projeto para que o circuito não fique temporariamente ou definitivamente inoperante [7] [16].

Transistores começaram a ser empregados em satélites e aviões a partir da década de 1950 [7]. Engenheiros aeroespaciais passaram a estudar, desde essa época, a influência dos

raios cósmicos nos materiais, particularmente a influência da radiação no funcionamento dos dispositivos eletrônicos [7].

Atualmente, estudos demonstram que os SOI MOSFETs de portas múltiplas possuem boa resistência aos efeitos degradantes da radiação [17].

1.3 Panorama Político do Brasil nos Setores da Microeletrônica e Aeroespacial

O governo brasileiro reiniciou a injeção de recursos financeiros para a área de microeletrônica [18] e para os estudos da influência dos raios cósmicos em dispositivos eletrônicos [19] [20].

A indústria de microeletrônica no Brasil foi implantada na década de 1960, sofrendo grande avanço durante a década de 1970, graças à expansão do mercado nacional [21]. Devido ao atraso na implantação da Lei 8248 durante o governo Collor, as indústrias de componentes eletrônicos foram sendo desativadas no Brasil, enquanto que outras simplesmente faliram [21].

Após a decadência da indústria de componentes no Brasil, os fabricantes de bens de consumo passaram a importar *kits* para serem montados em território nacional [21]. A importação desses *kits* e outros bens de informática acarretaram no déficit na balança comercial brasileira no setor da eletrônica, como mostra a Tabela 1.1 [22].

Tabela 1.1 – Balança comercial brasileira de produtos eletrônicos (em US\$ milhões) [22]

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Importações	5.986,8	8.486,6	10.632,5	13.529,1	15.158,3	20.124,0	14.987,7
Informática	1.250,8	1.500,8	1.948,8	2.654,7	2.886,3	3.611,4	3.102,0
Eletrônica de consumo	320,7	507,6	736,7	985,4	1.137,0	1.342,3	1.158,1
Telecomunicações	1.574,2	2.450,0	3.055,4	4.061,3	4.906,9	7.500,2	5.040,1
Componentes	2.841,1	4.028,2	4.891,6	5.827,7	6.228,1	7.670,1	5.687,5
Exportações	2.439,1	2.472,2	4.248,6	4.677,9	3.776,1	3.962,8	2.936,0
Informática	233,7	312,3	460,0	486,9	422,0	379,7	370,0
Eletrônica de consumo	258,6	264,6	199,1	197,7	231,4	240,8	194,9
Telecomunicações	1.553,6	1.469,9	3.188,4	3.562,6	2.739,9	2.953,8	2.080,8
Componentes	393,2	425,4	401,1	430,7	382,8	388,5	290,3
Saldo (Déficit)	(3.547,7)	(6.014,4)	(6.383,9)	(8.851,2)	(11.382,2)	(16.161,2)	(12.051,7)
Informática	28,7%	19,8%	23,3%	24,5%	21,7%	20,0%	22,7%
Eletrônica de consumo	1,8%	4,0%	8,4%	8,9%	8,0%	6,8%	8,0%
Telecomunicações	0,6%	16,3%	-2,1%	5,6%	19,0%	28,1%	24,6%
Componentes	69,0%	59,9%	70,3%	61,0%	51,4%	45,1%	44,8%

Fonte: SECEX (agregação, BNDES)

O investimento na área de microeletrônica pelo governo brasileiro não visa somente à redução do déficit na balança comercial do complexo eletrônico, e sim sedimentar um ramo industrial ao qual viabilizará um crescimento econômico ao país [23]. A indústria de microeletrônica é capaz de levar inovação e produtividade aos diversos setores industriais instalados no Brasil [23], inclusive ao setor aeroespacial.

Atualmente existe a tendência na utilização de CIs comerciais na área aeroespacial, pois o processo de fabricação comercial possui alto nível de desempenho com custo reduzido [24].

Utilizando *foundries* comerciais, alguns pesquisadores já demonstraram que transistores de *layout* fechado (*Enclosed Layout Transistor*, ELT) [25] [26] podem apresentar maior robustez à radiação, quando comparados aos transistores retangulares (*layout* aberto), devido à inexistência dos bicos de pássaros nas estruturas ELTs. Alguns exemplos de ELTs são: transistor de porta circular (*Circular Gate Transistor*, CGT) [27] e transistor circular de portas sobrepostas (*Overlapping-Circular Gate Transistor*, O-CGT) [28].

Para ilustrar, uma pesquisa recente mostra que após a irradiação por raios-X e prótons, o O-CGT apresentou menor variação na corrente de dreno e na tensão de limiar, em relação aos valores obtidos anteriormente a radiação, quando comparado com o transistor retangular equivalente [29] [30].

1.4 Motivação e Objetivos

Durante os dois anos de pesquisas, três transistores com estilo de *layout* promissor foram estudados.

Sabendo que o *chip* que contém MOSFETs tridimensionais é mais caro que o *chip* que contém MOSFETs planares, a motivação desse trabalho está na possibilidade de perpetuação da tecnologia planar, utilizando transistores com geometria de porta não retangular que foram projetados no Centro Universitário da FEI. O estudo comparativo dos efeitos da radiação em MOSFETs do tipo Diamante e do tipo Convencional também motiva esse trabalho para a aplicação de CIs em satélites, aviões e equipamentos médicos.

Os objetivos do trabalho são:

- a) obter experimentalmente os parâmetros elétricos dos MOSFETs do tipo Diamante (geometria de porta hexagonal), do tipo Octo (geometria de porta octogonal) e do tipo convencional (geometria de porta retangular), para

posterior estudo comparativo dos parâmetros elétricos entre transistor equivalente;

- b) simular estruturas SOI MOSFETs do tipo Octo e convencional para posterior estudo comparativo dos parâmetros elétricos desses transistores;
- c) simular estruturas SOI MOSFETs do tipo *Fish* e convencional para posterior estudo comparativo dos parâmetros elétricos dos transistores citados;
- d) estudar comparativamente como ocorre a degradação dos parâmetros elétricos dos MOSFETs do tipo Diamante e convencional, após irradiação por raios-X e por prótons.

1.5 Estrutura da Dissertação

Essa dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo este que é introdutório.

O capítulo 2 está dividido em três partes e introduz diversos conceitos, aos quais servirão como base teórica para todo o restante da dissertação. A primeira parte do capítulo descreve os conceitos físicos, os detalhes operacionais e os parâmetros elétricos dos MOSFETs. A segunda parte do capítulo apresenta diversos detalhes sobre os transistores que possuem geometria de porta não convencional (Diamante, Octo e *Fish*). A terceira parte do capítulo apresenta uma breve descrição dos raios cósmicos e como eles afetam os dispositivos do tipo MOSFET.

O capítulo 3 se inicia com o estudo experimental comparativo entre os MOSFETs Diamantes e os MOSFETs convencionais. Os MOSFETs do tipo Octo, Diamante e convencional foram estudados comparativamente por meio de experimentos e simulações. O capítulo 3 é finalizado com o estudo simulado comparativo entre o SOI MOSFET *Fish* e o SOI MOSFET convencional.

O capítulo 4 apresenta resultados experimentais comparativos dos MOSFETs Diamantes e convencionais, aos quais foram irradiados com raios-X, afim de verificar se o transistor Diamante é mais robusto a radiação que o transistor convencional.

O capítulo 5 apresenta resultados experimentais comparativos de MOSFETs Diamantes e convencionais, aos quais foram irradiados com prótons.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação, além de propor novas possibilidades de continuidade deste trabalho.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo introduz diversos conceitos que serão utilizados ao longo da dissertação.

Alguns detalhes técnicos dos MOSFETs serão descritos neste capítulo.

Três MOSFETs com geometria de porta não convencional (Diamante, Octo e *Fish*), aos quais foram projetados no Centro Universitário da FEI, serão conceitualizados aqui.

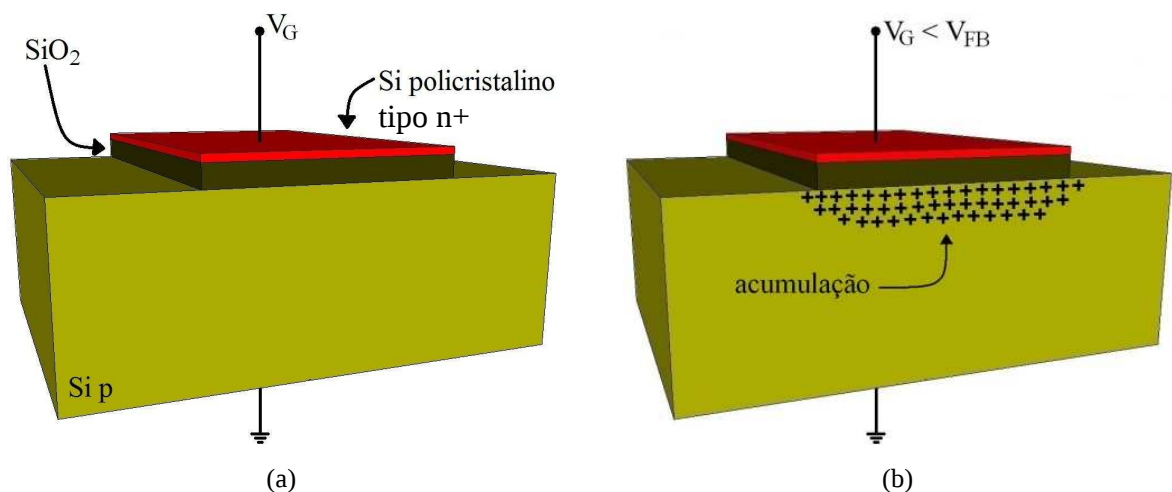
Esse capítulo também faz uma breve descrição de radiação, passando pela explicação da radiação aeroespacial e finaliza explicando detalhes da interação da radiação com dispositivos do tipo MOSFET.

2.1 Introdução ao MOSFET

Aspectos físicos e de operação dos MOSFETs serão descritos nesta seção, pois o estudo dos efeitos da radiação foi realizado nesse tipo de tecnologia. O dispositivo SOI MOSFET também será citado nessa seção, pois simulações numéricas tridimensionais foram realizadas nesse tipo de dispositivo para estudar três novas estruturas de geometria de porta não convencional.

2.1.1 Princípio de Funcionamento do Capacitor MOS

Entender o funcionamento do capacitor MOS é necessário para a compreensão do funcionamento do MOSFET. A Figura 2.1 apresenta o capacitor MOS (Figura 2.1a) que será estudado. O silício policristalino e o semiconductor (silício tipo p que compõe o substrato) são os eletrodos do capacitor, e o óxido de silício é o dielétrico do capacitor MOS.



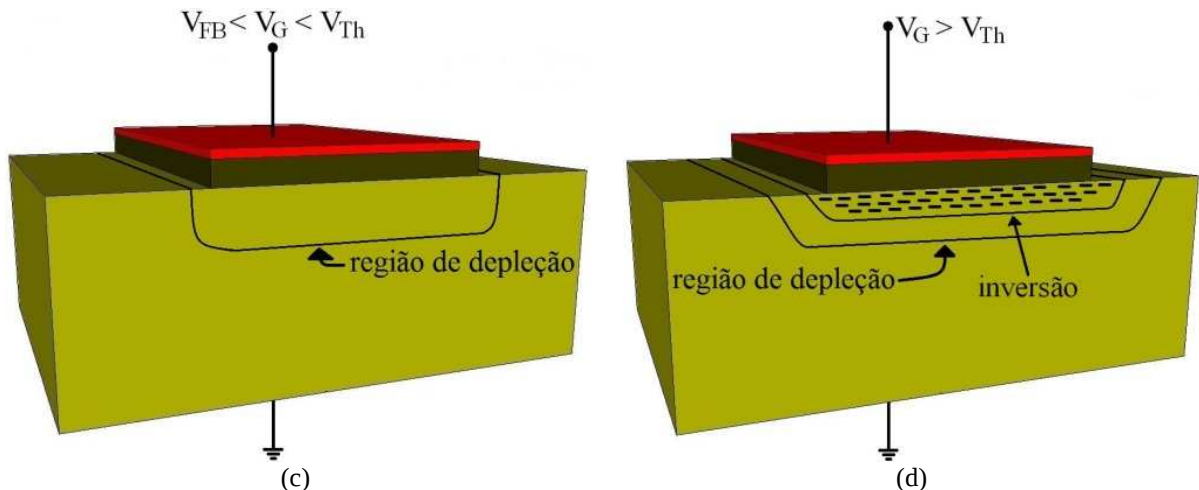


Figura 2.1 – Capacitor MOS (a), capacitor MOS operando no regime de acumulação (V_G menor que V_{FB}) (b), capacitor MOS com região de depleção formada (V_G entre V_{FB} e V_{Th}) (c) e capacitor MOS invertido (d)

Na Figura 2.1, V_G é a tensão de porta, V_{FB} é a tensão de faixa plana, V_{Th} é a tensão de limiar, Si p é o silício dopado com material do tipo p e SiO₂ é o óxido de silício.

O capacitor MOS não possui capacitância fixa como o dispositivo formado por duas placas metálicas. A capacitância do capacitor MOS varia em relação à tensão aplicada no terminal dele [31], devido à movimentação de cargas dentro do semicondutor.

Quando a tensão V_G é menor que a tensão V_{FB} , cargas positivas (lacunas) são atraídas para a interface Si/SiO₂ (Figura 2.1b). Como o substrato de Si é do tipo p, é dito que o capacitor MOS está operando no regime de acumulação de portadores majoritários [32], ou seja, quanto menor a tensão V_G , mais lacunas serão atraídas para a interface Si/SiO₂.

Para tensões de V_G entre V_{FB} e V_{Th} , as lacunas são repelidas da interface Si/SiO₂, restando apenas os elétrons das ligações covalentes [3]. Neste instante é formada a região de depleção [31] (Figura 2.1c).

Para V_G maior que V_{Th} , uma grande quantidade de portadores minoritários, provenientes do contato aterrado, é atraída para a interface Si/SiO₂ (Figura 2.1d). Como a concentração de elétrons é grande, ocorre a inversão na proximidade da interface Si/SiO₂, ou seja, o silício na região de interface passa a ter características do semicondutor tipo n [31].

A Figura 2.2 apresenta a curva da capacitância (C) em função da tensão (V) sobre o capacitor MOS.

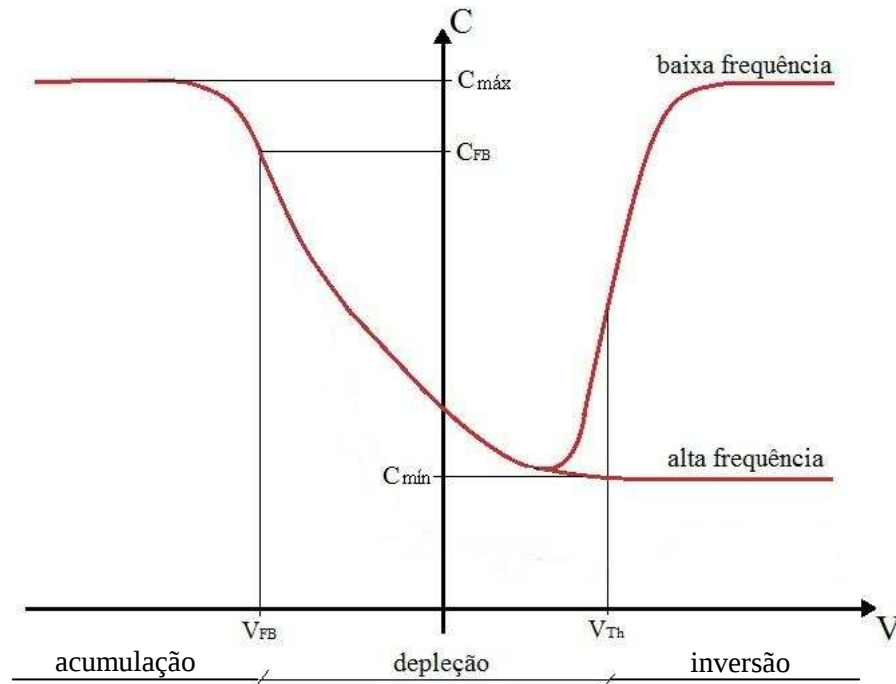


Figura 2.2 – Curva C em função de V (Curva C-V) do capacitor MOS

Na Figura 2.2, $C_{máx}$ e $C_{mín}$ são as capacitâncias máxima e mínima do capacitor MOS, respectivamente, e C_{FB} é a capacitância de faixa plana.

Quando o capacitor MOS opera na acumulação (V menor V_{FB}), a capacitância equivalente do dispositivo está relacionada à influência do SiO_2 (C_{ox} é igual à $C_{máx}$). Para V entre V_{FB} e V_{Th} , existem dois capacitores associados em série no dispositivo: um devido ao SiO_2 (C_{ox}) e outro devido a região de depleção no semiconductor (C_{Si}) [32]. A capacitância equivalente dessa associação série é igual à $C_{mín}$, quando a espessura da região de depleção é máxima [32].

A capacitância equivalente do dispositivo também depende da frequência de operação. Os portadores minoritários são mais influenciados em relação à frequência, pois os elétrons respondem somente na escala de tempo de geração e recombinação ($10^{-4}s$) [31], enquanto que os portadores majoritários respondem no tempo de relaxação do dielétrico ($10^{-13}s$) [31], ou seja, as lacunas respondem mais rapidamente a excitação externa (V) [31].

É possível a obtenção de diversos parâmetros oriundos à tecnologia de fabricação do *chip* por meio da curva C-V. Com o valor de $C_{mín}$ é obtido a densidade do elemento dopante no substrato e com o valor de $C_{máx}$ é obtido a espessura do dielétrico [33].

2.1.2 MOSFET Tipo Enriquecimento e Depleção (Estruturas e Simbologias)

Os MOSFETs podem ser subdivididos em dois tipos: depleção e enriquecimento. Considerando o transistor não polarizado, o MOSFET tipo depleção já possui canal de condução formado abaixo do SiO_2 [3], ao contrário do MOSFET tipo enriquecimento que não possui esse canal formado [3]. A Figura 2.3 apresenta os dois tipos de transistores em questão.

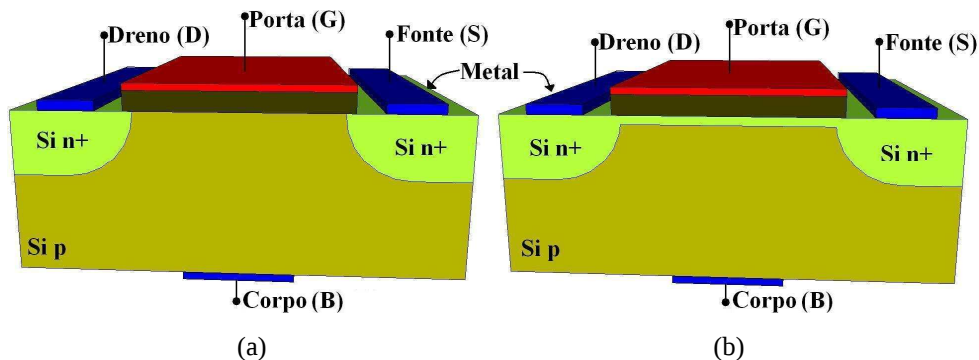


Figura 2.3 – MOSFET tipo enriquecimento (a) e depleção (b)

Os transistores apresentados na Figura 2.3 são chamados de nMOSFETs, pois o canal de condução é formado por elétrons [3] [32]. O substrato, que foi dopado com material tipo p, é o local onde a região ativa do transistor será construída. A principal função do substrato é a de proporcionar robustez mecânica ao dispositivo [3] [4]. No substrato existe um contato de corpo (B), que serve para garantir que o Si tipo p e n+ estejam sempre reversamente polarizados durante a operação normal do transistor [3].

Para os nMOSFETs, o contato de dreno (D) é aquele que possui tensão elétrica maior que a da fonte (S). O dreno recebe (ou drena) os elétrons provenientes da fonte, quando o contato de porta (G) possui tensão adequada para atrair os elétrons para a interface Si/SiO₂.

Os diversos símbolos que representam os MOSFETs estão representados pela Figura 2.4. Em muitas aplicações, o contato B é ligado, internamente, ao contato S [34].

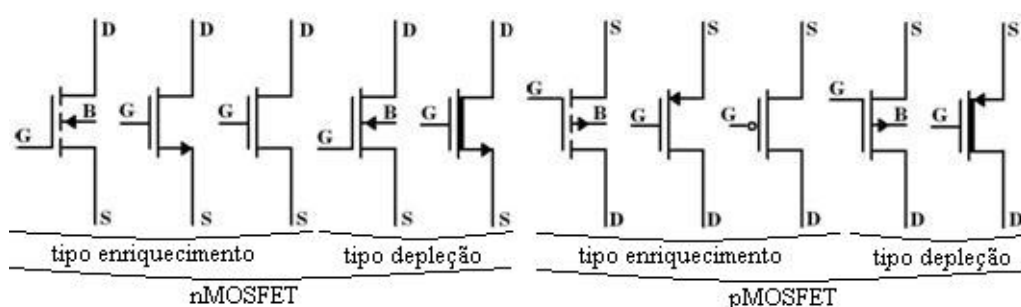


Figura 2.4 – Simbologia dos transistores MOSFETs

2.1.3 Funcionamento do nMOSFET Tipo Enriquecimento

A Figura 2.5 apresenta um exemplo de estrutura nMOSFET tipo enriquecimento.

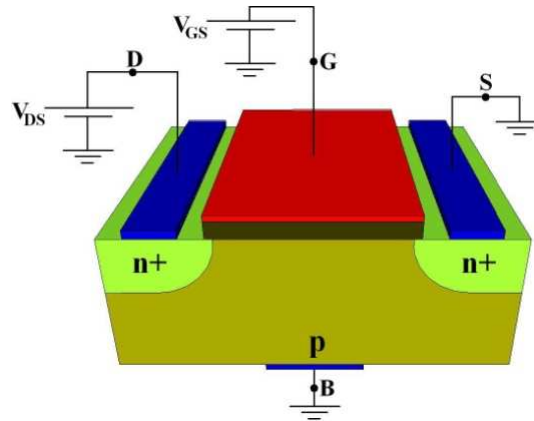
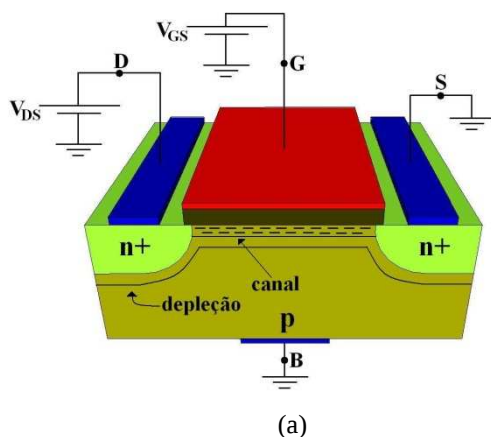


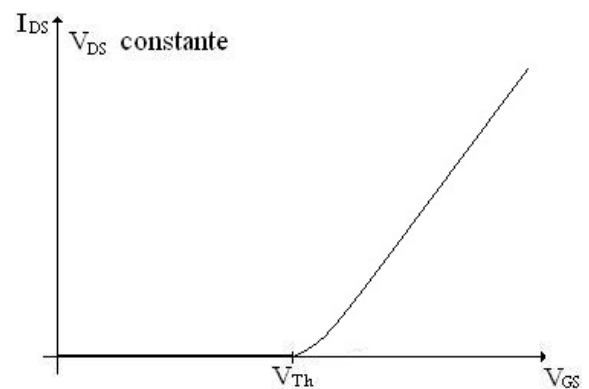
Figura 2.5 – nMOSFET tipo enriquecimento polarizado

Na Figura 2.5, V_{DS} é a tensão entre dreno e fonte e V_{GS} é a tensão entre porta e fonte.

Considere a Figura 2.6 para a explicação que será dada a seguir. Para V_{GS} maior que V_{Th} , um canal de condução é induzido. Para valor baixo e positivo de V_{DS} , elétrons provenientes da fonte passam pela região de canal até alcançar o dreno do nMOSFET (Figura 2.6a). A espessura do canal de condução é dependente da tensão V_{GS} , ou seja, quanto maior for essa tensão, maior será a condutância na região de canal [3] e, conseqüentemente, maior será a corrente entre dreno e fonte (I_{DS}) que circula no transistor. A Figura 2.6b apresenta um exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{GS} do nMOSFET tipo enriquecimento.



(a)



(b)

Figura 2.6 – nMOSFET operando com baixo valor de V_{DS} (a) e exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{GS} , para V_{DS} constante (b)

A Figura 2.7 ilustra a explicação que será dada a seguir. Mantendo a tensão V_{GS} fixa e aumentando consideravelmente a tensão V_{DS} , a forma da região de canal muda [3]. Isso ocorre, pois a tensão no interior do canal varia de 0 V (próximo a fonte) até V_{DS} (próximo ao dreno) [3]. O canal é mais espesso próximo à fonte, pois a diferença de potencial (ddp) neste ponto é igual à V_{GS} [3]. A ddp do canal próximo ao dreno é igual à $(V_{GS} - V_{DS})$ [3], o que justifica o canal ser mais fino nessa região [3]. Quando a tensão V_{DS} é maior ou igual à $(V_{GS} - V_{Th})$ ocorre o estrangulamento do canal (*pinched-off*) e a corrente I_{DS} , teoricamente, não aumenta mais (Figura 2.7a). Neste instante, o nMOSFET opera na região de saturação [3]. Para V_{DS} menor que $(V_{GS} - V_{Th})$, o transistor opera na região triodo [3]. A Figura 2.7b apresenta um exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{DS} do nMOSFET tipo enriquecimento.

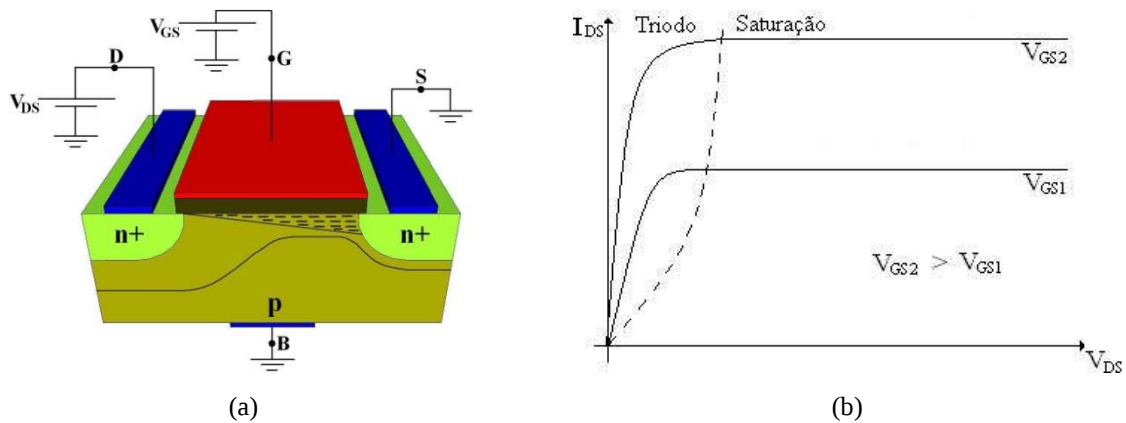


Figura 2.7 – nMOSFET operando na saturação (a) e exemplo de curva característica I_{DS} em função de V_{DS} (b)

Na Figura 2.7b, V_{GS1} e V_{GS2} são duas tensões distintas que foram aplicadas à porta do transistor (V_{GS2} é maior que V_{GS1}).

2.1.4 Expressando I_{DS} em Função de V_{GS} e de V_{DS} de um nMOSFET

É possível expressar matematicamente a característica elétrica dos nMOSFETs. As expressões que serão apresentadas a seguir serão válidas somente quando V_{GS} for maior que V_{Th} . A expressão (2.1) apresenta a equação de I_{DS} quando o transistor opera na região triodo [3], enquanto que a expressão (2.2) apresenta a equação de I_{DS} quando o transistor opera na região de saturação [3].

$$I_{DS} = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(V_{GS} - V_{Th}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS}^2 \right] \quad (2.1)$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{Th})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}) \quad (2.2)$$

Nas expressões (2.1) e (2.2), μ_n é a mobilidade dos elétrons no silício, C_{ox} é a capacitância que está relacionada ao óxido de porta do MOSFET, ϵ_{ox} é a permissividade do óxido de silício, x_{ox} é a espessura do óxido de silício, W é a largura de canal do MOSFET, L é o comprimento de canal do MOSFET e λ é o fator de modulação do comprimento de canal.

2.1.5 Modelo Equivalente para Pequenos Sinais do nMOSFET Tipo Enriquecimento

Como já dito anteriormente, a corrente I_{DS} do MOSFET é dependente da tensão V_{GS} , em outras palavras, o MOSFET se comporta como uma fonte de corrente controlada por tensão [3]. A Figura 2.8 apresenta o modelo equivalente para pequenos sinais do nMOSFET.

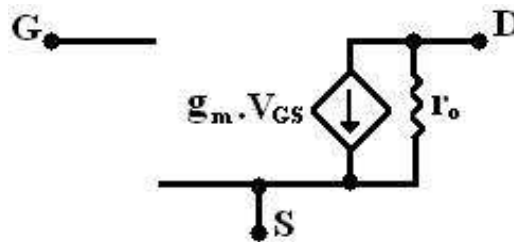


Figura 2.8 – Modelo equivalente para pequenos sinais do nMOSFET

Na Figura 2.8, g_m é a transcondutância de entrada (na dissertação será chamada simplesmente de transcondutância) e r_o é a resistência diferencial de saída na região de saturação. O modelo apresentado é indicado para projetos de amplificadores utilizando MOSFETs. Existem modelos equivalentes de pequenos sinais que consideram a influência do contato de corpo no funcionamento do transistor [35].

2.1.6 O Processo de Fabricação CMOS

A Figura 2.9 apresenta MOSFETs do tipo n e do tipo p que foram fabricados com processo de fabricação CMOS. Esse tipo de tecnologia é comumente utilizado em circuitos digitais, pois pode trabalhar em frequências elevadas, além de possuir baixo consumo de energia [36]. A tecnologia CMOS também pode ser utilizada em circuitos analógicos, como é o caso do amplificador operacional de transcondutância (*Operational Amplifier Transconductance* – OTA) [37].

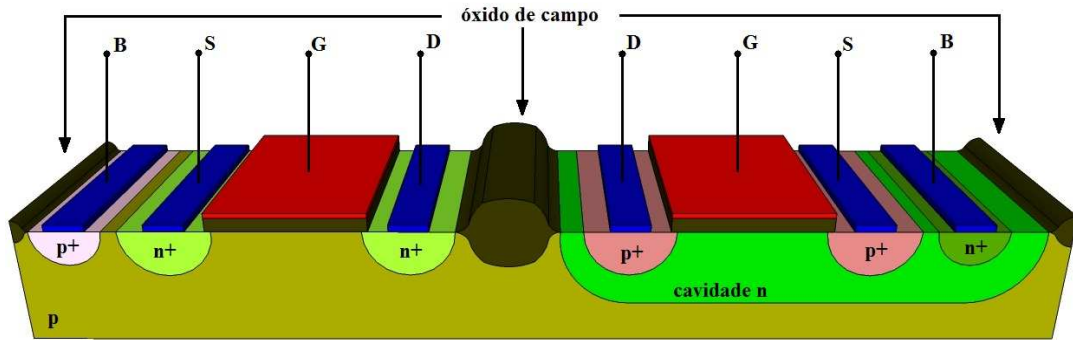


Figura 2.9 – MOSFETs do tipo n e p que foram implementados com processo de fabricação CMOS

O processo de fabricação CMOS costuma ser desenvolvido sobre o substrato tipo p [38]. O pMOSFET (MOSFET do tipo p) é construído dentro de uma cavidade n, após a implantação de dopantes doadores dentro da lâmina tipo p [38]. Para manter as junções reversamente polarizadas em circuitos digitais, os terminais B e S dos nMOSFETs são conectados ao ponto de menor potencial [38], enquanto que os terminais B e S do pMOSFETs são conectados ao ponto de maior potencial [38].

2.1.7 Parâmetros Elétricos dos MOSFETs

Nesse tópico serão apresentados diversos parâmetros dos MOSFETs. Os parâmetros que serão discutidos são: tensão de limiar (V_{Th}), inclinação de sublimiar (S), transcondutância (g_m), fator de modulação do comprimento de canal (λ), resistência diferencial de saída na região de saturação (r_o), tensão Early (V_{EA}), ganho de tensão intrínseco do transistor (A_V), resistência entre dreno e fonte de estado ligado (R_{on}), corrente de fuga (I_{leak}), corrente de estado desligado (I_{off}), corrente de estado ligado (I_{on}) e razão I_{on}/I_{off} .

2.1.7.1 Tensão de Limiar (V_{Th})

O V_{Th} é definido como sendo a tensão que deve ser aplicada a porta para formar a camada de inversão abaixo do óxido de porta em MOSFETs [39].

Existem diversos métodos para extração de V_{Th} . Neste trabalho foi utilizado o método da derivada de segunda ordem da curva I_{DS} em função de V_{GS} , pois esse método evita a dependência de V_{Th} com a resistência série [40].

A Figura 2.10 demonstra a extração da tensão de limiar: o maior pico da curva $\partial^2 I_{DS} / \partial V_{GS}^2$ (derivada de segunda ordem da curva I_{DS} em função de V_{GS}) corresponde ao valor de V_{Th} .

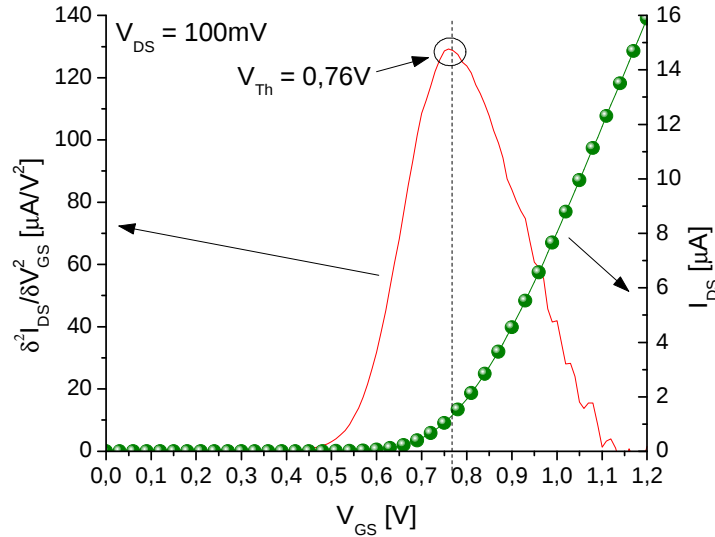


Figura 2.10 – Exemplo de curva I_{DS} em função de V_{GS} e derivada de segunda ordem da curva citada para obtenção de V_{Th}

A tensão de limiar é dada pela expressão (2.3) [31], enquanto a tensão de faixa plana é dada pela expressão (2.4) [31].

$$V_{Th} = \Phi_{ms} - \frac{Q_i}{C_{ox}} - \frac{Q_d}{C_{ox}} + 2 \cdot \Phi_F \quad (2.3)$$

$$V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_i}{C_{ox}} \quad (2.4)$$

Na expressão (2.3) e (2.4), Φ_{ms} é a diferença da função trabalho entre o metal e o semiconductor, Q_i é a carga efetiva do armadilhamento na interface e no óxido, Q_d é a carga de depleção e Φ_F é o potencial de Fermi.

2.1.7.2 Inclinação de Sublimiar (S)

A inclinação de sublimiar (S) é definida como sendo o inverso da derivada do logaritmo de I_{DS} em função de V_{GS} , para V_{GS} menor que V_{Th} . A corrente I_{DS} na região sublimiar independe de V_{DS} [5], ou seja, a corrente de difusão é predominante nessa região

[41]. Na região sublimiar, elétrons provenientes da fonte se difundem no substrato do nMOSFET e são coletados pelo dreno [41]. A expressão (2.5) apresenta a definição de inclinação de sublimiar [42].

$$S = \frac{1}{\frac{\delta(\log I_{DS})}{\delta V_{GS}}} = \ln 10 \cdot \frac{k \cdot T}{q} \cdot \left(1 + \frac{C_{Si} + C_{it}}{C_{ox}}\right) \quad (2.5)$$

Na expressão (2.5), k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, q é a carga elementar do elétron, C_{it} é a capacitância das armadilhas na interface Si/SiO₂.

Quanto menor é a inclinação de sublimiar, mais rápido ocorrerá o chaveamento do MOSFET do estado desligado para o ligado [5].

A expressão (2.5) demonstra que a inclinação de sublimiar é dependente da temperatura (T), da capacitância de depleção (C_{Si}), da capacitância das armadilhas na interface Si/SiO₂ (C_{it}) e da capacitância de porta (C_{ox}). Altos valores de S estão relacionados a valores elevados de C_{it} [43], ou seja, quanto menos armadilhas existirem na interface Si/SiO₂, menor/melhor será a inclinação de sublimiar.

Muitos circuitos eletrônicos tais como calculadoras solares e relógios de pulso operam na região sublimiar para reduzir o consumo de energia [41]. Circuitos projetados para trabalhar nessa região são mais sensíveis a ruídos, além de possuírem menor largura de banda [41]. Adiante será visto que CIs de uso aeroespacial não devem ser polarizados na região sublimiar.

A Figura 2.11 apresenta um exemplo de curva $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} para obtenção de S .

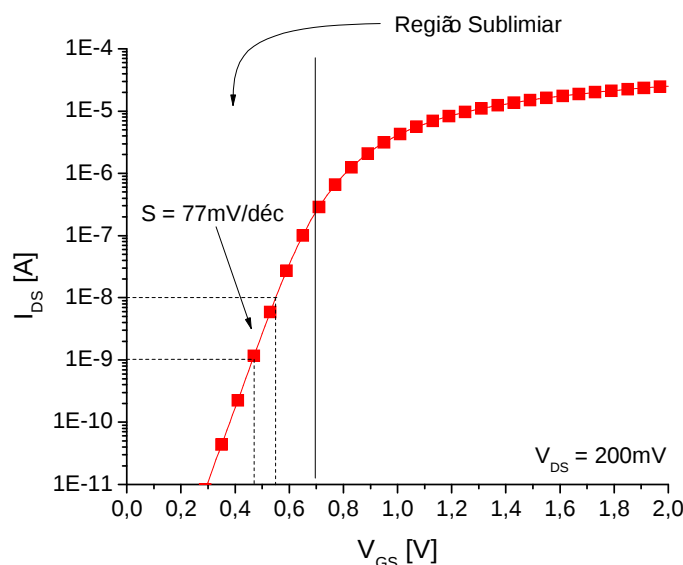


Figura 2.11 – Curva $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} com indicação da região sublimiar para obtenção de S

2.1.7.3 Transcondutância de Entrada (g_m)

A transcondutância (g_m) mede a efetividade no controle da corrente de dreno pela tensão de porta [5]. A expressão (2.6) apresenta a definição matemática de transcondutância [42], que é a derivada de I_{DS} em função de V_{GS} .

$$g_m = \frac{\delta I_{DS}}{\delta V_{GS}} \quad (2.6)$$

A Figura 2.12 apresenta um exemplo de curva de g_m em função de V_{GS} de um nMOSFET.

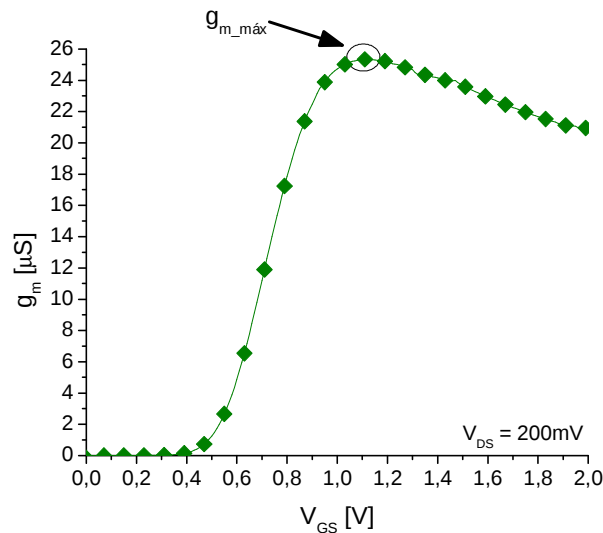


Figura 2.12 – Exemplo de curva g_m em função de V_{GS}

Na Figura 2.12, $g_{m_máx}$ corresponde ao máximo valor de transcondutância de determinado nMOSFET.

2.1.7.4 Razão g_m/I_{DS}

A razão entre a transcondutância e a corrente de dreno (g_m/I_{DS}) é um indicador do fator de qualidade do transistor [44], pois está relacionada com a amplificação que pode ser obtida (g_m) dividida pela corrente que circula no transistor (I_{DS}) [5], a qual foi suprida por determinada energia (V_{GS} e V_{DS}) [5].

A Figura 2.13 apresenta um exemplo de curva g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$.

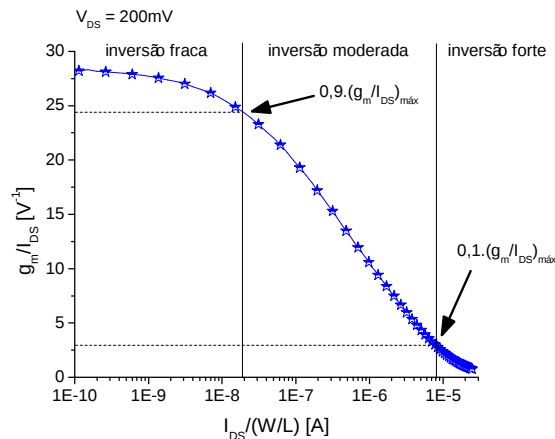


Figura 2.13 – Exemplo de curva g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$

A curva da Figura 2.13 é muito utilizada no projeto de OTAs [37]. Essa curva é comum a todos os MOSFETs de determinado processo de fabricação [37].

No projeto dos OTAs, a inversão fraca (região sublimiar) possui como características o baixo consumo de energia, o alto ganho de tensão intrínseco do transistor (A_V) e a baixa frequência de ganho de tensão unitário (f_T). A inversão forte tem como característica o alto consumo de energia, o baixo valor de A_V e o alto valor de f_T . Para finalizar, a inversão moderada fornece bom compromisso entre A_V , f_T e consumo de energia [37].

2.1.7.5 V_{EA} , λ e r_o

O nMOSFET começa a operar na região de saturação quando V_{DS} é igual a $(V_{GS} - V_{Th})$. À medida que V_{DS} aumenta além de $(V_{GS} - V_{Th})$, o ponto de estrangulamento do canal se desloca em direção a fonte [3], ou seja, a corrente I_{DS} na região de saturação passa a sofrer leve dependência linear da tensão entre dreno e fonte. Esse efeito é conhecido como modulação do comprimento de canal.

A Figura 2.14 mostra o efeito descrito anteriormente atuando na região de saturação da curva I_{DS} em função de V_{DS} de um nMOSFET.

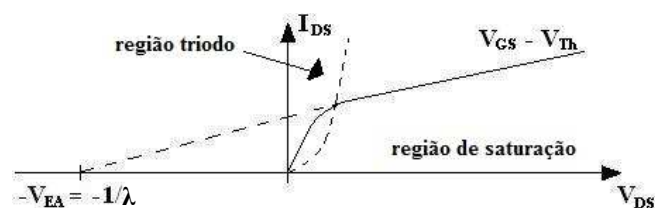


Figura 2.14 – Exemplo de curva I_{DS} em função de V_{DS} que mostra o efeito da modulação do comprimento de canal atuando no nMOSFET

Para o MOSFET operando na região de saturação, a tensão Early (V_{EA}) é obtida por meio da extrapolação da curva I_{DS} em função de V_{DS} até atingir o ponto onde I_{DS} é igual a 0 A [3]; neste ponto, V_{DS} é igual $-V_{EA}$. O valor da tensão Early depende do comprimento de canal e da concentração de elementos dopantes [45]. O fator de modulação do comprimento de canal (λ), apresentado na expressão (2.2), é igual ao inverso de V_{EA} [3].

A resistência diferencial de saída na saturação (r_o) é fornecida pela expressão (2.7) [3].

$$r_o \simeq \frac{V_{EA}}{I_{DS}} \quad (2.7)$$

2.1.7.6 Ganho de Tensão Intrínseco do Transistor

O ganho de tensão intrínseco do transistor (A_V) é fornecido pela expressão (2.8) [5].

$$A_V = \frac{g_m}{I_{DS}} \cdot V_{EA} \quad (2.8)$$

MOSFETs operando com altos valores de g_m/I_{DS} e V_{EA} geram maiores ganhos de tensão para as aplicações analógicas de CIs.

2.1.7.7 Resistência entre Dreno e Fonte de Estado Ligado (R_{on})

A resistência entre dreno e fonte de estado ligado (R_{on}) está relacionada com o MOSFET operando como chave [3]. O R_{on} é obtido na região triodo, por meio da razão entre a variação de V_{DS} (ΔV_{DS}) pela variação de I_{DS} (ΔI_{DS}).

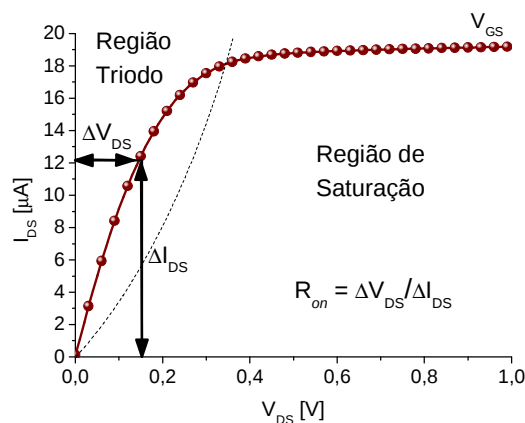


Figura 2.15 – Curva I_{DS} em função de V_{DS} que mostra o local de extração de R_{on}

2.1.7.8 Corrente de Fuga (I_{leak}), Corrente de Estado Desligado (I_{off}), Corrente de Estado Ligado (I_{on}) e Razão I_{on}/I_{off}

As correntes de fuga, de estado desligado e de estado ligado são obtidas por meio de curvas $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} (Figura 2.16).

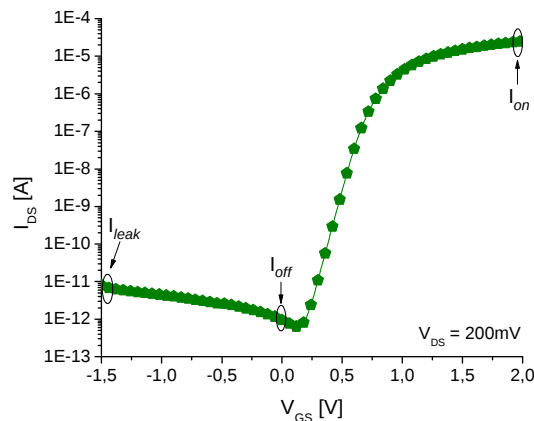


Figura 2.16 – Curva $\log(I_{DS})$ em função de V_{GS} que mostra os pontos de extração de I_{leak} , I_{off} e I_{on}

Na parte da radiação de MOSFETs, os valores I_{leak} , I_{off} e I_{on} serão extraídos para V_{GS} iguais a -1,50 V, 0,00 V e 1,95 V, respectivamente, e V_{DS} igual a 200 mV.

A razão I_{on}/I_{off} está relacionada ao consumo de energia do transistor. É desejável que o MOSFET forneça corrente apropriada quando ligado e não forneça corrente alguma quando desligado, ou seja, o consumo de energia é otimizado para altos valores da razão I_{on}/I_{off} .

2.1.8 Efeitos Adversos ao Funcionamento Normal (ou Ideal) dos MOSFETs

A densidade de transistores na pastilha de silício está aumentando graças às inovações tecnológicas nos processos de fabricação [39]. Em 1984, o comprimento de canal de uma DRAM de 256 kb era de aproximadamente 1,2 μm [39]. Dez anos depois, o comprimento de canal de uma DRAM de 64 Mb caiu para 0,4 μm [39]. Reduzir a dimensão dos transistores provoca efeitos que podem ser indesejados para a maioria das aplicações de CIs. Neste tópico serão apresentados o efeito dos elétrons quentes, o *Gate-Induced Drain Leakage* (GIDL) e o acionamento do tiristor parasitário oriundo do processo CMOS de fabricação.

2.1.8.1 Efeito dos Elétrons Quentes

Quando o nMOSFET trabalha na região de saturação, os elétrons da região de canal ganham energia cinética considerável na região de estrangulamento, devido ao alto campo elétrico do dreno [5]. Parte desses elétrons (portadores quentes) consegue transpor o óxido de porta, sendo coletados como corrente de porta, diminuindo a impedância de entrada do dispositivo [39]. Uma parcela desses elétrons não consegue transpor o óxido, ficando armadilhados no SiO_2 [39].

A alta energia de aceleração dos elétrons gera pares elétrons-lacunas no óxido de porta devido à ionização por impacto [5]. As lacunas geradas são coletadas pelo contato de corpo como corrente de substrato [39], enquanto que os elétrons gerados são coletados pelo contato de porta [39].

Os portadores quentes causam o aumento da tensão de limiar, degradação da corrente de dreno e diminuição da transcondutância [46]. Isso significa que o tempo de vida do dispositivo diminui com o aumento da quantidade de portadores quentes que são gerados [46].

2.1.8.2 Gate-Induced Drain Leakage (GIDL)

Quando o nMOSFET opera no regime de acumulação [41], pares elétrons-lacunas são gerados entre o dreno e a porta. Isso ocorre devido ao alto campo elétrico vertical [39] na proximidade da interface Si/SiO_2 [47]. Esse alto campo elétrico causa o tunelamento dos elétrons da interface Si/SiO_2 para o dreno [39]. As lacunas geradas são coletadas pelo contato de porta como corrente de porta [41] [47]. A Figura 2.17 apresenta a região de GIDL, local onde ocorre o aumento de I_{DS} à medida que V_{GS} diminui.

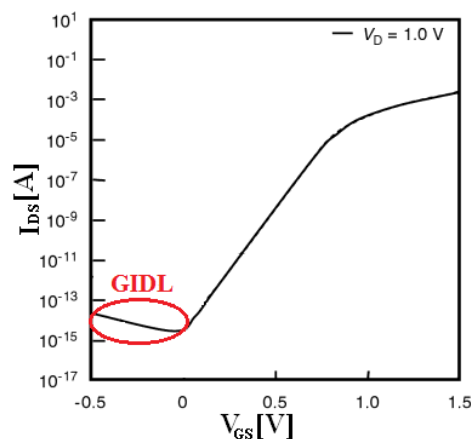


Figura 2.17 – Região onde ocorre o GIDL (adaptado de [48])

2.1.8.3 O Tiristor Parasitário Presente no Inversor CMOS

Em algumas situações, BJTs parasitários do tipo NPN e PNP podem ser ativados em CIs [49], o que ocasiona o disparo do tiristor parasitário (*latchup*) presente no inversor CMOS. Contribuem para o acionamento do tiristor parasitário: flutuação na tensão dos nós da estrutura CMOS [5], deslocamento de correntes no CI [5], fotocorrentes [5] e avalanche nas junções [5].

A Figura 2.18 apresenta o tiristor parasitário presente no inversor CMOS.

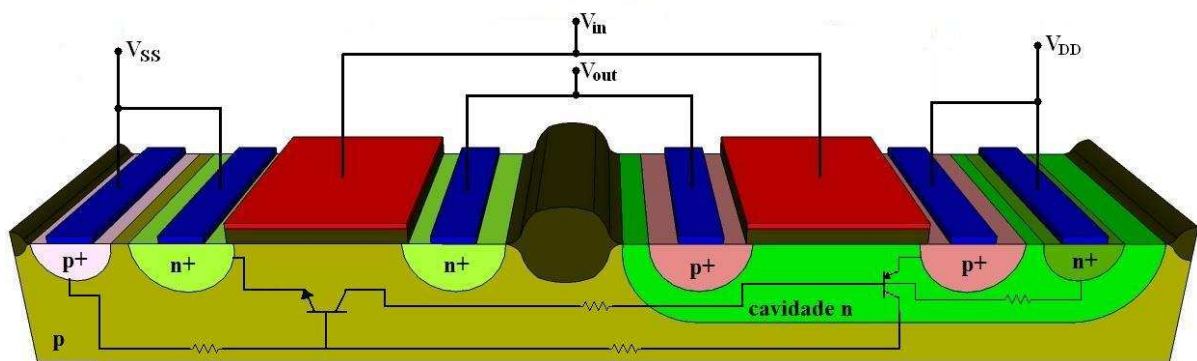


Figura 2.18 – Visualização do tiristor parasitário no inversor CMOS

Na Figura 2.18, V_{in} é o sinal de entrada do inversor, V_{out} é o sinal de saída do inversor, V_{DD} é a tensão positiva de alimentação em corrente contínua, V_{SS} é a tensão negativa de alimentação em corrente contínua.

2.1.9 Benefícios dos MOSFETs Implementados em Lâmina SOI

A tecnologia SOI é a mais indicada para substituir a tecnologia convencional de MOSFETs. Esse fato se deve devido à existência de diversos efeitos indesejados que acontecem nos MOSFETs por meio da interação da região ativa do transistor com o substrato. Para o transistor SOI, a espessa região de silício do transistor convencional é substituída, na maioria das vezes, por uma camada de óxido de silício, que é conhecida como óxido enterrado. A Figura 2.19 apresenta um exemplo de estrutura SOI nMOSFET.

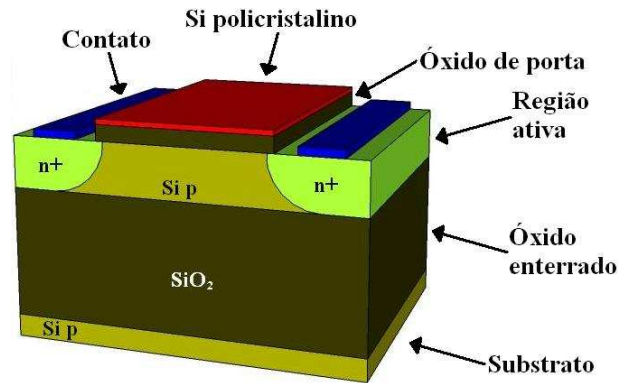


Figura 2.19 – Exemplo de estrutura SOI nMOSFET

O MOSFET convencional possui espessura de substrato de aproximadamente $800\ \mu\text{m}$ para garantir robustez mecânica [5], enquanto que a região ativa do transistor é de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ [5]. A interação da região ativa do MOSFET com o substrato cria capacitâncias parasitas significativas e essas capacitâncias estão associadas às regiões de depleção do dreno e da fonte [5]. No SOI MOSFET, as capacitâncias parasitas estão associadas ao óxido enterrado [5]. Como a espessura desse óxido é grande, pode-se garantir que essas capacitâncias são baixas [8], ou seja, circuitos projetados com SOI MOSFETs podem operar em frequências mais elevadas quando comparados com aqueles circuitos construídos com MOSFETs convencionais [8].

Por causa do filme fino de silício, o SOI MOSFET possui menor inclinação de sublimiar e maior transcondutância [8], quando comparado ao MOSFET convencional equivalente. Como a transcondutância do SOI MOSFET é mais elevada que a do MOSFET convencional, o dispositivo SOI possui maior razão g_m/I_{DS} [37].

Como o óxido enterrado é um isolante elétrico, as regiões de dreno e fonte de um inversor podem permanecer encostadas no SiO_2 sem que ocorra o *latchup* [8]. Isso é possível, pois cada transistor SOI é eletricamente isolado, ou seja, não há junções no SOI MOSFET que devem permanecer reversamente polarizadas [8].

A Figura 2.20 mostra que CIs constituídos por SOI MOSFETs apresentam maior densidade de integração que CIs produzidos com a tecnologia CMOS convencional de fabricação. Isso ocorre pois a área de um SOI MOSFET é menor que a área de um MOSFET convencional, devido a inexistência do contato de substrato [50].

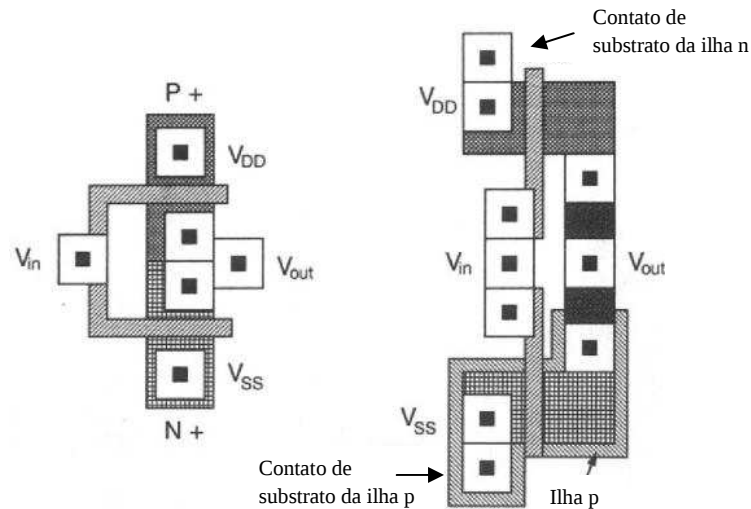


Figura 2.20 – Comparação entre a área ocupada pelo inversor SOI MOSFET e inversor MOSFET convencional, respectivamente (adaptado de [50])

CIs com SOI MOSFETs possuem menor corrente de fuga devido à isolamento entre transistores [5], ou seja, a tecnologia SOI garante alto desempenho com baixo consumo de energia [8]. O processo de fabricação do SOI MOSFET contém menos etapas que o processo de fabricação do MOSFET convencional [5], ou seja, o SOI MOSFET possui processo de fabricação mais simples [5].

Os circuitos formados por SOI MOSFETs são mais robustos à radiação por causa do isolamento entre transistores (óxido enterrado) [17]. Para circuitos operando em ambientes radioativos, os MOSFETs convencionais são mais sensíveis às cargas geradas pela interação da partícula radioativa com o silício [17], pois as partículas radioativas alteram o perfil de carga da região de depleção do transistor. No SOI MOSFET, essa interação é reduzida devido ao menor volume da região ativa do transistor [17].

2.2 Estilo de *Layout* do Tipo Diamante, Octo e *Fish* para Implementação de MOSFETs

Nessa seção serão apresentados detalhes sobre os MOSFETs do tipo Diamante, Octo e *Fish*, aos quais possuem geometria de porta não convencional. O intuito do estudo de novas geometrias de porta está na possibilidade de sobrevida da tecnologia planar frente à tecnologia tridimensional, devido ao menor custo de produção de *chips* que utilizam a tecnologia planar.

2.2.1 Estilo de *Layout* do Tipo Diamante para a Construção de MOSFETs

Novas geometrias de porta estão sendo propostas para aumentar o desempenho de CIs [51] [52]. Pensando nisso, uma nova estrutura de MOSFETs, conhecida por Diamante, foi proposta para melhorar o desempenho de CIs analógicos [53].

O MOSFET Diamante (DM) possui geometria hexagonal [54], enquanto que o MOSFET convencional (CM) possui geometria retangular. A modificação da geometria de porta de retangular para hexagonal eleva o campo elétrico longitudinal resultante no canal do DM [53], o que propicia melhorias na corrente de dreno [53] [55], na transcondutância [53] [56], na razão g_m/I_{DS} , na resistência entre dreno e fonte de estado ligado [9], no ganho de tensão de amplificadores [57] e na frequência de ganho de tensão unitário [57], considerando as mesmas condições de polarização, área de porta (A_G) e razão de aspecto (W/L) entre o DM e o CM equivalente. O efeito de canto na direção longitudinal do canal é o responsável pela elevação do campo elétrico longitudinal resultante no DM [53].

Para cada DM existe um equivalente CM, ambos possuindo a mesma área de porta e razão de aspecto [9], o que possibilita o estudo comparativo entre transistores equivalentes. O MOSFET Diamante foi projetado no Centro Universitário da FEI e possui patente no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob número PI0802745-5 A2 [11].

A Figura 2.21 apresenta o DM e o CM equivalente.

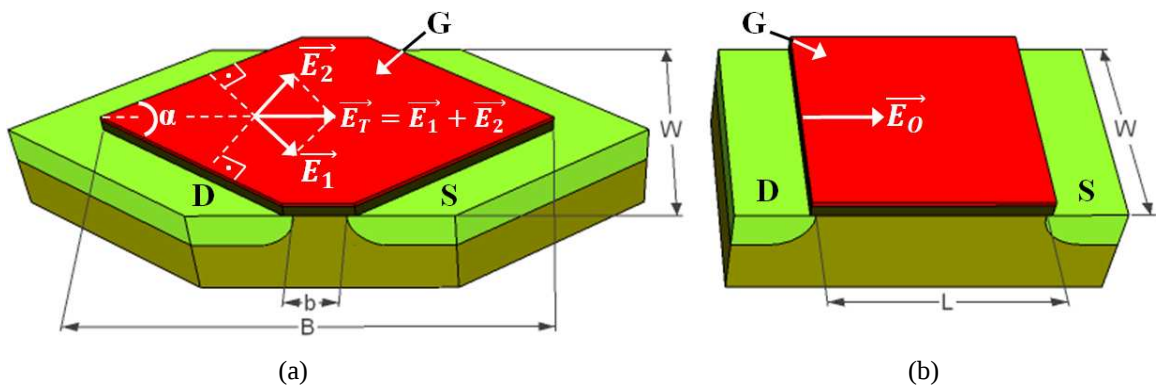


Figura 2.21 – Exemplo de uma estrutura planar DM (a) e CM (b)

Na Figura 2.21, b e B são o menor e maior comprimento de canal do DM, W é a largura de canal do DM e do CM, L é o comprimento de canal do CM, $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ são duas componentes de campo elétrico longitudinal, geradas por V_{DS} , que são perpendiculares à interface dreno/canal, $\vec{E}_T$ é o campo elétrico longitudinal resultante no DM, $\vec{E}_O$ é o campo elétrico longitudinal resultante no CM.

A soma vetorial de $\vec{E}_1$ com $\vec{E}_2$ é igual a $\vec{E}_T$. O valor de $\vec{E}_O$ é menor que $\vec{E}_T$, pois o DM potencializa o campo elétrico longitudinal resultante na região de canal por meio do efeito de canto [53]. Isso tudo acontece em transistores que possuem mesmas A_G , razões W/L e condições de polarização [53].

Se cortes longitudinais forem realizados no DM, vários transistores em paralelos são originados com diferentes comprimentos de canal [14]. A Figura 2.22, que foi obtida por simulação, mostra que a densidade de corrente no SOI MOSFET Diamante é maior onde o comprimento de canal é menor.

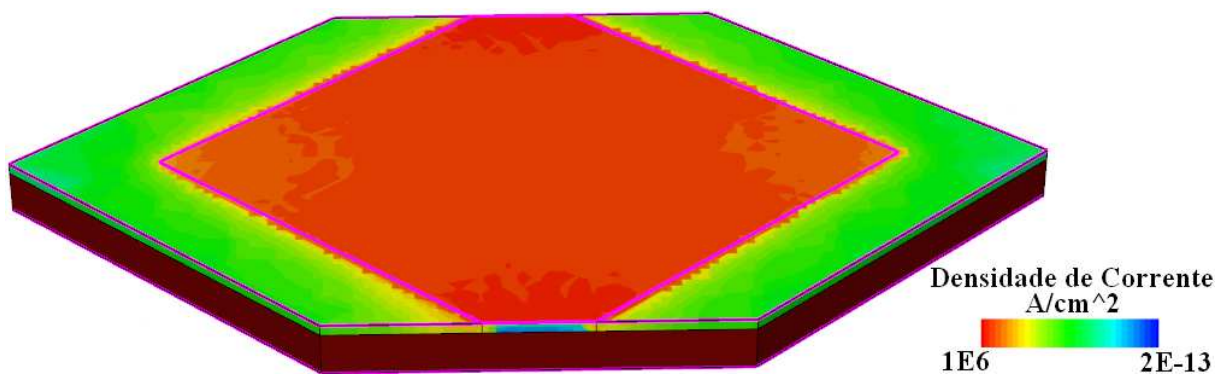


Figura 2.22 – Densidade de corrente no SOI MOSFET Diamante (adaptado de [9])

As expressões (2.9) e (2.10) são utilizadas para transformar o CM em DM [55]. Essas expressões satisfazem o critério que foi descrito anteriormente, que diz que transistores são considerados equivalentes quando possuem a mesma A_G e razão de aspecto.

$$B = 2 \cdot L - b \quad (2.9)$$

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{W}{B-b}\right) \quad (2.10)$$

Primeiramente, deve-se conhecer os valores de L e W do CM para converter o MOSFET convencional em Diamante. Para obtenção do B do DM, um valor para b deve ser atribuído pelo projetista (esse valor pode ser, por exemplo, a dimensão mínima permitida pela tecnologia CMOS [55]). Com os valores de W , B e b é obtido o ângulo α do DM.

2.2.2 Estilo de *Layout* do Tipo Octo para a Construção de MOSFETs

Pensando na redução de área de silício ocupado pelo MOSFET Diamante, uma nova geometria de transistores foi proposta, conhecida por Octo MOSFET (OM) [58]. Esse novo estilo de *layout* com formato de porta octogonal é gerado quando os bicos do transistor hexagonal (DM) são cortados [59].

O MOSFET Octo, da mesma forma que o MOSFET Diamante, também é capaz de aumentar o campo elétrico longitudinal resultante ao longo do canal [58]. A eliminação dos bicos do DM garante ao OM maior robustez contra descargas eletrostáticas e maior tensão de ruptura do transistor [59].

Da mesma forma que o DM, o MOSFET Octo foi projetado no Centro Universitário da FEI e possui patente no INPI sob número PI0903005-0 A2 [12].

A Figura 2.23 apresenta um exemplo de estrutura OM.

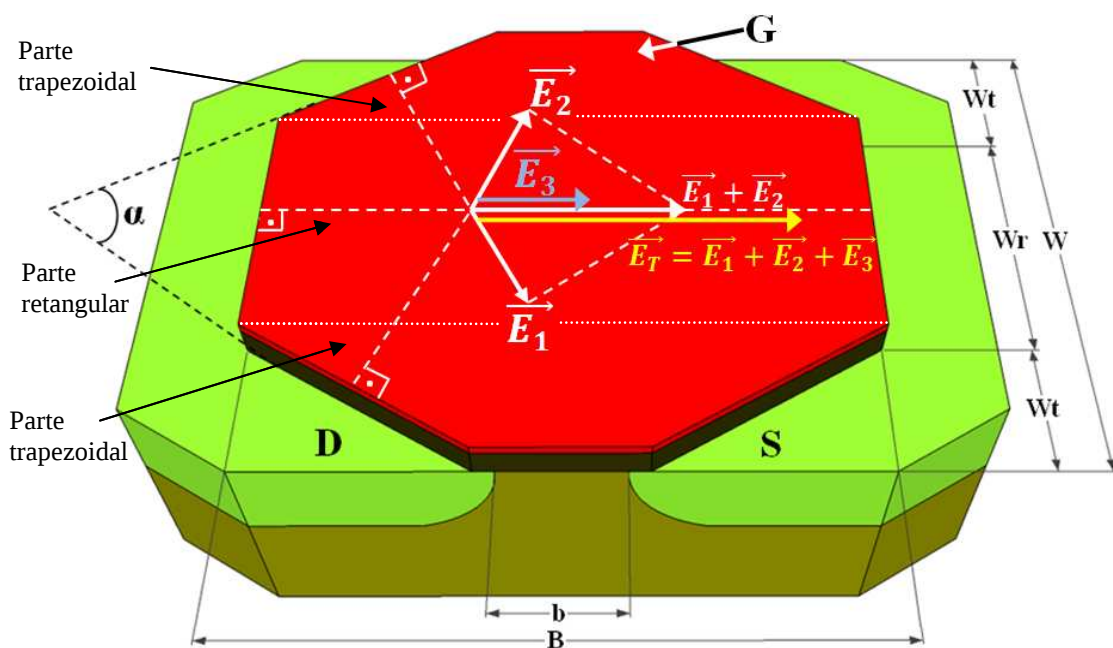


Figura 2.23 – Exemplo de uma estrutura planar OM

Na Figura 2.23, b e B são o menor e maior comprimento de canal, W é a largura de canal, W_t e W_r são a largura da parte trapezoidal e retangular que compõem o estilo octogonal de porta do OM, α está relacionado ao DM antes dos bicos serem cortados, $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$ são três componentes de campo elétrico longitudinal, geradas por V_{DS} , que são perpendiculares às

interfaces dreno/canal, $\vec{E}_T$ é o campo elétrico longitudinal resultante no OM que é igual a soma vetorial de $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e $\vec{E}_3$.

O OM é constituído por três transistores em paralelo, sendo dois trapezoidais e um retangular [58], como mostra a Figura 2.23. O valor de W_t , que corresponde às partes trapezoidais do OM, é obtido por meio da expressão (2.11), enquanto que W_r , que corresponde à parte retangular do OM, é obtido por meio da expressão (2.12) [58] [59].

$$W_t = \left(\frac{B-b}{2} \right) \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.11)$$

$$W_r = W - 2 \cdot W_t \quad (2.12)$$

A influência da geometria no dispositivo é retirada quando o parâmetro elétrico, como I_{DS} e g_m , é dividido por W/L_{eff} [59]. Conhecer os valores de W_r e W_t é necessário para obtenção da razão de aspecto do OM. A expressão (2.13) é utilizada para obtenção da razão W/L_{eff} do transistor Octo [58].

$$\left(\frac{W}{L_{eff}} \right)_{Octo} = \frac{4 \cdot W_t \cdot B + W_r \cdot (B+b)}{B \cdot (B+b)} \quad (2.13)$$

O comprimento efetivo de canal do OM (L_{eff}), ao qual será citado em resultados simulados e experimentais, é obtido por meio da expressão (2.13).

2.2.3 Estilo de *Layout* do Tipo *Fish* para a Construção de SOI MOSFETs

O SOI MOSFET *Fish* (FSM) é uma evolução do transistor Diamante [60], assim como o OM. O novo estilo geométrico de canal do *Fish* foi especialmente projetado para aplicações digitais, pois pela primeira vez existe a possibilidade de projetos utilizando a dimensão mínima permitida por determinado processo de fabricação CMOS [60].

A porta do transistor *Fish* apresenta a forma geométrica do sinal matemático “menor que” ($<$) [60]. Da mesma forma que o DM e o OM, o FSM foi projetado no Centro Universitário da FEI e possui patente no INPI sob número PI1101477-6 A2 [13].

A Figura 2.24 apresenta o SOI MOSFET *Fish*.

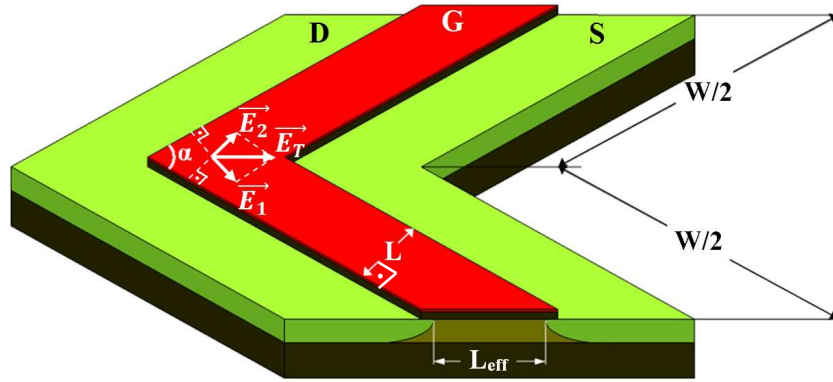


Figura 2.24 – Exemplo de uma estrutura FSM

Na Figura 2.24, W é a largura de canal, L é o comprimento de canal, L_{eff} é o comprimento efetivo de canal (L_{eff} é igual a $L/\sin(\alpha/2)$ [60] [61]), α é o ângulo do FSM, $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ são duas componentes de campo elétrico longitudinal, geradas por V_{DS} , que são perpendiculares às interfaces dreno/canal, $\vec{E}_T$ é o campo elétrico longitudinal resultante, ao qual é igual a somatória vetorial de $\vec{E}_1$ com $\vec{E}_2$, que está na mesma direção de L_{eff} e da densidade de corrente [60].

Todos os FSMs possuem um SOI MOSFET convencional (CSM) equivalente com mesma A_G [60]. Considerando as mesmas condições de polarização e área de porta, o campo elétrico longitudinal resultante do FSM é maior que do CSM equivalente, o que propicia melhorias nos valores de I_{DS} [60], g_m [60], R_{on} [60], além de outros parâmetros.

O desenho do FSM possibilita o aumento do L_{eff} desse transistor [61], aumentando à figura de mérito definida por $I_{DS}/(W/L_{eff})$, a qual representa a capacidade do transistor em fornecer determinada corrente I_{DS} para uma razão W/L_{eff} específica [61]. A expressão (2.14) relaciona as correntes de dreno do FSM com a do CSM.

$$\frac{I_{DS_FSM}/(W/L_{eff})}{I_{DS_CSM}/(W/L)} = \frac{I_{DS_FSM}}{I_{DS_CSM}} \cdot \left[\frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right] \geq 1, \text{ para } 0^\circ < \alpha \leq 180^\circ \quad (2.14)$$

A expressão 2.14 mostra que o FSM produz maior $I_{DS}/(W/L_{eff})$ quando comparado com o CSM equivalente, considerando as mesmas condições de polarização. Isso ocorreu devido ao fator $1/\sin(\alpha/2)$ que multiplica o comprimento de canal (L) do FSM [61].

2.3 Conceitos Fundamentais de Radiação em MOSFETs

Nesta seção serão apresentados detalhes sobre os tipos de radiação e como elas atuam na degradação de dispositivos MOSFETs. Essa seção descreve a radiação cósmica e os diversos detalhes da interação da radiação com os MOSFETs.

2.3.1 Conceitos de Radiação

Todos os elementos com número atômico (z) maior que 82 são radioativos e, portanto, passam por processos de rearranjo nuclear até que seja atingido o equilíbrio no núcleo atômico [7]. O equilíbrio é atingido por meio da emissão de partículas e/ou raios γ [7].

Cada nuclídeo radioativo possui determinada taxa de decaimento (τ) no processo de rearranjo nuclear [62]. Os elementos radioativos liberam energia até atingir o equilíbrio atômico [62], ou seja, a emissão de partículas e/ou raios γ transforma determinado elemento radioativo em outro mais estável [62]. A meia-vida ($t_{1/2}$) está relacionada com a taxa de decaimento do elemento radioativo, onde $t_{1/2}$ é definido como sendo o tempo necessário para que determinada massa de elemento radioativo decaia pela metade em relação ao valor inicial [63]. A expressão (2.15) define matematicamente meia-vida [7].

$$t_{1/2} = \frac{\log 2}{\tau} \quad (2.15)$$

Ao longo da dissertação, algumas unidades relacionadas à radiação poderão ser citadas quanto à radioatividade, energia, dose, fluxo, fluência e transferência linear de energia (*Linear Energy Transfer*, LET).

A unidade de radioatividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o *becquerel* (Bq), que equivale a uma desintegração por segundo ($\text{Bq} = \text{s}^{-1}$) [64].

A unidade de energia no SI é o *joule* (J) [7]. Em reações nucleares, a unidade mais utilizada é o elétron-volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) [7].

A dose absorvida de radiação é definida como sendo a energia fornecida, para determinada matéria, por unidade de massa [64]. O *gray* ($\text{Gy} = \text{J/kg}$) é a unidade de dose no SI, porém a unidade *rad* é mais utilizada e equivale a 0,01 Gy [64].

O fluxo é definido como sendo o número de partículas (ou fótons) que passa por determinada área em um intervalo de tempo e sua unidade é $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [7].

A fluência é a integral do fluxo em relação ao tempo e sua unidade é cm^{-2} .

O LET que também é conhecido como *stopping power*, expressa a perda de energia por unidade de comprimento de uma partícula que penetra determinada densidade de material [65]. A unidade de LET é $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$.

Existem diversos tipos de radiação que podem afetar o funcionamento dos circuitos eletrônicos, aos quais serão apresentadas a seguir:

- a) *Radiação por Próton*. O próton, que corresponde ao núcleo de hidrogênio [7], é a radiação mais abundante nos raios cósmicos [7]. O próton com energia na faixa de MeV é capaz de penetrar dezenas de micrometros no alumínio [7].
- b) *Radiação por Nêutron*. O nêutron possui mesma massa que o próton, porém com carga nula [7]. A ausência de carga do nêutron dificulta o freamento dessa partícula [7]. A água é considerada uma blindagem eficiente contra a radiação por nêutrons [66].
- c) *Radiação por Partícula α* . A partícula α corresponde ao núcleo do átomo de hélio (2 prótons e 2 nêutrons). Na faixa de energia de MeV, a partícula α possui forte interação com a matéria [7]. No silício, a partícula α pode penetrar 23 μm para a faixa de energia citada [7].
- d) *Radiação por Partícula β* . A partícula β possui a mesma massa do elétron, porém pode possuir carga positiva (pósitron) ou negativa (elétron). Comparado com a partícula α , a partícula β pode penetrar facilmente no material e ser facilmente defletida [7].
- e) *Radiação por Raios γ e Raios-X*. São ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda [7]. Os raios-X são obtidos por meio do choque de partículas carregadas com uma superfície [7], enquanto que os raios γ são originados durante as interações nucleares [7]. Os raios γ e X interagem de forma similar com a matéria: eles possuem alto poder de penetração na matéria, provocando ionização leve [7].

Obviamente, partículas com energia cinética consideravelmente maior possuem maior poder de dano em CIs [7]. A colisão de uma partícula altamente energética com determinado material pode gerar partículas subatômicas tais como o b-méson, o pósitron, o pión, o múon, o neutrino e o quark [7].

2.3.2 Radiação Aeroespacial

A radiação aeroespacial é composta principalmente por partículas com alto valor de energia [7]. Essas partículas, de fato, são núcleos de diversos átomos que estão presos no campo magnético terrestre ou estão passando pelo sistema solar [7].

A galáxia, as erupções solares e o campo magnético terrestre são as maiores fontes de partículas de alta energia [67].

2.3.2.1 Raios Cósmicos

Os raios cósmicos são subdivididos em três fontes: galácticos, solares e terrestres [7].

O raio cósmico galáctico é originado fora do sistema solar [67]. Esse tipo de radiação é constituído por 85% de prótons, 14% de partículas α e 1% de átomos pesados, com energia de até 1 GeV [7].

O raio cósmico solar é constituído por partículas, raios ultravioletas (UV) e raios-X [7]. As erupções solares expõem partículas com grande velocidade, além de aumentar a intensidade dos raios UV e raios-X.

A Figura 2.25 apresenta a abundância relativa de vários elementos químicos dos raios cósmicos galácticos e solares [7].

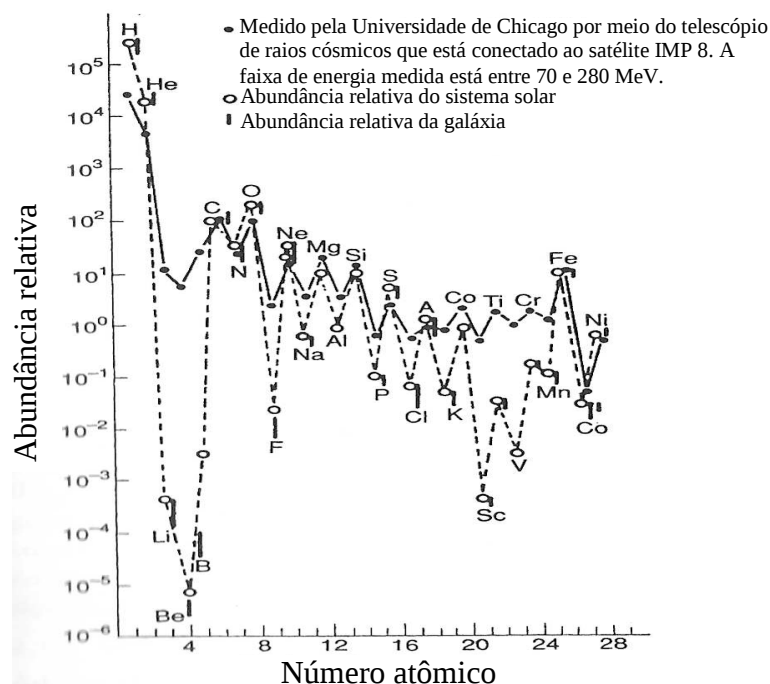


Figura 2.25 – Abundância relativa dos elementos presentes nos raios cósmicos solares e galácticos (adaptado da referência [68])

O raio cósmico terrestre é constituído por partículas secundárias, as quais são produzidas após o choque de partículas espaciais com a atmosfera terrestre [7]. A Figura 2.26 mostra a interação dos raios cósmicos com a atmosfera terrestre [69].

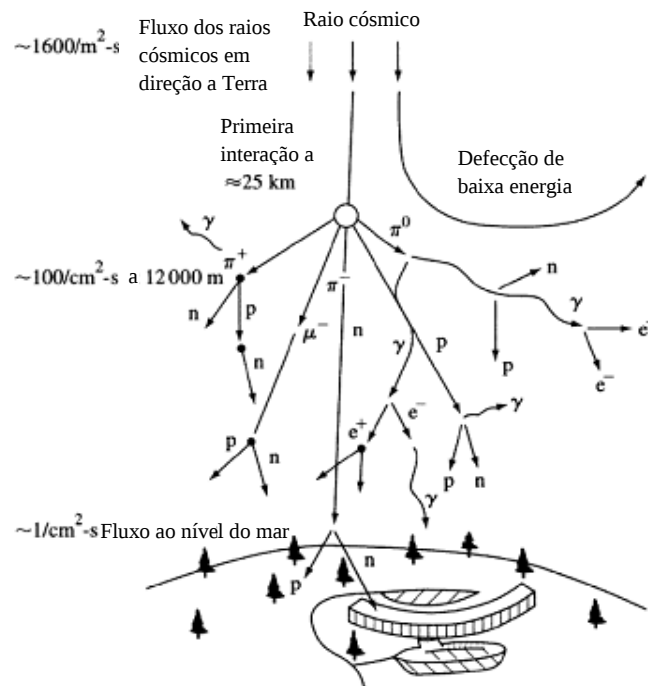


Figura 2.26 – Raio cósmico terrestre (adaptado da referência [69])

Na Figura 2.26, p significa próton, n significa nêutron, γ está relacionada aos raios γ , e^+ se refere ao pósitron, e^- se refere ao elétron, π^- , π^0 e π^+ são partículas fundamentais pión de carga negativa, neutra e positiva, respectivamente, μ^- é a partícula fundamental múon de carga negativa.

2.3.2.2 Campo Magnético Terrestre

Existem prótons, elétrons e íons de oxigênio armadilhados no campo magnético terrestre devido à força de Lorentz [67]. Essas partículas aprisionadas no campo magnético terrestre podem afetar a durabilidade de satélites dependendo da altitude, inclinação e blindagem utilizada [67].

O campo magnético terrestre não é geograficamente simétrico: influências geológicas podem causar inclinação e deslocamento das linhas magnéticas [7] [67]. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic Anomaly*, SAA) é considerada a distorção magnética mais influente na Terra.

A Figura 2.27 mostra a posição da SAA, incluindo a órbita do telescópio espacial Hubble [7]. Essa figura também apresenta curvas isofluxo que mostram que o telescópio espacial passa por regiões da SAA com alto fluxo de prótons [7].

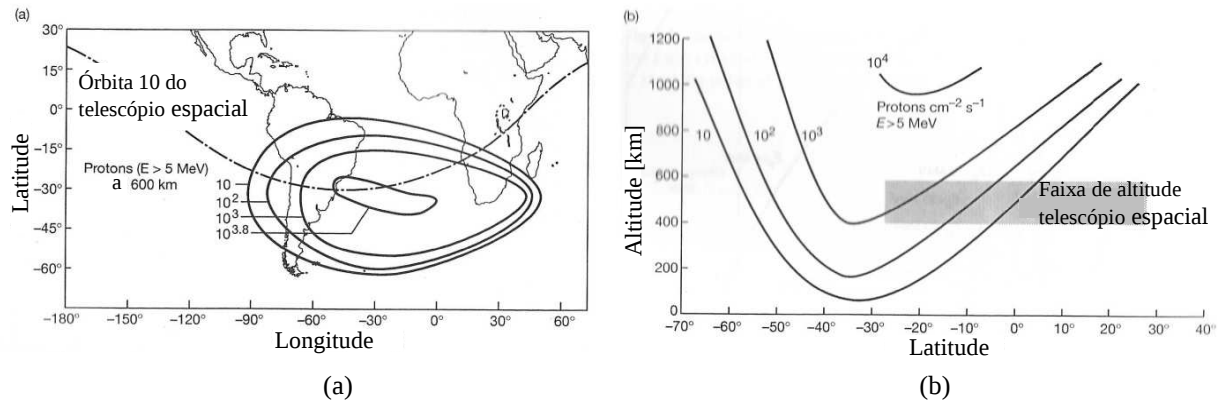


Figura 2.27 – SAA e trajetória do telescópio espacial Hubble (adaptado da referência [70])

O campo magnético terrestre também pode criar uma blindagem natural aos raios cósmicos [7]. De acordo com a força de Lorentz, uma força atua sobre determinada partícula carregada quando esta cruza um campo magnético [71]. A partícula será desviada da Terra se a energia dela for baixa [7] (vide Figura 2.26).

2.3.3 Total Ionizing Dose (TID)

TID é a sigla utilizada para referenciar a dose de radiação acumulada por determinado material ou dispositivo eletrônico. Por meio da radiação, os elétrons da banda de valência dos materiais podem ganhar energia suficiente para passar para a banda de condução [7]. Uma corrente elétrica pode existir, inclusive em isolantes se, por ventura, um campo elétrico for aplicado no material radiado [7]. Como a mobilidade das lacunas é menor que a dos elétrons, cargas positivas podem ficar armadilhadas dentro de isolantes elétricos [7]. A produção e o armadilhamento de lacunas dentro do SiO_2 causa degradação de dispositivos MOSFETs e TBJs [7].

A ionização de um material é causada pela interação de fótons de alta energia ou partículas carregadas com o material [72]. Os danos causados por fótons ou partículas carregadas se iniciam quando pares elétrons-lacunas (PEL) são gerados no material [73]. Para ensaios de TID, as partículas com energia na faixa dos MeV podem ser substituídas por raios-X de baixa energia, ou até mesmo por luz ultravioleta [7].

A Figura 2.28 apresenta como a radiação ionizante atua no óxido de porta dos MOSFETs. Essa figura possui quatro etapas que ocorrem simultaneamente durante o processo de irradiação.

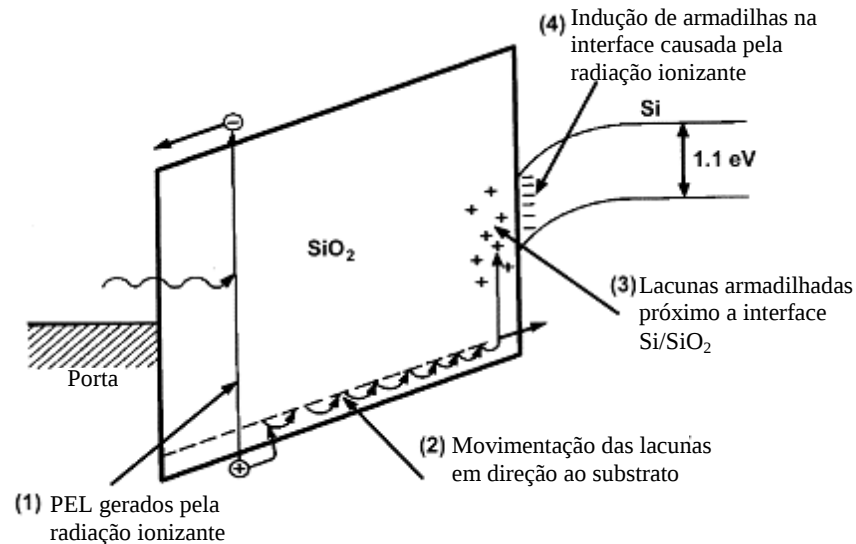


Figura 2.28 – Esquema ilustrativo de como a radiação ionizante atua no óxido de porta (adaptado da referência [74])

Na etapa (1), PEL são gerados no óxido de porta durante o processo de irradiação. Como a tensão de porta é positiva, os elétrons são atraídos para esse terminal [74], enquanto que as lacunas se movem na direção do substrato [74]. Os elétrons deixam o óxido de porta em um intervalo de tempo na faixa dos picosegundos [74]. Também nessa faixa de tempo, alguns elétrons se recombinam com poucas lacunas [74]. A fração de portadores que se recombina depende da energia e do tipo de radiação [74].

A Etapa (2) mostra a lenta movimentação das lacunas no interior do óxido de porta em direção ao substrato [74].

A etapa (3) mostra as lacunas localizadas dentro do SiO_2 , na proximidade da interface Si/SiO_2 . Nessa etapa, a tensão de limiar do MOSFET cai em relação ao valor inicial [74].

A etapa (4) está relacionada com as cargas armadilhadas na interface Si/SiO_2 . Devido à fina camada de SiO_2 utilizada para confecção do óxido de porta, o efeito de armadilhamento na interface é mais acentuado nas novas tecnologias de fabricação de CIs [7]. As cargas na interface Si/SiO_2 causam aumento na inclinação de sublimiar [73], redução na mobilidade [73], diminuição da transcondutância [7], aumento de V_{Th} para o nMOSFET [7] e diminuição de V_{Th} para o pMOSFET [7].

A Figura 2.29 apresenta os fenômenos que foram descritos nas etapas (3) e (4).

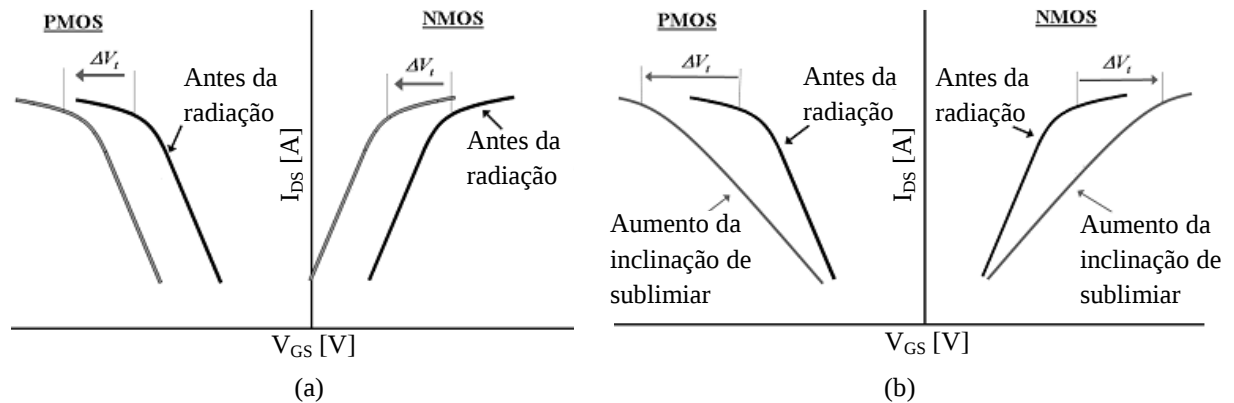


Figura 2.29 – Influência da radiação ionizante no comportamento elétrico do MOSFET quando as cargas estão armadilhadas no óxido de porta (a) e na interface Si/SiO₂ (b) (adaptado da referência [73])

Na Figura 2.29, ΔV_t significa variação de V_{Th} , NMOS significa nMOSFET e PMOS significa pMOSFET.

Quanto maior é a tensão elétrica aplicada sobre a porta, mais elétrons são coletados por esse terminal, após a geração de PEL no óxido de silício [75]. Em outras palavras, a quantidade de lacunas que não se recombinam aumenta à medida que o campo elétrico sobre o SiO₂ também aumenta [75]. A Figura 2.30 mostra a fração de lacunas que não conseguem se recombinar em função do campo elétrico aplicado no SiO₂, para vários tipos de radiação.

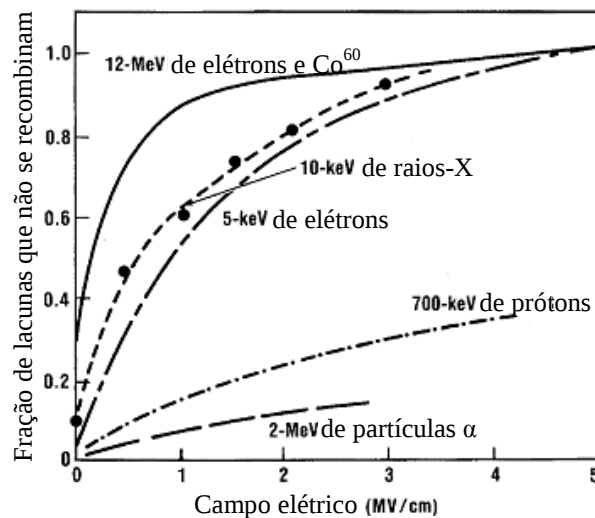


Figura 2.30 – Fração de lacunas que não se recombinaram em função do campo elétrico aplicado no SiO₂ (adaptado da referência [75])

A técnica de isolamento LOCOS (*Local Oxidation of Silicon*) é propensa à elevação da corrente de fuga em MOSFETs que sofreram com o processo de irradiação [75]. O mecanismo que propicia o aumento da corrente de fuga no dispositivo é o mesmo que já foi estudado anteriormente [75]. A diferença é que agora as cargas estão armadilhadas no óxido

de campo do dispositivo, mais especificamente na região de bico de pássaro (BBR). A Figura 2.31, que foi adaptada da referência [76], será utilizada para a explicação de como é formado o canal de condução da corrente de fuga no MOSFET.

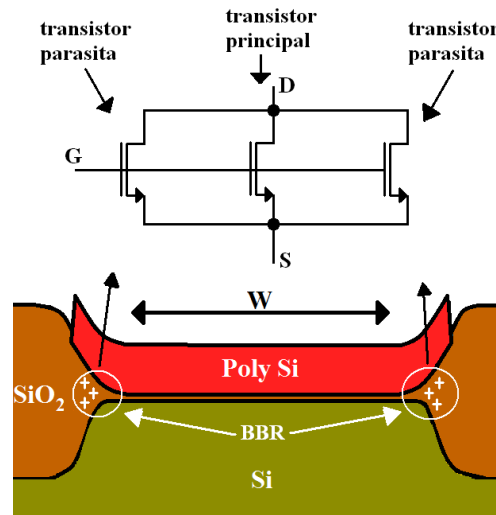


Figura 2.31 – Região de bico de pássaro que ocasiona elevação da corrente de fuga (adaptado da referência [76])

Após o processo de irradiação, as cargas que ficam armadilhadas nas BBRs podem criar duas regiões de condução parasitas no nMOSFET [75]. Essas regiões funcionam como transistores parasitários, influenciando negativamente na região sublimiar [7]. Os transistores parasitários podem originar alguma camada de inversão no silício, aumentando a corrente de fuga no nMOSFET [75], como mostra a Figura 2.32. O aumento da corrente de fuga no nMOSFET pode causar falhas em CIs [75].

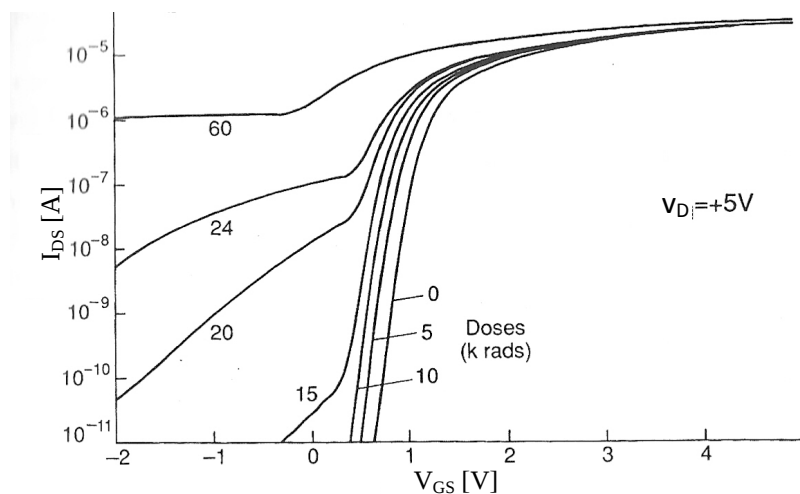


Figura 2.32 – Curvas $\log(I_{Ds})$ em função de V_{GS} de um nMOSFET irradiado várias vezes (adaptado da referência [77])

As armadilhas na interface e nas bordas dos transistores causam aumento significativo do ruído *flicker* em dispositivos CMOS [78] [79]. Esse tipo de ruído é prejudicial em circuitos de comunicação (conversores de dados e filtros), além de comprometer o funcionamento de CIs que operam em altas frequências [80].

A Figura 2.33 apresenta a densidade espectral de ruído de um nMOSFET que possui 48 nm de espessura de óxido de porta [78]. A tensão de porta foi fixada em 6 V durante a radiação [78].

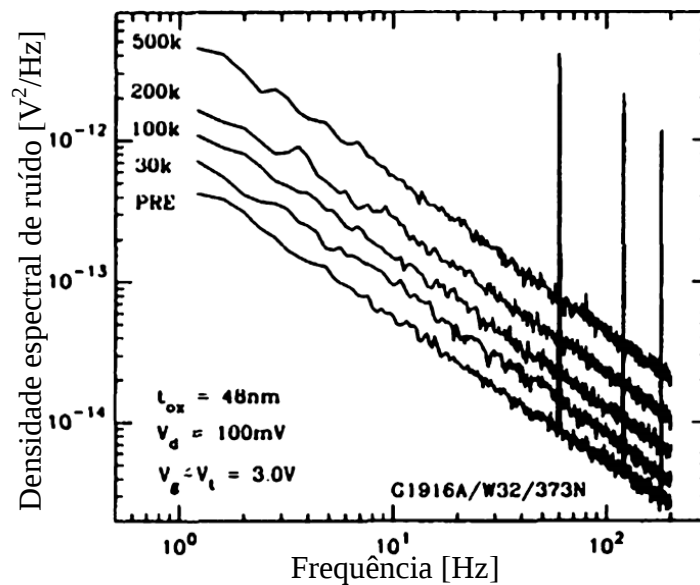


Figura 2.33 – Densidade espectral de ruído em função da frequência obtido de um nMOSFET que foi irradiado diversas vezes (adaptado da referência [78])

Analisando a Figura 2.33, observa-se que a densidade espectral de ruído aumentou em uma década após o nMOSFET ser radiado com 500 krad [78].

2.3.3.1 Técnicas Utilizadas para Redução da Corrente de Fuga em MOSFETs

Utilizando processos comerciais de fabricação, diversas técnicas têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas para aumentar a robustez de CIs à radiação [29].

Uma técnica bastante difundida para eliminar o transistor de borda está na utilização de ELTs [81]. Utilizando esses tipos de transistores as BBR são eliminadas, o que promove significativa redução na corrente de fuga dos nMOSFETs [82]. Não há necessidade de utilização da técnica ELT em pMOSFETs, pois nesses tipos de transistores não ocorre a

inversão nas BBR [82]. A Figura 2.34 apresenta um exemplo de ELT em formato de anel quadrado [25].

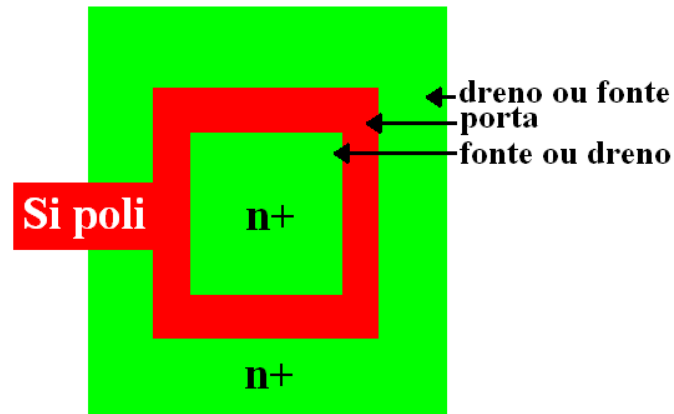


Figura 2.34 – Exemplo de um MOSFET do tipo ELT

A radiação também pode induzir um canal parasita de condução entre transistores, conectando a ilha n com a implantação n+ da fonte [82]. A inserção de anéis de guarda (implantação de dopantes p+) na interface Si/SiO₂ cria uma região que dificulta a inversão, a qual funciona como uma barreira para a corrente de fuga [82]. A utilização de ELTs cercados por anéis de guarda cria um CI comercial robusto a TID [83].

A Figura 2.35 mostra o canal parasita de condução entre transistores, além do anel de guarda para evitar a formação desse canal.

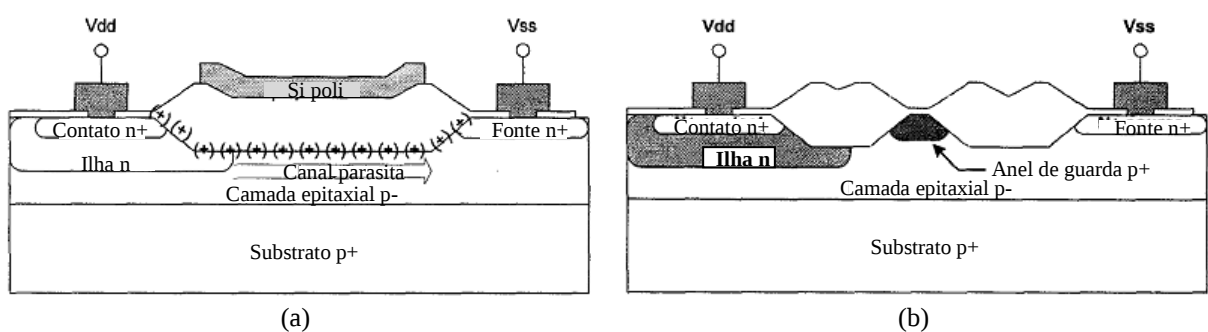


Figura 2.35 – Canal parasita de condução entre transistores (a) e inserção do anel de guarda para eliminação desse canal (b) (adaptado da referência [82])

A utilização da técnica de isolamento STI (*Shallow-Trench Isolation*) garante a eliminação das BBR [84], como mostra a Figura 2.36. Mesmo assim, a técnica STI não é suficiente para prover maior robustez à radiação aos MOSFETs, quando comparado com a isolamento LOCOS [84].

Na isolação STI convencional existem caminhos que podem originar correntes de fuga, mesmo quando o transistor não tenha passado por nenhum processo de radiação [85]. Para contornar esse problema, muitas indústrias aprimoraram a isolação STI para eliminar (ou atenuar) o problema da corrente de fuga [85]. Adicionalmente, algumas técnicas foram incorporadas a isolação STI para alcançar níveis altos de robustez à radiação [84] [86].

A Figura 2.36 apresenta o local de corte do MOSFET e a imagem de uma estrutura com isolação STI (a linha branca da figura 2.36a apresenta a região de corte).

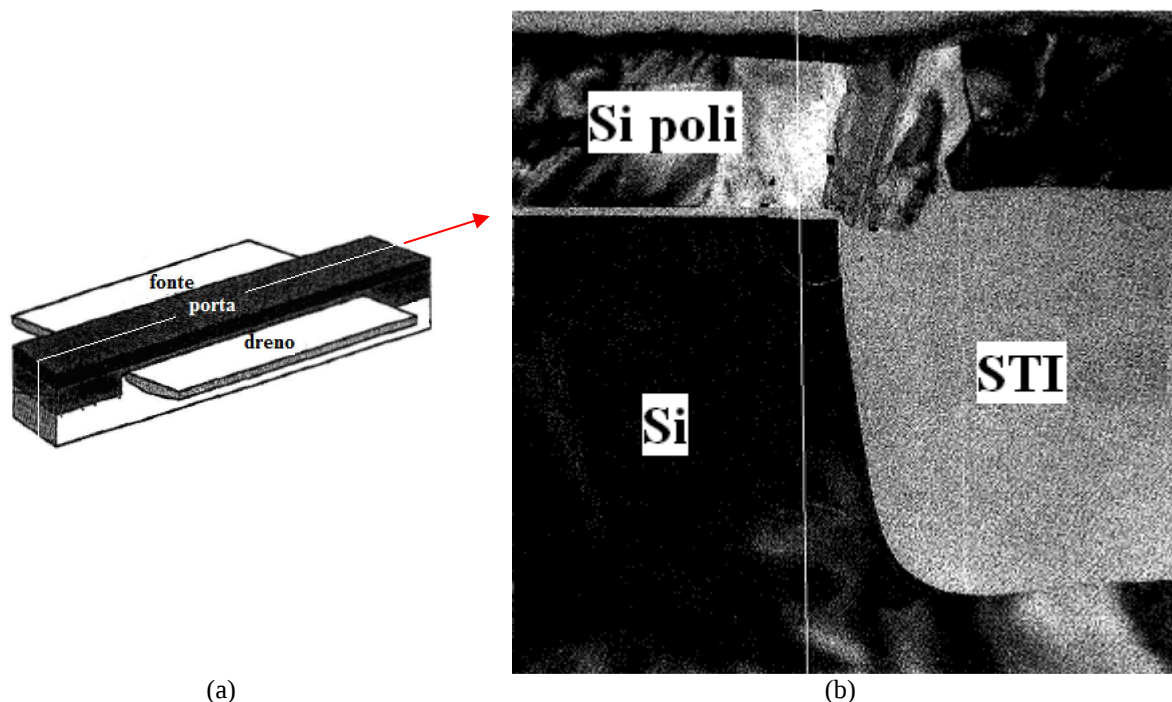


Figura 2.36 – Local de corte do MOSFET com isolação STI (a) e imagem da estrutura cortada (adaptado da referência [84])

Outra técnica bastante interessante para evitar a corrente de fuga abaixo das BBR consiste na dopagem diferenciada do silício policristalino [87]. As dopagens do silício policristalino do pMOSFET e do nMOSFET costumam ser feitas com material tipo p+ e n+, respectivamente [87]. Se o silício policristalino localizado na borda do nMOSFET (local onde está localizado a BBR) for dopado com material tipo p+, a tensão de limiar dessa região se eleva em 1 V [87]. Isso significa que a dopagem p+ do silício policristalino na borda do nMOSFET cria uma isolação entre o transistor principal e os transistores parasitários, dificultando o aparecimento da corrente de fuga que é induzida pela radiação [87].

2.3.3.2 Recozimento (*Annealing*) da Estrutura Cristalina

O recozimento da estrutura que sofreu com algum processo de irradiação reduz as cargas positivas armadilhadas no óxido de porta e na interface Si/SiO₂ [82]. A Figura 2.37, que está relacionada ao silício tipo n, mostra a fração de lacunas que não conseguem se recombinar em função do tempo de recozimento e da temperatura.

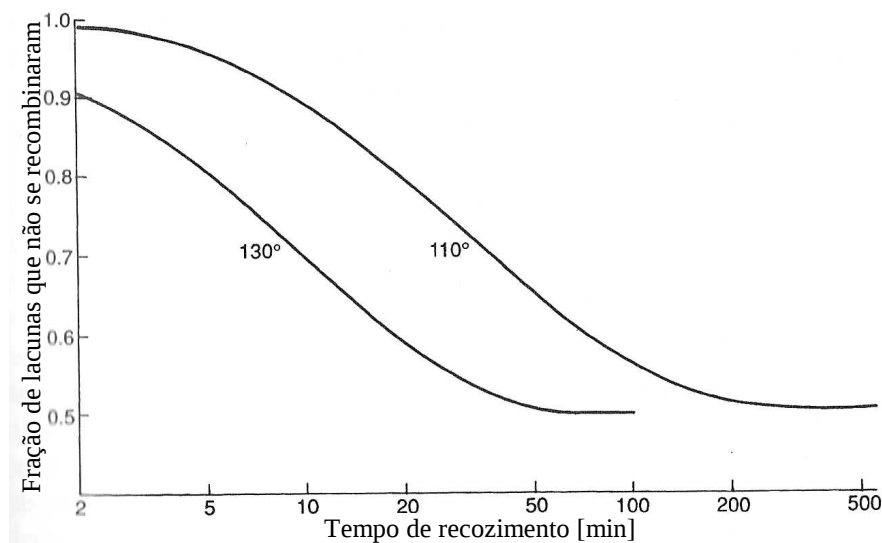


Figura 2.37 – Fração de lacunas que não conseguiram se recombinar em função do tempo e da temperatura. A estrutura em estudo é o silício, a qual foi dopada com 10^{14} cm^{-3} de fósforo (adaptado da referência [88])

A Figura 2.37 mostra que as lacunas se recombinam mais rapidamente em temperaturas mais elevadas.

2.3.4 Danos por Deslocamento

O dano por deslocamento ocorre quando um átomo é deslocado dentro de uma estrutura devido ao choque de uma partícula [75]. Um vazio é criado no local do átomo que foi deslocado, pois esse átomo passa a ocupar um local diferente dentro da estrutura [75].

Qualquer tipo de partícula pode ocasionar danos por deslocamento (elétrons, prótons, íons pesados e nêutrons) [75]. Entretanto, os nêutrons são mais influentes na geração de danos por deslocamento, pois esse tipo de partícula perde energia somente nas interações nucleares [75].

2.3.5 Radiação por Nêutrons

Os nêutrons não reagem diretamente com partículas carregadas, ou seja, os nêutrons possuem baixo poder de ionização [89]. O principal efeito das partículas neutras na matéria está relacionado aos danos por deslocamento [89]. Quando um material é atingido por um nêutron com energia cinética consideravelmente alta, uma reação de deslocamento em cadeia pode acontecer no material, ocasionando, em MOSFETs, redução no tempo de vida do dispositivo, degradação da mobilidade, mudança no perfil de difusão, entre outros [90].

Por meio de processos secundários, os nêutrons podem ocasionar defeitos no óxido de porta que se assemelham aos danos causados por raios γ [91]. Os nêutrons também podem induzir a acumulação de cargas positivas no óxido e na interface Si/SiO₂ [92].

2.3.6 Efeitos da Radiação no Capacitor MOS e Influência da Radiação nos Portadores Quentes e GIDL

A referência [73] realizou um estudo com capacitor MOS, que possui processo de fabricação comercial de 130 nm, ao qual foi irradiado com o intuito de verificar o comportamento da curva C-V. O capacitor foi polarizado com uma tensão V_G de 1,32 V durante a irradiação por raios γ . A TID acumulada pelo dispositivo foi igual a 1 Mrad e, após a irradiação, a estrutura sofreu processo de recozimento à 100 °C durante 1 semana. O capacitor MOS possui substrato de silício do tipo p e material de porta feito com silício policristalino do tipo n. A Figura 2.38 apresenta a curva C-V obtida do capacitor MOS em questão.

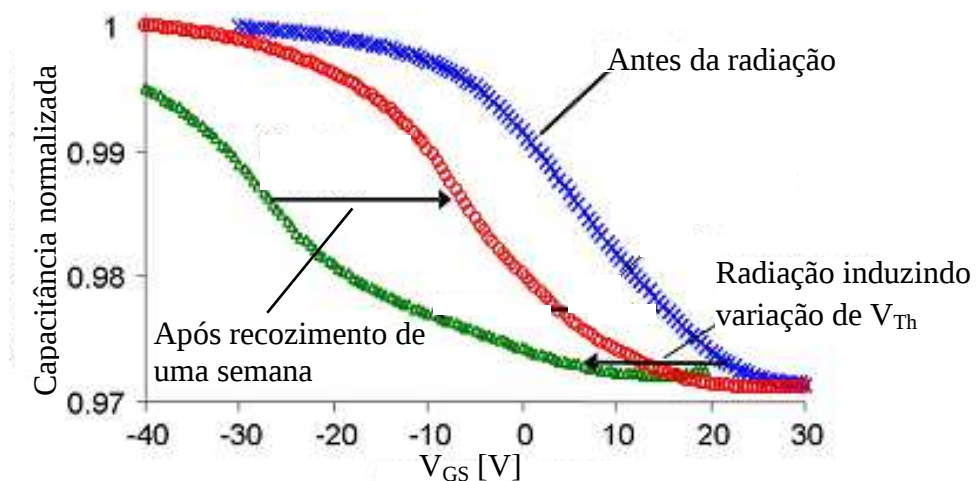


Figura 2.38 – Curva C-V de um capacitor MOS que foi irradiado com raios γ (adaptado da referência [73])

Logo após a irradiação, a curva C-V se desloca para a esquerda [72] [93], indicando o acúmulo de cargas no óxido de porta [73]. A recuperação do capacitor MOS (curva que possui círculos vermelhos) indica que alguns defeitos foram removidos do óxido ou que ocorreu algum tipo de compensação no dispositivo [73]. Como já dito anteriormente, a recuperação do dispositivo está relacionada com a temperatura e o tempo de recozimento [88] [73].

Estudos demonstraram que a degradação por portadores quentes sofre influência das cargas armadilhadas no óxido de porta [94]. Devido a esse fato, esse tipo de degradação aumenta em dispositivos que sofreram algum tipo de irradiação [95].

O fenômeno GIDL também sofre a influência da radiação [96]. A Figura 2.39 mostra que a corrente I_{DS} se desloca para a esquerda [67], após irradiação por raios-X, devido aos estados de interface e as cargas positivas armadilhadas no óxido de porta [96]. O nMOSFET da Figura 2.39 foi irradiado com dose de $0,5\text{J}/\text{cm}^2$ de raios-X. O transistor possui largura e comprimento de canal iguais a $20\text{ }\mu\text{m}$ e $0,65\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente.

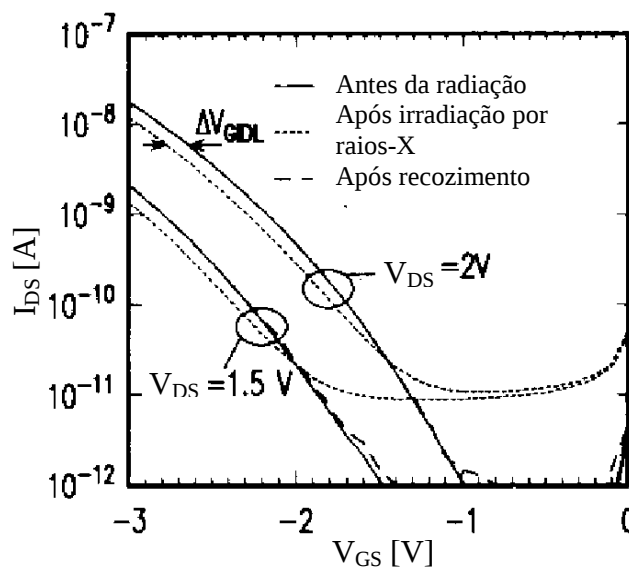


Figura 2.39 – Influência da radiação sobre a corrente I_{DS} na região onde ocorre o fenômeno GIDL (adaptado da referência [96])

Na Figura 2.39, ΔV_{GIDL} significa variação da tensão V_{GS} quando é fixada a corrente I_{DS} .

3 ESTUDO DOS MOSFETs COM GEOMETRIAS NÃO CONVENCIONAIS

Neste capítulo serão apresentados os estudos comparativos entre os MOSFETs com geometrias de porta não convencionais e os MOSFETs (retangulares) equivalentes. Os transistores com geometria de porta não convencional que serão estudados aqui são o Diamante, o Octo e o *Fish*.

3.1 Estudo Comparativo entre os Transistores Diamantes e os Seus Respectivos Transistores Convencionais Equivalentes

Nessa seção serão apresentados resultados simulados e experimentais comparativos entre os transistores Diamantes e os seus respectivos convencionais equivalentes, considerando a mesma área de porta, razão de aspecto e condições de polarização. Parâmetros como I_{DS} , g_m , R_{on} , V_{EA} , g_m/I_{DS} e A_V serão extraídos e analisados para verificar qual dispositivo, Diamante ou convencional equivalente, possui melhor desempenho elétrico.

3.1.1 Estudo Experimental Comparativo Entre os nMOSFETs Diamantes e os Seus Respectivos nMOSFETs Convencionais Equivalentes

Essa seção apresenta resultados experimentais comparativos entre os DMs e os seus respectivos CMs equivalentes [14]. O *chip* que contém os transistores utiliza processo CMOS comercial de fabricação, desenvolvida pela *On Semiconductor*, com dimensão mínima de 0,35 μm (vide Apêndice A para mais detalhes técnicos do processo de fabricação). Esse *chip* foi fabricado via MOSIS (*Metal-Oxide-Semiconductor Implementation Service*) [97], por meio do programa MEP (*MOSIS Educational Program*) [98].

A Tabela 3.1 apresenta as dimensões dos nMOSFETs em função de λ (dimensão mínima permitida pela tecnologia igual a 0,35 μm).

Tabela 3.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes presentes no *chip* que foi fabricado pela *On Semiconductor*

nMOSFET Convencional		W/L	Área [λ^2]	nMOSFET Diamante			
W [λ]	L [λ]			b [λ]	B [λ]	L _{eff} [λ]	Ângulo α
17,0	28,5	0,596	484,5	3,00	54,0	28,5	36,9°
17,0	20,0	0,850	340,0	3,00	37,0	20,0	53,1°
17,0	11,5	1,48	195,5	3,00	20,0	11,5	90,0°
17,0	7,00	2,34	119,0	3,00	11,5	7,25	126,9°
17,0	5,50	2,96	93,5	3,00	8,50	5,75	144,1°

A Figura 3.1 apresenta as curvas experimentais I_{DS} em função de V_{GT} dos DMs e CMs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV.

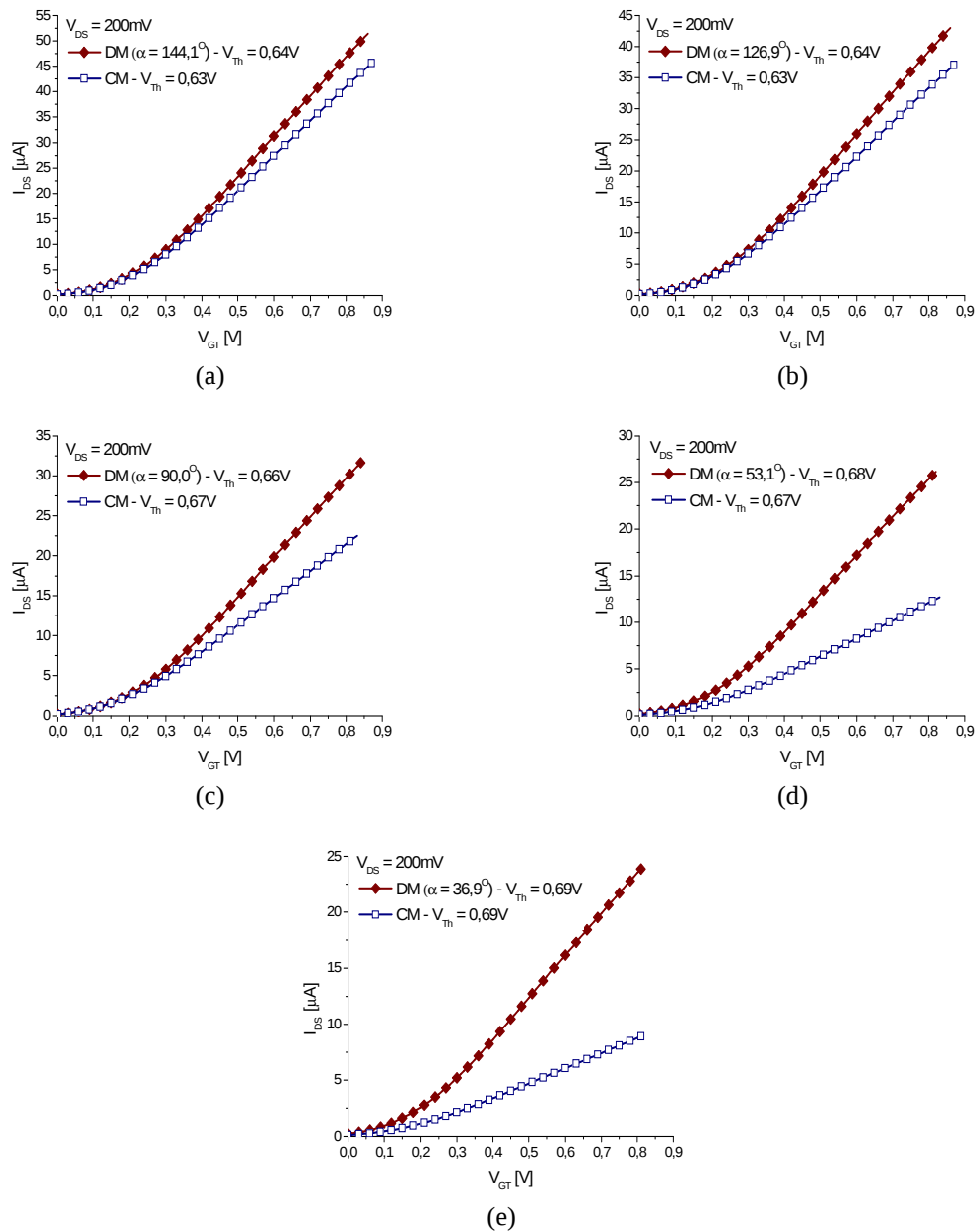


Figura 3.1 – Curvas experimentais I_{DS} em função de V_{GT} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV, para ângulo α igual a $144,1^\circ$ (a), $126,9^\circ$ (b), $90,0^\circ$ (c), $53,1^\circ$ (d) e $36,9^\circ$ (e) [14]

As tensões de limiar que foram apresentadas na Figura 3.1 foram obtidas utilizando a técnica da segunda derivada [40], para V_{DS} igual a 10 mV.

Da Figura 3.1 foram extraídas as correntes de dreno de transistores equivalentes, para V_{GT} igual a 800 mV e V_{DS} igual a 200 mV (região triodo). A Tabela 3.2 apresenta os valores de I_{DS} .

Tabela 3.2 – I_{DS} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 800$ mV e $V_{DS} = 200$ mV (região triodo) [14]

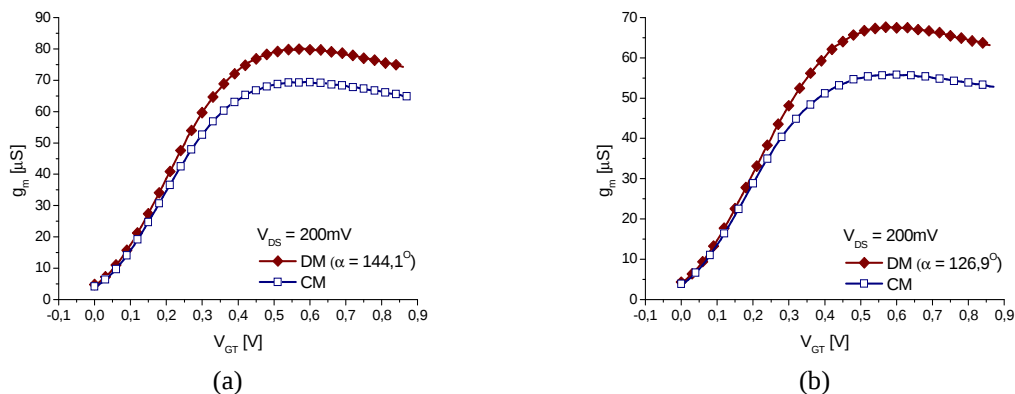
Ângulo α	DM I_{DS} [μ A]	CM I_{DS} [μ A]	I_{DS} melhoria (+) / piora (-)
144,1°	46,9	41,0	+14,4%
126,9°	39,2	33,3	+17,7%
90,0°	29,7	21,5	+38,1%
53,1°	25,4	12,1	+110,0%
36,9°	23,5	8,76	+168,0%

A Figura 3.1 mostra que os DMs possuem maiores valores de I_{DS} quando comparados aos respectivos CMs equivalentes, considerando as mesmas condições de polarização, A_G e razões W/L. Para mesmo valor de V_{GT} , a diferença entre a corrente I_{DS} de MOSFETs equivalentes aumenta à medida que o ângulo α diminui. O maior campo elétrico longitudinal do DM em relação ao CM equivalente contribuiu para a melhoria da corrente de dreno do MOSFET Diamante [14].

Analisando a Tabela 3.2, o DM com ângulo α de 144,1° melhorou em 14,4% sua corrente I_{DS} em relação ao CM equivalente. A melhoria da corrente de dreno do MOSFET Diamante se torna mais expressiva à medida que o ângulo α diminui. Para o DM com ângulo α de 36,9°, a melhoria de I_{DS} do DM em relação ao CM equivalente foi de 168%, ou seja, a corrente de dreno do MOSFET Diamante foi 2,68 vezes maior que a do MOSFET convencional.

Os resultados apresentados na Figura 3.1 e Tabela 3.2 demonstram que o DM pode substituir o CM equivalente em diversas aplicações. O MOSFET Diamante pode ser bem empregado como *driver* de corrente e como chave analógica [14].

As curvas da Figura 3.1 foram derivadas em função de V_{GT} para possibilitar o estudo da transcondutância dos MOSFETs equivalentes. A Figura 3.2 apresenta as curvas g_m em função de V_{GT} de MOSFETs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV.



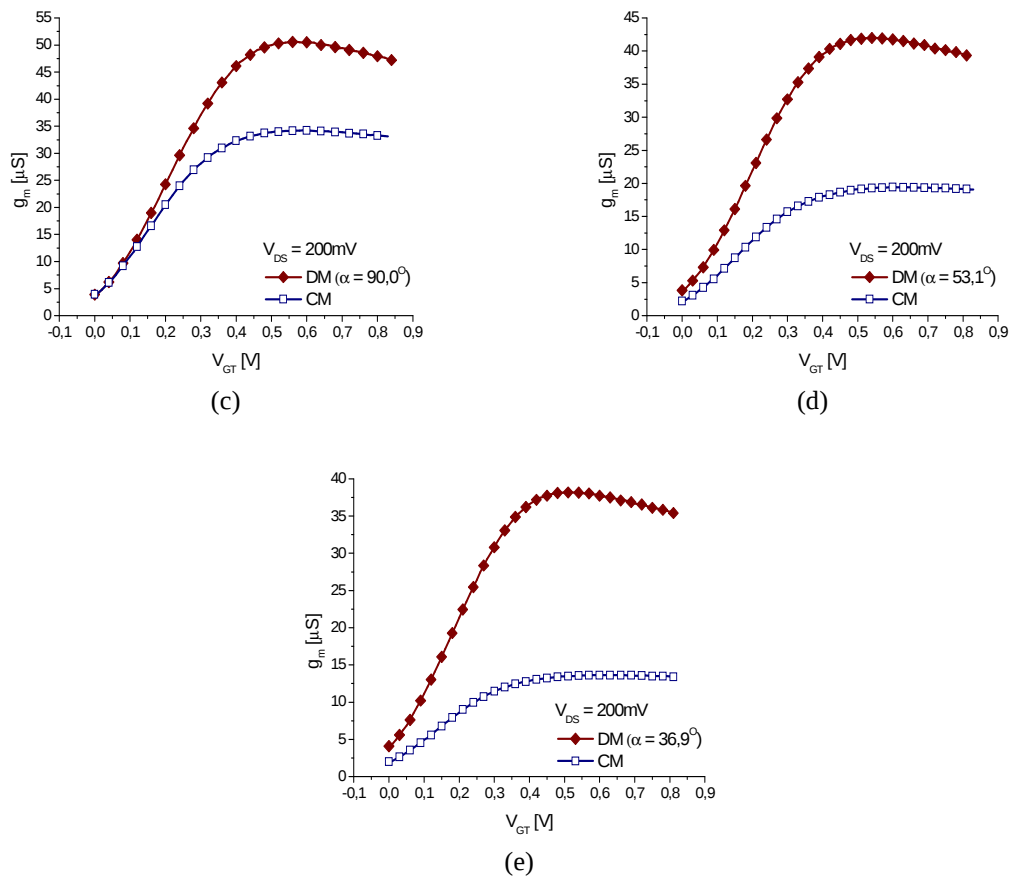


Figura 3.2 – Curvas experimentais g_m em função de V_{GT} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{DS} igual a 200 mV, para ângulo α igual a $144,1^\circ$ (a), $126,9^\circ$ (b), $90,0^\circ$ (c), $53,1^\circ$ (d) e $36,9^\circ$ (e) [14]

A Tabela 3.3 apresenta as transcondutâncias máximas de DMs e CMs equivalentes, para V_{DS} igual a 200 mV.

Tabela 3.3 – $g_{m_m\acute{a}x}$ de DMs e CMs equivalentes, para $V_{DS} = 200$ mV [14]

Ângulo α	DM	CM	$g_{m_m\acute{a}x}$ melhoria (+) / piora (-)
	$g_{m_m\acute{a}x}$ [μS]	$g_{m_m\acute{a}x}$ [μS]	
$144,1^\circ$	80,0	69,4	+15,3%
$126,9^\circ$	67,6	55,8	+21,1%
$90,0^\circ$	50,6	34,2	+48,0%
$53,1^\circ$	42,0	19,4	+116,0%
$36,9^\circ$	38,2	13,6	+181,0%

A Figura 3.2 e a Tabela 3.3 mostram que todos os DMs apresentaram maiores valores de transcondutância máxima que os respectivos CMs equivalentes, considerando as mesmas A_G , razões W/L e condições de polarização. O DM com ângulo α igual a $144,1^\circ$ apresentou melhoria de 15,3% no valor $g_{m_m\acute{a}x}$ quando comparado ao equivalente CM. Já o DM com

ângulo de $36,9^\circ$ obteve uma melhoria de 181% no valor da transcondutância máxima quando comparado ao CM equivalente.

Substituir os CMs por DMs equivalentes em CIs analógicos melhoraria o ganho de tensão do circuito [57], devido a maior transcondutância dos MOSFETs do tipo Diamante [14].

A Figura 3.3 apresenta as curvas I_{DS} em função de V_{DS} de MOSFETs equivalentes, considerando V_{GT} igual a 500 mV.

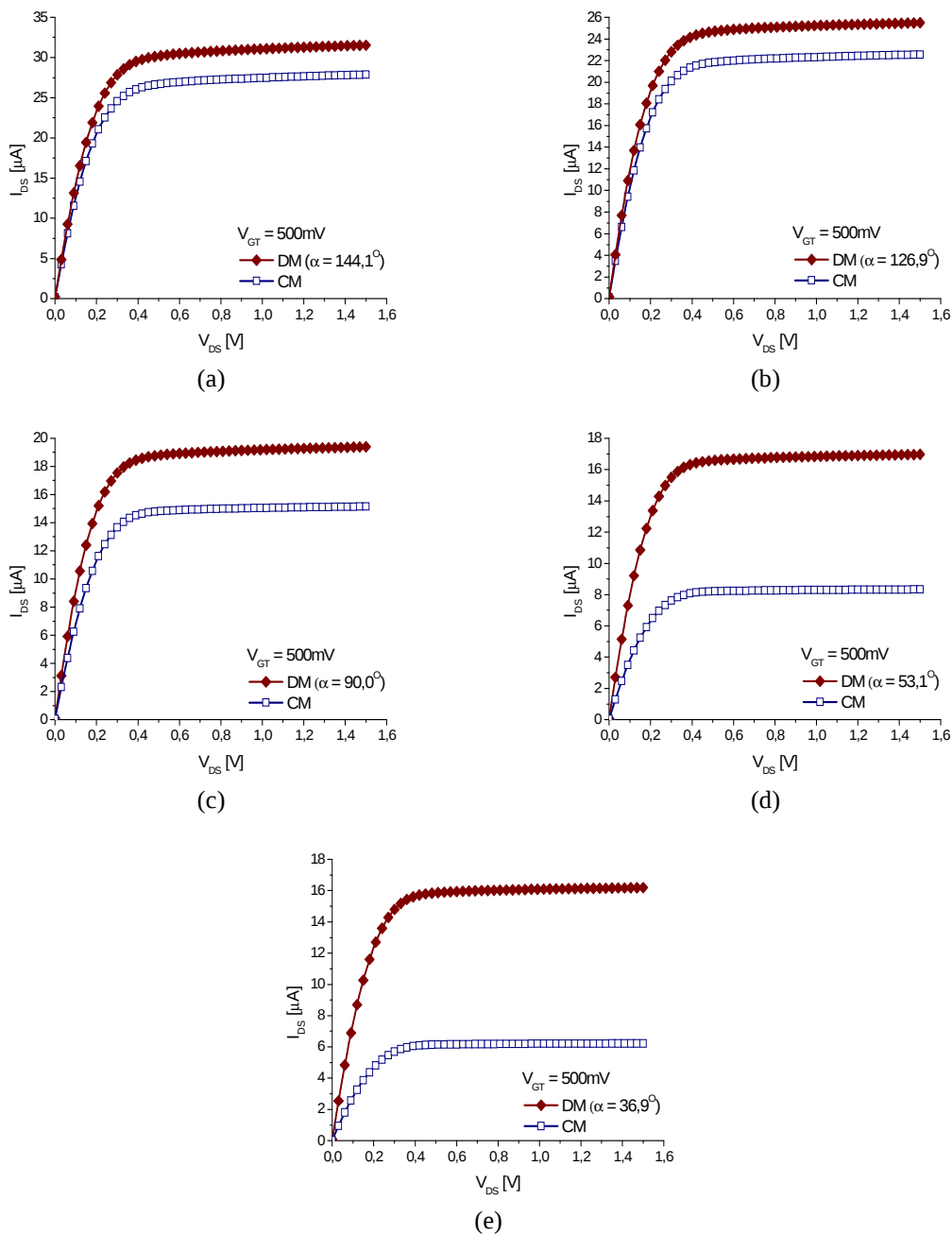


Figura 3.3 – Curvas experimentais I_{DS} em função de V_{DS} de DMs e CMs equivalentes, considerando V_{GT} igual a 500 mV, para ângulo α igual a $144,1^\circ$ (a), $126,9^\circ$ (b), $90,0^\circ$ (c), $53,1^\circ$ (d) e $36,9^\circ$ (e) [14]

As correntes de dreno na saturação (I_{DS_sat}), que foram obtidas da Figura 3.3, serão apresentadas na Tabela 3.4. Os valores de I_{DS_sat} foram obtidos para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 500 mV.

Tabela 3.4 – I_{DS_sat} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV e $V_{DS} = 1,50$ V (região de saturação) [14]

Ângulo α	DM	CM	I_{DS_sat} melhoria (+) / piora (-)
	I_{DS_sat} [μ A]	I_{DS_sat} [μ A]	
144,1°	31,6	27,9	+13,3%
126,9°	25,5	22,6	+12,8%
90,0°	19,4	15,2	+27,6%
53,1°	17,0	8,33	+104,0%
36,9°	16,2	6,23	+160,0%

Para todos os ângulos α , as correntes de dreno dos DMs foram maiores que a dos respectivos CMs equivalentes. Para o ângulo α de 36,9°, o valor de I_{DS_sat} do DM foi 160% maior que o valor obtido para o CM equivalente.

A utilização do MOSFET Diamante no lugar do MOSFET convencional pode promover significativa redução na área de porta. O valor de W do DM pode ser reduzido até que seja atingido o mesmo valor da corrente de dreno do CM equivalente.

A Tabela 3.5 apresenta as resistências entre dreno e fonte de estado ligado dos MOSFETs equivalentes, as quais foram obtidas da Figura 3.3.

Tabela 3.5 – R_{on} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV [14]

Ângulo α	DM	CM	R_{on} melhoria (+) / piora (-)
	R_{on} [$k\Omega$]	R_{on} [$k\Omega$]	
144,1°	6,47	7,37	+12,2%
126,9°	7,79	9,05	+13,9%
90,0°	10,1	13,7	+26,3%
53,1°	11,7	24,4	+52,0%
36,9°	12,4	33,2	+62,7%

O DM possui ótima característica para operar como chave [14], pois os valores de R_{on} obtidos dos DMs foram menores que os valores obtidos dos seus respectivos CMs equivalentes. O maior campo elétrico longitudinal do DM em relação ao CM equivalente proporcionou melhorias de até 62,7% no valor de R_{on} , como foi o caso do DM com ângulo α igual a 36,9° comparado ao seu equivalente CM.

A Tabela 3.6 apresenta as tensões Early dos MOSFETs equivalentes, aos quais foram obtidas da Figura 3.3.

Tabela 3.6 – V_{EA} de DMs e CMs equivalentes, para $V_{GT} = 500$ mV [14]

Ângulo α	DM V_{EA} [V]	CM V_{EA} [V]	V_{EA} melhoria (+) / piora (-)
144,1°	28,6	28,5	+0,35%
126,9°	40,5	39,9	+1,5%
90,0°	39,2	59,5	-34,1%
53,1°	57,1	99,7	-42,7%
36,9°	66,6	110	-39,5%

O alto campo elétrico longitudinal dos DMs com ângulo α abaixo de 126,9° prejudicou o desempenho desses transistores quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. O CM equivalente ao DM com ângulo α igual a 53,1° obteve desempenho 42,7% melhor.

3.1.2 Estudo Comparativo da Resposta em Frequência entre os nMOSFETs Diamantes e os Seus Respectivos nMOSFETs Convencionais Equivalentes

Algumas simulações foram realizadas para obtenção da razão g_m/I_{DS} , V_{EA} e A_V de transistores equivalentes [57].

Os transistores simulados são do tipo SOI nMOSFET e possuem espessura do óxido de porta, do filme de silício e do óxido enterrado iguais a 2,5 nm, 100 nm e 400 nm, respectivamente. A dopagem do dreno e da fonte foi feita com fósforo, com concentração de $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e o canal foi dopado com boro, com concentração de $5,5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Foram utilizados os seguintes modelos no *Sentaurus Device* [99] para as simulações numéricas tridimensionais (SN3D):

- PhuMob*. O modelo de mobilidade proposto por Klaassen unifica a descrição da mobilidade dos portadores majoritários e minoritários [99].
- Enormal*. O alto campo elétrico vertical força os portadores a interagir fortemente com a interface Si/SiO₂, o que ocasiona degradação da mobilidade do MOSFET [99].
- SRH(DopingDep)*. Modelo de geração e recombinação de portadores que leva em consideração a dependência dos elementos dopantes [99]. Esse modelo utiliza a teoria Shockley-Read-Hall [99].
- BandGapNarrow(OldSlotboom)*. Modelo de faixa de energia proposto por Slotboom [99].
- Avalanche(CarrierTempDrive)*. Modelo de ionização por impacto que está relacionada com a temperatura do portador [99].

A Tabela 3.7 apresenta a dimensão do SOI nMOSFET Diamante (DSM) e do SOI nMOSFET Convencional que foram simulados no *Sentaurus Device*.

Tabela 3.7 – Dimensões do CSM e do DSM simulados no *Sentaurus Device* [57]

	W [μm]	L _{eff} [μm]	W/L	B [μm]	b [μm]	A _G [μm^2]
CSM	5,95	4,00	1,48	-	-	23,9
DSM ($\alpha = 90^\circ$)	5,95	4,00	1,48	7,00	1,05	23,9

A Figura 3.4 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ dos transistores referenciados na Tabela 3.7.

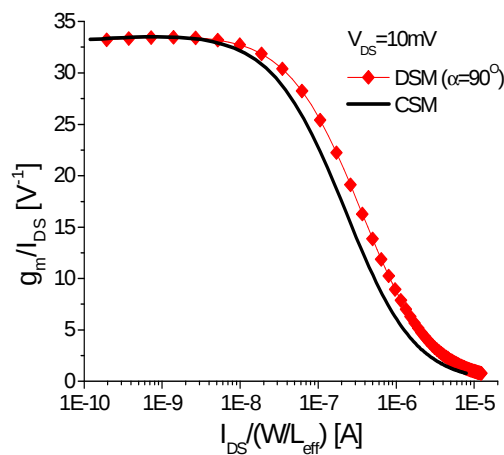


Figura 3.4 – Curva simulada g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ de DSM e CSM equivalentes, para V_{DS} igual a 10 mV [57]

A Figura 3.4 mostra que as razões g_m/I_{DS} dos SOI nMOSFETs equivalentes são praticamente iguais nas inversões fraca e forte. Entretanto, na inversão moderada o DSM possui maior razão g_m/I_{DS} quando comparado ao CSM equivalente.

A Tabela 3.8 apresenta as razões g_m/I_{DS} , as tensões Early e os ganhos de tensão intrínsecos dos SOI nMOSFETs apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.8 – g_m/I_{DS} para $I_{DS}/(W/L_{eff}) = 130 \text{ nA}$, V_{EA} e A_V do DSM de 90° e CSM equivalente [57]

	$g_m/I_{DS} [\text{V}^{-1}]$	$V_{EA} [\text{V}]$	$A_V = (g_m/I_{DS}) \cdot V_{EA}$
CSM	20,8	55,5	1154
DSM ($\alpha = 90^\circ$)	23,9 (+14,9%)	51,2 (-7,7%)	1224 (+6,1%)

Observação: O sinal (+) significa melhoria e o (-) piora.

Analisando a Tabela 3.8, o DSM possui maior ganho de tensão intrínseco quando comparado ao equivalente CSM, pois a razão g_m/I_{DS} do DSM é maior que a do CSM. A tensão Early do DSM foi prejudicada devido ao campo elétrico longitudinal [14]. Baseado

nesta análise, o MOSFET do tipo Diamante pode ser usado para melhorar o desempenho de circuitos analógicos [57].

Os resultados obtidos por meio das simulações motivou o estudo experimental da resposta em frequência de DMs e CMs equivalentes. A Figura 3.5 apresenta um amplificador fonte comum que foi utilizado para o levantamento da resposta em frequência de alguns MOSFETs da Tabela 3.1.

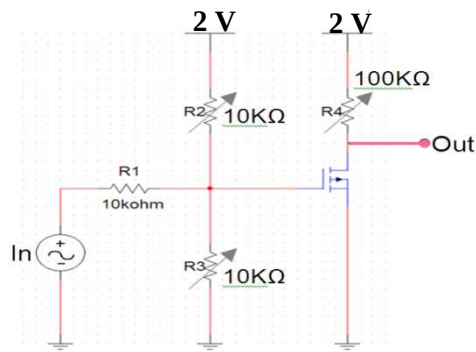


Figura 3.5 – Amplificador fonte comum [57]

Na Figura 3.5, o valor de R_4 foi fixado em $83,3 \text{ k}\Omega$ [57], enquanto que os outros potenciômetros foram ajustados para fixar a mesma corrente I_{DS} entre DMs e CMs equivalentes.

A Tabela 3.9 apresenta as tensões de polarização em corrente contínua do amplificador fonte comum para obtenção do ganho de tensão em baixa frequência.

Tabela 3.9 – Tensões de polarização em corrente contínua do amplificador fonte comum

	$I_{DS} [\mu A]$	$V_{GS} [V]$	$V_{DS} [V]$	$R_4 [k\Omega]$
DM ($\alpha = 53,1^\circ$)	9,60	1,03	1,20	83,3
CM	9,60	1,16	1,20	83,3
DM ($\alpha = 36,9^\circ$)	7,08	0,980	1,41	83,3
CM	7,08	1,15	1,41	83,3

Considerando mesmo valor de V_{DS} entre transistores equivalentes, a Tabela 3.9 mostra que o DM pode operar com tensão V_{GS} menor que a do respectivo CM equivalente para manter o mesmo valor de I_{DS} . Isso significa que o campo elétrico vertical do DM é menor que do CM, considerando V_{DS} e I_{DS} iguais entre transistores equivalentes.

A Figura 3.6 apresenta as curvas do ganho de tensão do amplificador (A_{VO}) em função da frequência (f). Essas curvas foram medidas e levantadas para os DMs com ângulos α de $36,9^\circ$ e $53,1^\circ$ e para os respectivos CMs equivalentes.

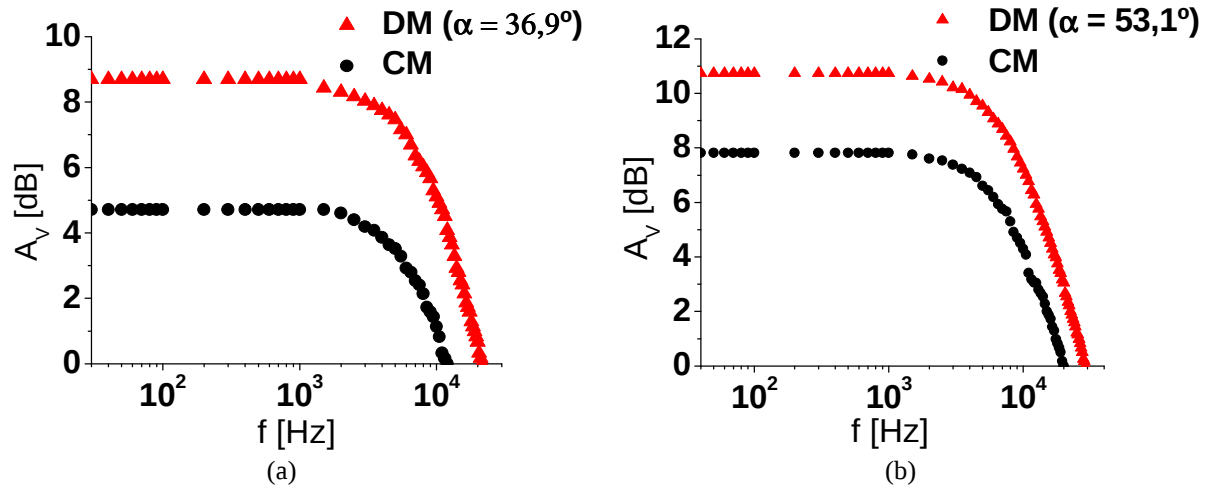


Figura 3.6 – Curvas experimentais A_v em função de f de DMs e CMs equivalentes, para α igual a $36,9^\circ$ (a) e $53,1^\circ$ (b) [57]

A Tabela 3.10 apresenta os ganhos de tensão máximos e as frequências de ganho de tensão unitário dos amplificadores.

Tabela 3.10 – A_{VO} e f_T do DM de $36,9^\circ$ e $53,1^\circ$ e dos seus respectivos CMs equivalentes

Transistor	A_{VO} [dB]	Melhoria do DM	f_T [kHz]	Melhoria do DM
DM de $53,1^\circ$	11,0	37,5%	29,0	45,0%
CM equivalente	8,00		20,0	
DM de $36,9^\circ$	9,00	80,0%	21,0	90,9%
CM equivalente	5,00		11,0	

Os ganhos de tensão e as frequências de ganho de tensão unitário dos DMs foram maiores quando comparados aos respectivos CMs equivalentes, pois os MOSFETs Diamantes possuem maior transcondutância [57]. Os ganhos de tensão dos DMs com ângulo α de $53,1^\circ$ e de $36,9^\circ$ foram, respectivamente, 37,5% e 80,0% maiores quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. Já a melhoria de f_T dos DMs com ângulo α de $53,1^\circ$ e de $36,9^\circ$ foram iguais a 45,0% e 90,9%, quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. A pior tensão Early dos DMs não influenciou no desempenho desses transistores.

3.1.3 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o MOSFET Diamante e o MOSFET Convencional

A Tabela 3.11 apresenta um resumo comparativo do desempenho de todos os parâmetros elétricos que foram estudados nos DMs e CMs.

Tabela 3.11 – Tabela comparativa de desempenho dos parâmetros elétricos do DM e do CM (adaptada da referência [14])

Parâmetro	MOSFET Diamante	MOSFET Convencional
I_{DS}	+	-
g_m	+	-
g_m/I_{DS}	+	-
V_{EA}	+ (para $\alpha \geq 126,9^\circ$) - (para $\alpha < 126,9^\circ$)	- +
R_{on}	+	-
A_{VO}	+	-
f_T	+	-

Observação: Os sinais (+) e (-) significam melhor e pior desempenho, respectivamente.

Analisando a Tabela 3.11, resultados experimentais mostraram que os DMs apresentam melhor desempenho que os respectivos CMs equivalentes em termos de I_{DS} , g_m , razão g_m/I_{DS} , R_{on} , A_{VO} e f_T devido ao maior campo elétrico longitudinal resultante no canal do DM. A única desvantagem do DM está no parâmetro V_{EA} para ângulo α menor que $126,9^\circ$.

3.2 Estudo Comparativo entre os Transistores do Tipo Octo e os Seus Respectivos Transistores Diamantes e Convencionais Equivalentes

Nessa seção serão estudados os transistores Octos, Diamantes e convencionais equivalentes. Diversos parâmetros elétricos serão obtidos para verificar qual transistor apresenta melhor desempenho. Vale a pena lembrar que o transistor Octo é criado quando os bicos do transistor Diamante são cortados, ou seja, nesse caso transistores equivalentes não possuem mesma área de porta.

3.2.1 Estudos Simulados Comparativos entre o SOI nMOSFET Octo, o SOI nMOSFET Diamante e o SOI nMOSFET Convencional

Três estruturas SOI nMOSFETs parcialmente depletadas (PD) foram simuladas no *Sentaurus Device* [59] com os modelos que já foram citados na seção 3.1.2.

Os transistores foram desenhados no *Sentaurus Structure Editor* [100] com as seguintes características: espessura do óxido de porta, do óxido enterrado e do filme de silício iguais a 2,5 nm, 400 nm e 100 nm, respectivamente. A dopagem do dreno e da fonte foi feita com fósforo, com concentração de $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e o canal foi dopado com boro, com concentração de $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

A Tabela 3.12 apresenta as dimensões do CSM, do DSM e do OSM (SOI nMOSFET Octo) que foram simulado no *Sentaurus Device*.

Tabela 3.12 – Dimensões do CSM, do DSM (α igual a 90°) e do OSM [59]

	W [μm]	L _{eff} [μm]	W/L	B [μm]	b [μm]	A _G [μm^2]	Ganho A _G
CSM	5,95	4,02	1,48	-	-	23,9	-
DSM	5,95	4,02	1,48	7,00	1,05	23,9	-
OSM	5,95	3,12	1,91	4,02	1,05	19,5	18,5%

A Tabela 3.12 mostra uma informação importante sobre a área de porta dos dispositivos. Como os bicos do DSM são cortados para obtenção do OSM, a área do transistor octogonal é 18,5% menor que a área do CSM e do DSM.

A Figura 3.7 apresenta as curvas características dos transistores da Tabela 3.12. As tensões de limiar do DSM (V_{Th_DSM}), do OSM (V_{Th_OSM}) e do CSM (V_{Th_CSM}) foram obtidas utilizando a técnica da segunda derivada [40], para V_{DS} igual a 10 mV.

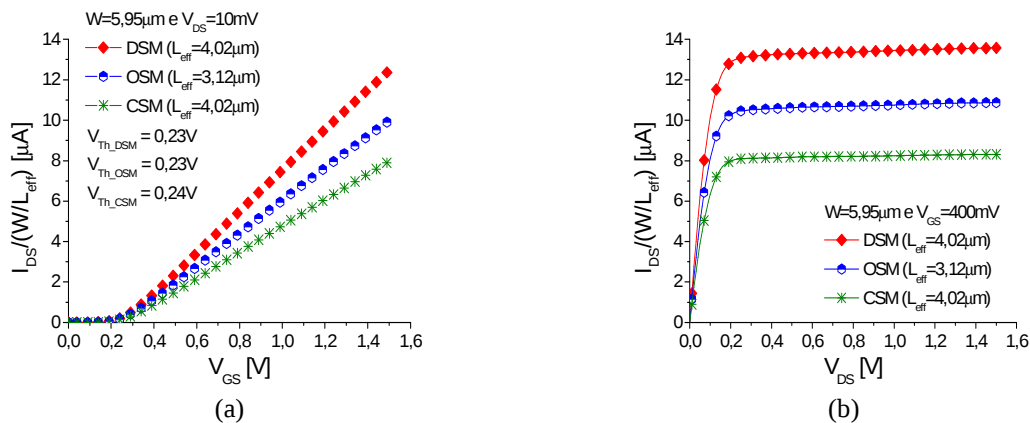


Figura 3.7 – Curvas simuladas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} (a) e V_{DS} (b) do OSM, DSM e CSM [59]

A Tabela 3.13 apresenta os parâmetros elétricos que foram obtidos da Figura 3.7.

Tabela 3.13 – $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$, $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$, V_{EA} e R_{on} dos dispositivos CSM, DSM e OSM [59]

Transistor	$I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$ [μA]	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$ [μS]	V_{EA} [V]	R_{on} [k Ω]
CSM	8,17	6,59	55,5	13,3
DSM	13,3 (+63%)	10,3 (+56%)	51,2 (-7,7%)	8,38 (+37%)
OSM	10,6 (+30%)	8,27 (+26%)	45,1 (-19%)	10,5 (+21%)

Observação: O sinal (+) significa melhor desempenho, enquanto que o sinal (-) significa pior desempenho.

Devido ao maior comprimento efetivo de canal, o DSM apresenta melhor desempenho em relação à $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$, $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$ e R_{on} , quando comparado ao OSM e ao CSM.

Mesmo assim, o OSM é uma ótima alternativa para substituir o CSM, pois o dispositivo octogonal associa redução de 18,5% na área de porta com melhor desempenho em termos de $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$ (30%), $g_{m_máx}/(W/L_{eff})$ (26%) e R_{on} (21%) [59]. A tensão Early do OSM reduziu em 19% quando comparado ao CSM equivalente, devido ao alto campo elétrico longitudinal da estrutura octogonal.

3.2.2 Estudo Experimental Comparativo entre os MOSFETs Octos, o MOSFET Diamante e o MOSFET Convencional

A Tabela 3.14 apresenta as dimensões dos MOSFETs que foram fabricados pela *On Semiconductor* com tecnologia de 0,35 μm (vide Apêndice A para mais detalhes técnicos do processo de fabricação).

Tabela 3.14 – Dimensão do CM, do DM (α igual a $36,9^\circ$), do OM1, do OM2 e do OM3 fabricados pela *On Semiconductor* [59]

	W [μm]	L_{eff} [μm]	W/L	B [μm]	b [μm]	A_G [μm^2]	Ganho A_G
CM	5,95	9,98	0,596	-	-	59,4	-
DM	5,95	9,98	0,596	18,9	1,05	59,4	-
OM1	5,95	8,75	0,681	14,4	1,05	55,9	5,89%
OM2	5,95	7,10	0,838	9,98	1,05	46,1	22,4%
OM3	5,95	4,76	1,25	5,60	1,05	29,9	49,7%

Os bicos do DM podem ser cortados em diferentes pontos, originando transistores octogonais com diferentes comprimentos B. Por esse motivo que existe três transistores octogonais (OM1, OM2 e OM3) associados ao DM com ângulo α igual $36,9^\circ$. A Figura 3.8 apresenta as curvas características dos transistores da Tabela 3.14.

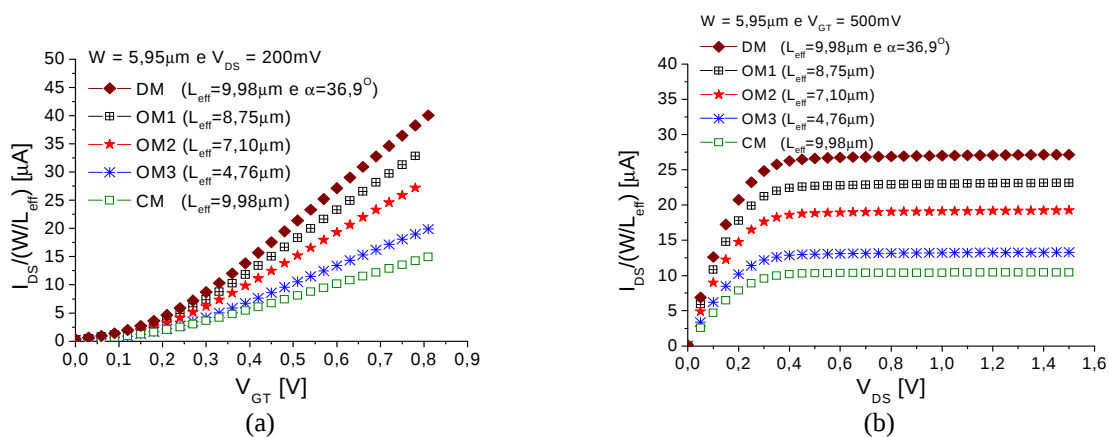


Figura 3.8 – Curvas experimentais $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GT} (a) e V_{DS} (b) do OM1, do OM2, do OM3, do DM e do CM [59]

Os resultados experimentais medidos apresentaram as mesmas tendências observadas nas simulações [59].

3.2.3 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o SOI MOSFET Octo, Diamante e Convencional (Simulação)

A Tabela 3.15 apresenta um resumo comparativo do desempenho dos parâmetros elétricos e geométricos que foram estudados nos OSM, DSM e CSM.

Tabela 3.15 – Tabela comparativa do desempenho dos parâmetros elétricos e geométricos do OSM, DSM e CSM

Parâmetro	SOI MOSFET Octo	SOI MOSFET Diamante	SOI MOSFET Convencional
$I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$	+	+	-
$g_{m_máx}/(W/L_{eff})$	+	+	-
V_{EA}	-	-	+
R_{on}	+	+	-
A_G	+	-	-

Observação: Os sinais (+) e (-) significam melhor e pior desempenho, respectivamente.

Devido ao maior campo elétrico longitudinal resultante no OSM em relação aos outros transistores estudados, o transistor octogonal apresenta melhor desempenho em termos de $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$, $g_{m_máx}/(W/L_{eff})$ e R_{on} , quando comparado ao CSM equivalente. O OSM consegue melhor desempenho elétrico ocupando uma área menor de silício, quando comparado ao equivalente CSM.

3.3 Estudo Comparativo entre os SOI nMOSFETs do Tipo *Fish* e o Respectivo Transistor Convencional Equivalente

Nessa seção serão efetuados estudos simulados comparativos entre os SOI nMOSFETs do tipo *Fish* e o convencional equivalente, considerando as mesmas áreas de porta e condições de polarização. Diversos parâmetros elétricos serão obtidos para verificar qual transistor apresenta melhor desempenho. No final da seção serão apresentados diversos cortes longitudinais que foram feitos no *Fish* com ângulo α de 90° e convencional equivalente, para obtenção do campo elétrico longitudinal de cada dispositivo.

3.3.1 Estudos Simulados Comparativos entre os SOI nMOSFETs do Tipo *Fish* e o Respetivo SOI nMOSFET Convencional Equivalente

Quatro dispositivos SOI nMOSFETs PD foram desenhados no *Sentaurus Structure Editor* [100] para posterior SN3D no *Sentaurus Device* [99]. Um transistor é do tipo CSM, enquanto que os outros três são do tipo FSM com diferentes ângulos α .

Esses SOI nMOSFETs possuem algumas características em comum que serão descritas nesse parágrafo. As espessuras do óxido de porta, do óxido enterrado e do filme de silício são iguais a 2,5 nm, 400 nm e 100 nm, respectivamente. A dopagem do dreno e da fonte foi feita com fósforo, com concentração de $1.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e o canal foi dopado com boro, com concentração de $5,5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Os modelos utilizados nas simulações executadas no *Sentaurus Device* foram citados na seção 3.1.2.

A Tabela 3.16 apresenta as dimensões dos SOI nMOSFETs utilizados no estudo comparativo.

Tabela 3.16 – Dimensões dos FSMs e CSM utilizados nas SN3D [61]

Transistor	W [μm]	L [μm]	L _{eff} [μm]	W/L _{eff}	A _G [μm^2]
CSM	6,00	1,00	1,00	6,00	6,00
FSM 135°	6,00	1,00	1,08	5,56	6,00
FSM 90°	6,00	1,00	1,41	4,26	6,00
FSM 45°	6,00	1,00	2,61	2,30	6,00

A Figura 3.9 apresenta a curva $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} dos dispositivos da Tabela 3.16.

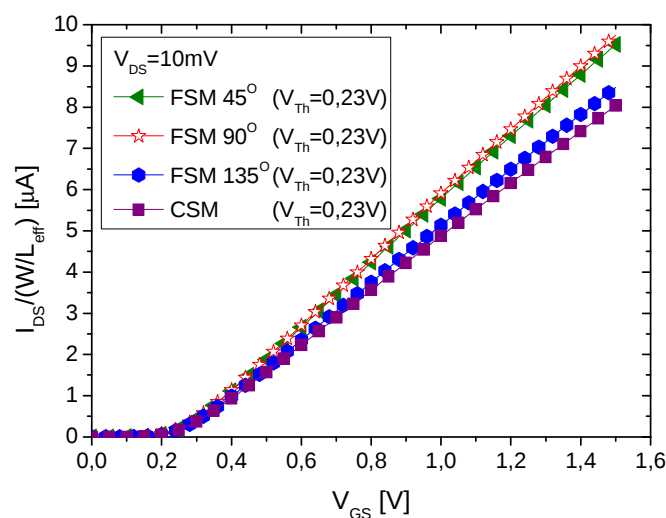


Figura 3.9 – Curvas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]

As tensões de limiar que foram apresentadas na Figura 3.9 foram obtidas utilizando a técnica da segunda derivada [40], para V_{DS} igual a 10 mV. Os valores de V_{Th} foram iguais para todos os dispositivos simulados.

A Tabela 3.17 apresenta os valores de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ dos diferentes SOI nMOSFETs estudados, bem como os demais parâmetros que foram extraídos e estudados de outras curvas que ainda serão apresentadas.

Tabela 3.17 – Parâmetros elétricos dos FSMs e do CSM equivalente [61]

Transistor	(a) I_{DS}/f_g [μA]	(b) S [mV/déc]	(c) I_{off}/f_g [pA]	(d) I_{on}/f_g [μA]	(e) I_{on}/I_{off} [10^4]	(f) $g_{m,max}/f_g$ [μS]
	$V_{DS}=10mV$ $V_{GS}=1V$	$V_{DS}=10mV$	$V_{DS}=10mV$ $V_{GS}=0V$	$V_{DS}=10mV$ $V_{GS}=1,5V$	$V_{DS}=10mV$	$V_{DS}=10mV$
CSM	4,87	70,1	94,6	8,04	8,50	6,66
FSM 135°	5,14 (+5,5%)	70,1 (0,0%)	102 (-7,8%)	8,48 (+5,4%)	8,31 (-2,2%)	7,01 (+5,3%)
FSM 90°	5,91 (+21,4%)	70,0 (+0,14%)	117 (-23,7%)	9,75 (+21,3%)	8,33 (-2,0%)	8,06 (+21,0%)
FSM 45°	5,79 (+18,9%)	70,2 (-0,14%)	116 (-22,6%)	9,52 (+18,4%)	8,21 (-3,4%)	7,89 (+18,5%)
Transistor	(g) g_m/I_{DS} [V^{-1}]	(h) $I_{DS,sat}/f_g$ [μA]	(i) R_{on} [k Ω]	(j) V_{EA} [V]	(k) $A_V=(g_m/I_{DS}).V_{EA}$	(l) $f_T=g_m/2.\pi.W.L.C_{ox}$ [GHz]
	$V_{DS}=10mV$ $I_{DS}/f_g=200nA$	$V_{DS}=1V$ $V_{GS}=0,4V$	$V_{GS}=0,4V$	$V_{GS}=0,4V$		
CSM	17,7	9,35	12,8	17,5	309,7	76,8
FSM 135°	18,2 (+2,8%)	9,75 (+4,3%)	12,1 (+5,47%)	22,0 (+25,7%)	400,4 (+29,3%)	80,9 (+5,3%)
FSM 90°	19,3 (+9,0%)	11,3 (+20,9%)	10,5 (+18,0%)	21,6 (+23,4%)	416,9 (+34,6%)	93,0 (+21,1%)
FSM 45°	19,2 (+8,4%)	11,2 (+19,8%)	10,7 (+16,4%)	23,8 (+36,0%)	457,0 (+47,9%)	91,0 (+18,5%)

Observação: O fator geométrico (f_g) é igual a W/L_{eff} . Os sinais (+) e (-) significam melhor e pior desempenho, respectivamente.

Analisando a Figura 3.9 e os resultados da Tabela 3.16, coluna (a), é perceptível que todos os FSMs tiveram melhor desempenho que o CSM equivalente para $I_{DS}/(W/L_{eff})$. O FSM com ângulo α de 90° obteve maior $I_{DS}/(W/L_{eff})$ devido ao maior campo elétrico longitudinal resultante [61], já que o valor de $\vec{E}_T$ se reduz para ângulos α maiores ou menores que 90° [61], devido a menor interação de $\vec{E}_1$ com $\vec{E}_2$. O valor de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ para o FSM com ângulo α de 90° foi 21,4% maior quando comparado ao valor obtido do CSM equivalente.

A Figura 3.10 apresenta a curva $\log[I_{DS}/(W/L_{eff})]$ em função de V_{GS} , a qual será utilizada para obtenção de S , I_{off}/f_g , I_{on}/f_g e razão I_{on}/I_{off} .

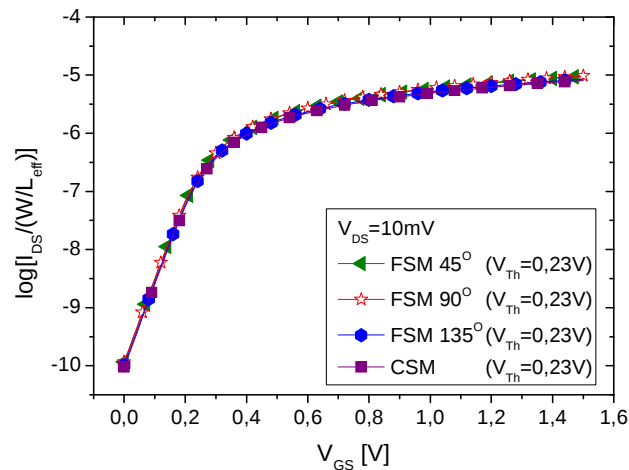


Figura 3.10 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L_{eff})]$ em função de V_{GS} dos FSMs e do CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]

A geometria do FSM não causa nenhuma degradação ou melhoria na inclinação de sublimiar [61], como pode ser observado pela Tabela 3.16, coluna b. Todos os valores de S foram de aproximadamente 70,0 mV/déc para todos os dispositivos estudados [61].

As colunas c, d e e da Tabela 3.17 serão utilizadas para seguinte análise. O FSM com α de 90° apresenta melhor I_{on}/f_g (melhoria de 21,3%) e pior I_{off}/f_g (piora de 23,7%) [61], quando comparado ao CSM equivalente. A razão W/L_{eff} contribuiu para a elevação das correntes de estado desligado dos FSMs. As razões I_{on}/I_{off} de todos os FSMs ficaram um pouco prejudicadas devido à razão W/L_{eff} .

A Figura 3.11 apresenta as curvas $g_m/(W/L_{eff})$ em função de V_{GS} .

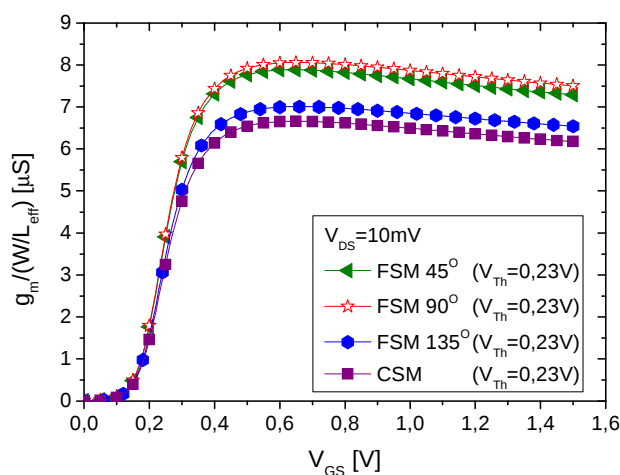


Figura 3.11 – Curvas g_m em função de V_{GS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]

Analisando a Tabela 3.17, coluna f, o FSM com ângulo α de 90° obteve melhor desempenho para $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$ (melhoria de 21% em relação ao CSM equivalente) pelo mesmo motivo que já foi descrito para $I_{DS}/(W/L_{eff})$ [61]. Por essa razão, o FSM será muito bem empregado em circuitos analógicos para aumentar A_{VO} e f_T [61], como foi observado no MOSFET do tipo Diamante.

A Figura 3.12 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$.

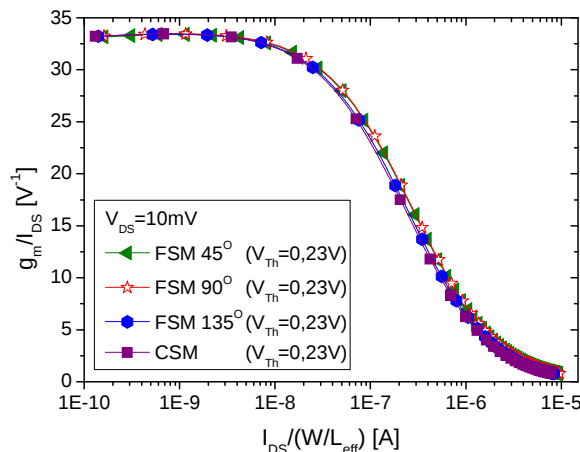


Figura 3.12 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L_{eff})$ dos FSMs e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 10 mV [61]

A Tabela 3.17, coluna g, mostra os resultados de g_m/I_{DS} com os transistores operando na inversão moderada ($I_{DS}/(W/L_{eff})$ igual a 200 nA). O FSM com ângulo α de 90° obteve desempenho 9% melhor que o equivalente CSM. Como já foi dito anteriormente, o FSM será muito bem empregado em circuitos analógicos para aumentar A_V e f_T .

A Figura 3.13 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{DS} .

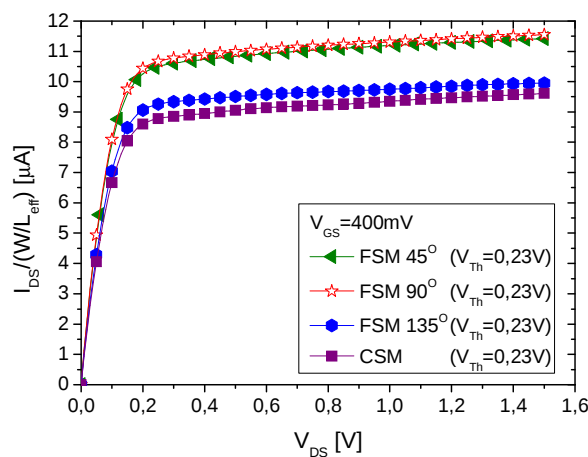


Figura 3.13 – Curvas $I_{DS}/(W/L_{eff})$ em função de V_{DS} dos FSMs e CSM equivalente, para V_{GS} igual a 400 mV [61]

Considerando a Tabela 3.17, coluna h, a corrente $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$ do FSM com ângulo α de 90° é 20,9% maior que a do seu equivalente CSM [61], considerando as mesmas condições de polarização e áreas de porta. Isso significa que o FSM pode substituir o CSM como *buffer* de corrente.

A Tabela 3.17, coluna i, mostra que o FSM com ângulo α de 90° possui R_{on} 18% menor quando comparado ao valor obtido para o CSM equivalente, devido ao maior valor de $\vec{E}_T$ [61]. Isso significa que o FSM melhora a velocidade de chaveamento em CIs digitais [61].

A Tabela 3.17, coluna j, apresenta os valores de V_{EA} obtidos da Figura 3.13. O FSM com ângulo α de 45° obteve maior valor de V_{EA} devido ao maior comprimento efetivo de canal [61]. Aumentar o valor de L_{eff} reduz a sensibilidade do dispositivo aos efeitos de canal curto [61]. Diferentemente do DSM, o FSM pode ser utilizado no estágio de saída de circuitos amplificadores devido ao aumento no valor de V_{EA} [61].

Conforme está escrito nas colunas g e j da Tabela 3.17, os FSMs obtiveram maiores valores de g_m/I_{DS} e V_{EA} [61]. Isso garante a esses dispositivos maiores ganhos de tensão intrínseco quando comparados ao CSM equivalente [61], como mostra a Tabela 3.16, coluna k.

A frequência de ganho de tensão unitário é outro parâmetro importante para aplicações analógicas de CIs [61]. Todos os FSMs obtiveram melhor desempenho quando comparados ao CSM equivalente. O FSM com ângulo α de 90° obteve valor de f_T 21,1% maior quando comparado ao valor obtido para o CSM equivalente [61].

As melhorias atribuídas aos FSMs dependem, sobretudo, do campo elétrico longitudinal resultante no canal. Por esse motivo, o valor de $\vec{E}_T$ foi obtido em diferentes posições do FSM com ângulo α de 90° . Para viabilizar o estudo comparativo, o valor do campo elétrico longitudinal resultante do CSM também foi obtido. A Figura 3.14 apresenta os SOI nMOSFETs e os locais de cortes.

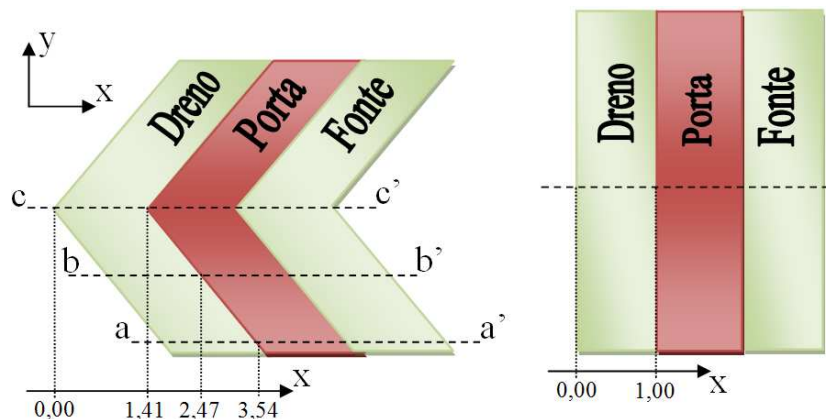


Figura 3.14 – Locais onde foram feitos os cortes nos transistores para obtenção de $\vec{E}_T$ (adaptado de [61])

A Figura 3.15 mostra os resultados de $\vec{E}_T$ em diferentes posições do FSM com ângulo α de 90° . O corte a-a' se refere à borda do transistor, o corte b-b' está contido entre o centro e a borda do FSM e o corte c-c' cruza a região central do dispositivo. O valor de $\vec{E}_T$ do CSM foi obtido no centro do transistor. Para obtenção de $\vec{E}_T$, os transistores estavam polarizados com V_{DS} e V_{GS} iguais a 1,50 V e 400 mV, respectivamente.

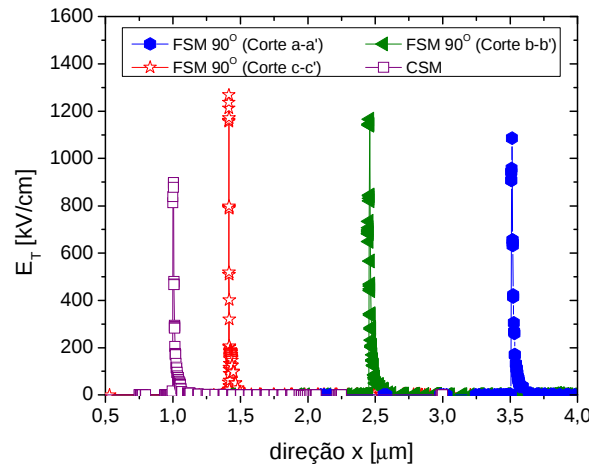


Figura 3.15 – Campo elétrico longitudinal resultante do FSM com ângulo α de 90° e do CSM equivalente [61]

A Tabela 3.18 apresenta os máximos valores de $\vec{E}_T$ obtidos da Figura 3.15. Vale à pena lembrar que o campo elétrico longitudinal é máximo na junção entre o dreno e o canal.

Tabela 3.18 – Campo elétrico longitudinal máximo do FSM com ângulo α de $90,0^\circ$ e CSM equivalente, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GS} igual a 400 mV [61]

Transistor	$\vec{E}_T$ (kV/cm)
CSM	899
FSM 90° (Corte a-a')	1086 (+20,8%)
FSM 90° (Corte b-b')	1166 (+29,7%)
FSM 90° (Corte c-c')	1268 (+41,0%)

Observação: O sinal (+) significa aumento.

Analisando a Figura 3.15 e a Tabela 3.18, percebe-se que o campo elétrico longitudinal do FSM é sempre maior que o do CSM, devido à interação de $\vec{E}_1$ com $\vec{E}_2$ [61]. Além disso, o valor de $\vec{E}_T$ do FSM no centro do canal (corte c-c') é maior que nos outros cortes [61]. O valor de $\vec{E}_T$ do FSM cai na periferia do transistor (cortes a-a' e b-b'), devido a menor interação dos campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ à medida que o corte se afasta da região central do FSM [61].

O estudo dos portadores quentes também foi feito para verificar se o alto campo elétrico do FSM prejudica esses transistores para esse fenômeno. Por esse motivo, SN3D foram realizadas no *Sentaurus Device* para o FSM com ângulo α de 90° e seu equivalente CSM [61]. Os seguintes modelos foram utilizados nas SN3D [61], além dos que já foram apresentados anteriormente:

- a) *Direct Tunneling*. Modelo de tunelamento direto.
- b) *Lucky(CarrierTempDrive)*. Modelo clássico de injeção de elétrons no óxido.

O estudo dos portadores quentes foi feito pela análise da corrente de porta (I_G) dos dispositivos. Considerando V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GS} igual a 400 mV, a corrente de porta do FSM com ângulo α de 90° e do CSM equivalente são iguais a 59,1 pA e 20,6 pA [61], respectivamente. Para o caso estudado, o valor de I_G do FSM com ângulo α de 90° é aproximadamente três vezes maior que o valor obtido para o CSM equivalente [61].

Novos estudos precisam ser realizados para determinar a influência dos portadores quentes no tempo de vida dos dispositivos FSMs [61]. Entretanto, vale à pena lembrar que os dispositivos simulados não possuem um perfil de dopagem otimizado [61]. Em dispositivos reais, técnicas aplicadas nos drenos dos transistores são empregadas para minimizar o impacto dos portadores quentes nos dispositivos [61].

3.3.2 Resumo Comparativo do Desempenho dos Parâmetros Elétricos Estudados entre o SOI MOSFET *Fish* e o SOI MOSFET Convencional

A Tabela 3.19 faz um resumo comparativo do desempenho de todos os parâmetros elétricos que foram estudados dos FSMs e CSM.

Tabela 3.19 – Tabela comparativa dos parâmetros elétricos do FSM e CSM [61]

	SOI nMOSFET <i>Fish</i>	SOI nMOSFET Convencional
$I_{DS}/(W/L_{eff})$	+	-
S	0	0
$I_{off}/(W/L_{eff})$	-	+
$I_{on}/(W/L_{eff})$	+	-
I_{on}/I_{off}	0	0
$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$	+	-
g_m/I_{DS}	+	-
$I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$	+	-
R_{on}	+	-
V_{EA}	+	-
A_V	+	-
f_T	+	-

Observação: Os sinais (+), (-) e (0) significam melhor desempenho, pior desempenho e desempenho similar, respectivamente.

A Tabela 3.19 mostra que o FSM possui melhor desempenho que o CSM para diversos parâmetros elétricos. Ao contrário do DSM, o FSM pode ser confeccionado utilizando a dimensão mínima permitida pela tecnologia. Foi visto que o melhor desempenho do FSM frente ao CSM, deve-se ao maior campo elétrico longitudinal e ao aumento do comprimento efetivo de canal. Concluindo: o SOI MOSFET *Fish* é uma excelente alternativa para aplicações analógicas e digitais de CIs.

4 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO POR RAIOS-X ENTRE OS nMOSFETs DIAMANTES E OS SEUS RESPECTIVOS nMOSFETs CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

Os DMs e os seus respectivos CMs equivalentes foram irradiados com raios-X. Esse capítulo apresenta resultados experimentais dos efeitos da radiação em nMOSFETs Diamantes e convencionais equivalentes, aos quais possuem tecnologia de fabricação comercial. No total foram testados 5 pares de DMs e CMs equivalentes. Os transistores foram polarizados durante a irradiação para potencializar os efeitos degradantes dos raios-X.

4.1 Detalhes sobre o *Chip*, o Encapsulamento e os MOSFETs Diamantes e Convencionais

O *chip* utiliza tecnologia de fabricação comercial da *On Semiconductor*, com dimensão mínima de $0,35\ \mu\text{m}$ (vide Apêndice A para mais detalhes técnicos do processo de fabricação). Esse *chip* foi fabricado via MOSIS [97], por meio do programa MEP [98].

Antes de sofrer qualquer tipo de radiação, o *chip* foi encapsulado pelo CTI (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer) por três motivos: 1) viabilizar a possibilidade de polarização dos transistores durante as irradiações, 2) evitar problemas de mau contato que poderiam ocorrer no uso do microprovador e 3) diminuir o tempo das medições. O CI fornece acesso a 10 nMOSFETs, sendo 5 do tipo DM e 5 do tipo CM.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama esquemático de encapsulamento e a imagem do *chip* encapsulado. Os círculos na Figura 4.a representam as posições dos nMOSFETs.

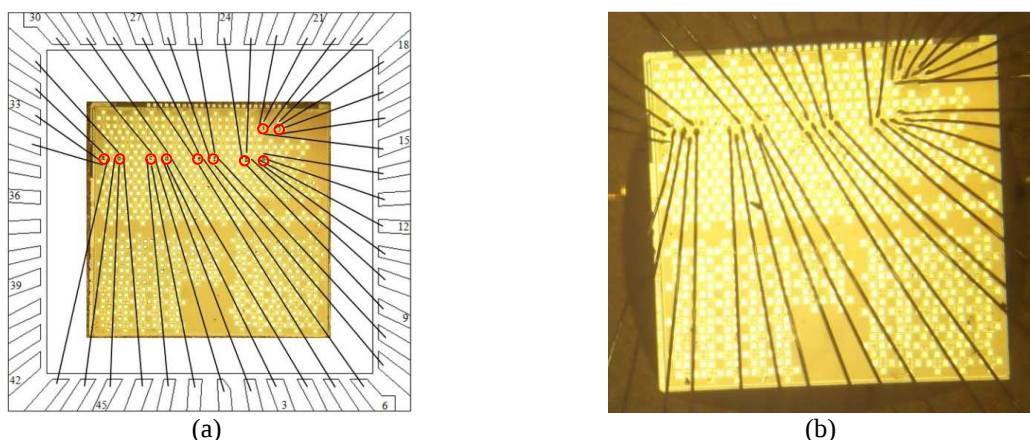


Figura 4.1 – Diagrama esquemático de encapsulamento (a) e *chip* encapsulado (b)

O diagrama esquemático de encapsulamento foi especialmente projetado para evitar que os fios que conectam os *pads* do *chip* aos terminais de base do encapsulamento ficassem em cima dos transistores evitando, dessa forma, a criação de uma barreira física à radiação que deve chegar aos MOSFETs.

A Tabela 4.1 apresenta as dimensões dos DMs e CMs que foram irradiados.

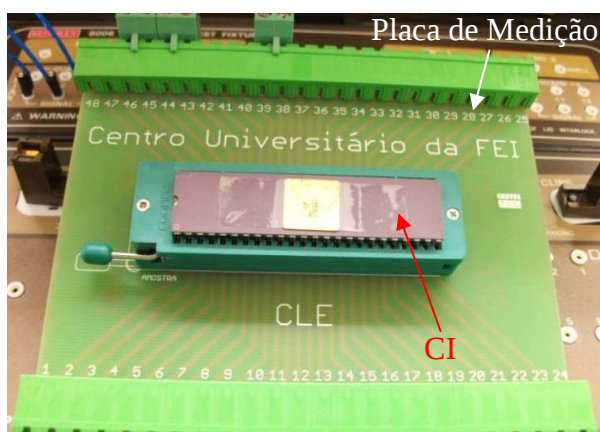
Tabela 4.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes que foram irradiados com raios-X (λ é igual a $0,35 \mu\text{m}$)

nMOSFET Convencional		W/L	Área [λ^2]	nMOSFET Diamante			
W [λ]	L [λ]			b [λ]	B [λ]	L _{eff} [λ]	Ângulo α
17,0	28,5	0,596	484,5	3,00	54,0	28,5	36,9°
17,0	20,0	0,850	340,0	3,00	37,0	20,0	53,1°
17,0	11,5	1,48	195,5	3,00	20,0	11,5	90,0°
17,0	7,00	2,34	119,0	3,00	11,5	7,25	126,9°
17,0	5,50	2,96	93,5	3,00	8,50	5,75	144,1°

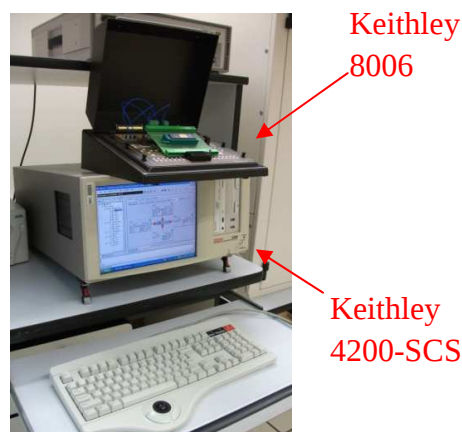
4.2 Procedimento Experimental

Alguns detalhes técnicos tiveram que ser resolvidos antes da primeira irradiação do *chip*. A placa de medição e as placas de polarização do CI tiveram que ser projetadas para viabilizar as medições e as radiações.

O encapsulamento utilizado no *chip* possui 48 pinos e, por essa razão, uma placa de medição teve que ser projetada, pois o Keithley 8006 [101] possui soquete DIP (*Dual-In-Line Package*) de apenas 28 pinos. As medições dos MOSFETs Diamantes e dos MOSFETs convencionais foram realizadas no Keithley 4200-SCS [102]. A Figura 4.2 apresenta a placa de medição com o CI posicionado e o sistema de medição formado por Keithley 8006 (*Component Test Fixture*) e Keithley 4200-SCS (*Semiconductor Characterization System*).



(a)



(b)

Figura 4.2 – Placa de medição (a) e sistema de medição (b)

O *chip* pode ser irradiado com os MOSFETs polarizados ou não. Irradiar o CI polarizado ou despolarizado significa que o circuito está ligado ou desligado em um ambiente radioativo. A opção foi por irradiar os nMOSFETs polarizados para potencializar os efeitos da radiação, devido à presença dos campos elétricos verticais e longitudinais [75].

Duas placas de circuito impresso (PCI) tiveram que ser projetadas para que fosse possível a polarização dos MOSFETs durante o processo de irradiação. A Figura 4.3 apresenta as PCIs que foram projetadas.



Figura 4.3 – PCIs utilizadas para polarizar os nMOSFETs durante as irradiações

Os bornes da PCI da esquerda dão acesso a todos os pinos do CI de 48 pinos. O cabo *flat* transmite os potenciais de polarização para o soquete que está alojado na placa da direita. Durante o processo de irradiação, a PCI da direita aloja o CI e ambos permanecem em ambiente radioativo.

Os ensaios de TID nos transistores foram feitos com raios-X, utilizando o equipamento Shimadzu XRD-7000 [103]. A Figura 4.4 apresenta o equipamento XRD-7000.



Figura 4.4 – Difratorômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000

Durante o processo de radiação, os nMOSFETs foram polarizados com V_{DS} igual a 50 mV e V_{GS} igual a 800 mV (próximo ao valor de V_{Th}). Esses valores de tensão foram escolhidos para evitar a queima dos transistores durante o processo de irradiação.

A Figura 4.5 apresenta o sistema montado para a radiação com raios-X. A Figura 4.5a mostra a PCI com bornes conectada a fonte de alimentação, para que fosse possível a polarização do CI que está dentro da máquina de raios-X (Figura 4.5b). As tensões de polarização dos transistores eram constantemente monitoradas, por meio do osciloscópio, durante o processo de irradiação.



Figura 4.5 – PCI conectada a fonte de alimentação para polarizar os nMOSFETs e osciloscópio para monitorar V_{GS} e V_{DS} (a) e CI posicionado no bocal de saída dos raios-X (b)

A fenda por onde saem os raios-X, a qual possui dimensão de 6 mm por 12 mm, é suficiente para irradiar toda a área do *chip*. A máquina de raios-X foi configurada para operar com tensão de 20 kV e corrente de 5 mA, onde esses parâmetros garantem uma taxa de dose de 1,15 Mrad/min.

As seguintes etapas foram executadas no dia da irradiação dos DMs e CMs:

- Todos os MOSFETs foram medidos antes da primeira irradiação;
- O tempo da primeira irradiação foi de 22 minutos, o que garante uma dose de 25,3 Mrad acumulada pelo *chip*;
- Terminada a primeira irradiação, o *chip* foi levado imediatamente para a sala de medições. O tempo aproximado de medição foi de 90 minutos e transistores equivalentes foram medidos um em seguida do outro, reduzindo, dessa forma, a influência da recuperação dos transistores que ocorre após a irradiação;
- O tempo da segunda irradiação foi de 44 minutos, o que garante uma dose de 75,9 Mrad acumulada pelo *chip*;
- Outra medição foi realizada logo após a segunda irradiação;

- f) A última irradiação (terceira irradiação) foi de 44 minutos, o que garante uma dose de 126 Mrad acumulada pelo *chip*;
- g) A última medição teve as mesmas características das anteriores.
- h) Para resumir, a Tabela 4.2 apresenta os tempos de radiação e a dose acumulada pelo *chip*.

Tabela 4.2 – Tempo de radiação e dose acumulada pelo *chip*

Irradiação	Tempo de radiação [min]	Dose Acumulada (DA) [Mrad]
1	22	25,3
2	44	75,9
3	44	126

4.3 Resultados Experimentais

Nesta seção serão apresentados resultados experimentais dos nMOSFETs que foram radiados com raios-X. Os parâmetros V_{Th} , $I_{on}/(W/L)$, $I_{leak}/(W/L)$, $I_{off}/(W/L)$, I_{on}/I_{off} , $g_{m_máx}/(W/L)$, g_m/I_{DS} , $I_{DS_sat}/(W/L)$, V_{EA} , R_{on} e A_V foram levantados para todos os DMs e CMs equivalentes.

Os parâmetros obtidos após cada irradiação foram confrontados com os valores obtidos antes da primeira irradiação. A máxima variação após determinada irradiação será considerada o pior caso, a título de comparação, e estará realçado em amarelo.

4.3.1 V_{Th}

As tensões de limiar dos MOSFETs foram obtidas utilizando a técnica da segunda derivada, para V_{DS} igual a 100 mV [40]. As tabelas apresentadas a seguir mostram a influência da radiação sobre os valores de V_{Th} .

4.3.1.1 Extração dos V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Tabela 4.3 mostra os valores de V_{Th} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.3 – V_{Th} do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,76	0,00%	0,69	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,77	1,32%	0,67	-2,90%
2ª irradiação	75,9	0,75	-1,32%	0,17	-75,4%
3ª irradiação	126	0,70	-7,89%	0,40	-42,0%

A Tabela 4.3 mostra que a tensão de limiar dos dispositivos estudados pode aumentar ou diminuir após a irradiação. Isso aconteceu, pois a medição foi feita no período transitório, ou seja, o armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta ou na interface Si/SiO₂ ainda estava ocorrendo.

A tensão de limiar do MOSFET diminui após a irradiação, pois cargas positivas se concentraram predominantemente no óxido de porta [74]. Se as cargas positivas se acumularem predominantemente na interface Si/SiO₂, a tensão de limiar se eleva [7].

A Tabela 4.1 mostra que os DMs possuem BBR menores que os respectivos CMs equivalentes. A BBR do DM é limitada pelo valor de b , enquanto que a BBR do CM é limitada por L . Durante a irradiação, a quantidade de PEL geradas é maior em MOSFETs que possuem maiores regiões de bico de pássaro. Parte das cargas positivas geradas nas BBR acabam migrando para o óxido de porta [75], afetando a tensão de limiar do MOSFET. O V_{Th} do CM é mais afetado quando comparado ao DM equivalente devido a maior geração de PEL nas BBR, durante a irradiação, e a migração de parte das cargas positivas para o óxido de porta.

Os resultados da Tabela 4.3 deixam visível a sensibilidade do CM à radiação por causa da BBR. O DM obteve uma redução máxima de 7,89% no valor de V_{Th} após a 3ª irradiação, enquanto que o CM equivalente obteve uma redução de 75,4% no valor de V_{Th} após a 2ª irradiação.

4.3.1.2 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 126,9° e do CM Equivalente

A Tabela 4.4 mostra os valores de V_{Th} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.4 – V_{Th} do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 126,9°		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,79	0,00%	0,76	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,76	-3,80%	0,87	14,5%
2ª irradiação	75,9	0,79	0,00%	0,88	15,8%
3ª irradiação	126	0,70	-11,4%	0,86	13,2%

Mais uma vez, o DM obteve melhor desempenho que o CM equivalente. A máxima variação de V_{Th} do DM foi de 11,4% após a 3ª irradiação, enquanto que o valor de V_{Th} do CM variou 15,8% após a 2ª irradiação.

4.3.1.3 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 90,0° e do CM Equivalente

A Tabela 4.5 mostra os valores de V_{Th} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.5 – V_{Th} do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 90,0°		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,75	0,00%	0,74	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,90	20,0%	0,71	-4,05%
2ª irradiação	75,9	0,76	1,33%	0,67	-9,46%
3ª irradiação	126	0,83	10,7%	0,69	-6,76%

Após a 1ª irradiação, o DM com ângulo α de 90,0° aumentou em 20,0% o valor de V_{Th} . Já o CM equivalente obteve uma regressão de 9,46% no valor de V_{Th} após a 2ª irradiação. Para esses MOSFETs equivalentes, o CM obteve desempenho melhor que o DM equivalente.

O pior desempenho do DM com ângulo α de 90° em relação ao CM equivalente pode ser justificado pelo alto campo elétrico longitudinal.

4.3.1.4 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 53,1° e do CM Equivalente

A Tabela 4.6 mostra os valores de V_{Th} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 53,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.6 – V_{Th} do DM com ângulo α de 53,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 53,1°		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,81	0,00%	0,78	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,81	0,00%	0,77	-1,28%
2ª irradiação	75,9	0,82	1,23%	0,89	14,1%
3ª irradiação	126	0,82	1,23%	0,88	12,8%

Da mesma forma que os DMs com ângulos α de 144,1° e 126,9°, o DM com ângulo α de 53,1° obteve menor variação de V_{Th} , quando compara ao CM equivalente, após as irradiações. O valor de V_{Th} do DM variou somente 1,23% após a 3ª irradiação, enquanto que a variação do CM equivalente foi de 14,1% após a 2ª irradiação.

4.3.1.5 Extração do V_{Th} do DM com Ângulo α igual a 36,9° e do CM Equivalente

A Tabela 4.7 mostra os valores de V_{Th} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.7 – V_{Th} do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,79	0,00%	0,76	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,78	-1,27%	0,73	-3,95%
2ª irradiação	75,9	0,77	-2,53%	0,69	-9,21%
3ª irradiação	126	0,75	-5,06%	0,67	-11,8%

O DM com ângulo α de 36,9° obteve melhor desempenho que seu equivalente CM, pois a máxima variação de V_{Th} do Diamante foi de 5,06%, enquanto que a variação do CM foi de 11,8%.

4.3.2 $I_{on}/(W/L)$

As correntes de estado ligado foram obtidas para V_{GS} e V_{DS} iguais a 1,95 V e 200 mV, respectivamente. As curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} apresentadas nessa seção mostram como a radiação atua no comportamento elétrico dos nMOSFETs. As tabelas apresentam os valores de $I_{on}/(W/L)$ obtidos das curvas citadas.

4.3.2.1 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.6 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

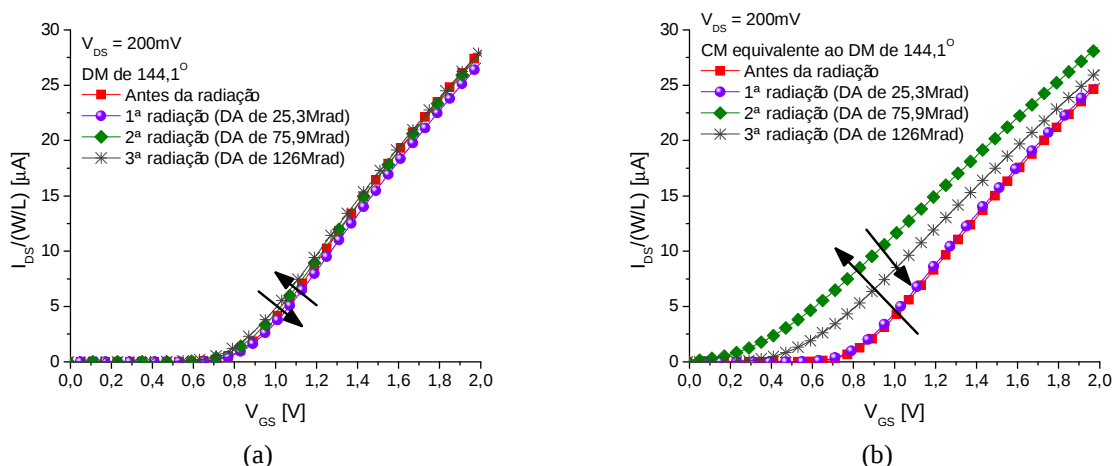


Figura 4.6 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.6 mostrou que o CM sofreu maior influência da radiação devido ao deslocamento da curva $I_{DS}/(W/L)$ sobre o eixo V_{GS} . O DM sofreu pouca influência da radiação.

A Tabela 4.8 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.8 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	27,0	0,00%	24,3	0,00%
1ª irradiação	25,3	26,0	-3,70%	24,6	1,23%
2ª irradiação	75,9	26,8	-0,741%	27,8	14,4%
3ª irradiação	126	27,1	0,370%	25,6	5,35%

Analisando a Tabela 4.8, é perceptível que o DM apresentou melhor desempenho, pois a variação máxima de $I_{on}/(W/L)$ do DM foi menor quando comparado ao CM equivalente. O MOSFET Diamante teve uma redução de 3,70% no valor de $I_{on}/(W/L)$, enquanto que o MOSFET convencional teve um aumento de 14,4% no valor de $I_{on}/(W/L)$.

O parâmetro $I_{on}/(W/L)$ sofre influência das cargas armadilhadas no óxido de porta e na região de interface Si/SiO₂. Essas cargas armadilhadas podem causar variação de V_{Th} e degradação da mobilidade [73].

4.3.2.2 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 126,9° e do CM Equivalente

A Figura 4.7 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de 126,9° e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

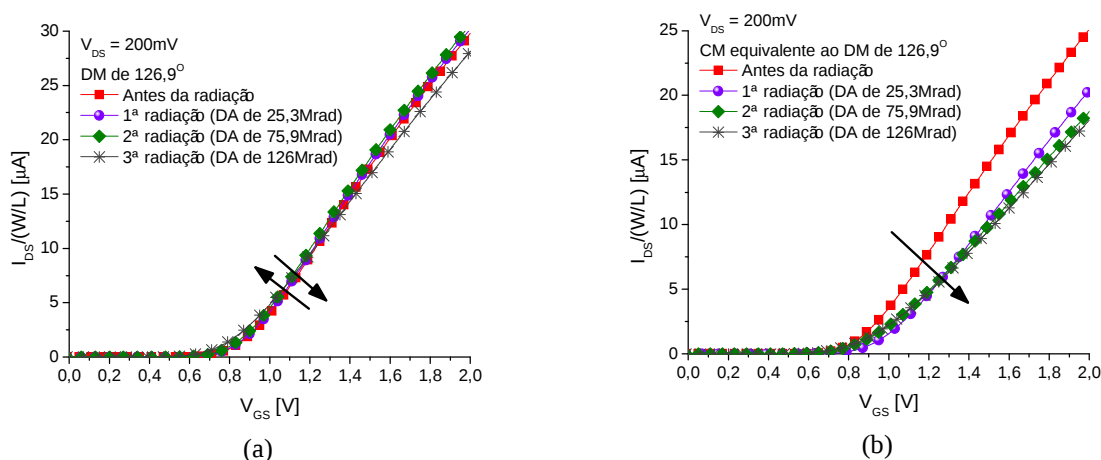


Figura 4.7 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de 126,9° (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.7 mostrou que o CM sofreu maior influência da radiação devido a grande variação de $I_{DS}/(W/L)$, para V_{GS} acima de 1 V. O DM sofreu menos influência da radiação para o valor de V_{GS} citado.

A Tabela 4.9 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.9 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 126,9°		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	28,7	0,00%	24,1	0,00%
1ª irradiação	25,3	29,1	1,39%	19,5	-19,1%
2ª irradiação	75,9	29,5	2,79%	17,9	-25,7%
3ª irradiação	126	27,0	-5,92%	17,2	-28,6%

Analisando a Tabela 4.9, o DM teve uma redução máxima de 5,92% no valor de $I_{on}/(W/L)$, enquanto que o CM equivalente teve uma diminuição máxima de 28,6% no valor de $I_{on}/(W/L)$. Mais uma vez, o MOSFET Diamante obteve melhor desempenho.

4.3.2.3 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.8 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

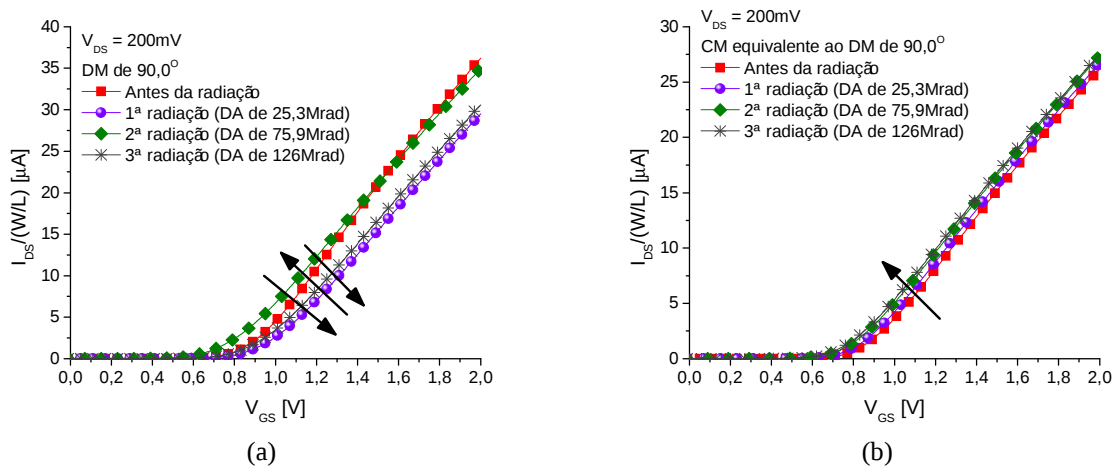


Figura 4.8 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.8 mostrou que o DM sofreu maior influência da radiação devido a grande variação de $I_{DS}/(W/L)$ sobre o eixo V_{GS} . O CM sofreu menos influência da radiação, como mostra a Figura 4.8b.

A Tabela 4.10 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.10 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	34,8	0,00%	25,1	0,00%
1ª irradiação	25,3	28,2	-19,0%	25,7	2,39%
2ª irradiação	75,9	33,6	-3,45%	26,3	4,78%
3ª irradiação	126	29,2	-16,1%	26,5	5,58%

Analisando a Tabela 4.10, é perceptível que o DM obteve desempenho pior que o equivalente CM, pois a variação máxima de $I_{on}/(W/L)$ do DM foi maior que a do respectivo

CM equivalente. O alto campo elétrico longitudinal do MOSFET Diamante com ângulo α de 90° prejudicou seu desempenho.

4.3.2.4 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.9 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

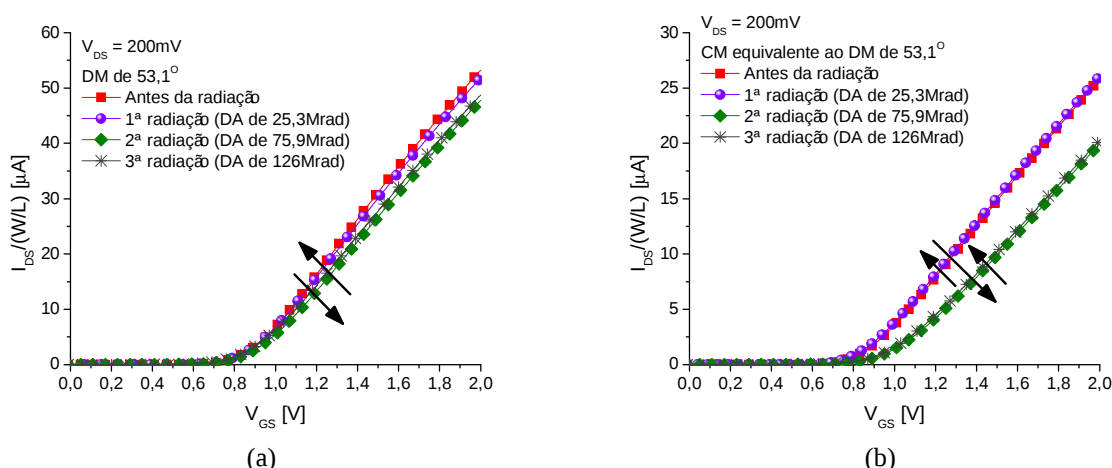


Figura 4.9 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.9 mostrou que CM foi bastante influenciado pelos raios-X a partir da 2ª radiação. Mais uma vez, o DM sofreu pouca influência da radiação.

A Tabela 4.11 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.11 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	51,1	0,00%	24,8	0,00%
1ª irradiação	25,3	49,8	-2,54%	25,0	0,806%
2ª irradiação	75,9	45,8	-10,4%	18,9	-23,8%
3ª irradiação	126	46,8	-8,41%	19,3	-22,2%

A Tabela 4.11 mostra que o DM com ângulo α de $53,1^\circ$ apresentou uma variação máxima de $I_{on}/(W/L)$ de 10,4%, enquanto que o CM equivalente obteve uma variação máxima de 23,8%. O DM com ângulo α de $53,1^\circ$ se manteve mais imune aos efeitos da radiação quando comparado ao CM equivalente.

4.3.2.5 Extração dos $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.10 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

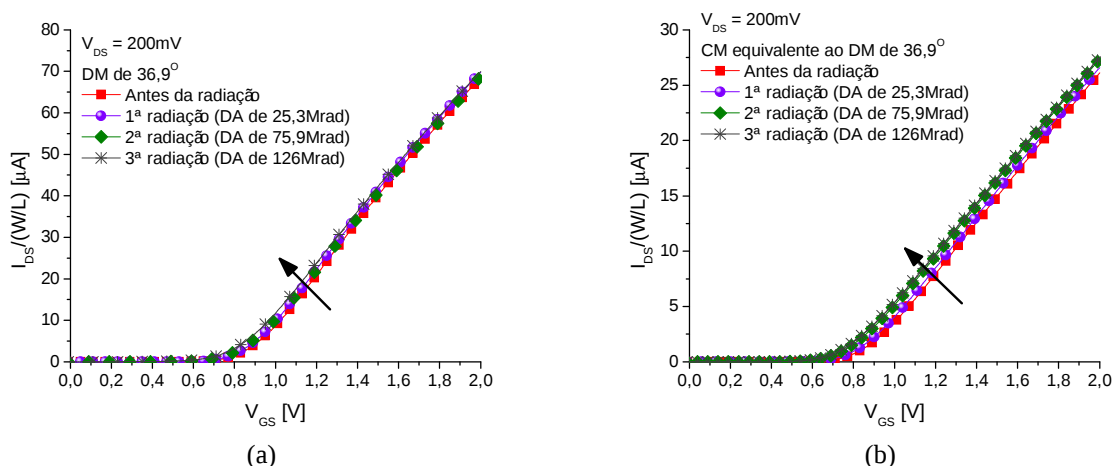


Figura 4.10 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

Observando a Figura 4.10, é perceptível que o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ teve um comportamento ligeiramente melhor que o equivalente CM, pois o MOSFET Diamante sofreu menos influência dos raios-X.

A Tabela 4.12 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.12 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	65,8	0,00%	25,0	0,00%
1ª irradiação	25,3	67,2	2,13%	25,5	2,00%
2ª irradiação	75,9	66,1	0,456%	26,3	5,20%
3ª irradiação	126	67,4	2,43%	26,4	5,60%

A Tabela 4.12 mostrou que o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ apresentou melhor desempenho que o equivalente CM para $I_{on}/(W/L)$. Após a 3ª irradiação, a variação máxima de $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ foi de 2,43%, enquanto que a variação máxima para o CM equivalente foi de 5,60%.

4.3.3 $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$

Nessa seção serão apresentados os valores de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ de transistores equivalentes. A corrente $I_{leak}/(W/L)$ foi obtida para V_{GS} igual a -1,50 V e V_{DS} igual a 200 mV, enquanto que a corrente $I_{off}/(W/L)$ foi obtida para V_{GS} e V_{DS} iguais a 0,00 V e 200 mV, respectivamente.

Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} serão apresentadas para mostrar o acionamento dos transistores parasitários que estão localizados nas BBR.

4.3.3.1 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Tabela 4.13 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.13 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	2,06	0,00%	8,01	0,00%
1ª irradiação	25,3	1,49	-27,7%	17,9	123%
2ª irradiação	75,9	1,19	-42,2%	4,27	-46,7%
3ª irradiação	126	7,50	264%	10,6	32,3%

O aumento no valor de $I_{leak}/(W/L)$ se deve as cargas positivas que ficam armadilhadas nas BBR após a irradiação [75].

A Tabela 4.13 mostra um aumento de 264% na corrente de fuga do DM com ângulo α de 144,1°, enquanto que o CM equivalente obteve um aumento máximo de $I_{leak}/(W/L)$ de 123%. Analisando esse caso, o CM obteve melhor desempenho que o DM equivalente.

A Tabela 4.14 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.14 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,11	0,00%	0,955	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,623	-43,9%	1,17	22,5%
2ª irradiação	75,9	15,7	1314%	82902	8,68.10 ⁶ %
3ª irradiação	126	718	64584%	912	95397%

Após a irradiação, as cargas positivas armadilhadas nas BBR ocasionaram a elevação da corrente de fuga nos nMOSFETs equivalentes [75]. O CM obteve desempenho pior, pois seu $I_{off}/(W/L)$ elevou em 8,68.10⁶% em relação ao valor inicial. Já o DM com ângulo α de $144,1^\circ$ obteve desempenho melhor devido a menor elevação no valor de $I_{off}/(W/L)$.

A Figura 4.11 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

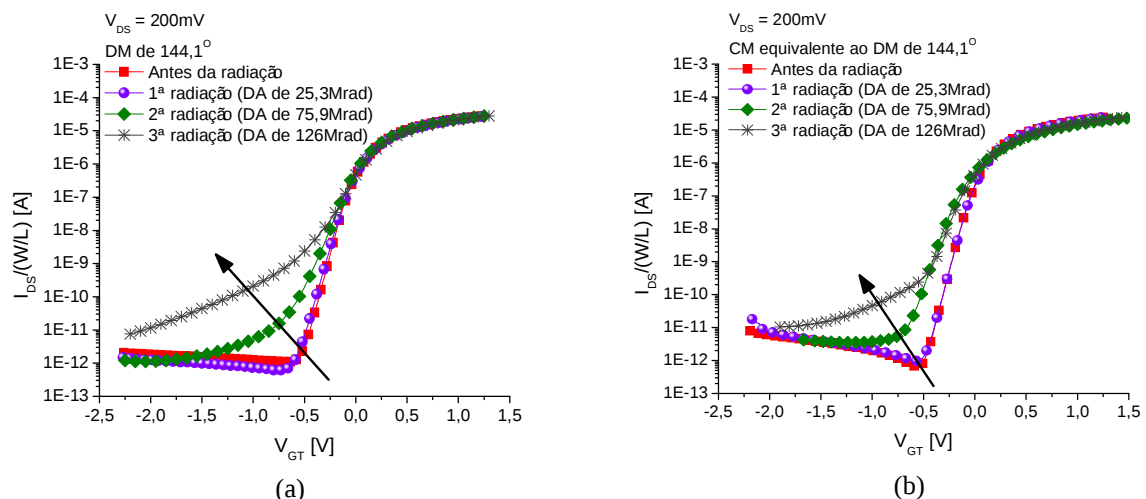


Figura 4.11 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.11 demonstrou o acionamento dos transistores parasitários oriundos das BBR, da mesma forma que na Figura 2.32 [77]. Uma corrente elétrica de grande magnitude passa a existir no dispositivo mesmo quando este deveria estar desligado.

4.3.3.2 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.15 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.15 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,42	0,00%	2,00	0,00%
1ª irradiação	25,3	2,29	61,3%	3,07	53,5%
2ª irradiação	75,9	0,921	-35,1%	1,22	-39,0%
3ª irradiação	126	1,50	5,63%	2,50	25,0%

A Tabela 4.15 mostra que os MOSFETs tiveram variações de $I_{leak}/(W/L)$ inexpressivas.

A Tabela 4.16 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.16 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	0,542	0,00%	1,53	0,00%
1ª irradiação	25,3	0,491	-9,41%	2,15	40,5%
2ª irradiação	75,9	0,289	-46,7%	4,46	192%
3ª irradiação	126	3,72	586%	148	9573%

Considerando a Tabela 4.16, o $I_{off}/(W/L)$ do CM elevou em 9573%, enquanto que o $I_{off}/(W/L)$ do DM elevou em 586%. Para esse caso, o DM obteve melhor desempenho.

A Figura 4.12 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

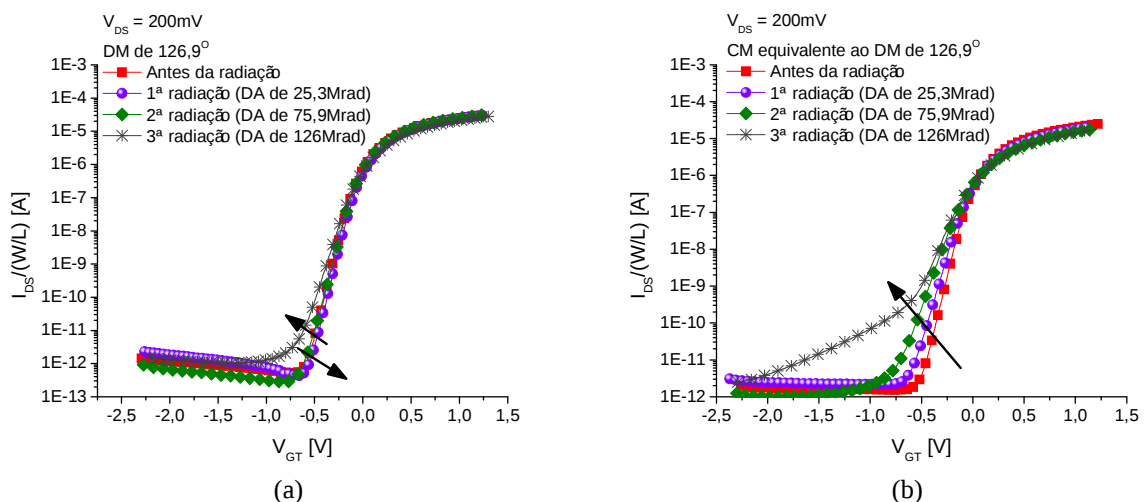


Figura 4.12 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.12 mostrou que o CM foi mais influenciado pelos transistores parasitas que o DM equivalente. Para valores negativos de V_{GT} , o CM foi muito prejudicado a partir da 3ª irradiação.

4.3.3.3 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.17 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.17 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	11,0	0,00%	5,56	0,00%
1ª irradiação	25,3	29,0	164%	1,80	-67,6%
2ª irradiação	75,9	20,1	82,7%	1,75	-68,5%
3ª irradiação	126	23,8	116%	4,17	-25,0%

A Tabela 4.17 mostra que o valor de $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 90° aumentou em 164% após a 1ª irradiação. O valor de $I_{leak}/(W/L)$ do CM não aumentou após as irradiações e, por essa razão, obteve melhor desempenho.

A Tabela 4.18 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.18 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	0,827	0,00%	2,93	0,00%
1ª irradiação	25,3	1,67	102%	0,829	-71,7%
2ª irradiação	75,9	39,7	4700%	51,6	1661%
3ª irradiação	126	47,4	5632%	514	17443%

O valor de $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do CM equivalente se elevaram em 5632% e 17443%, respectivamente. O DM com ângulo α de 90° obteve desempenho melhor que seu CM equivalente devido a menor variação de $I_{off}/(W/L)$ após as irradiações.

A Figura 4.13 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

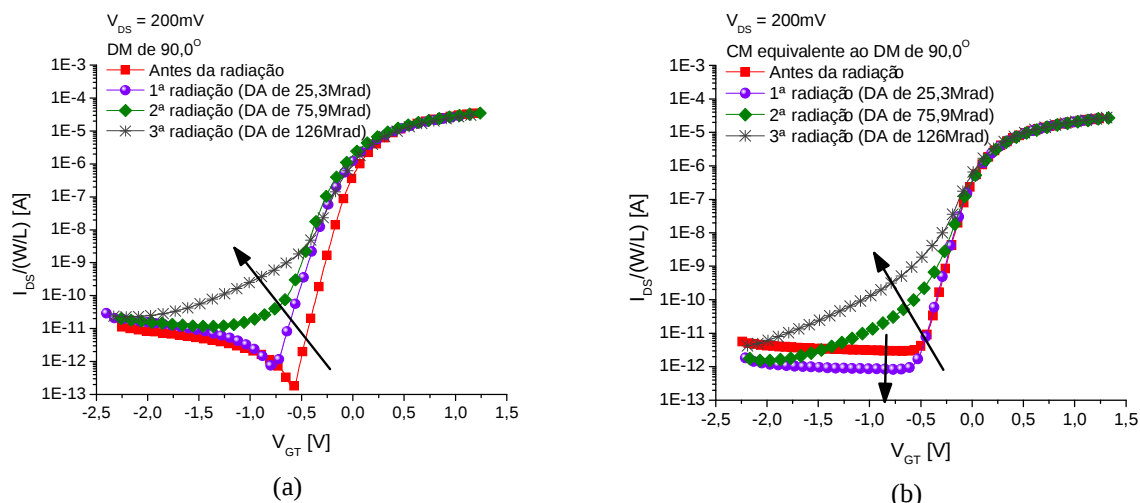


Figura 4.13 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.13b mostra que a corrente de fuga sofreu uma ligeira queda após as irradiações. Entretanto, a corrente de estado desligado sofreu um grande aumento, principalmente após a 3ª irradiação. Tanto o DM como o CM tiveram aumento muito grande da corrente de dreno para V_{GT} abaixo de -0,5V.

4.3.3.4 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.19 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.19 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,70	0,00%	1,72	0,00%
1ª irradiação	25,3	2,21	30,0%	2,31	34,3%
2ª irradiação	75,9	2,95	73,5%	2,11	22,7%
3ª irradiação	126	16,6	876%	4,70	173%

Analisando a Tabela 4.19, é perceptível que o DM com ângulo α de $53,1^\circ$ obteve pior desempenho para $I_{leak}/(W/L)$, pois ocorreu um aumento de 876% do parâmetro estudado. O aumento de $I_{leak}/(W/L)$ do CM equivalente foi de 173%.

A Tabela 4.20 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.20 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,15	0,00%	0,69	0,00%
1ª irradiação	25,3	1,89	64,3%	1,46	112%
2ª irradiação	75,9	57,7	4917%	100	14393%
3ª irradiação	126	2401	208682%	638	92364%

O valor de $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do CM equivalente se elevaram em 208682% e 92364%, respectivamente. O CM obteve desempenho ligeiramente melhor.

A Figura 4.14 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

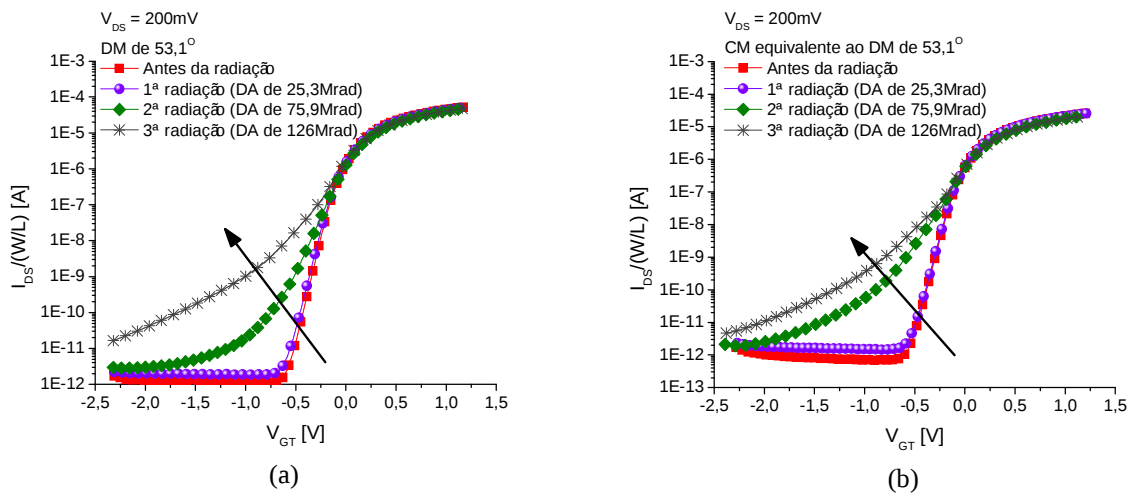


Figura 4.14 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.14 mostra um aumento expressivo da corrente I_{DS} para V_{GT} menor que -0,5 V. Essa tendência foi observada na Tabela 4.20, a qual mostra um grande aumento de I_{DS} após a 3ª irradiação para ambos os transistores.

4.3.3.5 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.21 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.21 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	9,81	0,00%	7,68	0,00%
1ª irradiação	25,3	6,65	-32,2%	6,08	-20,8%
2ª irradiação	75,9	6,08	-38,0%	4,42	-42,4%
3ª irradiação	126	20,9	113%	4,93	-35,8%

A Tabela 4.21 mostra que o CM teve uma redução de 42,4% no valor de $I_{leak}/(W/L)$, enquanto que o DM equivalente teve um aumento de 113% no valor de $I_{leak}/(W/L)$. O MOSFET convencional obteve melhor desempenho devido a menor variação de $I_{leak}/(W/L)$.

A Tabela 4.22 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.22 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	6,34	0,00%	3,41	0,00%
1ª irradiação	25,3	3,91	-38,3%	1,90	-44,3%
2ª irradiação	75,9	254	3906%	95,5	2701%
3ª irradiação	126	5216	82171%	453	13184%

O valor de $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do CM equivalente se elevaram em 82171% e 13184%, respectivamente. O CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve melhor desempenho.

A Figura 4.15 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

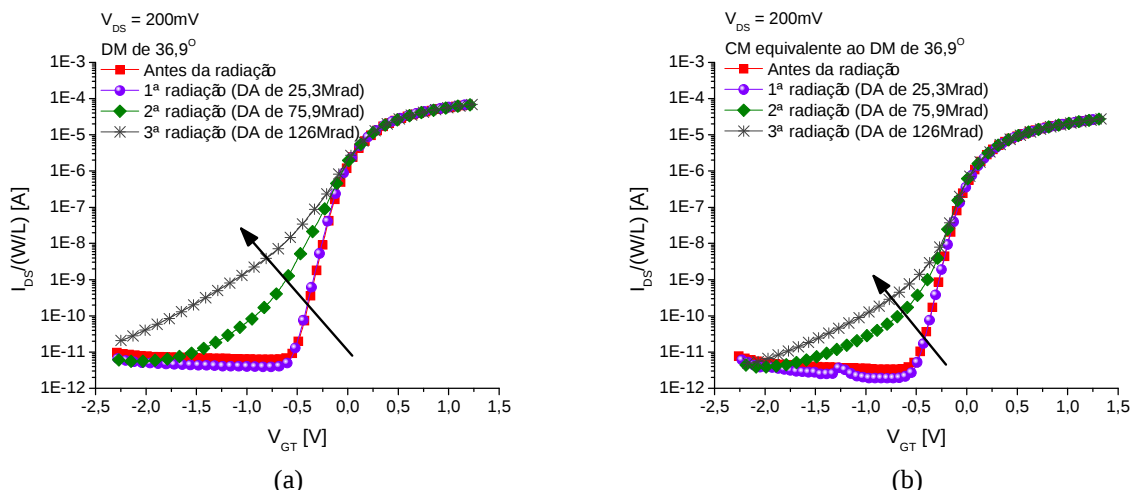


Figura 4.15 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.15 mostra um comportamento muito semelhante com as curvas do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM (Figura 4.14). A corrente de estado desligado aumentou muito tanto para o CM, como para o equivalente DM com ângulo α de $36,9^\circ$.

4.3.4 Razão I_{on}/I_{off}

Os resultados obtidos para $I_{on}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ apresentados nas seções 4.3.2 e 4.3.3, serão utilizados aqui para obtenção da razão I_{on}/I_{off} . Os resultados serão apresentados da mesma forma que anteriormente: cada irradiação terá um valor específico de I_{on}/I_{off} para determinado dispositivo e, então, esse valor será confrontado com o valor anterior a radiação para verificar como ocorreu a degradação desse parâmetro.

A Tabela 4.23 apresenta a razão I_{on}/I_{off} de todos os dispositivos DMs e CMs.

Tabela 4.23 – Razão I_{on}/I_{off} de DMs e CMs equivalentes antes e pós-irradiações

Transistor		DM		CM	
		$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação	$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação
DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e CM equivalente	Antes	24,3	0,00%	25,4	0,00%
	1ª radiação	41,7	71,6%	21,0	-17,3%
	2ª radiação	1,71	-93,0%	$3,35 \cdot 10^{-4}$	-99,9%
	3ª radiação	0,0377	-99,8%	0,0281	-99,9%
DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e CM equivalente	Antes	53,0	0,00%	15,8	0,00%
	1ª radiação	59,3	11,9%	9,07	-42,6%
	2ª radiação	102	92,4%	4,01	-74,6%
	3ª radiação	7,26	-86,3%	0,116	-99,3%
DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e CM equivalente	Antes	42,1	0,00%	8,57	0,00%
	1ª radiação	16,9	-59,9%	31	262%
	2ª radiação	0,846	-98,0%	0,51	-94,0%
	3ª radiação	0,616	-98,5%	0,0516	-99,4%

Tabela 4.23 – Razão I_{on}/I_{off} de DMs e CMs equivalentes antes e pós-irradiações

Transistor		DM		CM	
		$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação	$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação
DM com ângulo α de 53,1° e CM equivalente	Antes	44,4	0,00%	35,9	0,00%
	1ª radiação	26,3	-40,8%	17,1	-52,4%
	2ª radiação	0,794	-98,2%	0,189	-99,5%
	3ª radiação	0,0195	-99,9%	0,0303	-99,9%
DM com ângulo α de 36,9° e CM equivalente	Antes	10,4	0,00%	7,33	0,00%
	1ª radiação	17,2	65,4%	13,4	82,8%
	2ª radiação	0,260	-97,5%	0,275	-96,2%
	3ª radiação	0,0129	-99,9%	0,0583	-99,2%

A maioria dos nMOSFETs tiveram redução de quase 100% na razão I_{on}/I_{off} , que foi causada pela elevação de $I_{off}/(W/L)$ após as irradiações. Isso significa que o consumo de energia de todos os transistores aumentou consideravelmente.

O DM com ângulo α de 126,9° obteve comportamento melhor que o seu equivalente CM devido a menor variação da razão I_{on}/I_{off} após a 3ª irradiação.

4.3.5 $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$

Essa seção apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} de transistores equivalentes, para V_{DS} igual a 200 mV. Das curvas foram obtidos os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ após cada irradiação. A análise do desempenho dos transistores será feito da mesma forma que anteriormente: a transcondutância máxima após cada irradiação será comparada com o valor de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ de antes da irradiação. O transistor que obter menor variação será considerado mais robusto a radiação.

4.3.5.1 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a 144,1° e do CM equivalente

A Figura 4.16 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de 144,1° e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

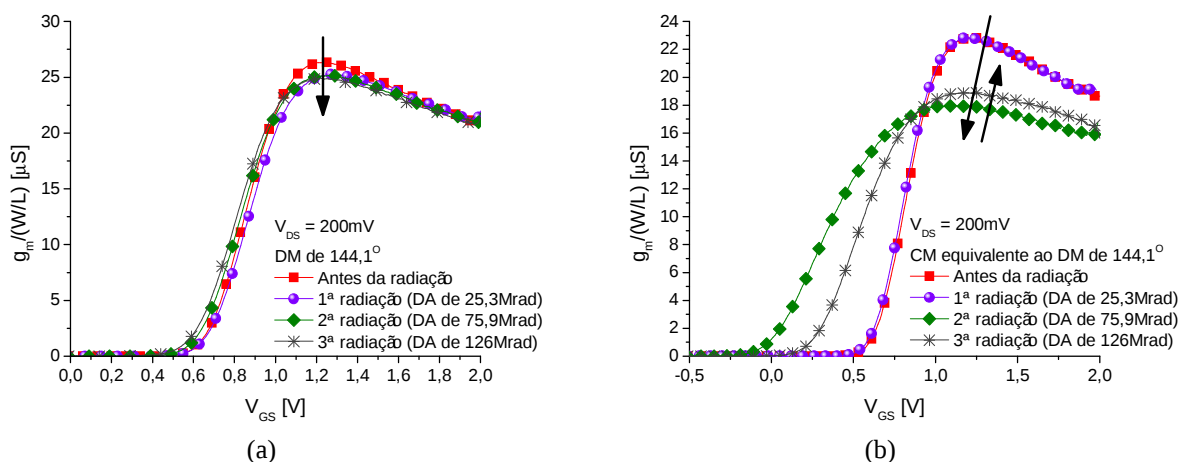


Figura 4.16 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.16 mostrou que o CM sofreu maior influência da radiação devido ao deslocamento da curva $g_m/(W/L)$ sobre o eixo V_{GS} . O DM sofreu pouca influência da radiação.

A Tabela 4.24 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.24 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	26,3	0,00%	22,8	0,00%
1ª irradiação	25,3	25,3	-3,80%	22,8	0,00%
2ª irradiação	75,9	25,2	-4,18%	18,0	-21,1%
3ª irradiação	126	24,9	-5,32%	18,9	-17,1%

A Tabela 4.24 mostra que o DM com ângulo α de $144,1^\circ$ apresenta melhor desempenho que o CM equivalente, pois a variação máxima de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do MOSFET Diamante foi de 5,32%, enquanto que a variação máxima do CM foi de 21,1%.

4.3.5.2 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM equivalente

A Figura 4.17 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

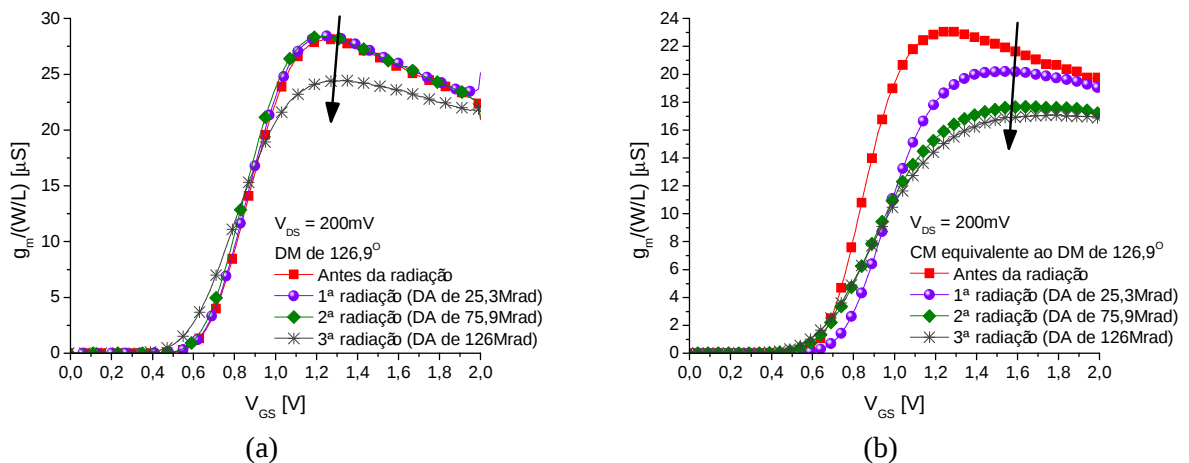


Figura 4.17 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

Analisando a Figura 4.17, é possível perceber que o DM com ângulo α de $126,9^\circ$ teve melhor desempenho para a transcondutância. O MOSFET Diamante foi visivelmente afetado após a 3ª irradiação, enquanto que o equivalente CM foi afetado a partir da 1ª irradiação.

A Tabela 4.25 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.25 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	28,2	0,00%	23,1	0,00%
1ª irradiação	25,3	28,4	0,709%	20,2	-12,6%
2ª irradiação	75,9	28,4	0,709%	17,7	-23,4%
3ª irradiação	126	24,5	-13,1%	17,1	-26,0%

A Tabela 4.25 confirma a tendência que já havia sido antecipada pela análise da Figura 4.17: o DM com ângulo α de $126,9^\circ$ obteve melhor desempenho porque a variação de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ foi menor para esse dispositivo. A variação de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ para o DM e para seu equivalente CM foram de 13,1% e 26,0%, respectivamente.

4.3.5.3 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM equivalente

A Figura 4.18 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

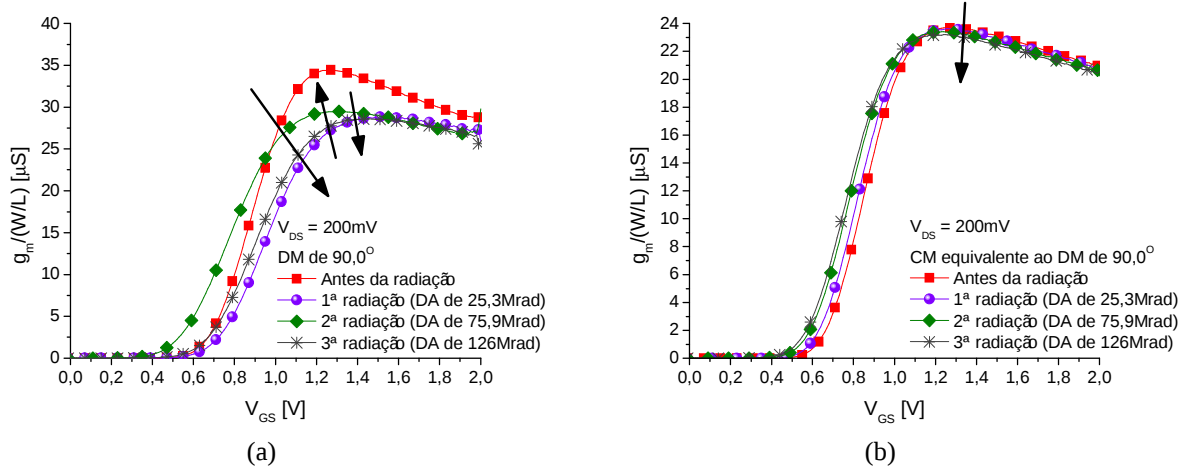


Figura 4.18 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

O DM com ângulo α de 90° teve seu desempenho comprometido devido ao alto campo elétrico longitudinal. O CM teve bom comportamento após as irradiações, pois as transcondutâncias máximas variaram pouco para cada curva obtida.

A Tabela 4.26 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.26 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	34,4	0,00%	23,7	0,00%
1ª irradiação	25,3	28,9	-16,0%	23,6	-0,422%
2ª irradiação	75,9	29,5	-14,2%	23,4	-1,27%
3ª irradiação	126	28,6	-16,9%	23,2	-2,11%

Como já foi dito na análise da Figura 4.18, o CM teve melhor desempenho que o equivalente DM. A máxima variação de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ foi de 2,11% para o CM e de 16,9% para o DM equivalente.

4.3.5.4 Extração dos $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM equivalente

A Figura 4.19 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

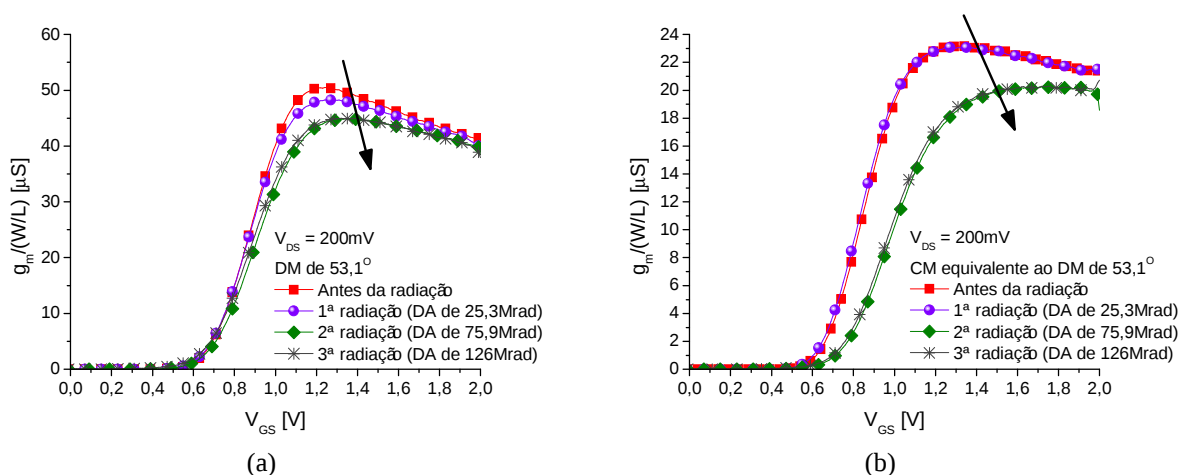


Figura 4.19 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

Aparentemente, o DM com ângulo α de $53,1^\circ$ sofreu menos influência da radiação que seu equivalente CM. O DM se degradou suavemente a cada dose acumulada, enquanto que o CM teve uma degradação abrupta da 1ª para a 2ª irradiação.

A Tabela 4.27 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.27 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	50,5	0,00%	23,2	0,00%
1ª irradiação	25,3	48,3	-4,36%	23,1	-0,431%
2ª irradiação	75,9	44,9	-11,1%	20,3	-12,5%
3ª irradiação	126	45,0	-10,9%	20,3	-12,5%

O DM com ângulo α de $53,1^\circ$ foi ligeiramente melhor que o CM equivalente. A variação máxima de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM e do CM foram iguais a 11,1% e 12,5%, respectivamente. Pode-se dizer que o CM foi mais afetado pela radiação, pois houve uma deformação das curvas $g_m/(W/L)$ após as irradiações. Essas deformações não foram observadas nas curvas do DM.

4.3.5.5 Extração dos $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM com ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM equivalente

A Figura 4.20 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

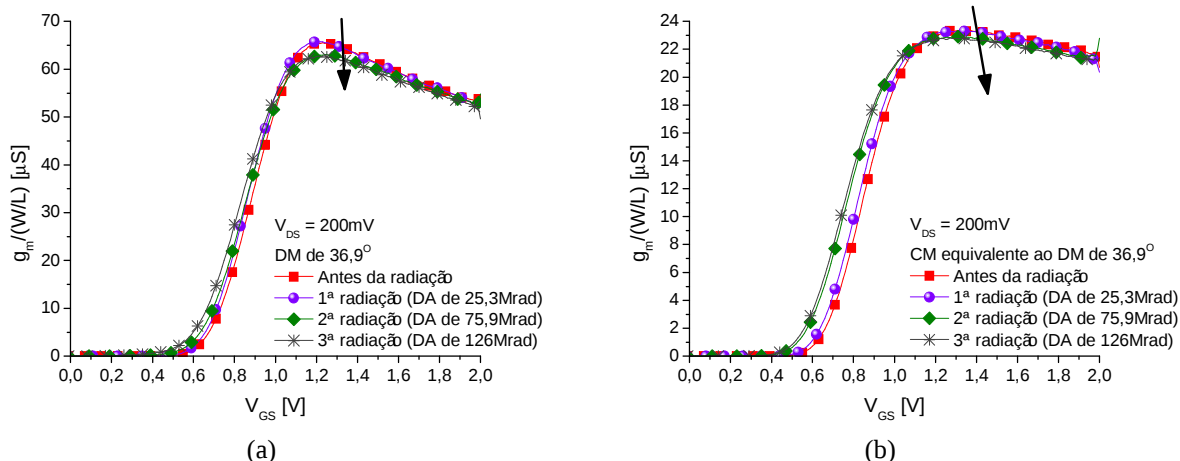


Figura 4.20 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

O comportamento da transcondutância após as irradiações foi similar para os MOSFETs equivalentes.

A Tabela 4.28 apresenta os valores de $g_{m_máx}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.28 – $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_máx}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_máx}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	65,6	0,00%	23,4	0,00%
1ª irradiação	25,3	65,7	0,152%	23,3	-0,427%
2ª irradiação	75,9	63,0	-3,96%	22,9	-2,14%
3ª irradiação	126	62,8	-4,27%	22,8	-2,56%

A transcondutância do CM teve uma redução de 2,56% após a 3ª irradiação, enquanto que o DM equivalente teve uma redução de 4,27% após a 3ª irradiação. O CM teve comportamento ligeiramente melhor que o DM equivalente com ângulo α de $36,9^\circ$.

4.3.6 g_m/I_{DS}

Essa seção apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ de MOSFETs equivalentes, para V_{DS} igual a 200 mV.

O intuito dessa seção é investigar os efeitos da radiação na degradação deste parâmetro para aplicações analógicas. Na inversão moderada dos transistores ($I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA) foi obtido os valores de g_m/I_{DS} para posterior comparação dos efeitos da radiação entre MOSFETs equivalentes. A comparação será feita da mesma forma que anteriormente.

4.3.6.1 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.21 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

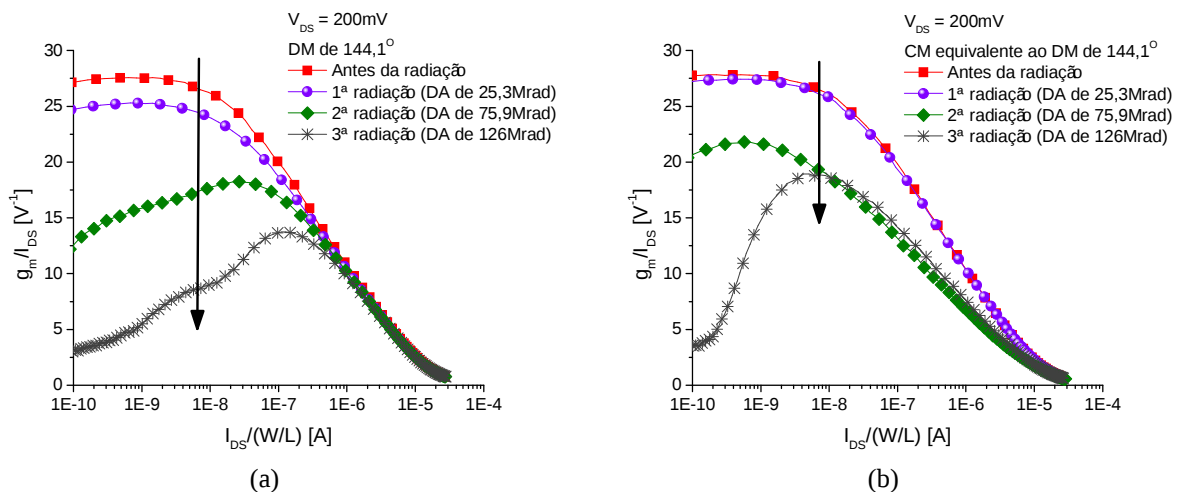


Figura 4.21 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.21 mostrou que os dois transistores sofreram grande degradação de g_m/I_{DS} com as irradiações, principalmente na inversão fraca. Esse fenômeno ocorreu devido ao aumento da corrente de fuga e de estado desligado nos MOSFETs.

A Tabela 4.29 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.29 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação	$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação
Antes	0,00	20,0	0,00%	19,9	0,00%
1ª irradiação	25,3	18,7	-6,50%	19,3	-3,02%
2ª irradiação	75,9	16,9	-15,5%	13,2	-33,7%
3ª irradiação	126	13,7	-31,5%	14,1	-29,1%

Na inversão moderada, o DM apresentou uma redução máxima de 31,5% no valor de g_m/I_{DS} , enquanto que o CM apresentou uma redução máxima de 33,7%. O MOSFET Diamante obteve desempenho ligeiramente melhor que o equivalente convencional na inversão moderada. Se a inversão forte tivesse sido analisada, o desempenho do DM seria ainda melhor, pois esse transistor sofreu pouco efeito da radiação nesse ponto de operação, como mostra a Figura 4.21.

4.3.6.2 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.22 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

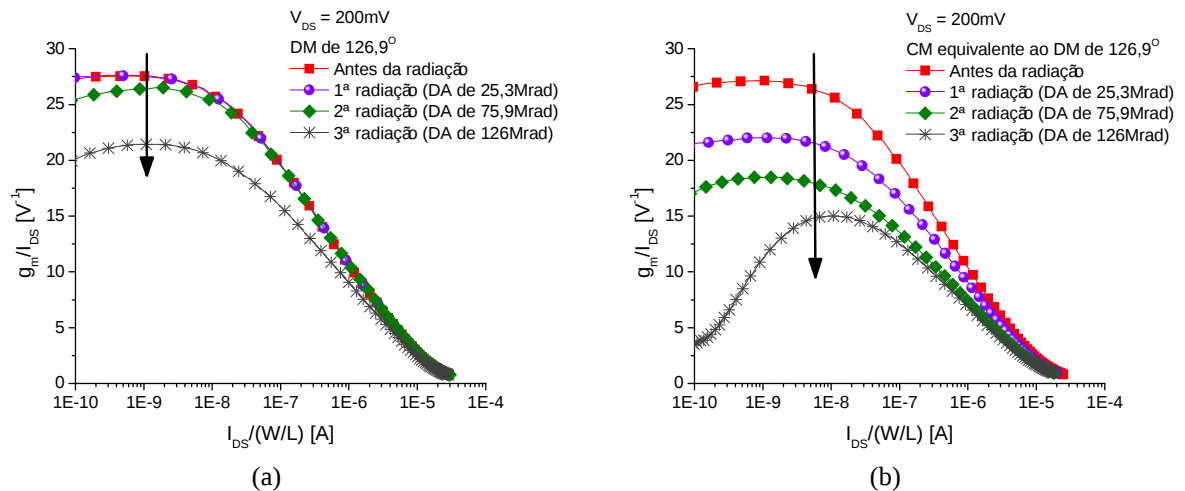


Figura 4.22 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.22 mostrou que a degradação de g_m/I_{DS} foi mais expressiva para o CM do que para o DM.

A Tabela 4.30 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.30 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 126,9°		CM equivalente	
		g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação	g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação
Antes	0,00	19,6	0,00%	19,7	0,00%
1ª irradiação	25,3	19,7	0,510%	16,6	-15,7%
2ª irradiação	75,9	19,5	-0,510%	13,5	-31,5%
3ª irradiação	126	15,9	-18,9%	12,5	-36,5%

A Tabela 4.30 mostra que o DM com ângulo α de 126,9° possui melhor desempenho que o equivalente CM. A variação máxima de g_m/I_{DS} do DM e do CM foram iguais a 18,9% e 36,5%, respectivamente. A Figura 4.22 mostra que o DM possui melhor desempenho também na inversão forte: para essa polarização, o MOSFET Diamante foi pouco afetado pela radiação. Na inversão fraca, o MOSFET convencional sofreu maior degradação dos raios-X.

4.3.6.3 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a 90,0° e do CM Equivalente

A Figura 4.23 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 90,0° e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

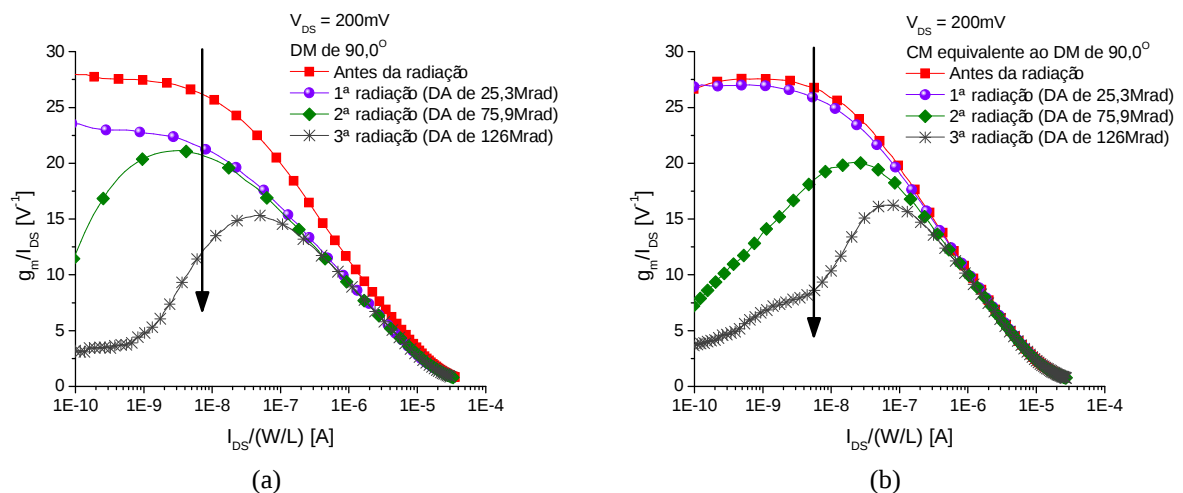


Figura 4.23 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 90,0° (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

Analisando a Figura 4.23, é perceptível que a degradação de g_m/I_{DS} foi muito similar entre os MOSFETs equivalentes.

A Tabela 4.31 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.31 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação	$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação
Antes	0,00	20,0	0,00%	19,6	0,00%
1ª irradiação	25,3	16,1	-19,5%	19,1	-2,55%
2ª irradiação	75,9	15,7	-21,5%	17,7	-9,69%
3ª irradiação	126	14,6	-27,0%	16,1	-17,9%

Analisando a Tabela 4.31, o CM apresentou melhor desempenho que o equivalente CM, pois a variação de g_m/I_{DS} do MOSFET convencional foi igual a 17,9%, enquanto que a variação do DM foi de 27,0%. O alto campo elétrico longitudinal do DM com ângulo α de 90° prejudicou seu desempenho. Os dois transistores sofreram com a irradiação na inversão fraca. Na inversão forte, a Figura 4.23 mostra que o CM possuiu desempenho ligeiramente melhor.

4.3.6.4 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.24 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

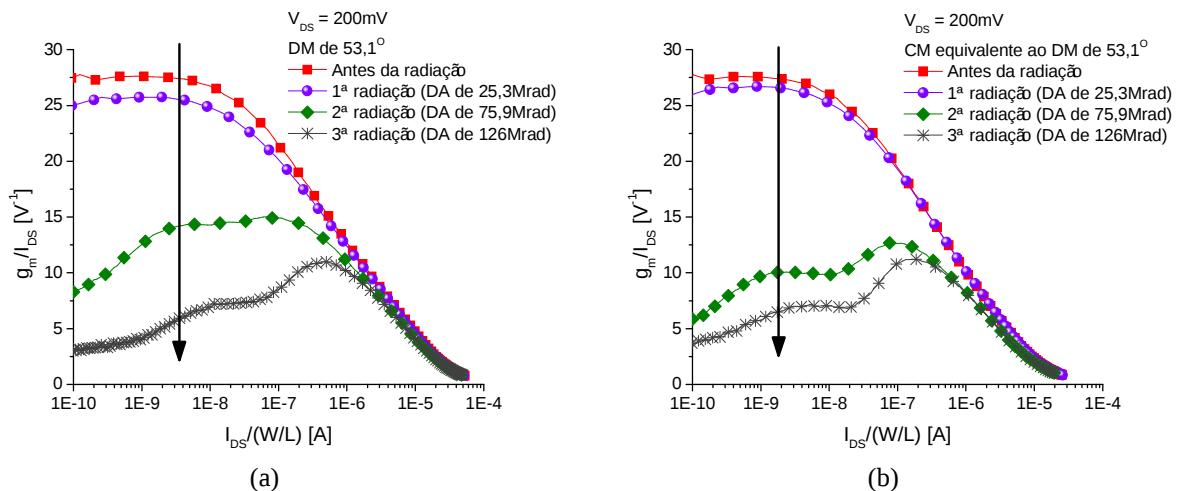


Figura 4.24 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.24 mostra que a degradação de g_m/I_{DS} foi similar entre os dois MOSFETs.

A Tabela 4.32 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.32 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação	$g_m/I_{DS} [V^{-1}]$	Variação
Antes	0,00	21,5	0,00%	19,5	0,00%
1ª irradiação	25,3	20,1	-6,51%	19,3	-1,03%
2ª irradiação	75,9	14,9	-30,7%	12,6	-35,4%
3ª irradiação	126	8,52	-60,4%	10,8	-44,6%

O CM obteve degradação menor de g_m/I_{DS} na inversão moderada. Os dois transistores tiveram uma queda máxima no valor inicial do parâmetro g_m/I_{DS} de 44,6% e 60,4% para o CM e DM, respectivamente. A Figura 4.24 mostra que a degradação foi mais influente na inversão fraca para os dois dispositivos, e que o DM possui melhor desempenho na inversão forte que o equivalente CM.

4.3.6.5 Extração das razões g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.25 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

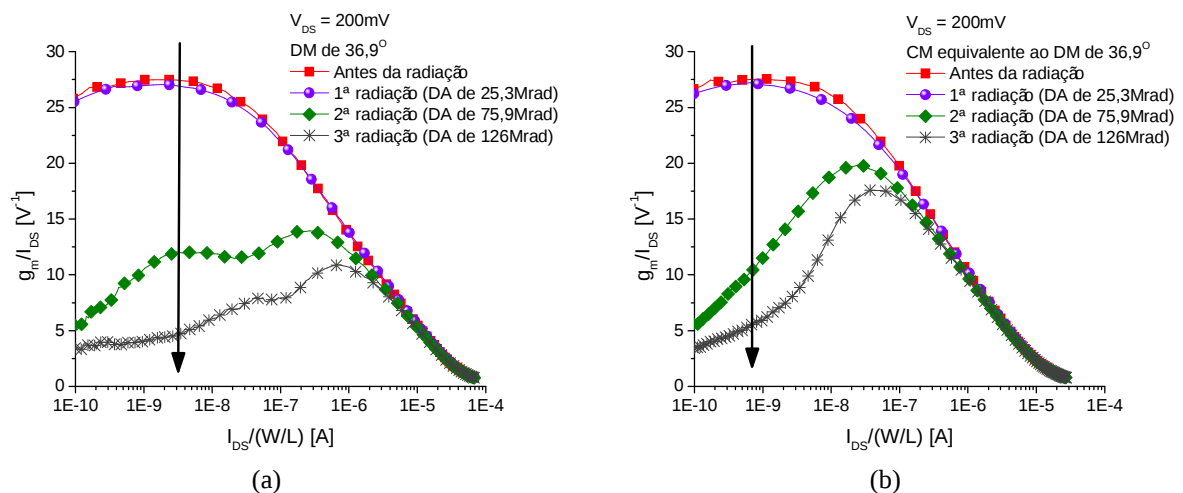


Figura 4.25 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.25 mostra que a degradação de g_m/I_{DS} após as irradiações foi mais influente para o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ do que para o CM equivalente.

A Tabela 4.33 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.33 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$ g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação	CM equivalente g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação
Antes	0,00	22,2	0,00%	19,7	0,00%
1ª irradiação	25,3	21,9	-1,35%	19,4	-1,52%
2ª irradiação	75,9	13,2	-40,5%	17,6	-10,7%
3ª irradiação	126	7,89	-64,5%	16,8	-14,7%

O CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve desempenho superior da razão g_m/I_{DS} na inversão moderada. A Tabela 4.33 mostrou que as degradações de g_m/I_{DS} na inversão moderada foram iguais a 14,7% e 64,5% para o CM e DM, respectivamente. Os dois dispositivos foram fortemente degradados na inversão fraca, como mostra a Figura 4.25. Na inversão forte, o MOSFET convencional foi menos degradado pelos raios-X.

4.3.7 $I_{DS_sat}/(W/L)$

Essa seção apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} de MOSFETs equivalentes, para V_{GT} igual a 400 mV. A corrente de dreno na saturação, $I_{DS_sat}/(W/L)$, foi obtida para V_{GT} igual a 400 mV e V_{DS} igual a 1,50 V.

Das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} também foram obtidos os valores das resistências entre dreno e fonte de estado ligado e das tensões Early. As tensões Early serão utilizadas no final do capítulo para fazer o levantamento dos ganhos de tensão intrínsecos dos transistores antes/pós-irradiações para os dispositivos operando na inversão moderada.

4.3.7.1 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.26 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

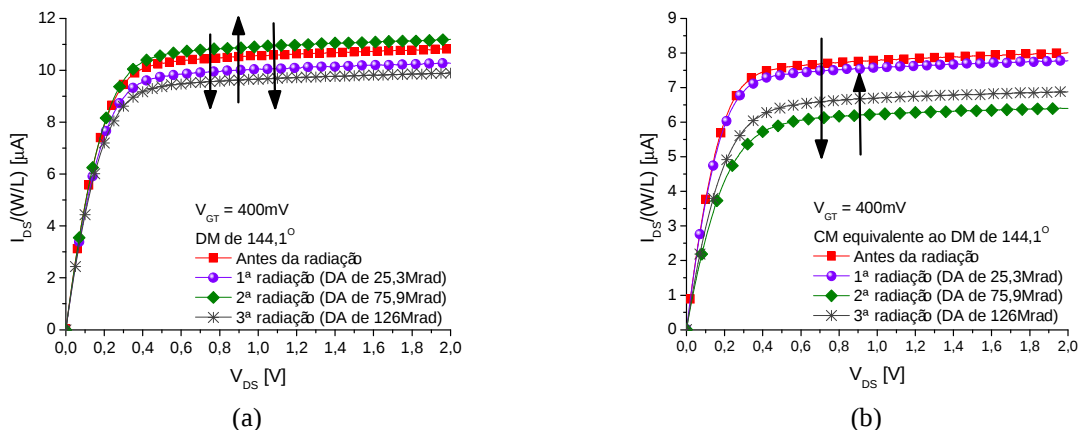


Figura 4.26 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.26 mostrou que, aparentemente, o DM com ângulo α de $144,1^\circ$ teve desempenho melhor que seu equivalente CM, pois o MOSFET Diamante variou pouco a corrente $I_{DS}/(W/L)$ após as irradiações.

A Tabela 4.34 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.34 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	10,7	0,00%	7,91	0,00%
1ª irradiação	25,3	10,2	-4,67%	7,69	-2,78%
2ª irradiação	75,9	11,1	3,74%	6,33	-20,0%
3ª irradiação	126	9,79	-8,50%	6,80	-14,0%

A explicação da Figura 4.26 antecipou a tendência que foi observada na Tabela 4.34. O MOSFET Diamante obteve melhor desempenho para $I_{DS_sat}/(W/L)$, quando comparado ao respectivo equivalente convencional. O DM teve uma redução de 8,50% no valor de $I_{DS_sat}/(W/L)$ após a 3ª irradiação, enquanto que o CM equivalente teve uma redução de 20,0% no valor de $I_{DS_sat}/(W/L)$ após a 2ª irradiação.

4.3.7.2 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.27 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

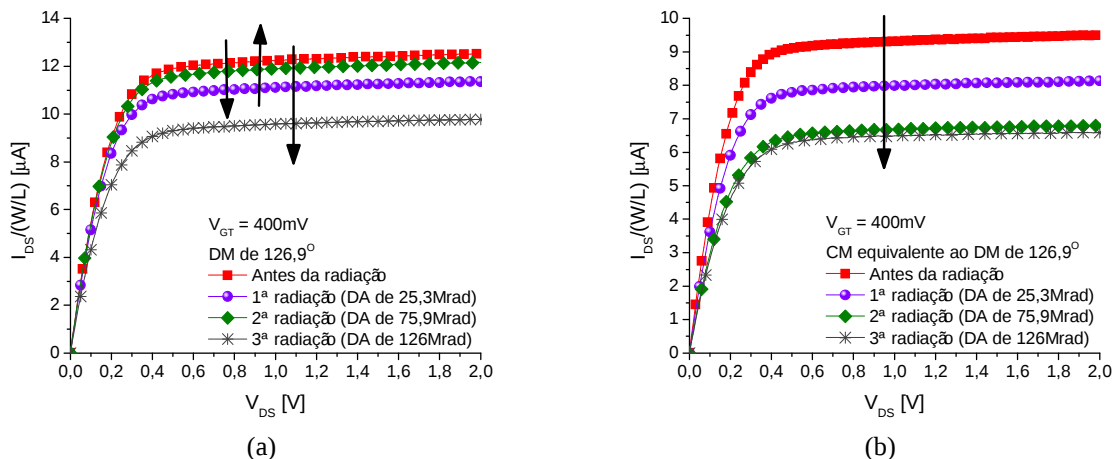


Figura 4.27 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações

Analisando a Figura 4.27, o DM com ângulo α de $126,9^\circ$ sofreu grande degradação na corrente de dreno somente após a 3ª irradiação. Já o CM equivalente sofreu os efeitos da radiação a partir da 1ª irradiação.

A Tabela 4.35 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.35 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	12,4	0,00%	9,43	0,00%
1ª irradiação	25,3	11,2	-9,68%	8,08	-14,3%
2ª irradiação	75,9	12,0	-3,23%	6,75	-28,4%
3ª irradiação	126	9,69	-21,9%	6,55	-30,5%

O MOSFET Diamante teve uma degradação de 21,9% da corrente $I_{DS_sat}/(W/L)$ após a 3ª irradiação, enquanto que o convencional equivalente teve uma degradação de 30,5% da corrente $I_{DS_sat}/(W/L)$ após a 3ª irradiação. O DM com ângulo α de $126,9^\circ$ obteve melhor desempenho que o equivalente CM devido a menor variação de $I_{DS_sat}/(W/L)$ após as irradiações.

4.3.7.3 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.28 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

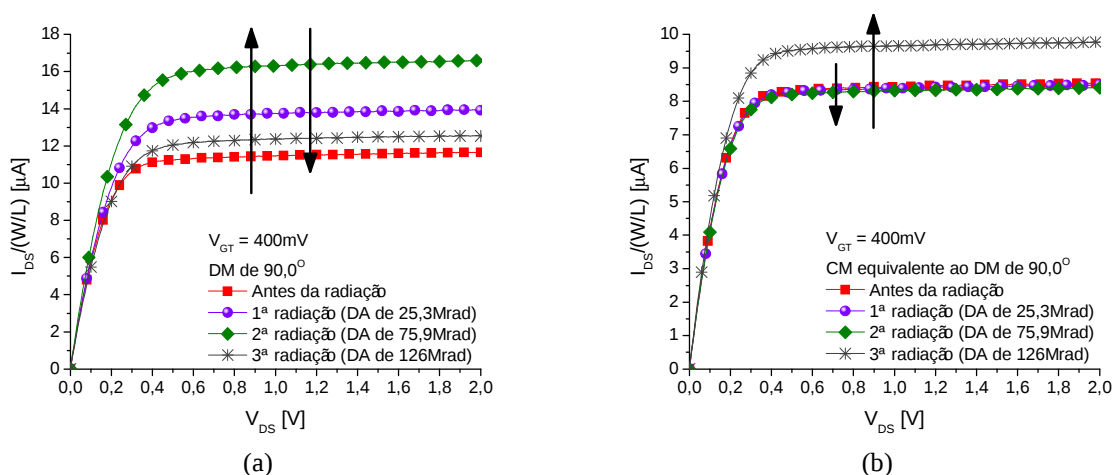


Figura 4.28 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações

A Figura 4.28 mostra que o DM com ângulo α de 90° foi mais influenciado que seu equivalente CM após as irradiações. O CM foi significativamente afetado após a 3ª irradiação, enquanto que o DM foi afetado a partir da 1ª irradiação.

A Tabela 4.36 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.36 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	11,6	0,00%	8,49	0,00%
1ª irradiação	25,3	13,9	19,8%	8,44	-0,589%
2ª irradiação	75,9	16,5	42,2%	8,36	-1,53%
3ª irradiação	126	12,5	7,76%	9,71	14,4%

Mais uma vez, o campo elétrico longitudinal do DM com ângulo α de 90° prejudicou seu desempenho. A Tabela 4.36 mostra que a variação de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM foi de 42,2% após a 2ª irradiação, enquanto que a variação de $I_{DS_sat}/(W/L)$ para o CM equivalente foi de 14,4% após a 3ª irradiação. Para esse caso, o CM obteve melhor desempenho.

4.3.7.4 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 4.29 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

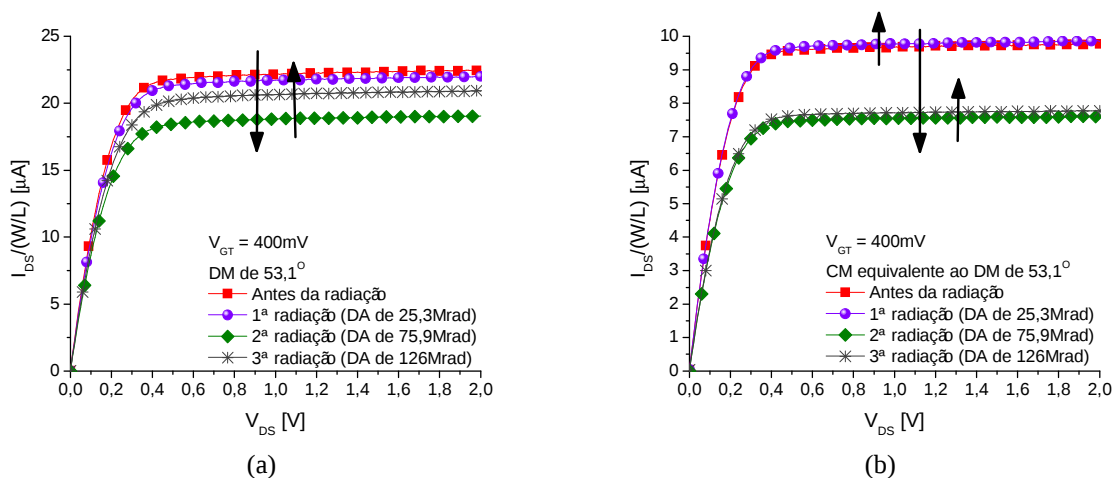


Figura 4.29 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações

Aparentemente, a Figura 4.29 mostra que o CM foi mais afetado pela radiação que seu equivalente DM com ângulo α de 53,1°. Os MOSFETs convencional e Diamante sofreram grande variação na corrente $I_{DS}/(W/L)$ após a 2ª irradiação.

A Tabela 4.37 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 53,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.37 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 53,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 53,1°		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	22,3	0,00%	9,73	0,00%
1ª irradiação	25,3	21,9	-1,79%	9,83	1,03%
2ª irradiação	75,9	18,9	-15,2%	7,59	-22,0%
3ª irradiação	126	20,8	-6,73%	7,76	-20,2%

O DM com ângulo α de 53,1° sofreu redução máxima de 15,2% no valor de $I_{DS_sat}/(W/L)$. Já o CM equivalente sofreu redução máxima de 22,0% no valor de $I_{DS_sat}/(W/L)$. O MOSFET Diamante obteve melhor desempenho que seu equivalente CM devido a menor variação do parâmetro estudado.

4.3.7.5 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 36,9° e do CM Equivalente

A Figura 4.30 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de 36,9° e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

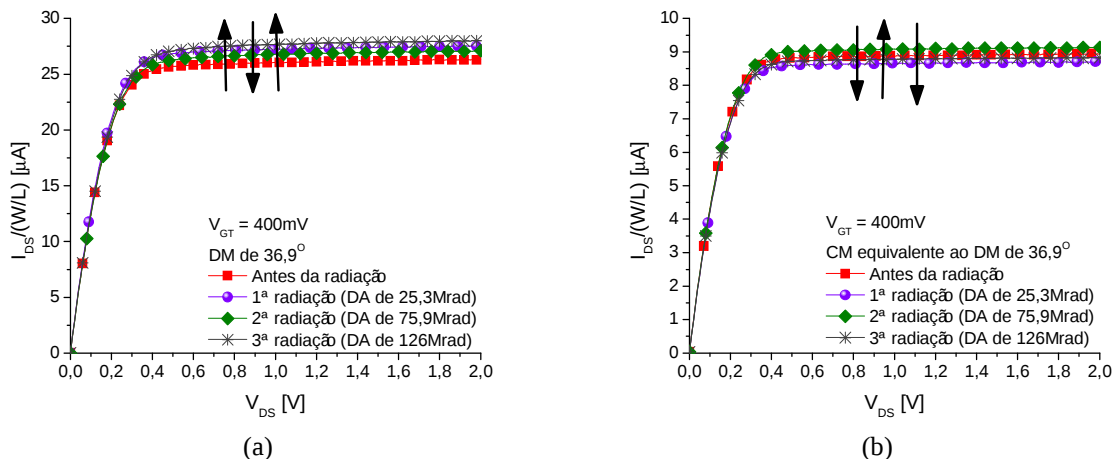


Figura 4.30 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de 36,9° (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiações

Não é possível obter conclusão alguma analisando visualmente a Figura 4.30. Ao que tudo indica, o DM com ângulo α de 36,9° e o CM equivalente possuem comportamento similar de $I_{DS}/(W/L)$ após as irradiações.

A Tabela 4.38 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.38 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	26,2	0,00%	8,91	0,00%
1ª irradiação	25,3	27,4	4,58%	8,68	-2,58%
2ª irradiação	75,9	27,0	3,05%	9,11	2,24%
3ª irradiação	126	27,9	6,49%	8,80	-1,23%

Como já foi previsto anteriormente pela análise da Figura 4.30, o comportamento de $I_{DS_sat}/(W/L)$ dos MOSFETs equivalentes foi similar. Entretanto, o CM obteve comportamento ligeiramente melhor que seu equivalente DM com ângulo α de 36,9°. A variação máxima de $I_{DS_sat}/(W/L)$ para o DM e CM foram de 6,49% e 2,58%, respectivamente.

4.3.8 R_{on}

As resistências de ligamento foram obtidas por meio das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} , para V_{GT} igual a 400 mV. Cada tabela dessa seção apresentará os valores de R_{on} obtidos antes e após as irradiações.

4.3.8.1 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Tabela 4.39 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.39 – R_{on} do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		R_{on} [kΩ]	Variação	R_{on} [kΩ]	Variação
Antes	0,00	19,2	0,00%	24,4	0,00%
1ª irradiação	25,3	20,3	5,73%	24,7	1,23%
2ª irradiação	75,9	19,3	0,521%	35,1	43,9%
3ª irradiação	126	20,9	8,85%	31,2	27,9%

O DM com ângulo α de 144,1° obteve melhor desempenho que seu equivalente CM para R_{on} . As variações máximas de R_{on} após as irradiações foram de 8,85% para o DM e de 43,9% para o CM.

4.3.8.2 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a 126,9° e do CM Equivalente

A Tabela 4.40 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.40 – R_{on} do DM com ângulo α de 126,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 126,9°		CM Equivalente	
		R_{on} [kΩ]	Variação	R_{on} [kΩ]	Variação
Antes	0,00	17,1	0,00%	21,8	0,00%
1ª irradiação	25,3	18,0	5,26%	25,6	17,4%
2ª irradiação	75,9	17,3	1,17%	31,4	44,0%
3ª irradiação	126	21,4	25,1%	33,0	51,4%

Os MOSFETs equivalentes sofreram maior degradação após a 3ª irradiação. A variação máxima de R_{on} foi de 51,4% para o CM e de 25,1% para o DM com ângulo α de 126,9°. Com esses resultados, pode-se concluir que o DM com ângulo α de 126,9° obteve melhor desempenho que seu CM equivalente.

4.3.8.3 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a 90,0° e do CM Equivalente

A Tabela 4.41 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.41 – R_{on} do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 90,0°		CM equivalente	
		R_{on} [kΩ]	Variação	R_{on} [kΩ]	Variação
Antes	0,00	16,0	0,00%	22,2	0,00%
1ª irradiação	25,3	15,8	-1,25%	22,4	0,901%
2ª irradiação	75,9	14,3	-10,6%	22,6	1,80%
3ª irradiação	126	16,9	5,62%	20,8	-6,31%

A variação máxima de R_{on} do DM com ângulo α de 90° foi de 10,6%. Já a variação máxima de R_{on} do CM foi de 6,31%. Para esses MOSFETs equivalentes, o CM obteve melhor desempenho que seu equivalente DM com ângulo α de 90,0°.

4.3.8.4 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.42 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.42 – R_{on} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		R_{on} [k Ω]	Variação	R_{on} [k Ω]	Variação
Antes	0,00	9,17	0,00%	20,6	0,00%
1ª irradiação	25,3	9,52	3,82%	20,5	-0,485%
2ª irradiação	75,9	10,7	16,7%	26,0	26,2%
3ª irradiação	126	10,2	11,2%	25,6	24,3%

O DM com ângulo α de $53,1^\circ$ obteve melhor desempenho que seu equivalente CM, pois a variação máxima de R_{on} do DM foi de 16,7%, enquanto que o CM obteve 24,3% de variação máxima do parâmetro estudado.

4.3.8.5 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.43 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.43 – R_{on} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		R_{on} [k Ω]	Variação	R_{on} [k Ω]	Variação
Antes	0,00	7,46	0,00%	21,5	0,00%
1ª irradiação	25,3	7,25	-2,82%	21,9	1,86%
2ª irradiação	75,9	7,53	0,938%	21,5	0,00%
3ª irradiação	126	7,42	-0,536%	22,0	2,33%

A variação máxima da resistência entre dreno e fonte de estado ligado do DM e CM foram de 2,82% e 2,33%, respectivamente. O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e seu equivalente CM possuem desempenho similar para R_{on} .

4.3.9 V_{EA}

As tensões Early foram obtidas por meio das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} , para V_{GT} igual a 400 mV. Cada tabela dessa seção apresentará os valores de V_{EA} obtidos antes e após as irradiações.

4.3.9.1 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.44 mostra os valores de V_{EA} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.44 – V_{EA} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	37,7	0,00%	34,9	0,00%
1ª irradiação	25,3	39,2	3,98%	34,6	-0,860%
2ª irradiação	75,9	38,3	1,59%	32,8	-6,02%
3ª irradiação	126	39,1	3,71%	34,1	-2,29%

O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ obteve melhor desempenho que seu equivalente CM, pois a variação máxima de V_{EA} foi menor para o Diamante. O V_{EA} do DM variou 3,98%, enquanto que a variação para o CM equivalente foi de 6,02%.

4.3.9.2 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.45 mostra os valores de V_{EA} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.45 – V_{EA} do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=2,45 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	40,9	0,00%	47,5	0,00%
1ª irradiação	25,3	41,6	1,71%	56,1	18,1%
2ª irradiação	75,9	41,4	1,22%	57,9	21,9%
3ª irradiação	126	44,5	8,80%	60,0	26,3%

Após a 3ª irradiação, o CM obteve uma variação máxima de 26,3% no valor de V_{EA} e o DM obteve uma variação máxima de 8,80%. Após as irradiações, o MOSFET Diamante

manteve o valor de V_{EA} próximo do valor inicial, em outras palavras, o DM com ângulo α de $126,9^\circ$ teve melhor desempenho que seu equivalente CM.

4.3.9.3 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.46 mostra os valores de V_{EA} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.46 – V_{EA} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	55,5	0,00%	73,8	0,00%
1ª irradiação	25,3	65,6	18,2%	77,9	5,56%
2ª irradiação	75,9	58,2	4,86%	85,7	16,1%
3ª irradiação	126	64,7	16,6%	84,9	15,0%

A variação máxima de V_{EA} para o DM com ângulo α de 90° e para seu equivalente CM foram de 18,2% e 16,1%, respectivamente. O CM teve desempenho ligeiramente melhor que o DM equivalente devido a menor variação do parâmetro estudado.

4.3.9.4 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.47 mostra os valores de V_{EA} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.47 – V_{EA} do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=7,00 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	70,8	0,00%	105	0,00%
1ª irradiação	25,3	75,8	7,06%	104	-0,952%
2ª irradiação	75,9	78,6	11,0%	141	34,3%
3ª irradiação	126	72,8	2,82%	129	22,9%

O DM com ângulo α de $53,1^\circ$ obteve melhor desempenho devido a menor variação de V_{EA} . O CM teve uma variação máxima de 34,3% no valor de V_{EA} , enquanto que a variação máxima do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ foi de 11,0%.

4.3.9.5 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.48 mostra os valores de V_{EA} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.48 – V_{EA} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	85,8	0,00%	153	0,00%
1ª irradiação	25,3	87,6	2,10%	179	17,0%
2ª irradiação	75,9	80,7	-5,94%	160	4,58%
3ª irradiação	126	78,9	-8,04%	185	20,9%

O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ teve melhor desempenho que o equivalente CM, pois a variação máxima de V_{EA} dos MOSFETs Diamante e convencional foram iguais a 8,04% e 20,9%, respectivamente.

4.3.10 A_V

As razões g_m/I_{DS} da seção 4.3.6 e os valores de V_{EA} da seção 4.3.9 foram utilizados aqui para a obtenção dos ganhos de tensão intrínsecos dos MOSFETs. Cada tabela dessa seção apresentará os valores de A_V obtidos antes e após as irradiações.

4.3.10.1 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.49 mostra os valores de A_V antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.49 – A_V do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	754	0,00%	695	0,00%
1ª irradiação	25,3	733	-2,78%	668	-3,85%
2ª irradiação	75,9	647	-14,2%	433	-37,7%
3ª irradiação	126	536	-29,0%	481	-30,8%

O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ obteve melhor desempenho que seu equivalente CM, pois a variação máxima do MOSFET Diamante foi menor. As variações máximas do parâmetro A_V foram iguais a 29,0% e 37,7% para o DM e CM, respectivamente.

4.3.10.2 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $126,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.50 mostra os valores de A_V antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.50 – A_V do DM com ângulo α de $126,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{\text{eff}}=2,45 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $126,9^\circ$		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	802	0,00%	936	0,00%
1ª irradiação	25,3	820	2,23%	931	-0,480%
2ª irradiação	75,9	807	0,706%	782	-16,5%
3ª irradiação	126	708	-11,7%	750	-19,9%

Após a 3ª irradiação, as máximas variações de A_V para o DM e CM foram de 11,7% e 19,9%, respectivamente. Nesse caso, o DM com ângulo α de $126,9^\circ$ obteve melhor desempenho que seu equivalente CM.

4.3.10.3 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.51 mostra os valores de A_V antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.51 – A_V do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{\text{eff}}=4,02 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	1110	0,00%	1446	0,00%
1ª irradiação	25,3	1056	-4,86%	1488	2,86%
2ª irradiação	75,9	914	-17,7%	1517	4,87%
3ª irradiação	126	945	-14,9%	1367	-5,50%

O DM com ângulo α de 90° obteve pior desempenho, pois a variação máxima de A_V para esse transistor foi igual a 17,7%, enquanto que a variação máxima de A_V do CM foi igual a 5,50%.

4.3.10.4 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $53,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.52 mostra os valores de A_V antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.52 – A_V do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiações

$L_{\text{eff}}=7,00 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $53,1^\circ$		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	1522	0,00%	2048	0,00%
1ª irradiação	25,3	1524	0,0907%	2007	-1,97%
2ª irradiação	75,9	1171	-23,1%	1777	-13,2%
3ª irradiação	126	620	-59,3%	1393	-32,0%

Após a 3ª irradiação, o ganho de tensão intrínseco do DM com ângulo α de $53,1^\circ$ e do CM equivalente caíram 59,3% e 32,0%, respectivamente. Para esses dispositivos equivalentes, o CM obteve melhor desempenho que o DM com ângulo α de $53,1^\circ$.

4.3.10.5 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 4.53 mostra os valores de A_V antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 4.53 – A_V do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiações

$L_{\text{eff}}=9,98 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	1905	0,00%	3014	0,00%
1ª irradiação	25,3	1918	0,718%	3473	15,2%
2ª irradiação	75,9	1065	-44,1%	2816	-6,57%
3ª irradiação	126	623	-67,3%	3108	3,12%

O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ teve desempenho pior que seu equivalente CM devido à queda excessiva de A_V após a 3ª irradiação.

4.4 Tabela Geral do Desempenho do MOSFET Diamante e do MOSFET Convencional Após Irradiação por Raios-X

A Tabela 4.54 apresenta de forma resumida como foi o desempenho de cada MOSFET após a irradiação por raios-X. Cada parâmetro elétrico foi analisado separadamente.

Tabela 4.54 – Tabela de desempenho dos DMs e dos respectivos CMs equivalentes após irradiações por raios-X

Ângulo α	V_{Th}		I_{on}/(W/L)		I_{leak}/(W/L)		I_{off}/(W/L)		I_{on}/I_{off}	
	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM
144,1°	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-
126,9°	+	-	+	-	0	0	+	-	-	-
90,0°	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-
53,1°	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-
36,9°	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-

Ângulo α	g_{m,max}/(W/L)		g_m/I_{DS}		I_{DS,sat}/(W/L)		R_{on}		V_{EA}	
	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM
144,1°	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
126,9°	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
90,0°	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
53,1°	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-
36,9°	-	+	-	+	-	+	0	0	+	-

Ângulo α	A_v	
	DM	CM
144,1°	+	-
126,9°	+	-
90,0°	-	+
53,1°	-	+
36,9°	-	+

4.4.1 Análise de V_{Th}

Com exceção do DM com ângulo α de 90°, todos os outros DMs tiveram degradação menor de V_{Th} após as irradiações, quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. A tensão de limiar dos DMs sofreu menor influência dos raios-X, pois as regiões de bico de pássaro dos MOSFETs Diamantes são menores que a dos seus respectivos CMs equivalentes. O alto campo elétrico longitudinal do DM com ângulo α de 90° prejudicou seu desempenho quando comparado ao equivalente CM. Os MOSFETs do tipo Diamante são uma ótima alternativa para aplicações analógicas, pois esses dispositivos sofreram menos influência no ponto de operação quando expostos a uma fonte radioativa.

4.4.2 Análise de I_{on}/(W/L)

A menor BBR dos DMs contribuiu para o melhor desempenho desses MOSFETs quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. A única exceção foi para o DM com ângulo α de 90,0°, ao qual teve seu desempenho prejudicado devido ao alto campo elétrico longitudinal que está associado a esse tipo de geometria e ângulo α .

4.4.3 Análise de $I_{leak}/(W/L)$ e de $I_{off}/(W/L)$

Para os MOSFETs estudados, o aumento da corrente de fuga e de estado desligado se deve as cargas positivas armadilhadas nas BBR após as irradiações [75].

Para $I_{leak}/(W/L)$, os CMs obtiveram desempenho superior que os respectivos DMs equivalentes, pois as correntes de fuga nos MOSFETs convencionais sofreram menor variação que nos MOSFETs Diamantes equivalentes.

As grandes BBR dos CMs contribuíram para a elevação de $I_{off}/(W/L)$. Embora os DMs possuam BBR bem menores que a dos seus respectivos CMs equivalentes, o maior campo elétrico longitudinal dos MOSFETs Diamantes contribuiu negativamente para o aumento de $I_{off}/(W/L)$, principalmente para os DMs com ângulos α menores que $90,0^\circ$.

Em aplicações digitais, um valor elevado de $I_{off}/(W/L)$ ocasiona aumento no consumo do CI, além de gerar erros de lógica no circuito [24].

4.4.4 Análise da razão I_{on}/I_{off}

Os MOSFETs tiveram redução brusca na razão I_{on}/I_{off} , que foi causa pela elevação de $I_{off}/(W/L)$ após as irradiações. Isso significa que o consumo de energia de todos os MOSFETs aumentou consideravelmente.

4.4.5 Análise de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$

Os DMs com ângulo α de $126,9^\circ$ e $144,1^\circ$ obtiveram bom desempenho em relação aos CMs equivalentes, pois as transcondutâncias dos DMs citados variaram pouco a cada dose acumulada de raios-X. O mesmo ocorreu para o CM equivalente ao DM com ângulo α de 90° . Os MOSFETs equivalentes para os ângulos α de $53,1^\circ$ e $36,9^\circ$ tiveram desempenho muito similar para $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$.

Tendo por base os resultados apresentados anteriormente, pode-se garantir que os DMs obtiveram desempenho superior aos CMs equivalentes. O DM, no geral, foi capaz de manter a transcondutância máxima razoavelmente constante após cada dose de radiação absorvida pelo *chip*. Isso significa que o DM é capaz de garantir o bom funcionamento de amplificadores em ambientes radioativos, pois seu g_m varia pouco.

4.4.6 Análise de g_m/I_{DS}

As figuras da seção 4.3.6 mostraram que todos os dispositivos sofreram forte degradação de g_m/I_{DS} na inversão fraca. Isso ocorreu devido ao aumento da corrente de fuga nos dispositivos, como já foi documentado na seção 4.3.3. Provavelmente o circuito que utilizasse esses MOSFETs ficaria inoperante se esses transistores operassem na inversão fraca em um ambiente radioativo.

A degradação dos transistores também ocorreu na inversão moderada. Os DMs com ângulo α maiores que 90° tiveram melhor desempenho que seus respectivos CMs equivalentes. Já os CMs equivalentes aos DMs com ângulo α menores ou igual a 90° tiveram melhor desempenho, pois o alto campo elétrico longitudinal dos DMs prejudicou seu desempenho para o parâmetro g_m/I_{DS} .

Tendo por base as figuras da seção 4.3.6, é recomendável que circuitos integrados analógicos operem na inversão forte se estes forem expostos em ambientes radioativos.

4.4.7 Análise de $I_{DS_sat}/(W/L)$

Os DMs com ângulo α maiores que 90° tiveram melhor desempenho que seus respectivos CMs equivalentes. Mais uma vez, o DM com ângulo α de 90° teve seu desempenho prejudicado devido ao maior campo elétrico longitudinal quando comparado ao respectivo CM equivalente. Os DMs com ângulos α de $36,9^\circ$ e de $53,1^\circ$ tiveram comportamento similar aos respectivos CMs. Mesmo assim, o CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ foi ligeiramente melhor.

Após cada irradiação, as correntes $I_{DS_sat}/(W/L)$ se tornavam maiores ou menores que o valor inicial sem que houvesse um padrão lógico para esse fato. Como os MOSFETs foram medidos logo após a irradiação, provavelmente a estrutura estava passando pelo processo de recozimento e as tensões de limiar dos dispositivos estavam em constante mudança, o que acentuou o aumento ou diminuição de $I_{DS_sat}/(W/L)$ após as irradiações.

4.4.8 Análise de R_{on}

Após as irradiações, os MOSFETs Diamantes obtiveram melhor desempenho para R_{on} do que os respectivos MOSFETs convencionais equivalentes. A exceção foi para o DM com ângulo α de 90° que apresentou comportamento ruim para o parâmetro estudado, quando comparado ao CM equivalente.

Na maioria dos casos, a resistência entre dreno e fonte de estado ligado aumentou após as irradiações. A elevação de R_{on} ocasiona aumento no tempo de chaveamento de MOSFETs operando como chave.

4.4.9 Análise de V_{EA}

A tensão Early se manteve mais estável para os DMs do que para os respectivos CMs equivalentes, porém a única exceção foi para o DM com ângulo α de 90° . A estabilidade do DM para o parâmetro V_{EA} é de extrema importância para aplicações analógicas: o ganho de tensão intrínseco do amplificador é diretamente proporcional a V_{EA} . Quanto maior é a estabilidade do MOSFET em manter os parâmetros g_m/I_{DS} e V_{EA} próximo dos valores iniciais (antes da radiação), menor será a interferência da radiação no ganho de tensão intrínseco do amplificador.

4.4.10 Análise de A_V

Analisando A_V , os DMs com ângulo α maiores que 90° tiveram bom desempenho em relação aos CMs equivalentes, pois a razão g_m/I_{DS} dos DMs não sofreu forte influência da radiação.

O alto campo elétrico dos DMs com ângulo α menores ou igual a 90° fez com que a corrente de fuga aumentasse nesses dispositivos. O aumento dessa corrente de fuga ocasionou a queda da razão g_m/I_{DS} prejudicando, dessa forma, o A_V dos DMs citados quando comparados aos respectivos CMs equivalentes.

5 ESTUDO COMPARATIVO DOS EFEITOS DA RADIAÇÃO POR PRÓTONS ENTRE OS nMOSFETs DIAMANTES E OS SEUS RESPECTIVOS nMOSFETs CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

Esse capítulo apresenta resultados experimentais comparativos entre os DMs e os seus respectivos CMs equivalentes, aos quais foram obtidos antes e após a irradiação por prótons. No total foram testados 3 pares de DMs e CMs equivalentes, os quais possuem processo de fabricação comercial. Os MOSFETs foram polarizados durante a irradiação para potencializar os efeitos degradantes da radiação por prótons.

5.1 Detalhes sobre o *Chip*

O *chip* que foi utilizado para radiação por prótons é do mesmo lote de produção daquele que foi utilizado no capítulo anterior, ou seja, esse *chip* utiliza tecnologia de fabricação comercial da *On Semiconductor* de 0,35 μm e foi fabricado via MOSIS [97], por meio do programa MEP [98].

Esse *chip* também foi encapsulado pelo CTI. Os DMs de 126,9° e 53,1° apresentaram problemas que foi constatado após o encapsulamento do *chip* (os fios desses transistores se soltaram dos *pads* do encapsulamento).

A Tabela 5.1 apresenta as dimensões dos DMs e CMs que foram utilizados nesse experimento.

Tabela 5.1 – Dimensão dos DMs e CMs equivalentes que foram irradiados com prótons (λ é igual a 0,35 μm)

nMOSFET Convencional		W/L	Área [λ^2]	nMOSFET Diamante			
W [λ]	L [λ]			b [λ]	B [λ]	L _{eff} [λ]	Ângulo α
17,0	28,5	0,596	484,5	3,00	54,0	28,5	36,9°
17,0	11,5	1,48	195,5	3,00	20,0	11,5	90,0°
17,0	5,50	2,96	93,5	3,00	8,50	5,75	144,1°

5.2 Procedimento Experimental

O CI irradiado com prótons foi medido Keithley 4200-SCS [102], da mesma forma que o CI apresentado no capítulo anterior.

Todos os nMOSFETs permaneceram polarizados durante a exposição aos prótons para potencializar os efeitos da radiação [75]. Durante o processo de radiação, os transistores foram polarizados com V_{DS} igual a 50 mV e V_{GS} igual a 800 mV.

A irradiação por prótons foi feita no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), nas dependências do Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos (LAMFI). A Figura 5.1 apresenta a imagem do acelerador de partículas da USP, ao qual está contido nas dependências do LAMFI.



Figura 5.1 – Acelerador de partículas do LAMFI [104]

A Figura 5.2 apresenta a mesa de controle do acelerado de partículas.



Figura 5.2 – Mesa de controle do acelerador de partículas do LAMFI [104]

O CI foi irradiado uma única vez a uma distância de aproximadamente 5 cm do bocal de saída do feixe de prótons. A corrente e a energia do feixe de prótons foram ajustados para 1

nA e 1,3 MeV, respectivamente. O *chip* recebeu radiação a uma taxa de dose de aproximadamente 15 Mrad/min durante 8 minutos, ou seja, a dose total acumulada pelo *chip* foi de aproximadamente 121 Mrad.

A Figura 5.3 apresenta o CI posicionado na saída do feixe de prótons no momento da irradiação.

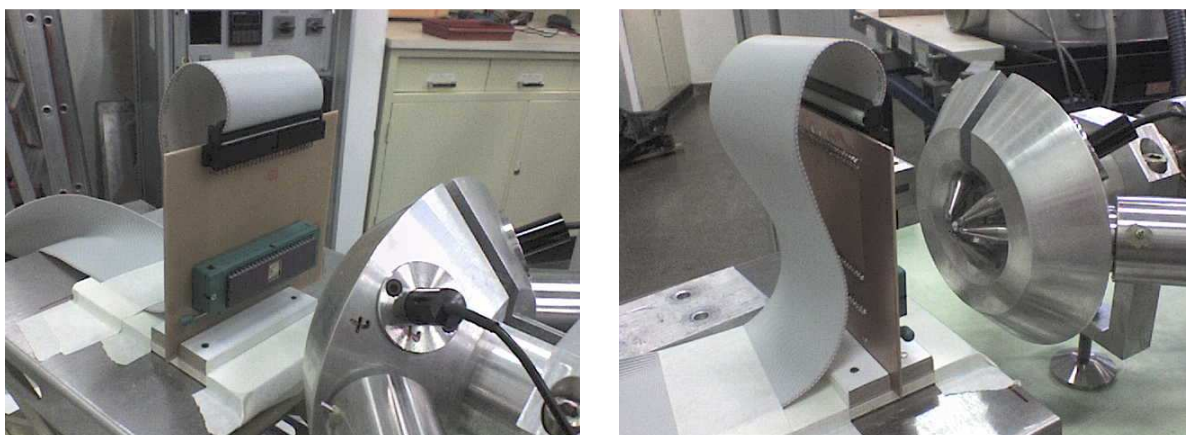


Figura 5.3 – CI posicionado na saída do feixe de prótons

Logo após a irradiação, o CI foi transportado da USP até o Centro Universitário da FEI para levantamento das curvas características dos transistores. Os MOSFETs começaram a ser medidos aproximadamente duas horas depois da irradiação.

5.3 Resultados Experimentais

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais dos DMs e CMs que foram expostos à radiação por prótons. Os parâmetros V_{Th} , $I_{on}/(W/L)$, $I_{leak}/(W/L)$, $I_{off}/(W/L)$, I_{on}/I_{off} , $g_{m_máx}/(W/L)$, g_m/I_{DS} , $I_{DS_sat}/(W/L)$, V_{EA} , R_{on} e A_V foram levantados para os DMs com ângulos α de 144,1°, 90,0° e 36,9° e para os seus respectivos CMs equivalentes.

5.3.1 V_{Th}

As tensões de limiar foram obtidas utilizando a técnica da segunda derivada [40], para V_{DS} igual a 100 mV. As tabelas apresentadas a seguir mostram a degradação de V_{Th} após a irradiação por prótons.

5.3.1.1 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.2 mostra os valores de V_{Th} antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.2 – V_{Th} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,78	0,00%	0,75	0,00%
Pós-irradiação	121	0,66	-15,4%	0,61	-18,7%

O CM apresentou uma queda mais acentuada no valor da tensão de limiar quando comparado ao DM equivalente. Após a irradiação, o V_{Th} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ caiu 15,4%, enquanto que a queda de V_{Th} do CM equivalente foi de 18,7%.

5.3.1.2 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.3 mostra os valores de V_{Th} antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.3 – V_{Th} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,82	0,00%	0,74	0,00%
Pós-irradiação	121	0,76	-7,32%	0,58	-21,6%

A variação de V_{Th} do DM com ângulo α de 90° foi de 7,32% enquanto que a variação de V_{Th} do CM equivalente foi de 21,6%. Da mesma forma que o DM com ângulo α de $144,1^\circ$, o MOSFET Diamante com ângulo α de 90° obteve melhor desempenho que seu equivalente CM após a irradiação.

5.3.1.3 Extração de V_{Th} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.4 mostra os valores de V_{Th} antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.4 – V_{Th} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		V_{Th} [V]	Variação	V_{Th} [V]	Variação
Antes	0,00	0,83	0,00%	0,75	0,00%
Pós-irradiação	121	0,77	-7,23%	0,67	-10,7%

O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve melhor desempenho que o equivalente CM, pois a redução no valor de V_{Th} foi menor para o MOSFET Diamante. As tensões de limiar se reduziram em 7,23% e 10,7% para o DM e CM equivalente, respectivamente.

5.3.2 $I_{on}/(W/L)$

Os valores das correntes de estado ligado foram obtidos para V_{GS} e V_{DS} iguais a 1,95 V e 200 mV, respectivamente. Os valores de $I_{on}/(W/L)$ foram obtidos das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} . Essas curvas serão apresentadas para demonstrar como a radiação por prótons influenciou no comportamento elétrico dos nMOSFETs.

5.3.2.1 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.4 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

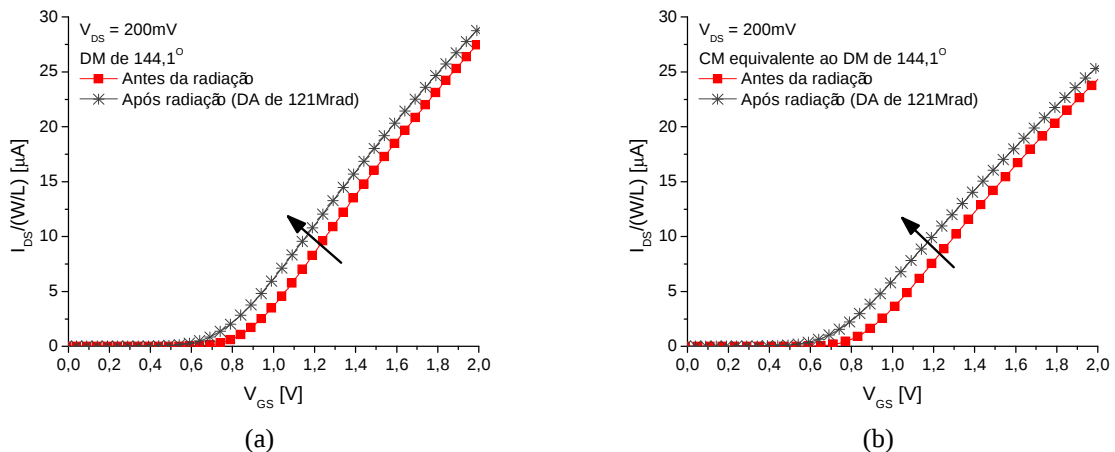


Figura 5.4 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

Analisando a Figura 5.4, é perceptível o deslocamento da curva $I_{DS}/(W/L)$, que está em função de V_{GS} , para a esquerda. Isso ocorreu devido ao acúmulo de cargas positivas no óxido de porta [73].

A Tabela 5.5 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.5 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	23,4	0,00%	26,6	0,00%
Pós-irradiação	121	24,6	5,13%	28,0	5,26%

Como mostra a Tabela 5.5, houve aumento nos valores de $I_{on}/(W/L)$ nos transistores estudados após a irradiação. Isso ocorreu devido ao deslocamento das curvas da Figura 5.4 para a esquerda. O desempenho dos dois MOSFETs foi similar para $I_{on}/(W/L)$.

5.3.2.2 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.5 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

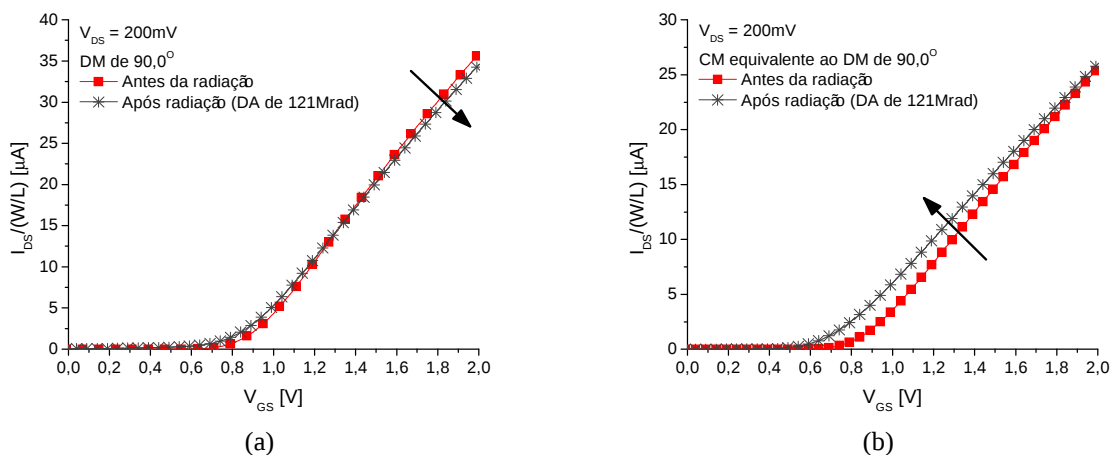


Figura 5.5 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

Para V_{GS} de aproximadamente 1 V, o DM sofreu menos influência da radiação quando comparado ao CM equivalente. Houve degradação da mobilidade nos dois transistores [73], pois a resistência série nos dispositivos aumentou.

A Tabela 5.6 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.6 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	34,4	0,00%	24,5	0,00%
Pós-irradiação	121	33,2	-3,49%	25,0	2,04%

A Tabela 5.6 mostra que os MOSFETs equivalentes possuem desempenho similar para $I_{on}/(W/L)$ após a irradiação. A variação máxima de $I_{on}/(W/L)$ para o DM foi de 3,49%, enquanto que para o CM equivalente foi de 2,04%.

5.3.2.3 Extração de $I_{on}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.6 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

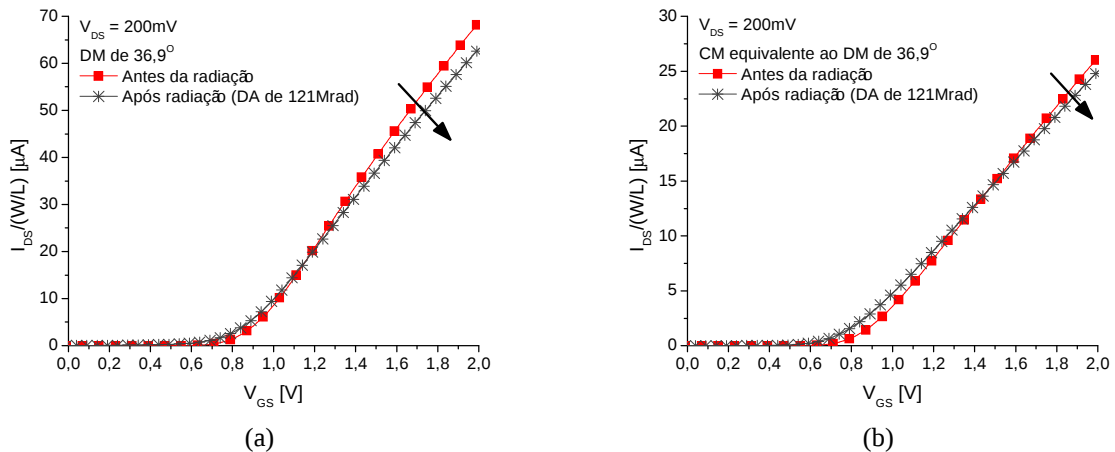


Figura 5.6 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A Figura 5.6 mostra que, após a irradiação, o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e o CM equivalente começaram a conduzir antes, devido a diminuição da tensão de limiar nos dois dispositivos. Considerando os dois MOSFETs após a irradiação, houve degradação de $I_{DS}/(W/L)$ para valores elevados de V_{GS} , ou seja, a mobilidade foi afetada nos dispositivos equivalentes devido as cargas armadilhadas na interface Si/SiO₂ [73].

A Tabela 5.7 mostra os valores de $I_{on}/(W/L)$ antes e pós-irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.7 – $I_{on}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{GS} igual a 1,95 V e V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{on}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	66,0	0,00%	25,1	0,00%
Pós-irradiação	121	60,6	-8,18%	24,0	-4,38%

Devido a menor variação de $I_{on}/(W/L)$ após a irradiação, o CM possui desempenho ligeiramente superior quando comparado ao DM com ângulo α de 36,9°.

5.3.3 $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$

A corrente de fuga e a corrente de estado desligado de MOSFETs equivalentes serão apresentadas nessa seção. A corrente $I_{leak}/(W/L)$ foi obtida para V_{GS} igual a -1,50 V e V_{DS} igual a 200 mV, enquanto que a corrente $I_{off}/(W/L)$ foi obtida para V_{GS} e V_{DS} iguais a 0,00V e 200 mV, respectivamente. Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} serão apresentadas para mostrar o acionamento dos transistores parasitários que estão localizados nas BBRs.

5.3.3.1 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Tabela 5.8 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.8 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,32	0,00%	1,83	0,00%
Pós-irradiação	121	178	13385%	184	9955%

A Tabela 5.8 mostra que o CM obteve desempenho melhor para $I_{leak}/(W/L)$ quando comparado ao DM equivalente. Os valores de $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 144,1° e do seu equivalente CM aumentaram 13385% e 9955%, respectivamente, após a irradiação.

A Tabela 5.9 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.9 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	0,726	0,00%	0,188	0,00%
Pós-irradiação	121	10543	$1,45 \cdot 10^6\%$	13025	$6,93 \cdot 10^6\%$

As regiões de bico de pássaro ocasionaram a elevação das correntes de fuga e de estado desligado dos dispositivos após a irradiação. A Tabela 5.9 mostra a influência negativa dos transistores parasitários sobre o funcionamento normal dos MOSFETs: a corrente de estado desligado do CM aumentou em $6,93 \cdot 10^6\%$ após a irradiação (pior desempenho).

A Figura 5.7 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

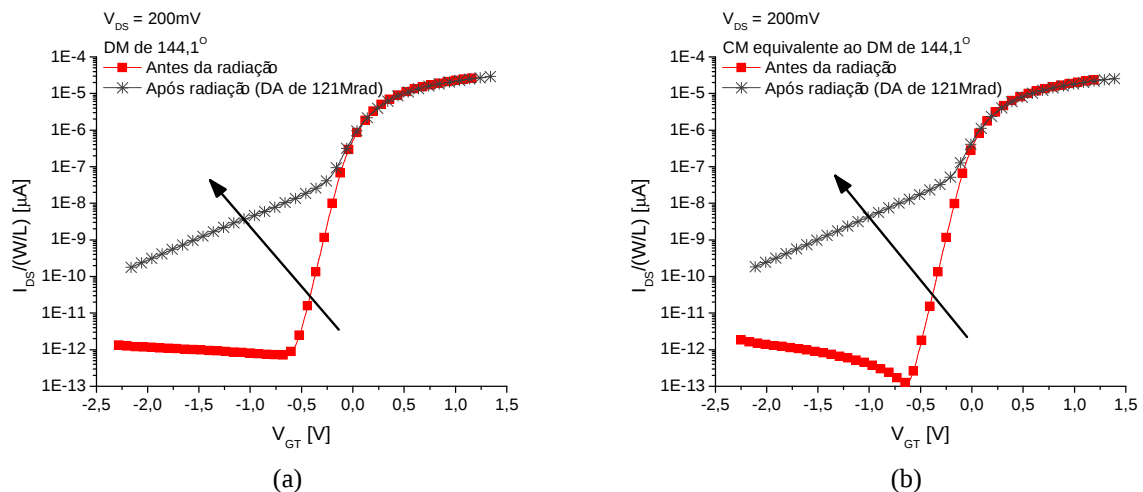


Figura 5.7 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A Figura 5.7 mostrou a influencia das BBR sobre o funcionamento normal dos dispositivos. Após a irradiação, as correntes de fuga dos transistores aumentaram consideravelmente.

5.3.3.2 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.10 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.10 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	0,857	0,00%	1,82	0,00%
Pós-irradiação	121	1551	180880%	58,9	3136%

A Tabela 5.10 mostra que após a irradiação a corrente de fuga do CM aumentou em 3136%, enquanto que o valor de $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 90° aumentou em 180880%. O CM obteve melhor desempenho que o equivalente DM com ângulo α de 90° porque a variação de $I_{leak}/(W/L)$ foi menor para o MOSFET convencional.

A Tabela 5.11 mostra os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.11 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	0,703	0,00%	1,59	0,00%
Pós-irradiação	121	53772	$7,65 \cdot 10^6\%$	4356	273862%

O alto campo elétrico do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ elevou a corrente de estado desligado em $7,65 \cdot 10^6\%$ após a irradiação. O CM também teve sua corrente de estado desligado elevada em 273862% após a irradiação. O CM equivalente ao DM com ângulo α de 90° obteve melhor desempenho devido a menor variação $I_{off}/(W/L)$ após a irradiação por prótons.

A Figura 5.8 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

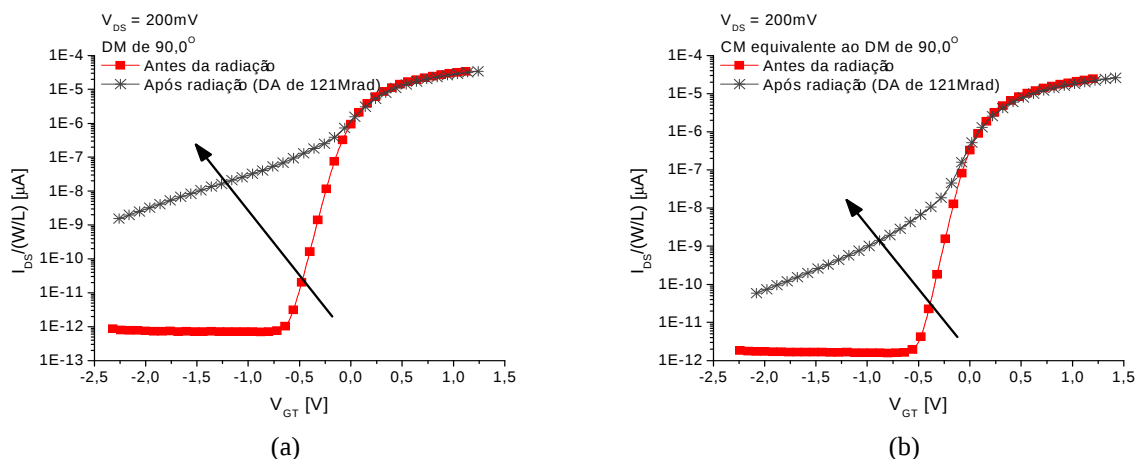


Figura 5.8 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A Figura 5.8 mostrou que após a irradiação as correntes de dreno dos dois transistores aumentaram bastante quando os MOSFETs deveriam estar desligados (V_{GT} de aproximadamente -0,75 V).

5.3.3.3 Extração de $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 36,9° e do CM Equivalente

A Tabela 5.12 mostra os valores de $I_{leak}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.12 – $I_{leak}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a -1,50 V

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{leak}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,51	0,00%	0,777	0,00%
Pós-irradiação	121	445	29370%	31,2	3915%

A Tabela 5.12 mostra que o CM equivalente ao DM com ângulo α de 36,9° obteve melhor desempenho após a irradiação, devido a menor variação de $I_{leak}/(W/L)$.

A Tabela 5.13 apresenta os valores de $I_{off}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.13 – $I_{off}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e V_{GS} igual a 0,00 V

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação	$I_{off}/(W/L)$ [pA]	Variação
Antes	0,00	1,01	0,00%	0,335	0,00%
Pós-irradiação	121	29419	2,91.10 ⁶ %	2447	730348%

O DM com ângulo α de 36,9° obteve pior desempenho para $I_{off}/(W/L)$ devido a variação de 2,91.10⁶% desse parâmetro após a irradiação. O CM equivalente aumentou em 730248% o valor de $I_{off}/(W/L)$ após a irradiação por prótons.

A Figura 5.9 apresenta as curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de 36,9° e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

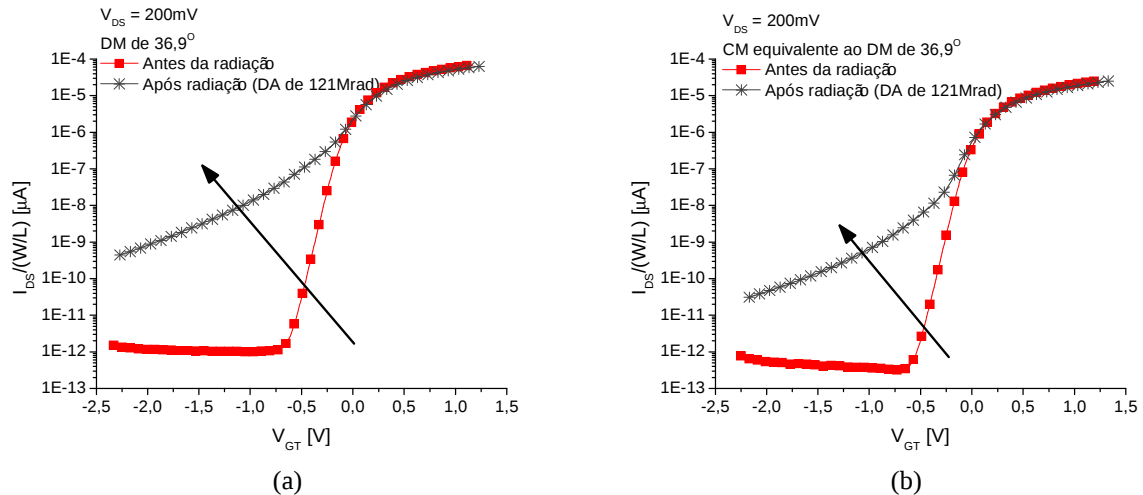


Figura 5.9 – Curvas $\log[I_{DS}/(W/L)]$ em função de V_{GT} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

As regiões de bico de pássaro dos dispositivos foram responsáveis pela ativação dos transistores parasitários que elevaram as correntes de fuga e de estado desligado.

5.3.4 Razão I_{on}/I_{off}

Os resultados de $I_{on}/(W/L)$ (seção 5.3.2) e de $I_{off}/(W/L)$ (seção 5.3.3) serão utilizados aqui para obtenção da razão I_{on}/I_{off} .

A Tabela 5.14 apresenta a razão I_{on}/I_{off} dos DMs e CMs estudados.

Tabela 5.14 – Razão I_{on}/I_{off} de DMs e CMs equivalentes antes e pós-irradiação

Transistor		DM		CM equivalente	
		$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação	$I_{on}/I_{off} [10^6]$	Variação
DM($\alpha=144,1^\circ$) e CM	Antes	32,2	0,00%	141	0,00%
	Pós-irradiação	0,00233	-99,9%	0,00215	-99,9%
DM ($\alpha=90,0^\circ$) e CM	Antes	48,9	0,00%	15,4	0,00%
	Pós-irradiação	$6,17 \cdot 10^{-4}$	-99,9%	0,00574	-99,9%
DM ($\alpha=36,9^\circ$) e CM	Antes	65,3	0,00%	74,9	0,00%
	Pós-irradiação	0,00206	-99,9%	0,00981	-99,9%

Após as irradiações, todos os transistores tiveram redução brusca da razão I_{on}/I_{off} , que foi causa pela elevação de $I_{off}/(W/L)$. Isso significa que o consumo de energia de todos os nMOSFETs aumentaram consideravelmente.

5.3.5 $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$

Nessa seção será apresentada diversas curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} obtidas antes e pós-irradiações. Cada curva foi obtida para V_{DS} igual a 200 mV.

Os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ foram obtidos das curvas citadas acima para possibilitar o estudo comparativo dos efeitos da radiação entre MOSFETs equivalentes.

5.3.5.1 Extração de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.10 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

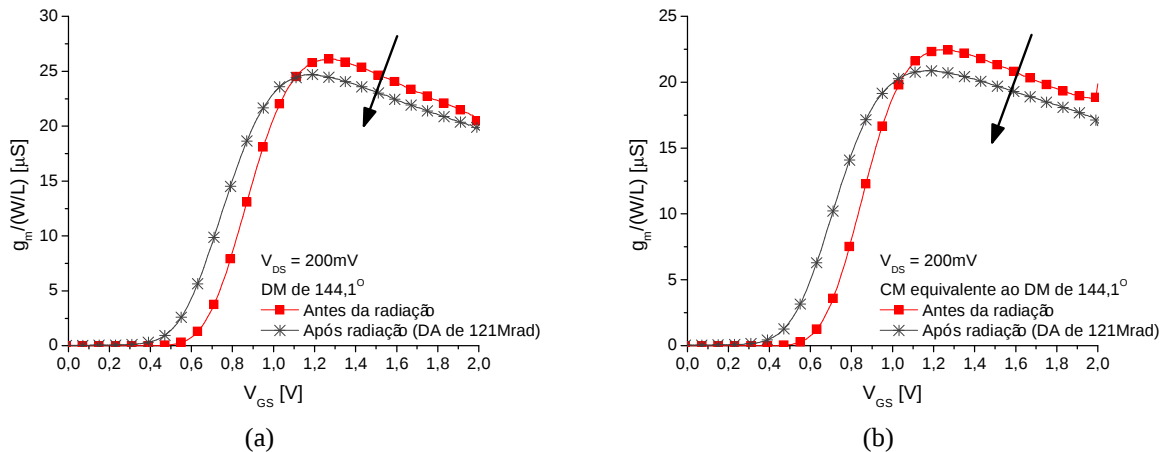


Figura 5.10 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A Figura 5.10 mostrou que a transcondutância máxima caiu para os dois dispositivos, devido as cargas positivas armadilhadas na interface Si/SiO₂ [7].

A Tabela 5.15 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.15 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	26,1	0,00%	22,5	0,00%
Pós-irradiação	121	24,7	-5,36%	20,9	-7,11%

A Tabela 5.15 mostra que a variação de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ após a irradiação foi de 5,36% para o DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e de 7,11% para o CM equivalente. O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ teve desempenho melhor que o equivalente CM devido a menor variação da transcondutância máxima.

5.3.5.2 Extração de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.11 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

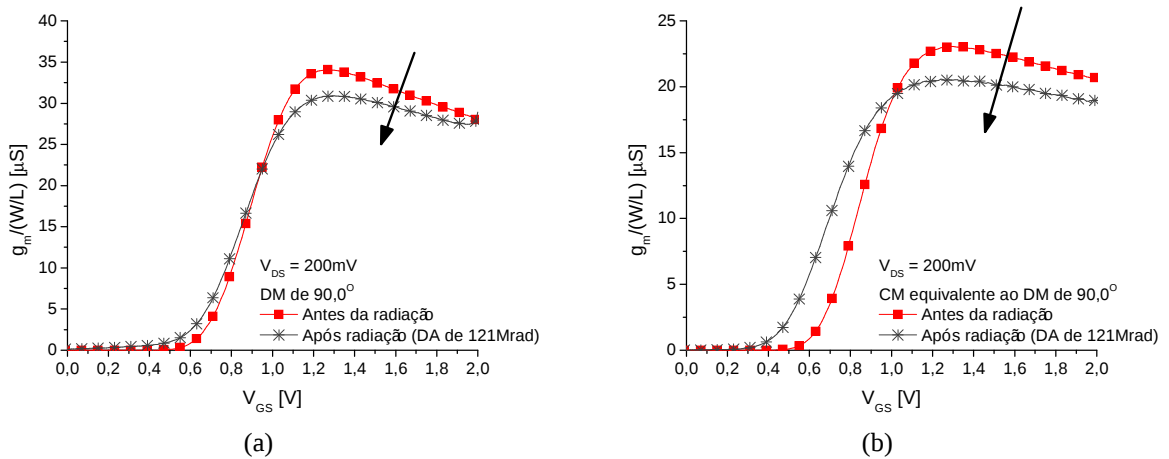


Figura 5.11 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

Após a irradiação, os transistores equivalentes tiveram redução da transcondutância máxima, como mostra a Figura 5.11, devido as cargas positivas armadilhadas na interface Si/SiO₂ [7].

A Tabela 5.16 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.16 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	34,1	0,00	23,1	0,00
Pós-irradiação	121	30,9	-9,38%	20,5	-11,2%

O DM com ângulo α de $90,0^\circ$ teve uma redução de 9,38% no valor da transcondutância máxima, enquanto que o valor de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do CM equivalente reduziu

em 11,2%. Analisando esse caso, o DM com ângulo α de 90° foi mais robusto a radiação por prótons devido a menor variação de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$, quando comparado ao CM equivalente.

5.3.5.3 Extração de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.12 apresenta as curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

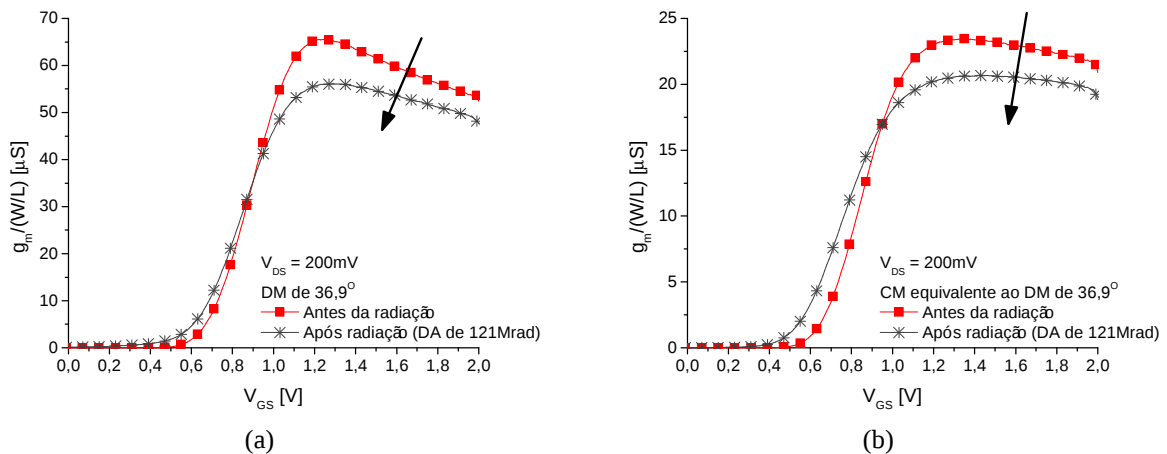


Figura 5.12 – Curvas $g_m/(W/L)$ em função de V_{GS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A transcondutância máxima dos dispositivos caiu após a irradiação, como mostra a Figura 5.12.

A Tabela 5.17 apresenta os valores de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.17 – $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação	$g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ [μS]	Variação
Antes	0,00	65,6	0,00%	23,5	0,00%
Pós-irradiação	121	56,1	-14,5%	20,7	-11,9%

Para esse caso, o CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ teve melhor desempenho após a irradiação. A redução de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ foram de 11,9% e 14,5% para o CM e DM, respectivamente.

5.3.6 g_m/I_{DS}

Essa seção apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ de MOSFETs equivalentes, para V_{DS} igual a 200 mV. A comparação dos efeitos da radiação por prótons sobre a razão g_m/I_{DS} será feita para $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada).

O intuito dessa seção é investigar os efeitos da radiação na degradação do parâmetro g_m/I_{DS} para aplicações analógicas.

5.3.6.1 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e CM Equivalente

A Figura 5.13 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

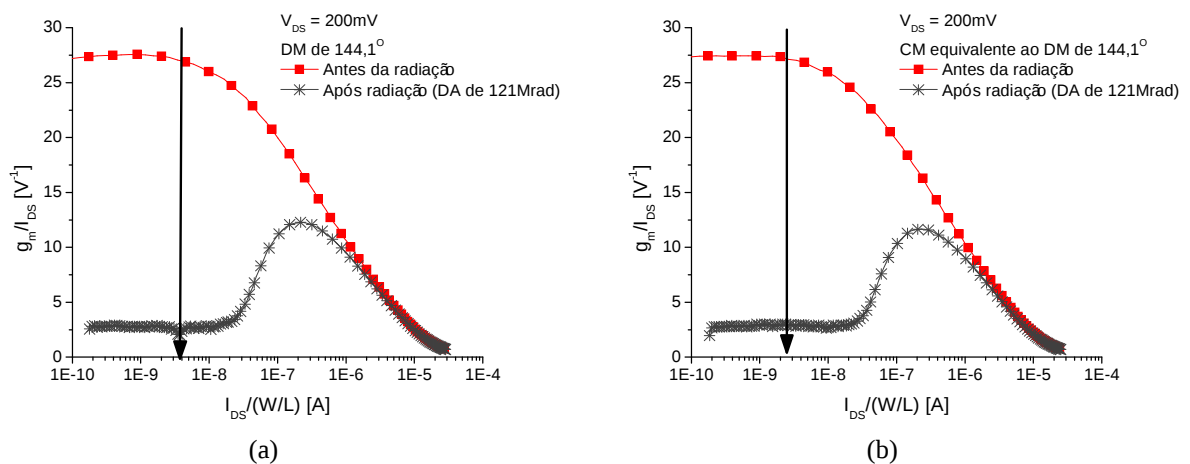


Figura 5.13 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

Os dois transistores sofreram grande influência da radiação na inversão fraca, como mostra a Figura 5.13, devido ao aumento na corrente de fuga dos dispositivos.

A Tabela 5.18 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.18 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação	g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação
Antes	0,00	20,1	0,00%	19,7	0,00%
Pós-irradiação	121	11,2	-44,3%	10,4	-47,2%

Após a irradiação, O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ apresentou redução de 44,3% no valor de g_m/I_{DS} , enquanto que o CM equivalente apresentou redução de 47,2%. O DM apresentou resultado ligeiramente superior para g_m/I_{DS} na inversão moderada.

5.3.6.2 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.14 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

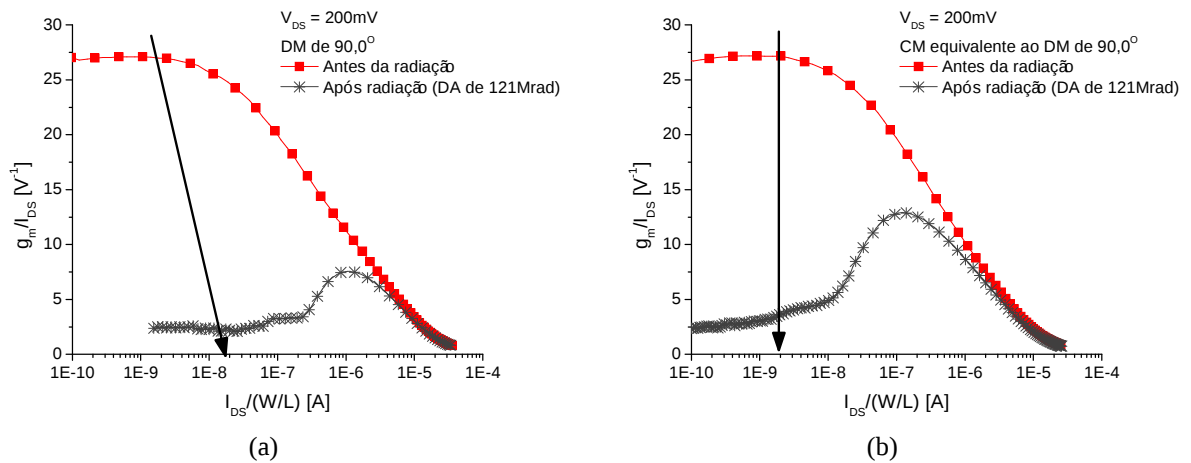


Figura 5.14 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

A Figura 5.14 mostra que os dois MOSFETs tiveram grande degradação da razão g_m/I_{DS} na inversão fraca e moderada, após a irradiação, devido ao aumento da corrente de fuga nos MOSFETs.

A Tabela 5.19 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.19 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação	g_m/I_{DS} [V^{-1}]	Variação
Antes	0,00	20,0	0,00%	19,7	0,00%
Pós-irradiação	121	3,26	-83,7%	12,8	-35,0%

O DM com ângulo α de 90° apresentou desempenho inferior ao CM equivalente, para a razão g_m/I_{DS} , após a irradiação. A redução da razão g_m/I_{DS} para o CM foi de 35,0%, enquanto que a redução para o DM equivalente foi de 83,7%.

5.3.6.3 Extração de g_m/I_{DS} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.15 apresenta as curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{DS} de 200 mV.

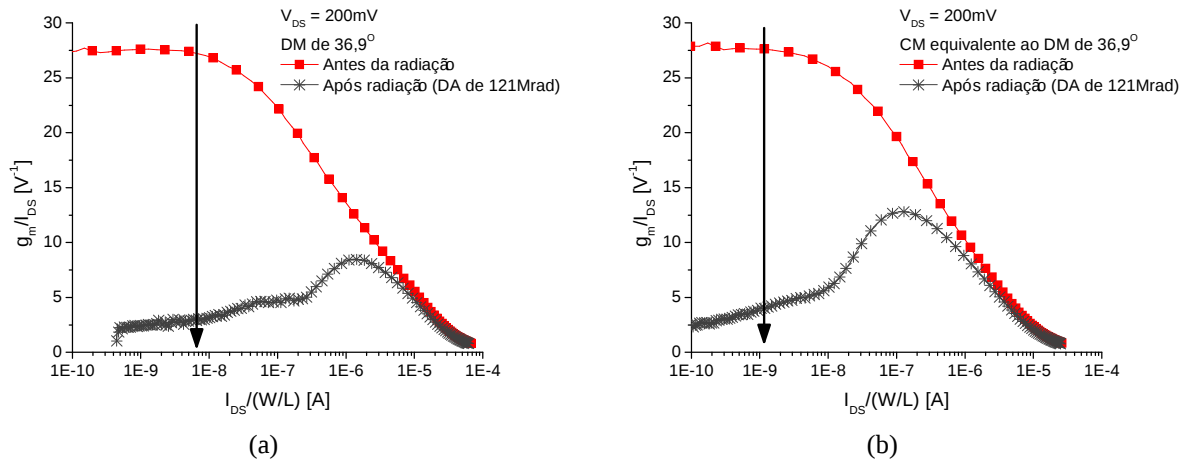


Figura 5.15 – Curvas g_m/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{DS} de 200 mV, antes e pós-irradiação

Os MOSFETs equivalentes tiveram grande degradação da razão g_m/I_{DS} na inversão fraca e moderada após a irradiação.

A Tabela 5.20 apresenta os valores de g_m/I_{DS} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.20 – g_m/I_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 200 mV e $I_{DS}/(W/L)$ igual a 100 nA (inversão moderada)

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		g_m/I_{DS} [V $^{-1}$]	Variação	g_m/I_{DS} [V $^{-1}$]	Variação
Antes	0,00	22,2	0,00%	19,6	0,00%
Pós-irradiação	121	4,74	-78,6%	12,9	-34,2%

O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ apresentou queda acentuada da razão g_m/I_{DS} após a irradiação e, por isso, teve pior desempenho. A queda de g_m/I_{DS} chegou a 78,6% para o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e 34,2% para o CM equivalente.

5.3.7 $I_{DS_sat}/(W/L)$

Essa seção apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} de MOSFETs equivalentes, para V_{GT} igual a 400 mV. A corrente de dreno na saturação foi obtida para V_{GT} igual a 400 mV e V_{DS} igual a 1,50 V.

Das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} também foram obtidos os valores das resistências entre dreno e fonte de estado ligado e da tensão Early.

5.3.7.1 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Figura 5.16 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de 144,1° e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

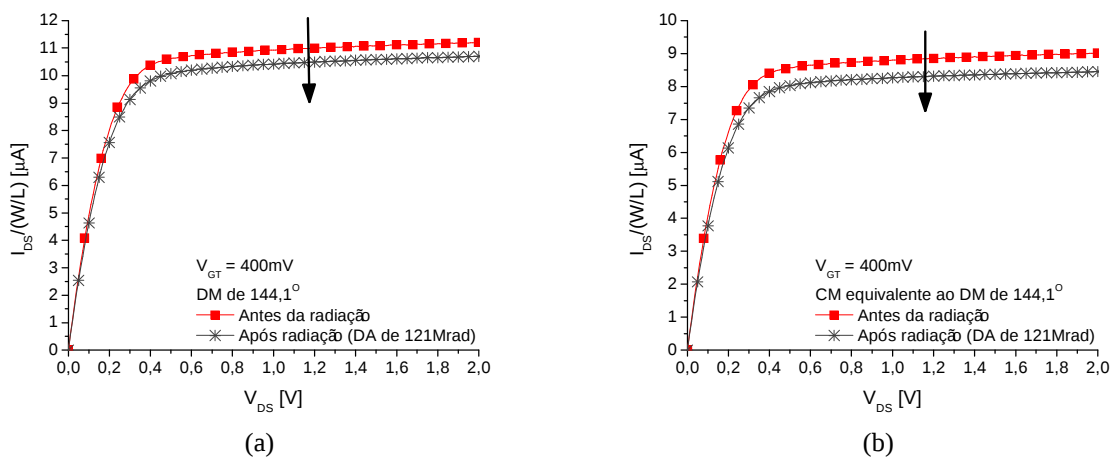


Figura 5.16 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de 144,1° (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação

Aparentemente os transistores equivalentes tiveram desempenho similar.

A Tabela 5.21 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.21 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	11,1	0,00%	8,92	0,00%
Pós-irradiação	121	10,6	-4,50%	8,37	-6,17%

O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ obteve desempenho ligeiramente superior ao CM equivalente, pois a variação de $I_{DS_sat}/(W/L)$ foi menor para o DM. Após a irradiação, a corrente de dreno na saturação reduziu em 4,50% para o DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e em 6,17% para o CM equivalente.

5.3.7.2 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.17 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

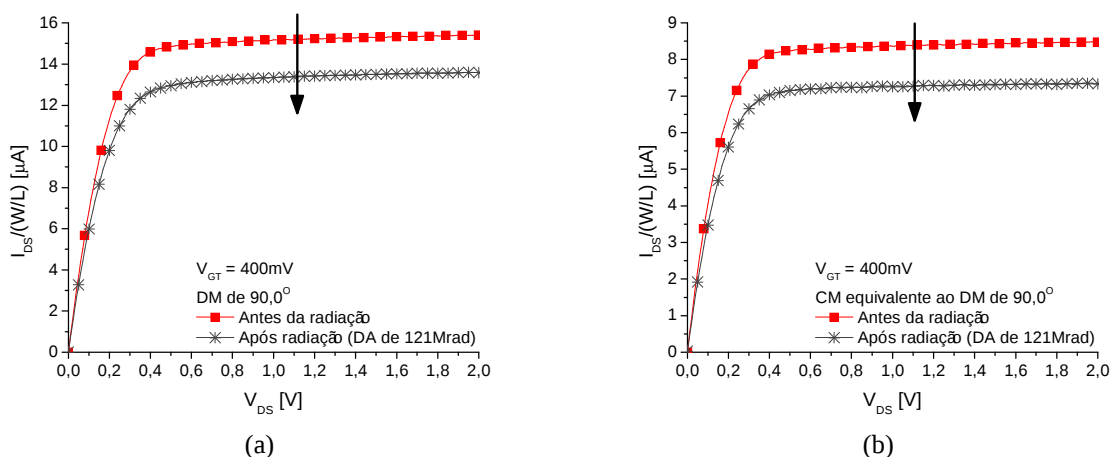


Figura 5.17 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação

Aparentemente os transistores equivalentes tiveram desempenho similar.

A Tabela 5.22 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.22 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	15,3	0,00%	8,43	0,00%
Pós-irradiação	121	13,5	-11,8%	7,32	-13,2%

Os MOSFETs equivalentes tiveram redução da corrente de dreno na saturação após a irradiação por prótons. O DM com ângulo α de $90,0^\circ$ teve melhor desempenho que o CM equivalente, pois o valor de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do MOSFET Diamante variou em 11,8% após a irradiação, enquanto que o CM equivalente obteve variação de 13,2%.

5.3.7.3 Extração de $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Figura 5.18 apresenta as curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu equivalente CM, para V_{GT} de 400 mV.

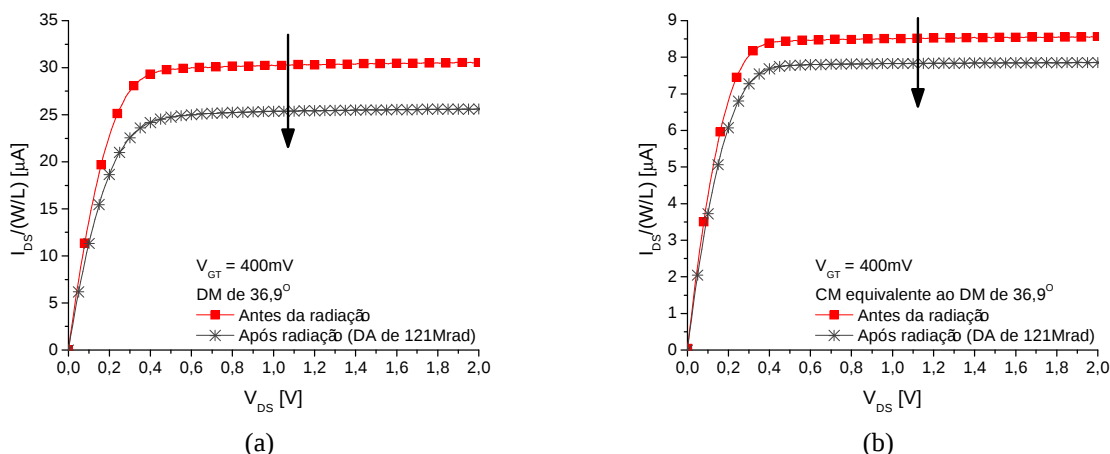


Figura 5.18 – Curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ (a) e do seu equivalente CM (b), para V_{GT} de 400 mV, antes e pós-irradiação

Aparentemente o CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve desempenho melhor.

A Tabela 5.23 apresenta os valores de $I_{DS_sat}/(W/L)$ antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.23 – $I_{DS_sat}/(W/L)$ do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação, para V_{DS} igual a 1,50 V e V_{GT} igual a 400 mV

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação	$I_{DS_sat}/(W/L)$ [μA]	Variação
Antes	0,00	30,4	0,00%	8,54	0,00%
Pós-irradiação	121	25,5	-16,1%	7,85	-8,08%

O CM equivalente ao DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve desempenho superior para $I_{DS_sat}/(W/L)$. Após a irradiação, o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ variou 16,1% enquanto que o CM equivalente variou 8,08%.

5.3.8 R_{on}

As resistências entre dreno e fonte de estado ligado foram obtidas por meio das curvas $I_{DS}/(W/L)$ versus V_{DS} , para V_{GT} igual a 400 mV. Cada tabela dessa seção apresentará os valores de R_{on} obtidos antes e após a irradiação.

5.3.8.1 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.24 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.24 – R_{on} do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $144,1^\circ$		CM equivalente	
		R_{on} [k Ω]	Variação	R_{on} [k Ω]	Variação
Antes	0,00	19,0	0,00%	22,8	0,00%
Pós-irradiação	121	20,1	5,79%	24,6	7,89%

Após a irradiação, as resistências entre dreno e fonte de estado ligado aumentaram nos transistores estudados. O DM com ângulo α de $144,1^\circ$ obteve desempenho superior ao CM equivalente após a irradiação, pois a variação de R_{on} do DM foi de 5,79%, enquanto que a variação do CM equivalente foi de 7,89%.

5.3.8.2 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $90,0^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.25 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.25 – R_{on} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		R_{on} [k Ω]	Variação	R_{on} [k Ω]	Variação
Antes	0,00	13,6	0,00%	22,9	0,00%
Pós-irradiação	121	15,5	14,0%	26,5	15,7%

Após a irradiação, o valor de R_{on} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ aumentou em 14,0% e o valor de R_{on} do CM equivalente aumentou em 15,7%. Portanto, o DM com ângulo α de $90,0^\circ$ obteve desempenho superior ao CM equivalente.

5.3.8.3 Extração de R_{on} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.26 mostra os valores de R_{on} antes e após cada irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.26 – R_{on} do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		R_{on} [k Ω]	Variação	R_{on} [k Ω]	Variação
Antes	0,00	6,82	0,00%	22,0	0,00%
Pós-irradiação	121	8,24	20,8%	24,9	13,2%

Após a irradiação, o DM com ângulo α de 36,9° obteve desempenho de R_{on} inferior ao CM equivalente devido a maior variação do parâmetro estudado. O DM com ângulo α de 36,9° obteve aumento de 20,8% no valor de R_{on} , enquanto que seu equivalente CM incrementou em 13,2% o parâmetro analisado.

5.3.9 V_{EA}

As tensões Early foram obtidas por meio das curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{DS} , para V_{GT} igual a 400 mV. As tabelas dessa seção apresentarão os valores de V_{EA} obtidos antes e após a irradiação.

5.3.9.1 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a 144,1° e do CM Equivalente

A Tabela 5.27 mostra os valores de V_{EA} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.27 – V_{EA} do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=1,92 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	37,6	0,00%	38,6	0,00%
Pós-irradiação	121	34,4	-8,51%	41,6	7,77%

O CM equivalente ao DM com ângulo α de 144,1° obteve melhor desempenho para a tensão Early após a irradiação. A variação de V_{EA} do DM foi de 8,51%, enquanto que a variação do CM foi de 7,77%.

5.3.9.2 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a 90,0° e do CM Equivalente

A Tabela 5.28 mostra os valores de V_{EA} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.28 – V_{EA} do DM com ângulo α de $90,0^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{eff}=4,02 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $90,0^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	58,3	0,00%	70,9	0,00%
Pós-irradiação	121	49,6	-14,9%	83,0	17,1%

Após irradiação, o DM com ângulo α de 90° obteve desempenho mais satisfatório que o equivalente CM para o parâmetro V_{EA} . A tensão Early do DM com ângulo α de 90° variou 14,9%, enquanto que a variação do CM foi de 17,1%.

5.3.9.3 Extração de V_{EA} do DM com Ângulo α Igual a $36,9^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.29 mostra os valores de V_{EA} antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.29 – V_{EA} do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ e do seu respectivo CM antes e pós-irradiação

$L_{eff}=9,98 \mu m$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de $36,9^\circ$		CM equivalente	
		V_{EA} [V]	Variação	V_{EA} [V]	Variação
Antes	0,00	89,7	0,00%	150	0,00%
Pós-irradiação	121	89,5	-0,223%	269	79,3%

A tensão Early do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ variou somente 0,223%, após a irradiação, enquanto que o valor de V_{EA} do CM equivalente variou 79,3%. O MOSFET Diamante de $36,9^\circ$ obteve desempenho satisfatório para V_{EA} .

5.3.10 A_V

As razões g_m/I_{DS} da seção 5.3.6 e os valores de V_{EA} da seção 5.3.9 foram utilizados para a obtenção dos ganhos de tensão intrínsecos dos transistores. Cada tabela dessa seção apresentará os valores de A_V obtidos antes e após a irradiação.

5.3.10.1 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a $144,1^\circ$ e do CM Equivalente

A Tabela 5.30 mostra os valores de A_V antes e após a irradiação do DM com ângulo α de $144,1^\circ$ e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.30 – A_V do DM com ângulo α de 144,1° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{\text{eff}}=1,92 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 144,1°		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	756	0,00%	760	0,00%
Pós-irradiação	121	385	-49,0%	433	-43,1%

A queda no ganho de tensão intrínseco do amplificador se deve a redução da razão g_m/I_{DS} após a irradiação. O CM obteve melhor desempenho que o DM com ângulo α de 144,1°, pois o MOSFET convencional variou o parâmetro A_V em 43,1%, enquanto que o DM equivalente variou em 49,0%.

5.3.10.2 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a 90,0° e do CM Equivalente

A Tabela 5.31 mostra os valores de A_V antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.31 – A_V do DM com ângulo α de 90,0° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{\text{eff}}=4,02 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 90,0°		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	1166	0,00%	1397	0,00%
Pós-irradiação	121	162	-86,1%	1062	-23,9%

O DM com ângulo α de 90,0° teve uma queda acentuada no valor de A_V (86,1%), quando comparado a queda do CM equivalente (23,9%). Para esse par de transistores equivalentes, o CM obteve melhor desempenho.

5.3.10.3 Extração de A_V do DM com Ângulo α Igual a 36,9° e do CM Equivalente

A Tabela 5.32 mostra os valores de A_V antes e após a irradiação do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente.

Tabela 5.32 – A_V do DM com ângulo α de 36,9° e do seu respectivo CM equivalente antes e pós-irradiação

$L_{\text{eff}}=9,98 \mu\text{m}$	DA [Mrad]	DM com ângulo α de 36,9°		CM equivalente	
		A_V [V/V]	Variação	A_V [V/V]	Variação
Antes	0,00	1991	0,00%	2940	0,00%
Pós-irradiação	121	424	-78,7%	3470	18,0%

Após a irradiação, o DM com ângulo α de 36,9° teve uma queda de 78,7% no valor de A_V , enquanto que o mesmo parâmetro aumentou 18,0% para o CM equivalente (melhor

desempenho). O aumento no ganho de tensão intrínseco do CM após a irradiação foi impulsionado pelo aumento da tensão Early.

5.4 Tabela Geral do Desempenho do MOSFET Diamante e do MOSFET Convencional Após Irradiação por Prótons

A Tabela 5.33 apresenta de forma resumida como foi o desempenho de cada MOSFET após a irradiação por prótons. Cada parâmetro elétrico foi analisado separadamente.

Tabela 5.33 – Tabela de desempenho dos DMs e dos respectivos CMs equivalentes após irradiação por prótons

	V_{Th}		$I_{on}/(W/L)$		$I_{leak}/(W/L)$		$I_{off}/(W/L)$		I_{on}/I_{off}	
Ângulo α	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM
144,1°	+	-	0	0	-	+	+	-	-	-
90,0°	+	-	0	0	-	+	-	+	-	-
36,9°	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-
	$g_{m_máx}/(W/L)$		g_m/I_{DS}		$I_{DS_sat}/(W/L)$		R_{on}		V_{EA}	
Ângulo α	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM	DM	CM
144,1°	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+
90,0°	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-
36,9°	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
	A_v									
Ângulo α	DM	CM								
144,1°	-	+								
90,0°	-	+								
36,9°	-	+								

5.4.1 Análise de V_{Th}

Após a irradiação, todos os DMs apresentaram melhor desempenho para V_{Th} quando comparados aos respectivos CMs equivalentes. As tensões de limiar dos DMs sofreram menos influência da radiação devido a menor região de bico de pássaro, pois parte das cargas positivas geradas nas BBR acabam migrando para dentro do óxido de porta. Os valores de V_{Th} caíram, para todos os transistores, pois houve um acúmulo significativo de cargas positivas no óxido de porta [73].

Comparados aos CMs equivalentes, o MOSFETs Diamantes mostraram que podem ser bem empregado em CIs analógicos devido a menor variação de V_{Th} após a irradiação.

5.4.2 Análise de $I_{on}/(W/L)$

No geral, todos os MOSFETs tiveram desempenho similar do parâmetro $I_{on}/(W/L)$ após a irradiação. As curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de V_{GS} mostram que ocorreu degradação da mobilidade nos dispositivos após a irradiação [73], pois houve aumento da resistência série nos MOSFETs.

5.4.3 Análise de $I_{leak}/(W/L)$ e de $I_{off}/(W/L)$

Após a irradiação por prótons, todos os MOSFETs estudados tiveram elevação dos parâmetros $I_{leak}/(W/L)$ e $I_{off}/(W/L)$. Os transistores parasitas dos MOSFETs, aos quais estão localizados abaixo das BBR, foram responsáveis pelo aumento da corrente de dreno dos dispositivos para V_{GS} menor que 0 V.

Em aplicações digitais, o aumento da corrente de fuga dos MOSFETs elevaria o consumo de energia do CI, além de ocasionar erros de lógica [24].

5.4.4 Análise de I_{on}/I_{off}

Após as irradiações, todos os transistores tiveram redução brusca da razão I_{on}/I_{off} , que foi causa pela elevação de $I_{off}/(W/L)$. Isso significa que o consumo de energia de todos os transistores aumentou consideravelmente.

5.4.5 Análise de $g_{m_máx}/(W/L)$

As transcondutâncias de todos os MOSFETs caíram após a irradiação, pois a densidade de cargas positivas armadilhadas na interface Si/SiO₂ aumentou [7].

Após a irradiação, os DMs com ângulos α de 144,1° e de 90,0° obtiveram desempenho melhor de $g_{m_máx}/(W/L)$ quando comparados aos respectivos CMs equivalentes.

Após a irradiação, o DM com ângulo α de 36,9° teve desempenho inferior quando comparado ao CM equivalente. Para esse caso, a redução de $g_{m_máx}/(W/L)$ do DM e do CM foram iguais a 14,5% e 11,9%, respectivamente. Esses resultados poderiam atribuir desempenho similar ao MOSFETs equivalente.

No geral, os DMs tiveram alterações mínimas no valor de $g_{m_máx}/(W/L)$ após a irradiação por prótons. Isso significa que o MOSFET Diamante é capaz de garantir o bom

funcionamento de amplificadores em ambientes radioativos, pois o valor de $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$ do DM variou pouco após a irradiação por prótons.

5.4.6 Análise de g_m/I_{DS}

As figuras da seção 5.3.6 mostraram que todos os dispositivos sofreram forte influência da radiação por prótons, sobretudo nas regiões de inversão fraca e moderada. Se esses MOSFETs fossem utilizados em amplificadores operando nas regiões descritas acima, possivelmente esses circuitos deixariam de operar adequadamente.

A degradação de g_m/I_{DS} na inversão fraca e moderada ocorreu devido ao aumento da corrente de fuga e de estado desligado nos MOSFETs após a irradiação.

5.4.7 Análise de $I_{DS_sat}/(W/L)$

Após a irradiação, os DMs com ângulo α maior ou igual a 90° tiveram desempenho melhor que seus respectivos CMs para $I_{DS_sat}/(W/L)$. O alto campo elétrico longitudinal do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ prejudicou seu desempenho perante o CM equivalente.

Como já foi explicado anteriormente, o acúmulo de cargas positivas na interface Si/SiO₂, após a irradiação, provoca a diminuição da mobilidade do canal e, consequentemente, a corrente de dreno sofre uma ligeira queda.

5.4.8 Análise de R_{on}

Todos os transistores estudados tiveram aumento de R_{on} após a irradiação. Somente o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve desempenho inferior ao equivalente CM depois da irradiação.

5.4.9 Análise de V_{EA}

Os MOSFETs Diamantes com ângulo α menor ou igual a 90° obtiveram melhor desempenho. O DM com ângulo α de $36,9^\circ$ se destacou devido à variação de somente 0,223% da tensão Early após a irradiação.

5.4.10 Análise de A_V

Todos os DMs tiveram desempenho pior de A_V após a irradiação. O aumento da corrente de fuga e de estado desligado, sobretudo nos MOSFETs Diamantes, ocasionou a queda da razão g_m/I_{DS} que, por sua vez, afetou o ganho de tensão intrínseco dos transistores.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho introduziu novos estilos de *layout* de MOSFETs que podem ser empregados em circuitos integrados analógicos e digitais. Os MOSFETs com geometria de porta não retangular (ou não convencional) foram desenvolvidos no Centro Universitário da FEI e atualmente estão patenteados no INPI.

O MOSFET do tipo Diamante foi o primeiro transistor com geometria diferenciada a ser estudado nessa dissertação. O DM possui geometria hexagonal e o estudo comparativo foi realizado com o MOSFET convencional equivalente. Foi visto que DMs e CMs são considerados equivalentes quando possuem a mesma área de porta e razão de aspecto.

O MOSFET Diamante foi concebido com o intuito de aumentar o campo elétrico longitudinal resultante na região de canal e, conseqüentemente, aumentar a velocidade dos portadores minoritários e a corrente entre dreno e fonte. Para verificar se o DM seria capaz de atingir as expectativas para as quais ele foi criado, o estudo comparativo por meio de simulações e experimentos entre DMs e CMs equivalentes foi realizado, considerando a mesma área de porta, razão de aspecto e condições de polarização entre transistores equivalentes.

As referências [55], [9] e [53] apresentaram os primeiros estudos comparativos por SN3D entre os SOI nMOSFETs Diamantes e seus respectivos SOI nMOSFETs convencionais equivalentes. Essas referências demonstraram que o campo elétrico longitudinal resultante nos DSMs era maior que aquele obtido nos respectivos CSMs equivalentes. As SN3D mostraram que os DSMs obtiveram melhores resultados que os respectivos CSMs equivalentes para I_{DS} , g_m , e R_{on} . O maior campo elétrico longitudinal dos DSMs em relação aos CSMs equivalentes degrada os parâmetros I_{off} e V_{EA} , à medida que o ângulo α diminui.

Os resultados obtidos nas SN3D motivou o grupo a elaborar o projeto de um *chip* que contém MOSFETs do tipo Diamante e convencional. Esse *chip* foi manufaturado pela *On Semiconductor* com processo de fabricação CMOS comercial de 0,35 μm , por meio do Programa Educacional do MOSIS (MEP).

Os resultados experimentais mostram que o MOSFET Diamante possui melhor desempenho que o MOSFET convencional equivalente em termos de I_{DS} , g_m , g_m/I_{DS} , R_{on} , A_{VO} e f_T , considerando a mesma área de porta, razão de aspecto e condições de polarização entre transistores equivalentes. Para ilustrar, quando V_{GT} é igual a 800 mV e V_{DS} é igual a 200 mV, o DM com ângulo α de 144,1° obteve corrente de dreno 14,4% maior que a do respectivo CM equivalente. Para as mesmas condições de polarização descritas anteriormente, a corrente de

dreno do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ foi 168% (ou 2,68 vezes) maior que o valor obtido de I_{DS} do respectivo CM equivalente.

Considerando as mesmas condições de polarização, área de porta e razão de aspecto, o DM com ângulo α de $36,9^\circ$ obteve $g_{m_m\acute{a}x}$ 181% maior que o valor obtido para o CM equivalente. O maior valor de g_m do MOSFET Diamante motivou o estudo comparativo da resposta em frequência entre transistores equivalentes.

O circuito amplificador fonte comum foi projetado para obtenção da curva de resposta em frequência de DMs e CMs equivalentes. O MOSFET do tipo Diamante é recomendado para as aplicações de circuitos integrados analógicos devido ao maior valor de A_{VO} e de f_T . Para exemplificar, os valores de A_{VO} (em dB) e de f_T do DM com ângulo α de $36,9^\circ$ foram, respectivamente, 80,0% e 90,9% maiores que os valores obtidos para o CM equivalente, considerando a mesma área de porta, razão de aspecto e condições de polarização.

O MOSFET Octo foi o segundo transistor com estilo de porta diferenciado a ser estudado. Esse transistor possui geometria de porta octogonal, ou seja, nesse tipo de MOSFET existem três componentes de campo elétrico longitudinal na região de canal, ao contrário do MOSFET Diamante, que possui somente duas componentes vetoriais de campo elétrico longitudinal. O MOSFET Octo foi especialmente projetado para elevar a tensão de ruptura e aumentar a robustez contra os efeitos das descargas eletrostáticas, em relação ao DM equivalente. Essas melhorias foram alcançadas por meio do corte dos vértices do transistor de porta hexagonal (MOSFET Diamante). Consequentemente, a área de porta do OM é menor que as áreas de porta do DM e do CM equivalentes.

Analisando os resultados obtidos por SN3D, o OSM possui melhor desempenho que o CSM equivalente em termos de $I_{DS_sat}/(W/L_{eff})$ (melhoria de 30%), $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L_{eff})$ (melhoria de 26%) e R_{on} (melhoria de 21%), considerando as mesmas condições de polarização. A tensão Early do OSM é degradada em relação ao CSM equivalente devido ao maior campo elétrico longitudinal resultante na estrutura octogonal.

Os resultados comparativos obtidos por meio de simulações e experimentos entre os MOSFETs equivalentes do tipo Octo, Diamante e convencional mostraram as mesmas tendências. O OM é capaz de fornecer uma corrente $I_{DS}/(W/L_{eff})$ maior que a do CM equivalente, com redução significativa da área de porta. Isso significa que o OM promove melhorias dos seus parâmetros elétricos com aumento da densidade em circuitos integrados.

Os MOSFETs do tipo Diamante e Octo não podem ser fabricados utilizando a dimensão mínima permitida pela tecnologia, o que limita a utilização desses dispositivos

somente em circuitos integrados analógicos. Pensando nessa limitação, o SOI MOSFET do tipo *Fish* foi criado.

O FSM, da mesma forma que o DSM, utiliza o efeito de canto para aumentar o campo elétrico longitudinal resultante na região de canal, em relação àquele obtido no CSM equivalente. O aumento do campo elétrico longitudinal e o maior comprimento efetivo de canal do FSM propiciam melhorias de diversos parâmetros elétricos em relação aos parâmetros obtidos do CSM equivalente, considerando a mesma área de porta e condições de polarização.

Na maioria dos casos, o FSM com ângulo α de 90° obteve melhor desempenho que os FSMs com ângulos α de 45° e 135° . O FSM com ângulo α de $90,0^\circ$ obteve melhoria de 21,4% no valor de I_{DS}/f_g , quando comparado ao valor obtido do CSM equivalente.

A fim de verificar os efeitos degradantes da radiação sobre o funcionamento dos transistores, os MOSFETs Diamantes e os seus respectivos MOSFETs convencionais equivalentes foram irradiados com diferentes fontes radioativas (raios-X e prótons) e diferentes doses. Durante as irradiações, os transistores estavam polarizados com V_{DS} de 50 mV e V_{GS} de 800 mV (próximo ao valor de V_{Th} desses transistores) para potencializar os efeitos degradantes das radiações e reproduzir as condições reais de trabalho do transistor operando como chave.

A primeira radiação do *chip* foi realizada no Centro Universitário da FEI com raios-X. Na maioria dos dispositivos medidos, os DMs obtiveram melhor desempenho que os seus respectivos CMs equivalentes para V_{Th} , $I_{on}/(W/L)$, $I_{off}/(W/L)$, $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$, $I_{DS_sat}/(W/L)$, R_{on} e V_{EA} . O melhor desempenho do DM em relação ao respectivo CM equivalente se deve a menor região de bico de pássaro do transistor hexagonal.

A segunda radiação foi realizada com prótons no IFUSP e um outro *chip* foi colocado a prova nessa ocasião. Para esse caso, a maioria dos DMs medidos obtiveram melhor desempenho que os seus respectivos CMs equivalentes para V_{Th} , $g_{m_m\acute{a}x}/(W/L)$, $I_{DS_sat}/(W/L)$, R_{on} e V_{EA} . Como já dito anteriormente, a menor região de bico de pássaro do DM em relação aos CMs equivalentes propicia melhor desempenho ao transistor hexagonal.

Fixando a corrente de dreno, o MOSFET Diamante apresentaria menor influência da radiação, pois necessitaria de um V_{GS} menor quando comparados ao CM equivalente. O DM seria menos influenciado pela radiação devido ao menor campo elétrico vertical na estrutura hexagonal, quando comparado ao CM equivalente.

Esse trabalho abre novas possibilidades de estudo dos MOSFETs com geometria de porta não convencional. Como os MOSFETs do tipo Diamante, Octo e *Fish* possuem ótimas

características elétricas para aplicação em circuitos integrados, a proposta é que sejam manufaturados diferentes CIs analógicos e digitais implementados com diferentes estruturas de *layout* para a realização de estudos comparativos de desempenho. Esses circuitos integrados também seriam estudados em ambientes radioativos.

Outra proposta de continuidade do trabalho está na possibilidade de aperfeiçoamento de uma plataforma computadorizada que testa circuitos integrados digitais sob efeito da radiação. Essa plataforma está operante e por enquanto testa somente memórias estáticas de acesso aleatório.

REFERÊNCIAS

1. BRINKMAN, W. F.; HAGGAN, D. E.; TROUTMAN, W. W. A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 32, December 1997.
2. LILIENFELD, J. E. **Method and Apparatus for Controlling Electric Currents**. US Patent 1.745.175, 28 January 1930.
3. SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2000.
4. BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: PHB, 1998.
5. COLINGE, J. P. **Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI**. 3rd. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004.
6. DIXIT, A. et al. Analysis of the Parasitic S/D Resistance in Multiple-Gate FETs. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 52, June 2005.
7. HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L. **Handbook of Radiation Effects**. 2nd. ed. New York: Oxford, 2003.
8. KUO, J. B.; LIN, S.-C. **Low-Voltage SOI CMOS VLSI Devices and Circuits**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
9. ALATI, D. M. **Estudo do Comportamento Elétrico da Resistência de Ligamento (On-Resistane) do SOI NMOSFET Diamante**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo. 2009. Relatório de Iniciação Científica.
10. GIMENEZ, S. P. **Aperfeiçoamento em Transistores (MOSFET Wave)**. Patente INPI: PI0802634-3 A2, 07 Agosto 2008.
11. BELLODI, M.; GIMENEZ, S. P. **Aperfeiçoamento em Transistores (MOSFET Diamante)**. Patente INPI: PI0802745-5 A2, 07 Agosto 2008.

12. GIMENEZ, S. P. **Estrutura de Transistor do Gênero MOSFET (MOSFET Octo)**. Patente INPI: PI0903005-0 A2, 28 Agosto 2009.
13. GIMENEZ, S. P. **Aperfeiçoamento em Transistores (MOSFET Fish)**. Patente INPI: PI1101477-6 A2, 11 Abril 2011.
14. GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. Comparative Experimental Study between Diamond and Conventional MOSFET. **ECS Transactions: SiGe, Ge, and Related Compounds 4: Materials, Processing, and Devices**, Las Vegas, 33, 2010. 121-132.
15. FRIEDLANDER, M. W. **A Thin Cosmic Rain: Particles from Outer Space**. 2nd. ed. Cambridge: Harvard University Press, 2000.
16. BUCHNER, S. **Overview of Single Event Effects**. Seressa 2010. São José dos Campos: [s.n.]. 2010.
17. COLINGE, J. P. (Ed.). **FinFETs and Other Multi-Gate Transistors**. New York: Springer, 2008.
18. ROMERO, C. Brasil Busca Reduzir Vácuo Tecnológico. **Valor Econômico**, 19 Maio 2008.
19. SILVEIRA, V. Radiação Cósmica Preocupa Cientistas. **Valor Econômico**, São José dos Campos, Maio 2010.
20. SILVEIRA, V. Para Embraer, Informações São Raras. **Valor Econômico**, São José dos Campos, 18 Maio 2010.
21. ARAÚJO, A. A. D. et al. **Programa Nacional de Microeletrônica: Contribuições para a Formulação de um Plano Estruturado de Ações**. Ministério de Ciência e Tecnologia. Brasília. 2002.
22. GUTIERREZ, R. M. V. **Complexo eletrônico: Lei de Informática e Competitividade**. BNDES Setorial 31. [S.l.], p. 5-48. 2009.
23. MIGUEL, H. D. O. et al. **Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior:**

Propostas do Painel de Semicondutores. FINEP. [S.l.]. 2004.

24. FELIX, J. A. et al. Radiation Response and Variability of Advanced Commercial Foundry Technologies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 53, December 2006.
25. BINZAID, S.; ATTIA, J. O. Configurable Active-Region-Cutout-Transistor for Radiation Hardened Circuit Applications. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, Niagara Falls, 2008.
26. ANELLI, G. et al. Radiation Tolerant VLSI Circuits in Standard Deep Submicron CMOS Technologies for the LHC Experiments: Practical Design Aspects. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 46, December 1999.
27. SILVA, W. A. J. **Estudo da Transcondutância e da Razão da Transcondutância sobre a Corrente de Dreno do SOI nMOSFET de Porta em Formato de Anel Circular Utilizando Tecnologia SOI CMOS de 0,13 μm .** Centro Universitário da FEI. [S.l.]. 2008. Dissertação de Mestrado.
28. LIMA, J. A. D.; GIMENEZ, S. P.; CIRNE, K. H. Modeling and Characterization of Overlapping Circular-Gate MOSFET and Its Application to Power Devices. **IEEE Transactions on Power Electronics**, PP, n. 99, 22 February 2011.
29. CIRNE, K. H. et al. X-ray Radiation Effects in the Circular-Gate Transistors. **ECS Transactions: Advanced Semiconductor-on-Insulator Technology and Related Physics 15**, Montreal, 35, 2011.
30. CIRNE, K. H. **Estudo e Fabricação de MOSFETs Robustos à Radiação para Aplicações Espaciais de Circuitos Integrados.** Centro Universitário da FEI. [S.l.]. 2011. Dissertação de Mestrado.
31. STREETMAN, B. G.; BANERJEE, S. **Solid State Electronic Device.** Fifth Edition. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.
32. MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS.** São Paulo: Thomson, 2004.

33. YTTERDAL, T.; CHENG, Y.; FJELDLY, T. A. **Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
34. PHILIPS Semiconductors (2N7000). **Datasheet Catalog**. Disponível em: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/2N7000-03.pdf>. Acesso em: 20 Setembro 2011.
35. RAZAVI, B. **Design of Analog CMOS Integrated Circuits**. New York: McGraw-Hill, 2001.
36. TOCCI, R. T.; WIDMER, N. S. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education, 2003.
37. SILVEIRA, F.; D., F.; A., J. P. G. A gm/ID Based Methodology for the Design of CMOS Analog Circuits and Its Application to the Synthesis of a Silicon-on-Insulator Micropower OTA. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 31, n. 9, September 1996.
38. CLEIN, D. **CMOS IC Layout: Concepts, Methodologies, and Tools**. [S.l.]: Newnes, 2000.
39. COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices**. New York: Springer, 2002.
40. CONDE, A. O. et al. A Review of Recent MOSFET Threshold Voltage Extraction Methods. **Microelectronics Reliability**, 42, 2002. 583-596.
41. BAKER, R. J. **CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation**. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
42. SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. 3rd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
43. JACKSON, J. B. **Junction Field Effect Transistors and Silicon Nanowires for Future Nanoelectronics Devices**. The University of Utah. [S.l.]. 2008. Dissertação de Doutorado.

44. SAKURAI, T.; MATSUZAWA, A.; DOUSEKI, T. **Fully-Depleted SOI CMOS Circuits and Technology for Ultralow-Power Applications**. [S.l.]: Springer, 2006.
45. BHATTACHARYYA, A. B. **Compact MOSFET Models for VLSI Design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
46. LEBLEBICI, Y.; SUNG-MO, K. **Hot-Carrier Reliability of MOS VLSI Circuits**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1993.
47. TAJALLI, A.; LEBLEBICI, Y. **Extreme Low-Power Mixed Signal IC Design: Subthreshold Source-Coupled Circuits**. [S.l.]: Springer, 2010.
48. ISHIBASHI, K.; OSADA, K. **Low Power and Reliable SRAM Memory Cell and Array Design**. [S.l.]: Springer, 2011.
49. TROUTMAN, R. R. **Latchup in CMOS Technology: The Problem and Its Cure**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1986.
50. STERN, J. M. et al. Silicon-On-Insulator for High Performance ASIC Designs. **Processing Issues for VLSI/ASIC Designers, IEE Colloquium on**, 22 June 1992.
51. GIMENEZ, S. P.; FERREIRA, R. M. G.; MARTINO, J. A. Early Voltage Behavior in Circular Gate SOI nMOSFET Using 0.13 μm Partially-Depleted SOI CMOS Technology. **ECS Transactions**, August 2006.
52. DANTAS, L. P.; GIMENEZ, S. P. Comparison between Harmonic Distortion in Circular Gate and Conventional SOI nMOSFET using 0.13 μm Partially-Depleted SOI CMOS Technology. **ECS Transactions**, 2007. 1086-1095.
53. GIMENEZ, S. P. Diamond MOSFET: An Innovative Layout to Improve Performance of ICs. **Solid-State Electronics**, v. 54, n. 12, p. 1690-1696, December 2010.
54. ALATI, D. M.; GIMENEZ, S. P. Comparação entre o Transistor SOI nMOSFET Diamante e seu Equivalente Convencional. **Anais do XI Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica - XI SICT**, São Paulo, 07 Outubro 2009. 76.

55. GIMENEZ, S. P.; BELLODI, M. Diamond SOI MOSFET: A New Drain and Source/Channel Interface Layout to Improve Drain Current. **Fifth Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Göteborg, January 2009.
56. ALATI, D. M.; GIMENEZ, S. P. Estudo Comparativo entre o SOI nMOSFET Diamante e Convencional, Utilizando o Simulador Sentaurus Device da Synopsys. **XVII Simpósio Internacional de Iniciação Científica USP (XVII SIICUSP)**, São Carlos, 09 Novembro 2009.
57. GIMENEZ, S. P.; CLASER, R.; ALATI, D. M. Using Diamond SOI nMOSFETs to Improve the Frequency Response of the Analog Integrated Circuits. **Seventh Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Granada, January 2011.
58. CLASER, R.; ALATI, D. M.; GIMENEZ, S. P. Layout, Manufacture and Experimental Characterization of the Octo MOSFET. **Microelectronics Student Forum (SForum)**, São Paulo, 2010.
59. GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. OCTO SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond to Be Used in the Analog Integrated Circuits. **Seventh Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits**, Granada, January 2011.
60. GIMENEZ, S. P.; ALATI, D. M. FISH SOI MOSFET: An Evolution of the Diamond SOI Transistor for Digital ICs Applications. **ECS Transactions**, 35, 2011. 163-168.
61. 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**, 158, 2011. H1258-H1264.
62. OLMSTED, J.; WILLIAMS, G. M. **Chemistry: The Molecular Science**. Second Edition. ed. [S.l.]: Wm. C. Brown Publishers, 1997.
63. ZUMDAHL, S. S.; DECOSTE, D. J. **Introductory Chemistry: a Foundation**. Seventh

Edition. ed. [S.l.]: Brooks/Cole, 2010.

64. YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. 10ª Edição. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2004.
65. SROUR, J. R. Basic Mechanisms of Radiation Effects on Electronic Materials, Devices, and Integrated Circuits. **IEEE NSREC Short Course**, 1983.
66. PROFIO, A. E. **Radiation shielding and dosimetry**. New York: Wiley, 1979.
67. CLAEYS, C. L.; SIMOEN, E. **Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices**. [S.l.]: Springer, 2002.
68. ADAMS, J. H. **Cosmic Ray Effects on Microelectronics**. Naval Research Laboratories. [S.l.]. 1981.
69. DODD, P. E. **Basic Mechanisms for Single Event Effects**. IEEE NSREC Short Course. [S.l.]: [s.n.]. 1999.
70. CRABB, R. L. Solar Cell Radiation Damage. **Radiation Physics and Chemistry**, 1994.
71. RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2005.
72. SCHWANK, J. R. Basic Mechanisms of Radiation Effects in the Natural Space Environment. **IEEE NSREC Short Course**, 1994.
73. BARNABY, H. J. Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 53, December 2006.
74. OLDHAM, T. R.; MCLEAN, F. B. Total Ionizing Dose Effects in MOS Oxides and Devices. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 50, June 2003. 483-499.
75. MCLEAN, F. B.; OLDHAM, T. R. **Basic Mechanisms of Radiation Effects in Electronic Materials and Devices**. U.S. Army Laboratory Command. [S.l.]. 1986.
76. ALATI, D. M. et al. Experimental Comparative Study of the X-Ray Radiation Effects between the Threshold Voltages of the Diamond and Conventional Layout Styles.

Eighth Workshop of the Thematic Network on Silicon on Insulator Technology, Devices and Circuits, Montpellier, January 2012.

77. Trabalho não publicado. National Microelectronic Research Centre - University College. Cork.
78. MEISENHEIMER, T. L.; FLEETWOOD, D. M. Effect of Radiation-Induced Charge on 1/f Noise in MOS Devices. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 37, December 1990. 1696-1702.
79. FLEETWOOD, D. M.; MEISENHEIMER, T. L.; SCOFIELD, J. H. 1/f Noise and Radiation Effects in MOS Devices. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 41, November 1994.
80. CHEW, K. W.; YEO, K. S.; CHU, S. F. Impact of Technology Scaling on the 1/f Noise of Thin and Thick Gate Oxide Deep Submicron NMOS Transistors. **IEE Proceedings Circuits, Devices and Systems**, October 2004. 415-421.
81. MOHR, K. C.; CLARK, L. T.; HOLBERT, K. E. A 130-nm RHBD SRAM with High Speed SET and Area Efficient TID Mitigation. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 54, December 2007.
82. MAVIS, D. G.; ALEXANDER, D. R. Employing Radiation Hardness by Design Techniques with Commercial Integrated Circuit Processes. **16th Digital Avionics Systems Conference**, October 1997.
83. WIRTH, G. I. **Efeitos da Radiação em Circuitos Integrados Analógicos: Técnicas de Simulação e Hardening**. [S.l.]: [s.n.]. 2009.
84. SHANEYFELT, M. R. et al. Challenges in Hardening Technologies Using Shallow-Trench Isolation. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 45, December 1998.
85. DODD, P. E. et al. Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 57, August 2010.

86. BRADY, F. T.; MAIMON, J. D.; HURT, M. J. A Scaleable, Radiation Hardened Shallow Trench Isolation. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 46.
87. SNOEYS, W. J.; GUTIERREZ, T. A. P.; ANELLI, G. A New NMOS Layout Structure for Radiation Tolerance. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, 2002, v. 49, n. 4.
88. HIRATA, M. et al. Effect of Impurities on the Annealing Behavior of Irradiated Silicon. **Journal of Applied Physics**, 38, 1967. 2433-2438.
89. MESSENGER, G. C.; ASH, M. S. **The Effects of Radiation on Electronic Systems**. 2nd Edition. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
90. KILCHYTSKA, V. et al. Effect of High-Energy Neutrons on MuGFETs. **Solid-State Electronics**, 2010. 196-204.
91. CHANG, W. A Framework for Understanding Fast-Neutron Induced Defects in SiO₂ MOS Structures. **Journal of Electronic Materials**, 21, 1992.
92. VAIDYA, S. J. et al. Neutron Induced Degradation in Nitrided Pyrogenic Field Oxide MOS Capacitors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, 194, September 2002. 311-318.
93. NICOLLIAN, E.; BREWS, J. **(MOS) Metal Oxide Semiconductor Physics and Technology**. [S.l.]: Wiley, 2003.
94. HOFMANN, K. R. et al. Hot Electron and Hole Emission Effects in Short n-Channel MOSFET's. **IEEE Transactions on Electron Devices**, ED-32, 1985. 691-699.
95. REICH, R. K. et al. Radiation-Dependent Hot-Carrier Effects. **IEEE Electron Device Letters**, EDL-7, April 1986.
96. ACOVIC, A. et al. Effects of X-ray Irradiation on GIDL in MOSFETs. **IEEE Electron Device Letters**, 13, April 1992. 189-191.
97. MOSIS Integrated Circuit Fabrication Service. Disponivel em: <<http://www.mosis.com/>>. Acesso em: 03 Fevereiro 2012.

98. MEP Research Account. Disponível em:
<http://www.mosis.com/pages/products/mep/mep_new_res>. Acesso em: 03 Fevereiro 2012.
99. Sentaurus Device User Guide. Synopsys Inc. [S.l.]. 2007. Version A-2007.12.
100. Sentaurus Structure Editor User Guide. Synopsys Inc. [S.l.]. 2007. Version A-2007.12.
101. MODEL 8006 Component Test Fixture. Disponível em:
<<http://www.keithley.com/data?asset=9983>>. Acesso em: 16 Janeiro 2012.
102. KEITHLEY 4200-SCS: Semiconductor Characterization System Technical Data.
Disponível em: <<http://www.keithley.com/data?asset=4527>>. Acesso em: 16 Janeiro 2012.
103. MAXIMA_X XRD-7000. Disponível em:
<<http://www.shimadzu.com.br/analitica/catalogos/difratometros/raios-x/xrd/C141-E006C-XRD-7000.pdf>>. Acesso em: 25 Agosto 2011.
104. **Laboratório de Materiais e Feixes Iônicos (LAMFI)**. Disponível em:
<<http://www2.if.usp.br/~lamfi/>>. Acesso em: 26 Janeiro 2012.

APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS DO *CHIP* FABRICADO PELA ON SEMICONDUCTOR

MOSIS WAFER ACCEPTANCE TESTS

RUN: T99J
TECHNOLOGY: SCN05
microns

VENDOR: AMIS (ON-SEMI)
FEATURE SIZE: 0.5

Run type: SKD

INTRODUCTION: This report contains the lot average results obtained by MOSIS from measurements of MOSIS test structures on each wafer of this fabrication lot. SPICE parameters obtained from similar measurements on a selected wafer are also attached.

COMMENTS: SMSCN3ME06_ON-SEMI

TRANSISTOR PARAMETERS	W/L	N-CHANNEL	P-CHANNEL	UNITS
MINIMUM Vth	3.0/0.6	0.78	-0.93	volts
SHORT Idss	20.0/0.6	466	-251	uA/um
Vth		0.66	-0.91	volts
Vpt		13.0	-12.3	volts
WIDE Ids0	20.0/0.6	< 2.5	< 2.5	pA/um
LARGE Vth	50/50	0.68	-0.96	volts
Vjbkd		10.8	-11.8	volts
Ijlk		<50.0	<50.0	pA
Gamma		0.48	0.57	V^0.5
K' (Uo*Cox/2)		58.6	-18.9	uA/V^2
Low-field Mobility		481.96	155.44	cm^2/V*s

COMMENTS: Poly bias varies with design technology. To account for mask bias use the appropriate value for the parameter XL in your SPICE model card.

	Design Technology	XL (um)	XW
(um)	-----	-----	---

0.00	SCMOS_SUBM (lambda=0.30)	0.10	
0.20	SCMOS (lambda=0.35)	0.00	

FOX TRANSISTORS	GATE	N+ACTIVE	P+ACTIVE	UNITS
Vth	Poly	>15.0	<-15.0	volts

PROCESS PARAMETERS	N+	P+	POLY	PLY2_HR	POLY2	M1	M2
UNITS							
Sheet Resistance	84.4	105.9	22.9	1051	40.5	0.09	0.09
ohms/sq							
Contact Resistance	60.7	152.9	16.3		26.4		0.80
ohms							
Gate Oxide Thickness	142						
angstrom							

PROCESS PARAMETERS	M3	N\PLY	N_W	UNITS
Sheet Resistance	0.05	807	801	ohms/sq
Contact Resistance	0.82			ohms

COMMENTS: N\POLY is N-well under polysilicon.

CAPACITANCE PARAMETERS	N+	P+	POLY	POLY2	M1	M2	M3	N_W
UNITS								
Area (substrate)	417	724	86		29	12	8	91
aF/um^2								
Area (N+active)			2434		38	17	12	
aF/um^2								
Area (P+active)			2340					
aF/um^2								
Area (poly)				880	68	16	9	
aF/um^2								
Area (poly2)					57			
aF/um^2								
Area (metal1)						30	12	
aF/um^2								
Area (metal2)							31	
aF/um^2								
Fringe (substrate)	354	252			55	34	27	
aF/um								
Fringe (poly)					59	38	28	
aF/um								
Fringe (metal1)						57	33	
aF/um								
Fringe (metal2)							48	
aF/um								
Overlap (N+active)			182					
aF/um								
Overlap (P+active)			230					
aF/um								

CIRCUIT PARAMETERS			UNITS
Inverters	K		
Vinv	1.0	2.02	volts
Vinv	1.5	2.27	volts
Vol (225 uA)	2.0	0.27	volts
Voh (225 uA)	2.0	4.70	volts
Vinv	2.0	2.45	volts
Gain	2.0	-18.01	
Ring Oscillator Freq.			
DIV256 (31-stg, 5.0V)		105.50	MHz

D256_WIDE (31-stg,5.0V)	156.92	MHz
Ring Oscillator Power		
DIV256 (31-stg,5.0V)	0.49	uW/MHz/gate
D256_WIDE (31-stg,5.0V)	1.00	uW/MHz/gate

COMMENTS: SUBMICRON

T99J SPICE BSIM3 VERSION 3.1 PARAMETERS

SPICE 3f5 Level 8, Star-HSPICE Level 49, UTMOST Level 8

* DATE: Dec 22/09

* LOT: T99J WAF: 7101

* Temperature_parameters=Default

```
.MODEL CMOSN NMOS (
+VERSION = 3.1          TNOM    = 27          LEVEL    = 49
+XJ          = 1.5E-7    NCH     = 1.7E17      TOX      = 1.42E-8
+K1          = 0.8916583 K2      = -0.0984787    VTH0     = 0.6066706
+K3B         = -8.4234075 W0     = 3.807398E-8    K3       = 23.6382023
+DVT0W       = 0         DVT1W   = 0          NLX      = 1.509888E-
9
+DVT0        = 0.7849492 DVT1   = 0.3994002    DVT2W    = 0
+U0          = 452.2685957 UA     = 1E-13      DVT2     = -0.5
+UC          = -5.73121E-14 VSAT   = 1.841184E5    UB       = 1.176277E-
18
+AGS         = 0.0886407 B0     = 1.957761E-6    A0       = 0.5371856
+KETA        = -2.530193E-3 A1     = 7.230825E-5    B1       = 5E-6
+RDSW       = 1.081837E3 PRWG    = 0.112333    A2       = 0.315185
1.908309E-4
+WR          = 1         WINT    = 1.761404E-7    PRWB     = -
+XL          = 1E-7      XW     = 0          LINT     = 9.06256E-8
1.191345E-9
+DWB         = 5.413496E-8 VOFF   = -1.406284E-4    DWG      = -
+KIT         = 0         CDSC    = 2.4E-4      NFACTOR  = 0.8085791
+CDSCB       = 0         ETA0    = 1.449343E-3    CDSCD    = 0
+DSUB        = 0.0129169 PCLM    = 2.2363819    ETAB     = 1
4
+PDIBLC2     = 1.682325E-3 PDIBLCB = -0.5        PDIBLC1  = 1.729314E-
+PSCBE1      = 2.511791E9 PSCBE2  = 1E-3        DROUT    = 1.01633E-4
+DELTA       = 0.01      RSH     = 84.4        PVAG     = 0
+PRT         = 0         UTE     = -1.5        MOBMOD   = 1
+KT1L        = 0         KT2     = 0.022       KT1      = -0.11
+UB1         = -7.61E-18 UC1      = -5.6E-11    UA1      = 4.31E-9
+WL          = 0         WLN     = 1          AT       = 3.3E4
+WWN         = 1         WWL     = 0          WW       = 0
+LLN         = 1         LW      = 0          LL      = 0
+LWL         = 0         CAPMOD  = 2          LWN     = 1
+CGDO        = 1.82E-10 CGSO    = 1.82E-10    XPART    = 0.5
+CJ          = 4.14902E-4 PB       = 0.839007    CGBO     = 1E-9
+CJSW        = 3.600151E-10 PBSW    = 0.8        MJ       = 0.429248
+CJSWG       = 1.64E-10 PBSWG   = 0.8        MJSW     = 0.2047744
+CF          = 0         PVTH0   = -0.0632742    MJSWG    = 0.2047744
+PK2         = -0.07324 WKETA    = 2.457772E-3    PRDSW    = 203.232232
6.437462E-3 )
*
+LKETA       = -
```

```
.MODEL CMOSN PMOS (
+VERSION = 3.1          TNOM    = 27          LEVEL    = 49
+XJ          = 1.5E-7    NCH     = 1.7E17      TOX      = 1.42E-8
+K1          = 0.553472 K2      = 7.871921E-3    VTH0     = -0.9152268
K3       = 6.2769786
```

+K3B	= -0.4898254	W0	= 1.23924E-7	NLX	= 1.141647E-
7					
+DVT0W	= 0	DVT1W	= 0	DVT2W	= 0
+DVT0	= 0.9353874	DVT1	= 0.3671023	DVT2	= -0.1875761
+U0	= 201.3603195	UA	= 2.408572E-9	UB	= 1E-21
+UC	= -1E-10	VSAT	= 1.202516E5	A0	= 0.8828557
+AGS	= 0.088966	B0	= 5.175071E-7	B1	= 0
+KETA	= -4.865785E-3	A1	= 1.370912E-4	A2	= 0.4773832
+RDSW	= 3E3	PRWG	= -0.0281209	PRWB	= -0.0479695
+WR	= 1	WINT	= 2.309781E-7	LINT	= 1.226577E-
7					
+XL	= 1E-7	XW	= 0	DWG	= -
5.470108E-9					
+DWB	= -1.983267E-8	VOFF	= -0.0625678	NFACTOR	= 1.1137245
+CIT	= 0	CDSC	= 2.4E-4	CDSCD	= 0
+CDSCB	= 0	ETA0	= 0	ETAB	= -0.2
+DSUB	= 1	PCLM	= 2.3939111	PDIBLC1	= 0.0494294
+PDIBLC2	= 3.663793E-3	PDIBLCB	= -0.0364718	DROUT	= 0.2462657
+PSCBE1	= 1E8	PSCBE2	= 3.359223E-9	PVAG	= 0.0150055
+DELTA	= 0.01	RSH	= 105.9	MOBMOD	= 1
+PRT	= 0	UTE	= -1.5	KT1	= -0.11
+KT1L	= 0	KT2	= 0.022	UA1	= 4.31E-9
+UB1	= -7.61E-18	UC1	= -5.6E-11	AT	= 3.3E4
+WL	= 0	WLN	= 1	WW	= 0
+WWN	= 1	WWL	= 0	LL	= 0
+LLN	= 1	LW	= 0	LWN	= 1
+LWL	= 0	CAPMOD	= 2	XPART	= 0.5
+CGDO	= 2.3E-10	CGS0	= 2.3E-10	CGB0	= 1E-9
+CJ	= 7.238228E-4	PB	= 0.8735391	MJ	= 0.4909204
+CJSW	= 2.545206E-10	PBSW	= 0.8	MJSW	= 0.1987115
+CJSWG	= 6.4E-11	PBSWG	= 0.8	MJSWG	= 0.1987115
+CF	= 0	PVTH0	= 5.98016E-3	PRDSW	= 14.8598424
+PK2	= 3.73981E-3	WKETA	= 0.0104146	LKETA	= -
8.958097E-3	)				
*					