CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
RAFAEL NAVARENHO DE SOUZA

# ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO ENTRE OS MOSFETS DOS TIPOS *WAVE* E CONVENCIONAIS EQUIVALENTES OPERANDO EM AMBIENTES DE RADIAÇÕES IONIZANTES

São Bernardo do Campo
2016

RAFAEL NAVARENHO DE SOUZA

# ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO ENTRE OS MOSFETS DOS TIPOS *WAVE* E CONVENCIONAIS EQUIVALENTES OPERANDO EM AMBIENTES DE RADIAÇÕES IONIZANTES

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

São Bernardo do Campo

2016

Navarenho de Souza, Rafael.
ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO ELÉTRICO ENTRE OS MOSFETS DOS TIPOS WAVE E CONVENCIONAIS EQUIVALENTES OPERANDO EM AMBIENTES DE RADIAÇÕES IONIZANTES / Rafael Navarenho de Souza. São Bernardo do Campo, 2016.
201 p. : il.

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

1. Caracterização Elétrica Experimental. 2. Dose Ionizante Total (TID). 3. Leiaute. 4. MOSFET do tipo Wave. 5. Radiação Ionizante. I. Pinillos Gimenez, Salvador, orient. II. Título.

centro universitário FEI

# APRESENTAÇÃO DE TESE
# ATA DA BANCA EXAMINADORA

**Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica**

Doutorado

PGE-10

**Aluno:** Rafael Navarenho de Souza **Matrícula:** 512305-4

**Título do Trabalho:** Estudo comparativo do comportamento elétrico entre os mosfets dos tipos wave e convencionais equivalentes operando em ambientes de radiações ionizantes.

**Área de Concentração:** Dispositivos Eletrônicos Integrados

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

**Data da realização da defesa:** 21/10/2016

**ORIGINAL ASSINADA**

Avaliação da Banca Examinadora

São Bernardo do Campo, 21 / 10 / 2016.

| MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA | |
|---|---|
| Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez | Ass.: |
| Prof. Dr. Marco Antonio Assis de Melo | Ass.: |
| Prof. Dr. Aparecido Sirley Nicolett | Ass.: |
| Prof.ª Dr.ª Josemary Angélica Corrêa Gonçalves | Ass.: |
| Prof.ª Dr.ª Talitha Nicoletti Régis | Ass.: |

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

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

**VERSÃO FINAL DA TESE**

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

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Aos meus pais Eduardo e Solange
pelo apoio, incentivo e carinho.

Aos meus irmãos e amigos
por estarem sempre ao meu lado.

Para a Alline por seu apoio incondicional em
todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Salvador Pinillos Gimenez, por seu incentivo, entusiasmo, respeito, confiança em aceitar-me como seu orientado, além de sua contribuição a este trabalho, por seu comprometimento com a formação e educação dos seus orientados e alunos, pela disseminação do seu conhecimento e amizade construída ao longo deste período.

Meus agradecimentos também às professoras Dr.ª Josemary Angélica Corrêa Gonçalves e Dr.ª Milene Galeti pelo incentivo e contribuição em minha banca de Qualificação de doutorado.

Aos professores Dr. Marcelo Antonio Pavanello, Dr. Carlos Eduardo Thomas, Dr. Marcelo Bellodi, Dr. Renato Camargo Giacomini, Dr.ª Paula Ghedini Der Agopian e Prof.ª Dr.ª Michelly de Souza pelas excelentes aulas ministradas.

A Adriana, Marcia e Ricardo pela total competência na condução dos trabalhos da Secretaria.

Aos meus pais Antonio Eduardo de Souza e Solange Isabel Navarenho de Souza pelo incentivo, carinho e amor que sempre foi me dado.

Aos meus irmãos Vinicius, Leonardo e Felipe que incentivaram, participaram e se interessaram por este trabalho, assim como as importantes discussões, estudos e observações do também aluno Leonardo, pois sem sua ajuda não seria possível terminar este trabalho.

A minha esposa, Alline Moraes Galdi, por sua compreensão, paciência, apoio, incentivo, carinho e amor recebido durante esta jornada.

Aos meus amigos de infância, aos amigos da rua Arapuru, da graduação na FEI, do mestrado da FEI, dos meus colegas e amigos nos Estados Unidos da América que sempre me incentivaram nesta busca pelo conhecimento na área de engenharia.

Aos amigos de turma pela troca de informações e apoio.

Aos amigos da General Motors do Brasil e dos Estado Unidos da América que dividiram algumas aflições e sempre me apoiaram nesta empreitada.

A todos que de alguma forma me apoiaram para a conclusão deste trabalho.

A General Motors por financiar e incentivar o estudo científico.

Ao Centro Universitário da FEI pelo incentivo ao estudo científico.

Agradeço a vida concedida com proteção, saúde, paz, harmonia, felicidade, sabedoria, discernimento e capacidade de seguir com os estudos e novos desafios, pois ela é uma soma de experiências e relacionamentos, e é isso que fica.

Agradeço a Deus...

“The true sign of intelligence is not knowledge but imagination”

Albert Einstein

# RESUMO

Neste trabalho realizou-se um estudo comparativo experimental entre um novo estilo de leiaute para ser empregado em *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors* (MOSFETs), denominado de *Wave*, cujo formato de porta é semelhante ao da letra "S", e aos seus respectivos MOSFETs equivalentes de porta retangular, visando as aplicações de circuitos integrados (CIs) analógicos e digitais em ambientes de radiações ionizantes. Dessa forma, neste estudo são comparados os valores dos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito do *Wave* MOSFET de canal n (WnM) com o MOSFET de canal n convencional (nMOSFET) equivalente (CnM), antes e depois dos procedimentos de irradiação com raios X. Este estudo considera a polarização dos MOSFETs durante os procedimentos de irradiações com raios X, isto é, com os transistores polarizados e não polarizados durante os procedimentos de radiações ionizantes, considerando-se que eles possuem os mesmos comprimentos de canal, as mesmas condições de polarização e os mesmos fatores geométricos, cujo objetivo é verificar as vantagens e desvantagens deste inovador estilo de leiaute em relação ao leiaute retangular convencional equivalente.

Foram projetados no Centro Universitário da FEI diferentes MOSFETs com geometrias de porta retangulares (convencionais) e do tipo *Wave*, utilizando-se o processo de fabricação *Complementary* MOS (CMOS) convencional (*Bulk*) da AMI *Semiconductor* (*ON Semiconductor*) de 0,35 μm, por meio do programa *MOSIS Education Program* (MEP), os quais foram usados neste trabalho.

O MOSFET do tipo *Wave* é uma evolução do MOSFET com geometria de porta circular e foi especialmente projetado para melhorar o casamento (*"matching")* entre dispositivos, melhorar o fator de integração de MOSFETs planares de potência (*Planar Power MOSFETs*, PPMs), aumentar a tensão de ruptura (*Breakdown Voltage between Source and Drain,* $BV_{DS}$) e a robustez contra as descargas eletrostáticas (*Electrostatic Discharge,* ESD) quando comparado aos MOSFETs convencionais de geometria de porta retangular. Além disso, trabalhos realizados por caracterização elétrica e por simulação numérica 3D mostraram que o *Wave* nMOSFET é capaz de melhorar o desempenho elétrico dos parâmetros analógicos e digitais em aproximadamente 15%, em média, relativamente ao convencional equivalente.

Os efeitos da Dose Ionizante Total (*Total Ionizing Dose*, TID) podem ser atenuados por meio de estratégias de projeto (*Hardening-By-Design*, HBD) nas quais os efeitos dos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro (BBRs) são reduzidos. O *Wave* MOSFET, devido as suas características geométricas, produz um campo elétrico longitudinal

radial ao longo do canal e, consequentemente, é capaz de reduzir os efeitos dos transistores parasitários nas BBRs em ambientes de radiações ionizantes. Entretanto, o estilo de leiaute *Wave* possui um alto campo elétrico longitudinal próximo à região de dreno no semicírculo, o qual está configurado com polarização de dreno interno acarretando, assim, um aumento da corrente de estado desligado ($I_{OFF}$) em uma década, quando comparado ao convencional equivalente após os efeitos da TID. Portanto, a sua aplicação em ambientes de radiações ionizantes de raios X para CIs digitais pode apresentar limitações quando a $I_{OFF}$ é considerada.

Quando as aplicações em CIs CMOS analógicos ocorrem em ambientes de radiações ionizantes de raios X, o WnM é capaz de apresentar um melhor desempenho elétrico em relação aos convencionais equivalentes de porta retangular, pois os transistores parasitários nas BBRs têm uma menor influência do que aqueles encontrados nos CnMs, após a exposição às radiações ionizantes de raios X. Portanto, através deste estudo comparativo experimental, o estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs apresenta a capacidade de aumentar a frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$) e o ganho de tensão de malha aberta ($A_{V0}$), em média, 20% e 10%, respectivamente, em relação ao estilo de leiaute convencional (retangular) equivalente, considerando-se que esses MOSFETs apresentam as mesmas áreas de porta e condições de polarização. Desta forma, o MOSFET do tipo *Wave* pode ser considerado uma outra alternativa de leiaute para a implementação de MOSFETs, objetivando-se principalmente as aplicações de CIs CMOS analógicos em ambientes de radiações ionizantes de raios X.

Palavras-chave: Caracterização Elétrica Experimental, Dose Ionizante Total (TID), Leiaute, MOSFET do tipo *Wave*, Radiação Ionizante.

## ABSTRACT

This work presents an experimental comparative study between a new layout structure to be applied in Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFETs), called Wave, whose the format of the gate is similar to the letter "S", and the equivalents MOSFETs with rectangular gate, aiming applications in analog and digital integrated circuits (ICs) in ionizing radiation environments. Thus, this study compares the values of the main electrical parameters and figures of merit of the Wave n-channel MOSFET (WnM) with the n-channel MOSFET (nMOSFET) equivalent conventional (CnM), before and after the irradiation procedures with X-rays. This study takes into account the biasing of the MOSFETs during the irradiation procedures with X-rays, i.e. with biased and unbiased transistors during the ionizing irradiation procedures, considering that they have the same channel lengths, the same conditions of biasing and the same geometric factors, in order to verify the advantages and disadvantages of this innovative layout style compared to the equivalent conventional rectangular layout.

It was designed, at the University Center of FEI, MOSFETs with rectangular gate geometries (conventional) and Wave, using the Complementary MOS (CMOS) conventional manufacturing process (Bulk) from AMI Semiconductor (ON Semiconductor) of 0.35 μm via MOSIS Education Program (MEP) program, which were used in this study.

The Wave MOSFET is an evolution of the MOSFET with circular gate geometry and was especially designed to improve the matching between devices, to improve the geometric factor of Planar Power MOSFETs (PPMs), to increase the Breakdown Voltage between Source and Drain ($BV_{DS}$), and the robustness against Electrostatic Discharge (ESD) when compared to the conventional MOSFETs with rectangular gate geometry. Furthermore, studies conducted by electrical characterization and 3D numerical simulation showed that the Wave nMOSFET is capable of improving the electrical performance of analog and digital parameters by approximately 15% on average compared to the equivalent conventional.

The effects of the Total Ionizing Dose (TID) can be attenuated by design strategies (Hardening-by-Design, HBD) in which the effects of the parasitic transistors in the bird's beak regions (BBRs) are reduced. The Wave MOSFET, due to its geometric characteristics, produces a longitudinal electrical field which is radial along the channel, and therefore it is able to reduce the effects of the parasitic transistors in the BBRs in the ionizing radiation environments. However, the Wave layout style has a high longitudinal electrical field close to the drain region in the semicircle which is configured with internal drain bias, resulting in an

increased OFF State current ($I_{OFF}$) in a decade when compared to the equivalent conventional after the effects of the TID. Therefore, its application in the ionizing radiation environments for digital ICs is likely to be limited when it takes into account $I_{OFF}$.

Regarding the applications in the analog ICs CMOS in X-rays ionizing radiation environments, the WnM is able to present better electrical performance in relation to the equivalent conventional with rectangular gate, due to the fact that the parasitic transistors in the BBRs have less influence than those found in the CnMs after the exposure to X-rays ionizing radiation. Therefore, through this experimental comparative study, the Wave layout for MOSFETs presents the capability to increase the unity voltage gain frequency ($f_T$) and the open loop voltage gain ($A_{V0}$), on average, 20% and 10%, respectively, in relation to the conventional (rectangular) layout style, considering that these MOSFETs have the same gate areas and polarization conditions. Thus, the Wave MOSFET can be considered another alternative of layout for the implementation of MOSFETs aiming the applications of analog CMOS ICs in X-rays ionizing radiation environments.

Keywords: Experimental Electrical Characterization, Total Ionizing Radiation (TID), Layout, *Wave* MOSFET, Ionizing Radiation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhamento do leiaute do *Wave* MOSFET. Semicírculos superior e inferior, com porta, dreno e fonte, assim como o campo elétrico longitudinal (LEF) e as regiões de bico de pássaro (BBRs).....37
Figura 2 – Exemplo de uma seção transversal simplificada de um nMOSFET implementado com tecnologia de CIs CMOS convencional (*Bulk*).....40
Figura 3 – Exemplo de uma seção transversal simplificada de um pMOSFET levando-se em conta que ele foi construído com tecnologia de CIs CMOS convencional (*Bulk*).....40
Figura 4 – Exemplo de uma curva Log [$I_{DS}$/(W/L)] em função de $V_{GT}$ para um *Wave* nMOSFET e um nMOSFET convencional de comprimentos de canal iguais a 2,3µm e $V_{DS}$ = 0,4V.....43
Figura 5 – Exemplo de um MOSFET indicando as tensões das resistências parasitárias de dreno e de fonte.....44
Figura 6 – Exemplo de uma curva da resistência série em função de $V_{GT}$ de um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS de comprimento de canal igual a 12 µm para um $V_{DS}$ de 10mV.....45
Figura 7 – Exemplo de uma curva experimental da $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ que é utilizada para extrair da resistência de estado ligado de um nMOSFET.....47
Figura 8 – $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ ilustrando a extrapolação da região linear da região de saturação para determinar $V_{EA}$.....48
Figura 9 – Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{ON}$.....49
Figura 10 – Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{OFF}$.....50
Figura 11 – Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{leak}$.....51
Figura 12 – Exemplo de uma curva $g_m/I_{DS}$ em função de [$I_{DS}$/(W/L)] (representada em escala logarítmica), com a identificação das regiões dos regimes de inversão fraca, moderada e forte.....52
Figura 13 – Curvas de $A_{V0}$ e $f_T$ em função de [$I_{DS}$/(W/L)].....54
Figura 14 – Raios cósmicos terrestres.....57
Figura 15 – SAA e trajetória do telescópio espacial Hubble.....58

Figura 16 – Curva da incidência de prótons por $cm^{-2}$ $s^{-1}$ considerando a altitude e a latitude, assim como a faixa de altitude do telescópio espacial.....58
Figura 17 – Efeito Fotoelétrico.....60
Figura 18 – Efeito Compton.....61
Figura 19 – Produção de pares elétron-pósitron.....62
Figura 20 – Atuação da radiação ionizante no óxido de porta.....63
Figura 21 – Influência da radiação ionizante nas características elétricas do MOSFET, (a) cargas armadilhadas no óxido de porta, (b) na interface $S_iO_2$.....64
Figura 22 – Ilustração das regiões de bico de pássaro da estrutura do MOSFET e o seu circuito elétrico equivalente, levando-se em conta os transistores parasitários associados as regiões de bico de pássaro.....66
Figura 23 – Curvas dos logaritmos das $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ de um nMOSFET irradiado várias vezes.....67
Figura 24 – Exemplo de um ELT com formato de porta anelar quadrado.....68
Figura 25 – Leiaute dos MOSFETs dos tipos *Wave* (a) e do seu equivalente convencional retangular (b) com L=2,3 μm.....71
Figura 26 – Imagem do MOSFET do tipo *Wave* (a) e do seu convencional retangular equivalente (b), ambos com um comprimento de canal de 12μm.....72
Figura 27 – Difratômetro de raios X (a) e o dispositivo posicionado em seu interior para receber a irradiação de raios X (b).....73
Figura 28 – Microprovador *Cascade* da *Microtech* (a) e o analisador de dispositivos semicondutores *Keithley* 4200, da *Keithley Instruments Inc.* (b).....74
Figura 29 – Imagem do encapsulamento do CI que contém os dispositivos usados para realizar esse estudo.....77
Figura 30 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 μm na condição de polarização *Floating*.....79
Figura 31 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 μm na condição de polarização *Floating*.....79
Figura 32 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 μm na condição de polarização *Floating*.....80

Figura 33 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID=1,5Mrad para L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 4 V, na condição de polarização *Floating*.....82
Figura 34 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID= 1,5Mrad para L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 0,4 V, na condição de polarização *Floating*.....83
Figura 35 – Resultados experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$=4 V e $V_{GS}$=2 V (região de saturação) na condição de polarização *Floating*.....84
Figura 36 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=4V, para análise da $I_{OFF}$ na condição de polarização *Floating*.....85
Figura 37 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID= 1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 0,4V, para análise da $I_{ON}$ na condição de polarização *Floating*.....86
Figura 38 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar na condição de polarização *Floating*.....90
Figura 39 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 10m V, na condição de polarização *Floating*.....91
Figura 40 – Resultados experimentais de S (mV/dec) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes na condição de polarização *Floating*.....93
Figura 41– Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para um Perm TID= 1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{GS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....95
Figura 42 – Resultados experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V e $V_{DS}$=3V na condição de polarização *Floating*.....97
Figura 43 – Resultados experimentais das tensões *Early* em função do comprimento de canal dos MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V na condição de polarização *Floating*.....99

Figura 44 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V na condição de polarização *Floating*.....101
Figura 45 – Curvas experimentais das $g_m$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....102
Figura 46 – Curvas experimentais das $g_m$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=12 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....103
Figura 47 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$/(W/L) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$= 2 V na condição de polarização *Floating*.....104
Figura 48 – Curvas experimentais das $g_m$ /$I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....105
Figura 49 – Curvas experimentais das $g_m$ /$I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) com o detalhamento do regime de inversão forte para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *Floating*.....107
Figura 50 – Resultados experimentais das $g_m$/$I_{DS}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$ = 2 V e para $I_{DS}$/(W/L) = $1x10^{-6}$(A) (região do regime de inversão moderada) na condição de polarização *Floating*...108
Figura 51 – Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$/(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....109
Figura 52 – Resultados experimentais dos $A_{V0}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$=2 V e para $I_{DS}$/(W/L)=$1x10^{-6}$ (A) na condição de polarização *Floating*.....110
Figura 53 – Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*.....112
Figura 54 – Resultados experimentais das $f_T$ máximo em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$= 2 V na condição de polarização *Floating*.....113

Figura 55 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 μm na condição de polarização *ON State*.....115
Figura 56 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 μm na condição de polarização *ON State*....115
Figura 57 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 μm na condição de polarização *ON State*.....116
Figura 58 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID= 2 Mrad com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=4 V, na condição de polarização *ON State*.....118
Figura 59 – Curvas experimentais da $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad para L= 2,3 μm e com $V_{DS}$ = 4 V, na condição de polarização *ON State*.....119
Figura 60 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ ampliadas para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=4 V, na condição de polarização *ON State*.....119
Figura 61 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=4V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*.....120
Figura 62 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L= 2,3 μm e com $V_{DS}$=4 V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*.....121
Figura 63 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ ampliadas para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com para L= 2,3 μm e com $V_{DS}$=4V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*.....122
Figura 64 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm, na condição de polarização *ON State*.....123

Figura 65 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm, na condição de polarização *ON State*.....114
Figura 66 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm, na condição de polarização *ON State*.....125
Figura 67 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2Mrad com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar, na condição de polarização *ON Sate*.....127
Figura 68 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2Mrad, com L= 2,3 μm e com $V_{DS}$ = 10m V, na condição de polarização *ON State*.....128
Figura 69 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm, na condição de polarização *ON State*.....129
Figura 70 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm, na condição de polarização *ON State*.....130
Figura 71 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm, na condição de polarização *ON State*.....130
Figura 72 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L= 2,3 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....132
Figura 73 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....134
Figura 74 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....134

Figura 75 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{GS}$=2V, na condição de polarização *ON State*.....135
Figura 76 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....137
Figura 77 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....138
Figura 78 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....138
Figura 79 – Curvas experimentais de $g_m$ (W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *ON State*.....140
Figura 80 – Curvas experimentais das $g_m$ (W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, para L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....141
Figura 81 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....142
Figura 82 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....142
Figura 83 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *ON State*.....143
Figura 84 – Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....144
Figura 85 – Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....145

Figura 86 – Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$/(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....147
Figura 87 – Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$/(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....148
Figura 88 – Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....149
Figura 89 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....150
Figura 90 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*.....151
Figura 91 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *ON State*.....151
Figura 92 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 μm na condição de polarização *OFF State*.....154
Figura 93 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 μm na condição de polarização *OFF State*.....154
Figura 94 – Resultados experimentais das $V_{TH}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 μm na condição de polarização *OFF State*.....155
Figura 95 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para as diferentes TID, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....157
Figura 96 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para diferente TID, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V.....158

Figura 97 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm, na condição de polarização *OFF State*.....160
Figura 98 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm, na condição de polarização *OFF State*.....161
Figura 99 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a μm, na condição de polarização *OFF State*.....162
Figura 100 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente considerando-se as diferentes TID, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar, na condição de polarização *ON State*.....164
Figura 101 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 μm na condição de polarização *OFF State*.....165
Figura 102 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 μm na condição de polarização *OFF State*.....165
Figura 103 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 μm na condição de polarização *ON State*.....166
Figura 104 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{GS}$ = 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....167
Figura 105 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para as diferentes TID, com L=6 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....168
Figura 106 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{GS}$ = 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....168

Figura 107 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....169
Figura 108 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....170
Figura 109 – Curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L igual 12 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....170
Figura 110 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....172
Figura 111 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....172
Figura 112 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....173
Figura 113 – Curvas experimentais das $g_m$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....174
Figura 114 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....175
Figura 115 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....176
Figura 116 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....176

Figura 117 – Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais de 1 Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L=12 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....178
Figura 118 – Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos Wave e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 0,5 Mrad, 1 Mrad, 1,5 Mrad, respectivamente, com L=12 μm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....179
Figura 119 – Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5 Mrad, 1,0 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 μm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*.....180
Figura 120– Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos Wave e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....181
Figura 121– Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos Wave e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....182
Figura 122– Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos Wave e retangular equivalente, com L igual a 12 μm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*.....182

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões dos MOSFETs do tipo *Wave* e do tipo retangular utilizados neste trabalho.....71

Tabela 2 – Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *Floating* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs.....80

Tabela 3 – $I_{ON}$, $I_{OFF}$, e a razão $I_{ON}/I_{OFF}$ dos WnMs e seus respectivos CnMs para as condições de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como as variações desses parâmetros em função da TID, para L=2,3μm, na condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.....87

Tabela 4 – Comportamento da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ dos WnMs e equivalentes CnMs para as condições de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, considerando-se um L= 6μm e L=12μm, na condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.....88

Tabela 5 – Comportamento das inclinações de sublimiar do WnM e do seu respectivo CnM equivalente para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3μm e considerando-se a condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.....92

Tabela 6 – Comportamento de $R_{ON}$ para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3μm e considerando-se a condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.....100

Tabela 7 – Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *ON State* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs.....116

Tabela 8 – Comportamento das inclinações de sublimiar do WnM e do seu respectivo CnM equivalente para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3μm e considerando-se a condição de polarização *ON State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.....127

Tabela 9 – Comportamento de $R_{ON}$ para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 2 Mrad), assim como suas variações em função da TID, considerando-se um L de 2,3μm na condição de polarização *ON State* durante o processo de radiações ionizantes de raios X.....136

Tabela 10 – Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *OFF State* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs.....155
Tabela 11 – Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados dos MOSFETs dos tipos *Wave* e convencionais equivalentes de portas retangulares nas condições de polarizações *Floating*, *ON State* e *OFF State*, que foram consideradas durante o processo das radiações ionizantes, assim como a diferença de comportamento entre eles na condição de pré-radiação.....185

## LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| $A$ | Área ($cm^2$) |
| $A_{V0}$ | Ganho de tensão de malha aberta (adimensional ou dB) |
| $C_L$ | Capacitância de carga (F) |
| $C_{ox}$ | Capacitância do óxido de porta por unidade de área ($F/cm^2$) |
| $\varepsilon$ | Campo elétrico (V/cm) |
| $\varepsilon_{si}$ | Permissividade do silício [$1{,}06.10^{-12}$ F/cm] |
| $f_g$ | Fator Geométrico (W/L) |
| $f_T$ | Frequência de ganho de tensão unitário (Hz) |
| $f_{Tmax}$ | Frequência de ganho de tensão unitário máxima (Hz) |
| $g_m$ | Transcondutância (S) |
| $g_{m\ máx}$ | Transcondutância máxima (S) |
| $I_{DS}$ | Corrente de dreno (A) |
| $I_{DS_tri}$ | Corrente de dreno operando na região Triodo (A) |
| $I_{DS_sat}$ | Corrente de dreno operando na região Saturação (A) |
| $I_{DS\ Wave}$ | Corrente de dreno do *Wave* MOSFET (A) |
| $I_{DS\ Convencional}$ | Corrente de dreno do SOI nMOSFET convencional (A) |
| $I_{D\ Sub}$ | Corrente de dreno na região de sublimiar (A) |
| $I_{OFF}$ | Corrente de dreno de estado desligado (A) |
| $I_{ON}$ | Corrente de dreno de estado ligado (A) |
| $I_{leak}$ | Corrente de dreno de fuga (A) |
| $L$ | Comprimento do canal (µm) |
| $N_A$ | Concentração de dopantes no canal do transistor ($cm^{-3}$) |
| $n_i$ | Concentração intrínseca dos portadores ($cm^{-3}$) |
| $q$ | Carga elementar do elétron ($1{,}6.10^{-19}$C) |
| $q_{Deff}$ | Carga de depleção efetiva na camada de silício [$C/cm^2$] |
| $R_C$ | Resistência do canal (Ω) |
| $R_D$ | Resistência de dreno (Ω) |
| $R_{ON}$ | Resitência série entre fonte e dreno de estado ligado (Ω) |
| $R_S$ | Resistência de fonte (Ω) |
| $R_{Série}$ | Resistência total (Ω) |
| $S$ | Inclinação de sublimiar (mV/década) |

| | |
|---|---|
| Si | Silício |
| $SiO_2$ | Dióxido de silício |
| $t_{Si}$ | Espessura da camada de silício (m) |
| $t_{ox}$ | Espessura do óxido de porta (m) |
| $V_{DS}$ | Tensão entre dreno e fonte (V) |
| $V_{DS_Sat}$ | Tensão de dreno de saturação (V) |
| $\upsilon$ | Velocidade dos portadores móveis no canal ($m^2/s$) |
| $V_B$ | Tensão de substrato (V) |
| $V_D$ | Tensão de dreno (V) |
| $V_G$ | Tensão de porta (V) |
| $V_{EA}$ | Tensão *Early* (V) |
| $V_{FB}$ | Tensão de faixa plana (V) |
| $V_{GSeff}$ | Tensão de porta efetiva (V) |
| $V_{GS}$ | Tensão entre porta e fonte (V) |
| $V_{GT}$ | Sobretensão de porta (V) |
| $V_{RD}$ | Diferença de potencial na resistência série do dreno (V) |
| $V_{RS}$ | Diferença de potencial na resistência série da fonte (V) |
| $V_S$ | Tensão de fonte (V) |
| $V_{TH}$ | Tensão de limiar (V) |
| W | Largura do canal (m) |
| $X_{dmáx}$ | Espessura máxima da região de depleção (m) |
| $\mu$ | Mobilidade dos portadores no canal de um MOSFET ($cm^2/Vs$) |
| $\Phi_F$ | Potencial de Fermi (V) |
| $\Delta$ | Variação |

## LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| $A_{DIDBC}$ | Área da região de dreno da configuração de polarização de dreno interno |
| $A_{DEDBC}$ | Área da região de dreno da configuração de polarização de dreno externo |
| BBR | Região de bico de pássaro (*Bird´s Beak Region*) |
| BBRs | Regiões de bico de pássaro (*Bird´s Beak Regions*) |
| $BV_{DS}$ | Tensão de ruptura entre fonte e dreno (*Breakdown Voltage between Source and Drain)* |
| CI | Circuito integrado |
| CIs | Circuitos integrados |
| CMOS | Metal-óxido-semicondutor complementar (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) |
| CnM | MOSFET do tipo "n" com porta retangular (*Conventional nMOSFET*) |
| DE | Dreno externo |
| DEDEPAMBRE | Desativação dos MOSFETs parasitários das regiões de bico de pássaro Dreno externo (*Deactivation of Parasitic MOSFETs of the Bird's Beak Regions*) |
| DI | Dreno Interno |
| DGA | Porta postiça assistida (*Dummy Gate-Assisted*) |
| EDBC | Configuração de polarização de dreno externo (*External Drain Bias Configuration*) |
| ELT | Transistor de leiaute fechado (*Enclosed Layout Transistor*) |
| ESD | Descargas eletrostáticas (*Electrostatic Discharge*) |
| FD | Totalmente depletado (*Fully Depleted*) |
| FinFET | Transistor de efeito de campo do tipo Fin (*Fin Field Effect Transistor*) |
| HBD | Robutez pelo projeto (*Hardening-By-Design*) |
| IDBC | Configuração de polarização de dreno interno (*Internal Drain Bias Configuration*) |
| ITRS | Plano Internacional de Tecnologia de Semicondutor (*International Technology Roadmap to Semiconductor)* |
| LCE | Efeito de canto longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*) |
| LEF | Campo elétrico longitudinal (*Longitunal Electrical Field*) |
| LOCOS | Oxidação local do silício *(Local Oxidation of Silicon)* |

| | |
|---|---|
| MOS | Metal-óxido Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor*) |
| MOSFET | Transistor de efeito de campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) |
| OTA | Amplificador Operacional de Transcondutância |
| PAMDLE | Associacão paralela de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*Parallel Connections between MOSFETs with different Channel Lenghts*) |
| SAA | Anomalia magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic Anomaly*) |
| SEB | Evento único de queima (*Single Event Burnout)* |
| SEE | Efeitos de evento único (*Single Event Effects*) |
| SEGR | Evento de ruptura de porta (*Single Event Gate Rupture*) |
| SHE | Erro fatal (*Single Hard Error*) |
| SEL | Evento de travamento único (*Single Event Latchup*) |
| SET | Evento transiente único (*Single Event Transient)* |
| SEU | Evento perturbante único (*Single Event Upset)* |
| STI | Isolamento de fosso raso (*Shallow-Trench Isolation)* |
| SOI | Silício-sobre-isolante (*Silicon-On-Insulator*) |
| TID | Dose ionizante total (*Total Ionizing Dose*) |
| UTB | Corpo ultrafino (*Ultra Thin Body*) |
| UTBOX | Óxido enterrado ultrafino (*Fino Ultra Thin Buried Oxide*) |
| WM | *Wave* MOSFET |
| WnM | *Wave* MOSFET do tipo “n” |

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO**.....33
**2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O MOSFET E SOBRE OS EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES**.....39
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O MOSFET.....39
**2.1.1 Tensão de limiar**.....41
**2.1.2 Inclinação de sublimiar**.....42
**2.1.3 Transcondutância**.....43
**2.1.4 Resistência série entre dreno e fonte**.....44
***2.1.4.1 Resistência série de estado ligado***.....46
**2.1.5 Tensão *Early***.....47
**2.1.6 Corrente de dreno de estado ligado**.....48
**2.1.7 Corrente de dreno de estado desligado**.....49
**2.1.8 Corrente de dreno de fuga**.....50
**2.1.9 Razão $I_{ON}/I_{OFF}$**.....51
**2.1.10 Razão da transcondutância pela corrente de dreno em função da corrente de dreno normalizada em relação ao fator geométrico**.....52
**2.1.11 Ganho de tensão de um único transistor**.....53
**2.1.12 Frequência de ganho de tensão unitário**.....54
2.2 AS RADIAÇÕES IONIZANTES E SEUS EFEITOS NOS MOSFETs.....55
**2.2.1 Radiação ionizante por raios X e seus efeitos em MOSFETs**.....60
**2.2.2 *Total Ionizing Dose* (TID) e seus efeitos nos MOSFETs**.....62
**2.2.3 Técnicas de leiaute para reduzir os efeitos das radiações ionizantes em MOSFETs**.....68
**3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**.....70
3.1 PROJETO, LEIAUTE E FABRICAÇÃO DOS MOSFETS.....70
**3.1.1 Descrição dos MOSFETs utilizados nesse trabalho e seus leiautes**.....70
3.2 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....72
**3.2.1 Procedimento de polarização dos dispositivos**.....75
***3.2.1.1 Condições de polarização dos dispositivos no estado "Floating"***.....75
***3.2.1.2 Condições de polarização dos dispositivos "ON State" e "OFF State"***.....76
***3.2.1.3 Projeto dos encapsulamentos dos dispositivos***.....76

3.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....77
**3.3.1 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudos dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos sem polarização (*Floating*) durante o processo de radiações ionizantes**.....78
***3.3.1.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões de limiar na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....78
***3.3.1.2 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "Floating" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$***.....82
***3.3.1.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinações de sublimiar na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....89
***3.3.1.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....94
***3.3.1.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....98
***3.3.1.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....100
***3.3.1.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....102
***3.3.1.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....105
***3.3.1.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nos ganhos de tensão em malha aberta na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....109
***3.3.1.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas frequências de ganho de tensão***

***unitário na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....111
**3.3.2 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudos dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos na condição com polarização *"ON State"* durante o processo de radiações ionizantes**.....113
***3.3.2.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões de limiar na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....114
***3.3.2.2 Efeitos das radiações ionizantes nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "ON State" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$***.....117
***3.3.2.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinações de sublimiar na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....126
***3.3.3.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....131
***3.3.3.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....133
***3.3.2.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....136
***3.3.2.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....139
***3.3.2.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....144
***3.3.2.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nos ganhos de tensão em malha aberta na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....146

*3.3.2.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas frequências de ganho de tensão unitário na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....148
**3.3.3 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudo dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos com polarização *"OFF State"* durante o processo de radiações ionizantes**.....152
*3.3.3.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X na tensões de limiar na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....153
*3.3.3.2 Efeitos das radiações ionizantes nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "OFF State" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$*.....157
*3.3.3.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinaões de sublimiar na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....163
*3.3.3.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....166
*3.3.2.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....169
*3.3.3.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....171
*3.3.3.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....174
*3.3.3.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....177
*3.3.3.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X no ganho de tensão em malha aberta na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*.....179

***3.3.3.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X na frequência de ganho de tensão unitário na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes***.....180
**4 QUADRO GERAL COMPARATIVO RESULTANTE DO ESTUDO DA TID ENTRE OS MOSFETS DOS TIPOS *WAVE* E SEUS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES**.....184
**5 CONCLUSÕES**.....188
**6 TRABALHOS FUTUROS**.....190
**REFERÊNCIAS**.....191
**APÊNDICE A –** Artigos Publicados.....198
**ANEXO A –** Detalhamento do estilo de leiaute *Wave*.....200

# 1 INTRODUÇÃO

O estudo do Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (*Metal–Oxide–Semiconductor Field Effect Transistor*, MOSFET) é de suma importância para o crescimento contínuo da eletrônica. Desde sua invenção até os dias atuais, grandes transformações foram realizadas no sentido de melhorar o seu desempenho elétrico de suas aplicações em circuitos integrados (CIs), seja através de mudanças de processo, tecnologia e materiais, ou no seu leiaute [1].

O MOSFET é um dispositivo com quatro terminais (dreno, porta, fonte e substrato) inventado por Julius Edgar Lilienfield e patenteado entre os anos 1920 e 1930 [1,2]. O MOSFET é capaz de controlar o fluxo de corrente elétrica entre seus terminais de saída (dreno e fonte) através do campo elétrico vertical, aplicado à porta, que é isolada do canal do dispositivo por uma fina camada de óxido [1,2]. Assim, o MOSFET passou a ser aplicado comercialmente a partir de 1960, por conta do grande avanço da tecnologia de fabricação do óxido de porta [2,3].

Há uma busca incessante pela redução das dimensões dos CIs, ou seja, aumentar o número de dispositivos semicondutores por unidade de área (A) [4] e, consequentemente, possibilitar CIs mais eficientes e com menor custo de fabricação [4]. Desta forma, novas tecnologias de processo de manufatura de CIs Metal-Óxido-Semicondutor Complementar (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor,* CMOS), novos tipos de materiais, novas estruturas de transistores, tais como múltiplas portas, são objetos de intensa pesquisa e desenvolvimento atualmente. Essa tendência pode ser observada no Plano Internacional de Tecnologia de Semicondutor (*International Technology Roadmap to Semiconductor*, ITRS) [5] e também na previsão da Lei de Moore [6, 7].

Considerando-se os CIs nas aplicações médicas e espaciais (que operam em ambientes de radiações ionizantes), os efeitos da dose ionizante total ou *Total Ionizing Dose* (TID) podem introduzir danos permanentes nas camadas de óxido do MOSFET, piorando seu desempenho elétrico [8, 9].

Atualmente, os processos e as tecnologias de fabricação de CIs CMOS não têm uma implementação prática razoável que permita atenuar os efeitos da TID [10]. Assim sendo, inúmeras propostas com essa finalidade enfrentam vários desafios comerciais e custos agregados [10].

Muitas tentativas têm sido feitas para melhorar a tolerância aos danos das radiações ionizantes de acordo com o plano de implementação dos MOSFETs atuais, que podem se

dividir em duas categorias [5]: a primeira está relacionada com a otimização do processo de fabricação de CIs CMOS com diferentes materiais e tecnologias, e a segunda se concentra no uso de estruturas e leiautes não convencionais para os MOSFETs [estruturas tridimensionais, 3D, como, por exemplo, os transistores de efeito de campo de porta dupla (FinFET), múltiplas portas (MuGFETs), *nanowire* etc.] [11].

Um modo de atenuar alguns efeitos das radiações ionizantes consiste em prolongar e sobrepor o óxido de porta com a região de isolamento lateral do MOSFET [12] como por exemplo, o *Shallow Trench Isolation* (STI) [13]. Outra proposta é o uso de *Silicon-On-Insulator* (SOI) que isola o substrato da região de operação ativa do MOSFET com um óxido enterrado (*Buried Oxide,* BOX). Essa estrutura é também capaz de eliminar o efeito de ruptura (*latch-up*), reduzir os efeitos de canal curto (*Short Channel Effects,* SCE) e os efeitos de evento único (*Single Event Effects*, SEE) que são decorrentes das radiações ionizantes [14]. No entanto, os óxidos enterrados aumentam os efeitos indesejados da TID nos SOI MOSFETs, pois as cargas geradas através da incidência das radiações ionizantes podem agregar-se dentro do óxido enterrado e também nas suas interfaces [15, 16].

Os transistores de efeito de campo de porta dupla e múltiplas portas são comprovadamente dispositivos promissores para reduzir as dimensões dos MOSFETs, onde o mais estudado é o FinFET (transistor de porta dupla, não planar, apresentado somente há alguns anos e com dificuldades comerciais de substituir a tecnologia planar CMOS, amplamente usada atualmente [17]). Outros exemplos que podem ser citados são: o corpo ultrafino (*Ultra Thin Body*, UTB) [18], que reduz os efeitos de canal curto e os efeitos das flutuações aleatórias dos dopantes (*Random Dopant Fluctuations*, RDF) [19], bem como o óxido enterrado ultrafino (*Ultra Thin Buried Oxide,* UTBOX) que permite um baixo consumo de energia elétrica e uma operação de tensão multi-limiar por meio da polarização da porta inferior (*back-gate*). Por outro lado, estes transistores ainda são menos tolerantes em ambientes de radiações ionizantes quando comparados ao CMOS convencional (*Bulk*) [20,21,22].

Além disso, os transistores discutidos anteriormente geram um alto impacto econômico, quando comparado à tecnologia de fabricação de CIs CMOS convencional (*Bulk*). Desta forma, o uso de técnicas de projeto (*Hardening-By-Design*, HBD), com alterações de leiaute, permite melhorar a tolerância dos dispositivos contra as radiações ionizantes [22], sem necessariamente alterar a tecnologia, o material, ou o processo de fabricação. Por exemplo, pode ser citada a utilização do transistor de leiaute fechado (*Enclosed Layout Transistor*, ELT) que elimina completamente a corrente de fuga da corrente de dreno ($I_{leak}$) nas regiões de

bico de pássaro (*Bird's Beak Regions,* BBRs) do MOSFET [23], uma vez que esse estilo de leiaute não contém bordas e há uma região de porta anelar envolvendo completamente a região de dreno que, por sua vez, é cercada pela região de fonte [24]. Em tal dispositivo, o metal de porta cobre completamente a região ativa deste, além de não haver nenhuma região de isolamento do óxido que pode ser invertido para causar a corrente de fuga nestas regiões [24]. Esta abordagem mostrou ser muito eficaz, permitindo que o MOSFET apresente tolerâncias contra a TID na escala de Mrad por meio das tecnologias de manufatura de CIs CMOS convencionais (*Bulk*) [25, 26]. A desvantagem do ELT é o seu fator geométrico, W/L (onde W e L são, respectivamente, a largura e o comprimento do canal), considerando-se não ser possível obter valores inferiores a 2,26 [27, 28]. Esta é uma preocupação relevante para a concepção de CIs CMOS analógicos [28]. Cita-se como exemplo, a leitura de sensores de imagem que muitas vezes utilizam valores baixos de W/L [29], adicionado ao fato de que o ELT é assimétrico (diferentes áreas de fonte e dreno) [30]. Foram desenvolvidas variações do ELT para aliviar tal deficiência. No entanto, ainda assim há perda de área útil na concepção do seu leiaute [27].

Com o objetivo de superar as desvantagens do ELT, foram propostos novos leiautes como, por exemplo, o de porta *Dummy-Gate-Assisted* (DGA) [27]. Resultados experimentais confirmaram que esta estrutura inovadora para o MOSFET é mais tolerante às radiações ionizantes [27]. Entretanto, o ELT e o DGA aumentam a área total do CIs CMOS em relação àqueles com os leiautes convencionais retangulares [27].

Os MOSFETs fabricados com formatos de porta hexagonal (*Diamond* MOSFETs) [31], octogonal (*Octo* MOSFETs) [32] e elipsoidal (*Ellipsoidal* MOSFETs) [33] são alternativas interessantes se comparados aos mencionados acima, pois eles são capazes de aumentar o desempenho elétrico dos MOSFETs e a tolerância contra os efeitos das radiações ionizantes, graças ao Efeito de Canto Longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE), da associação paralela de MOSFETs com diferentes comprimentos de canal (*Parallel Connections between MOSFETs with different Channel Lenghts*, PAMDLE) e da desativação dos MOSFETs parasitários das regiões de bico de pássaro (*Deactivation of Parasitic MOSFETs of the Bird's Beak Regions*, DEPAMBBRE), sem gerar quaisquer custos adicionais ao processo planar atual de fabricação CIs CMOS [31-33]. É importante ressaltar que esses dispositivos não podem ser manufaturados com o comprimento mínimo de canal ($L_{min}$) permitido pela tecnologia de fabricação de CIs CMOS [31-33].

A partir da abordagem do uso de leiautes inovadores não convencionais para MOSFETs, os quais podem ser implementados com $L_{min}$, um outro estilo de leiaute foi

proposto - *Wave* MOSFET (WM) - que apresenta uma geometria da porta similar ao da letra "S", cujo objetivo é melhorar o casamento (*"matching")* entre dispositivos, o fator de integração, aumentar a tensão de ruptura (*Breakdown Voltage between Source and Drain,* $BV_{DS}$) e diminuir os efeitos das descargas eletrostáticas (*Electrostatic Discharge,* ESD) [34].

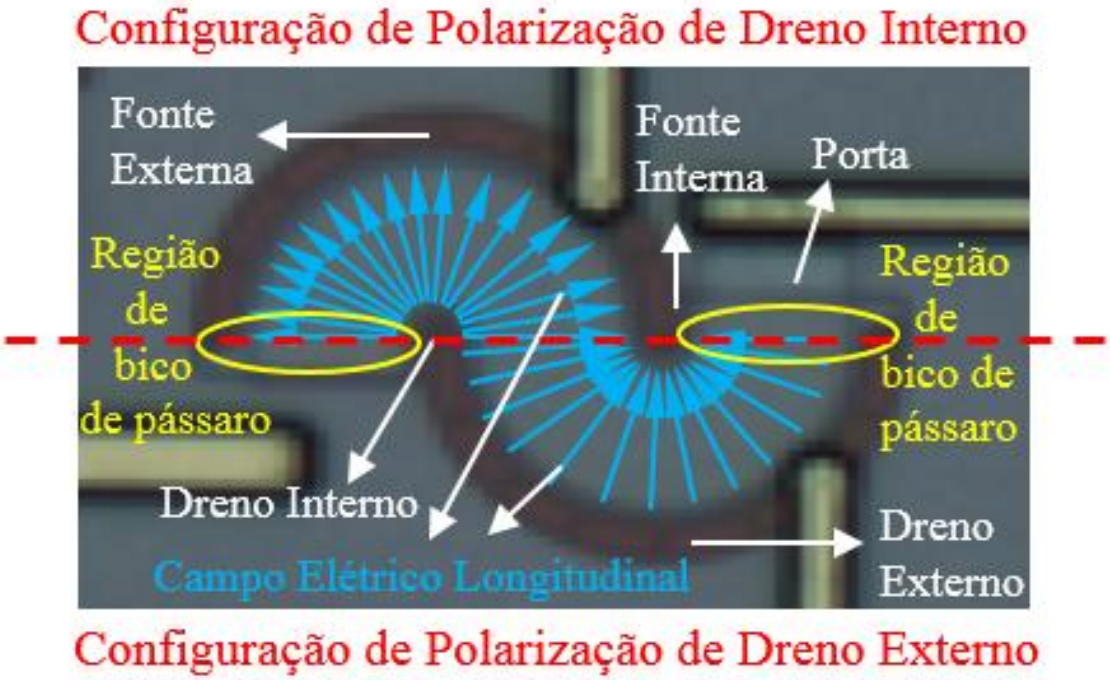
Trabalhos anteriores [35 - 37] demonstraram que o WM de canal "n" (WnM) é capaz de melhorar o desempenho elétrico com relação a corrente de dreno ($I_{DS}$), transcondutância ($g_m$), resistência de estado ligado entre fonte e dreno ($R_{ON}$) e a frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$), sem gerar qualquer custo adicional à tecnologia de fabricação de CIs CMOS convencional, considerando a mesma área de porta e condições de polarização [35 - 37]. O Anexo A apresenta detalhes do estilo de leiaute *Wave*.

O WnM possui características elétricas diferenciadas devido ao seu estilo de leiaute inovador. A corrente de dreno na configuração de polarização de dreno interno (IDBC) é maior que aquela encontrada na configuração de polarização de dreno externo (EDBC). Isto acontece por serem diferentes as áreas de dreno e fonte das configurações de polarização de dreno interno e externo. Ou seja, verifica-se que existe uma área de fonte maior e uma área de dreno menor na configuração de polarização de dreno interno quando comparado à configuração de polarização de dreno externo. Isto produz um maior campo elétrico longitudinal (*Longitudinal Electrical Field,* LEF) ao longo do canal e uma maior densidade de campo elétrico longitudinal na configuração de polarização de dreno interno. A resultante verificada em simulação numérica tridimensional [35] e os resultados experimentais [36, 37] mostraram que a corrente de dreno ($I_{DS}$) do WnM é maior quando comparada à corrente do MOSFET do tipo "n" de porta convencional retangular (CnM), considerando-se a mesma área de porta e condições de polarização. Além disso, uma importante característica elétrica do WnM é que na configuração de polarização de dreno interno, a resistência da fonte é menor que na configuração de polarização de dreno externo e, portanto, tem-se uma resultante de resistência série total ($R_{Série}$) menor no WnM quando comparado ao CnM equivalente de mesma área de porta e razão de aspecto (W/L) [36, 37]. Há, portanto, uma menor diferença de potencial na resistência de fonte com relação à polarização de $V_{GS}$ e, consequentemente, tem-se um $V_{GS}$ efetivo maior aplicado à porta do transistor, que também contribui para uma maior corrente de dreno [36, 37].

A Figura 1 apresenta uma foto do *Wave* MOSFET do tipo "n" fabricado com a tecnologia *Bulk* CMOS comercial de 0,35 µm da *ON-Semiconductor* [38]. É possível observar as indicações da porta, do dreno, da fonte, do campo elétrico longitudinal (LEF) no canal e das regiões de bico de pássaro. Além disso, a Figura 1 destaca, com uma linha tracejada ao meio,

o semicírculo superior em configuração de polarização de dreno interno (*Internal Drain Bias Configuration*, IDBC) e o semicírculo inferior em configuração de polarização de dreno externo (*External Drain Bias Configuration*, EDBC).

Figura 1 - Detalhamento do leiaute do *Wave* MOSFET. Semicírculos superior e inferior com porta, dreno, fonte, campo elétrico longitudinal (LEF) e as regiões de bico de pássaro (BBRs)




Fonte: Autor

Verifica-se que o campo elétrico longitudinal é maior na região de dreno interno do semicírculo superior do que aquele encontrado na região do dreno externo do semicírculo inferior, pois a área da região de dreno do semicírculo superior ($A_{D_IDBC}$) é menor do que aquela observada no semicírculo inferior ($A_{D_EDBC}$) [34, 35, 36, 37].

Como há um maior LEF na região de dreno do semicírculo superior, ele é responsável por criar valores mais elevados das $I_{DS}$ dos valores encontrados no semicírculo inferior. Todavia, a resultante da corrente de dreno do *Wave* MOSFET (considerando as configurações de dreno interno e externo) é maior do que aquela encontrada no MOSFET de porta retangular equivalente, considerando-se a mesma área de porta e as mesmas condições de polarização [34, 35, 36, 37]. Outras características importantes deste estilo de leiaute para MOSFETs são as regiões de bico de pássaro, que são influenciadas pelos transistores parasitários daquelas áreas. Os transistores parasitários da BBR do semicírculo inferior do WnM em EDBC são

ativados em menor proporção, pois a corrente de dreno é radial ao longo de seu canal e também pelo fato de o LEF nesse transistor ser menor do que aquele observado no MOSFET convencional equivalente. Isso se comprova pela área de dreno do *Wave* MOSFET ser maior quando comparado à área do CnM equivalente. Já para o semicírculo superior em IDBC do *Wave* MOSFET, há um LEF elevado próximo à região de dreno interno tendo em vista a sua área ser menor. Por outro lado, o campo elétrico longitudinal que está próximo à região de dreno e bico de pássaro é radial, e por este motivo ele reduz os efeitos dos transistores parasitários associados a essas regiões na corrente de fuga entre dreno e fonte do WnM. Desta maneira, a resultante da influência dos transistores parasitários do WnM tende a ser menor quando comparada à resultante do CnM após as armadilhas criadas nos dispositivos em detrimento das radiações ionizantes.

Nesse contexto, motivado principalmente pelas diferenças do estilo de leiaute *Wave* (EDBC e IDBC) e suas características elétricas, em especial a diferente influência da menor proporção da ativação dos transistores parasitários nas BBRs em ambientes de radiações ionizantes, este trabalho concentra-se na análise comparativa experimental dos efeitos da radiação de raios X, levando-se em conta os efeitos da TID, entre o *Wave* MOSFET e o MOSFET convencional equivalente.

Esta investigação é inovadora e pertinente, pois o estilo de leiaute *Wave* já pode ser aplicado na implementação de MOSFETs com melhor fator de integração, tolerância a ESD e melhor $BV_{DS}$ em MOSFETs planares de potência (*Planar Power* MOSFET, PPM), que são usados como elemento de comutação de alta eficiência de corrente em conversores de corrente contínua para corrente contínua DC/DC [39], em transceptores (*transceivers*) integrados para comunicações sem fio [40], assim como em CIs CMOS de transmissão/recepção (T/R) [40], onde o elemento de comutação destes CIs precisam de uma melhor (menor) resistência série de estado ligado entre fonte e dreno ($R_{ON}$) [39,40]. Portanto, explorar e comparar o desempenho elétrico do MOSFET do tipo *Wave* em relação ao tradicional equivalente é importante para compreender os efeitos da TID, cujas aplicações em CIs CMOS em ambientes de radiações ionizantes (médicas e aeroespaciais, por exemplo) são mais favoráveis.

# 2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O MOSFET E SOBRE OS EFEITOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

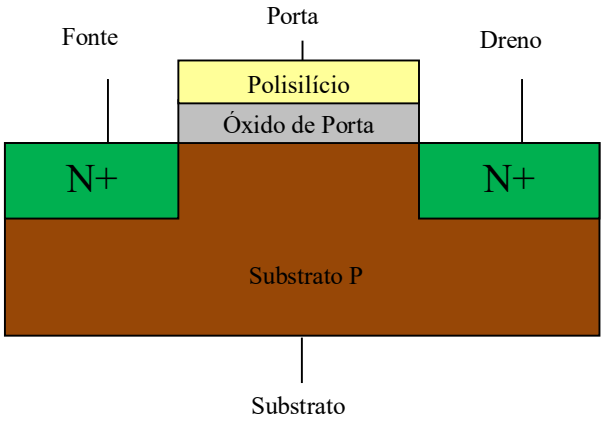
Este capítulo visa apresentar os conceitos básicos necessários para o entendimento deste trabalho.

## 2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O MOSFET

O MOSFET é um dispositivo que apresenta quatro terminais (fonte, dreno, porta e substrato), cujo fluxo de portadores móveis minoritários entre os terminais de fonte e dreno é controlado pelo campo elétrico vertical, gerado pela porta, que é isolada do canal do dispositivo por uma fina camada de óxido [1, 2, 41]. Adicionalmente, há um contato na parte inferior da estrutura do MOSFET, chamado de corpo (substrato), que normalmente está aterrado se for um transistor de canal do tipo n (nMOSFET) [41], onde os átomos dopantes doadores usados para gerar as regiões de fonte e dreno são pentavalentes (N+), fósforo por exemplo, e a região de canal é dopada com átomos trivalentes (P), boro por exemplo. No caso dos MOSFETs de canal do tipo p (pMOSFET), os átomos dopantes trivalentes (P+) são usados para gerar as regiões de fonte e dreno e os átomos pentavalentes (N) são utilizados para implementar a região de canal.

A Figura 2 apresenta um exemplo de uma seção transversal simplificada de um nMOSFET na tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS.

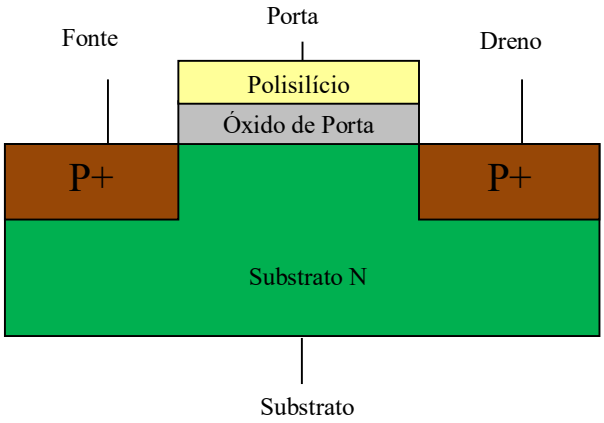
Figura 2 – Exemplo de uma seção transversal simplificada de um nMOSFET implementado com tecnologia de CIs CMOS convencional (*Bulk*)




Fonte: Autor

A Figura 3 apresenta um exemplo de uma seção transversal simplificada de um pMOSFET considerando-se que ele foi construído com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS.

Figura 3 – Exemplo de uma seção transversal simplificada de um pMOSFET levando-se em conta que ele foi construído com tecnologia de CIs CMOS convencional (*Bulk*)




Fonte: Autor

Contudo, com a redução das dimensões dos MOSFETs convencionais, ocorrem determinadas interações entre a região ativa e a região do substrato de silício desses dispositivos, e consequentemente surgem efeitos parasitários indesejados [3], tais como: o efeito de canal curto, a degradação da mobilidade dos portadores móveis do canal (elétrons ou lacunas), o efeito tiristor parasitário, entre outros [41, 42, 43].

Com o objetivo de minimizar os efeitos parasitários dos MOSFETs implementados com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS, a tecnologia Silício-Sobre-Isolante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) MOSFET [44, 45, 46] começou a ser amplamente utilizada, principalmente em aplicações em altas temperaturas e sob a influência das radiações ionizantes, visando também mitigar os efeitos de evento único (*Single Event Effects*, SEE) [44]. No entanto, esses dispositivos são fortemente afetados pelos efeitos da dose ionizante total (*Total Ionizing Dose*, TID), pelo fato de armadilhar cargas positivas na região do óxido enterrado, e consequentemente modificando suas características elétricas [44, 45, 46].

### 2.1.1 Tensão de limiar

A tensão de limiar ($V_{TH}$) de um nMOSFET implementado com tecnologia de fabricação de CIs CMOS convencional (*Bulk*) é definida como a tensão de porta capaz de criar uma camada de inversão na superfície do canal [interface $SiO_2$ (Dióxido de Silício) e Si (Silício)], povoando-a com elétrons livres (portadores minoritários), que são capazes de conduzir corrente elétrica ao longo do canal [47].

No nMOSFET, a tensão de limiar é dada pela equação (1) [41, 48, 49].

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{qN_A X_{dMÁX}}{C_{OX}} \tag{1}$$

Na equação 2.1, $V_{FB}$ é a tensão de faixa plana, ΦF é o potencial de Fermi, q é a carga elementar do elétron, $N_A$ é a concentração de dopantes no canal, $X_{dMÁX}$ é a profundidade máxima de depleção e $C_{OX}$ é a capacitância do óxido de porta por unidade de área [41, 48, 49].

A tensão de limiar pode ser extraída pelo método da segunda derivada da curva da corrente de dreno ($I_{DS}$) em função da tensão de porta ($V_{GS}$) para valores de tensão de dreno ($V_{DS}$) próximos à zero, como por exemplo, para $V_{DS}$ igual a 10 mV [50]. Este método usa o valor máximo da curva da segunda derivada da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, traçando uma reta perpendicular ao eixo do $V_{GS}$, para se obter o $V_{TH}$. O cruzamento dessa reta com o eixo X define o valor da tensão de limiar [50]. Neste método, a extração da tensão de limiar independe da degradação da mobilidade e da resistência série parasitária [41, 48, 49, 50].

### 2.1.2 Inclinação de sublimiar

A inclinação de sublimiar (S) fornece a variação da tensão que deve ser aplicada ao contato de porta em relação a fonte, para que haja o aumento de uma década na corrente de dreno do dispositivo [46].

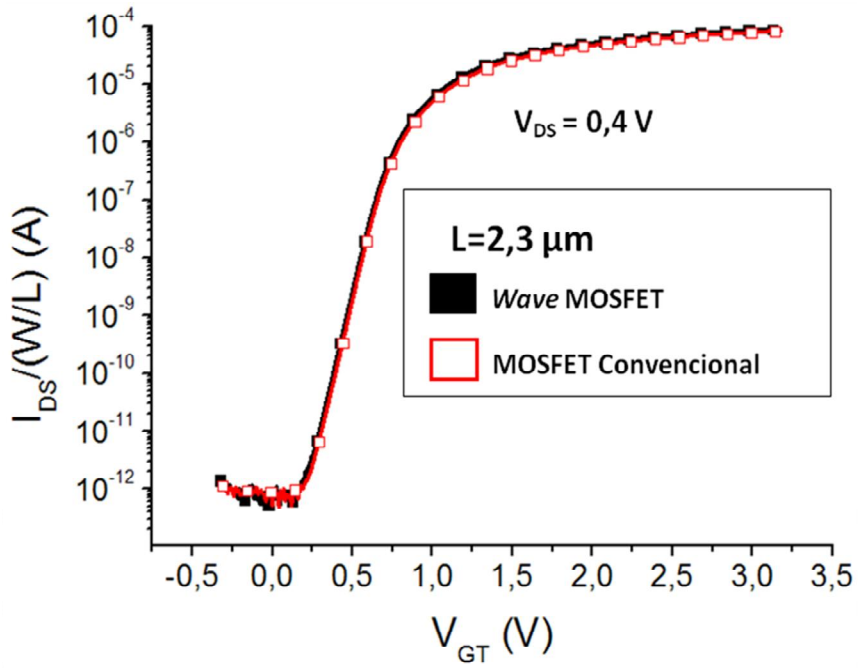
S é dado pelo inverso da inclinação da curva da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, no regime de sublimiar, com a corrente de dreno em escala logarítmica, conforme apresentado na equação (2) [46].

$$S = \frac{1}{\frac{d(\log I_{DS})}{dV_{GS}}} \tag{2}$$

Os valores de S são dados em milivolts por década (mV/década ou mV/dec). Os valores típicos da inclinação de sublimiar de um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS se encontram dentro da faixa de 80 a 120 mV/década em temperatura ambiente [46]. Quanto menor for o valor da inclinação de sublimiar, mais rápida será a capacidade do transistor em realizar chaveamentos e consequentemente melhor o transistor será para as aplicações de CIs CMOS digitais [46].

A Figura 4 apresenta um exemplo de curva do logaritmo da $I_{DS}/(W/L)$ em função da sobretensão de porta ($V_{GT} = V_{GS} - V_{TH}$) de um *Wave* MOSFET do tipo n, utilizada para a extração na região de sublimiar.

Figura 4 – Exemplo de uma curva logaritmo [$I_{DS}$/(W/L)] em função de $V_{GT}$ para um *Wave* nMOSFET e um nMOSFET convencional de comprimentos de canal iguais a 2,3µm e $V_{DS}$ = 0,4V




Fonte: Autor

### 2.1.3 Transcondutância

A transcondutância ($g_m$) de um MOSFET é definida como o quão eficiente é o controle da tensão de porta sobre a corrente entre o dreno e a fonte. Uma outra forma de definir $g_m$ é dizer como a mudança na corrente de dreno se comporta em relação à mudança da tensão de porta [51,52]. A transcondutância é obtida através da derivada da corrente de dreno em relação à diferença de potencial entre porta e fonte e é dada pela a equação (3) [48].

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \tag{3}$$

Para um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS, a transcondutância na região Triodo pode ser definida conforme a equação (4) [3]:

$$g_m = \frac{\mu C_{OX} W}{L}(V_{GS} - V_{TH}) \tag{4}$$

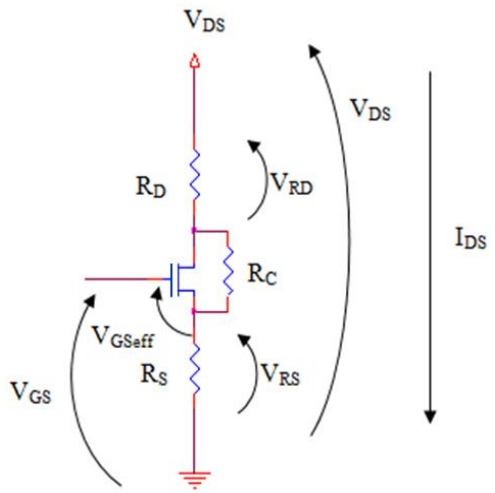
Onde μ é a mobilidade dos portadores de carga livre no canal, $C_{OX}$ é a capacitância do óxido de porta por unidade de área, W é a largura do canal e L é o comprimento de canal.

### 2.1.4 Resistência série entre dreno e fonte

A resistência série entre dreno e fonte ou a resistência total ($R_{Série}$) do MOSFET pode ser definida como a soma das resistências parasitárias do dreno, da fonte e do canal. Essas resistências são intrínsecas a estrutura do transistor [53, 54].

A Figura 5 apresenta o circuito elétrico equivalente de um MOSFET levando-se em conta as resistências intrínsecas, onde são apresentados: a tensão entre dreno e fonte ($V_{DS}$), a tensão entre porta e fonte ($V_{GS}$), a tensão na resistência de dreno ($V_{RD}$), a tensão na resistência de fonte ($V_{RS}$), a resistência de dreno ($R_D$), a resistência de canal ($R_C$), a resistência de fonte ($R_S$), a corrente de dreno ($I_{DS}$) e a tensão de porta efetiva ($V_{GSeff}$).

Figura 5 – Exemplo de um MOSFET indicando as tensões das resistências parasitárias de dreno e de fonte




Fonte: Autor

Em primeira aproximação, a resistência total entre os terminais de fonte e dreno é dada pela expressão (5) [53, 54].

$$R_{Série} = R_D + R_S + R_C \tag{5}$$

Onde na equação (2.5), $R_D$ é a resistência de dreno, $R_S$ a resistência de fonte e $R_C$ a resistência de canal.

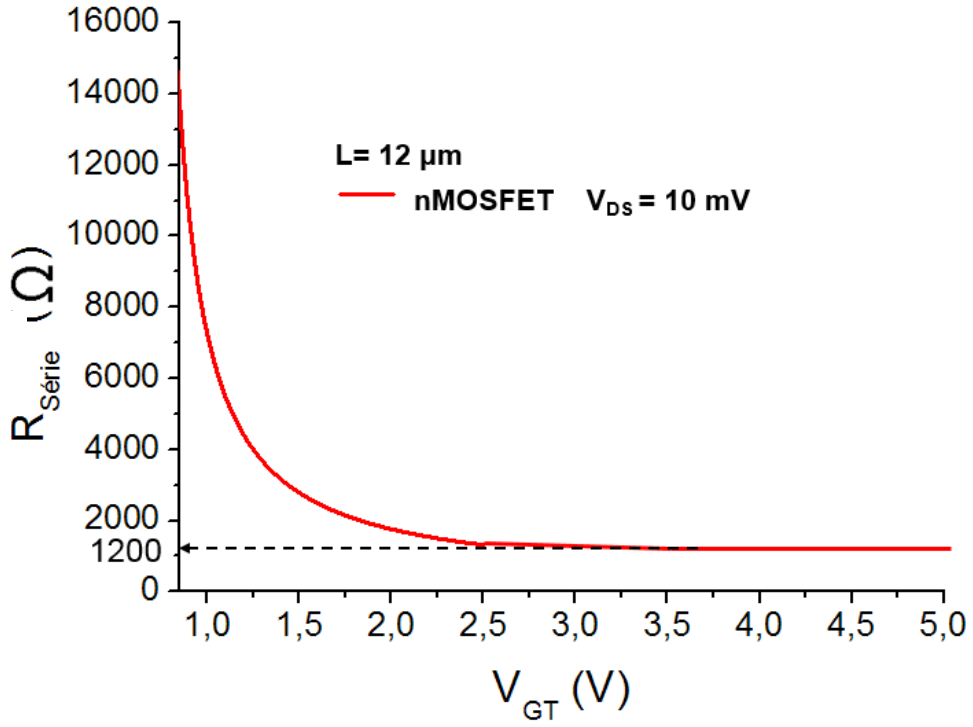
Ao se aplicar baixos valores de $V_{DS}$ e altos valores de $V_{GS}$ (muito acima da $V_{TH}$) num MOSFET, ocorre à inversão do seu canal e com isso a resistência do seu canal torna-se praticamente desprezível em ralação as demais resistências descritas acima. Assim, a resistência série do transistor, pode ser expressa como sendo a soma das resistências parasitárias do dreno e da fonte, conforme a equação (6) em primeira aproximação [53, 54].

$$R_{Série} = R_D + R_S \tag{6}$$

Um método de se extrair a $R_{Série}$ é a partir da curva da resistência ôhmica ao longo do canal em função de $V_{GT}$, para altos valores de $V_{GT}$ (por exemplo, maior que 3 V) e baixos valores de $V_{DS}$ (por exemplo, de 10 mV) até se observar um patamar que está praticamente paralelo ao eixo de $V_{GT}$ [54].

A Figura 6 mostra um exemplo de uma curva da resistência série total ao longo do canal em função de $V_{GT}$ de um n MOSFET para $V_{DS}$ igual a 10mV [37].

Figura 6 – Exemplo de uma curva da resistência série em função de $V_{GT}$ de um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*Bulk*) de CIs CMOS de comprimento de canal igual a 12 µm para um $V_{DS}$ de 10mV [37]




Fonte: Autor

Observando a Figura 6, o valor extraído da $R_{Série}$ desse nMOSFET é de aproximadamente 1200 Ω.

#### *2.1.4.1 Resistência série de estado ligado*

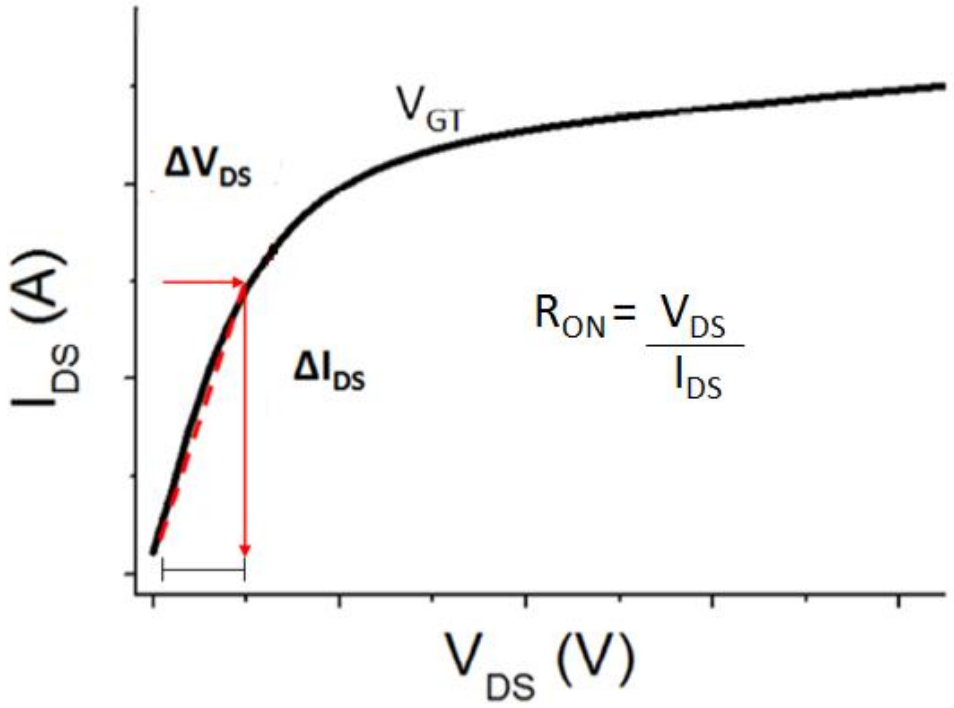
A resistência série de estado ligado de um MOSFET ($R_{ON}$ ou $R_{DSON}$) é um parâmetro muito importante para as aplicações de CIs CMOS digitais [55]. Quanto menor for o seu valor, um menor ruído será gerado por esse dispositivo e mais rápido será o seu chaveamento, ou seja, maior é a sua velocidade de processamento [55]. $R_{ON}$ na região Triodo pode ser determinado segundo a equação (7) [56].

$$R_{ON} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{V_{DS}}{\mu_n C_{ox}} \frac{L}{W} \frac{1}{(V_{GS}-V_{TH})V_{DS}-\frac{V_{DS}^2}{2}} \tag{7}$$

A Figura 7 apresenta um exemplo de uma curva $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ de um nMOSFET, que é utilizada para extrair o valor da $R_{ON}$.

A extração da resistência série de estado ligado pode ser feita graficamente. Para um MOSFET operando em Triodo, pode-se obter o seu valor a partir da divisão da tensão entre os contatos de dreno e fonte pela corrente entre os contatos de dreno e fonte obter o seu valor.

Figura 7 - Exemplo de uma curva experimental da $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ que é utilizada para extrair da resistência de estado ligado de um nMOSFET




Fonte: Autor

Na Figura 7, $\Delta I_{DS}$ é a variação da corrente entre dreno e fonte na parte linear da região Triodo e $\Delta V_{DS}$ é a variação da tensão entre dreno e fonte na parte linear dessa mesma região.

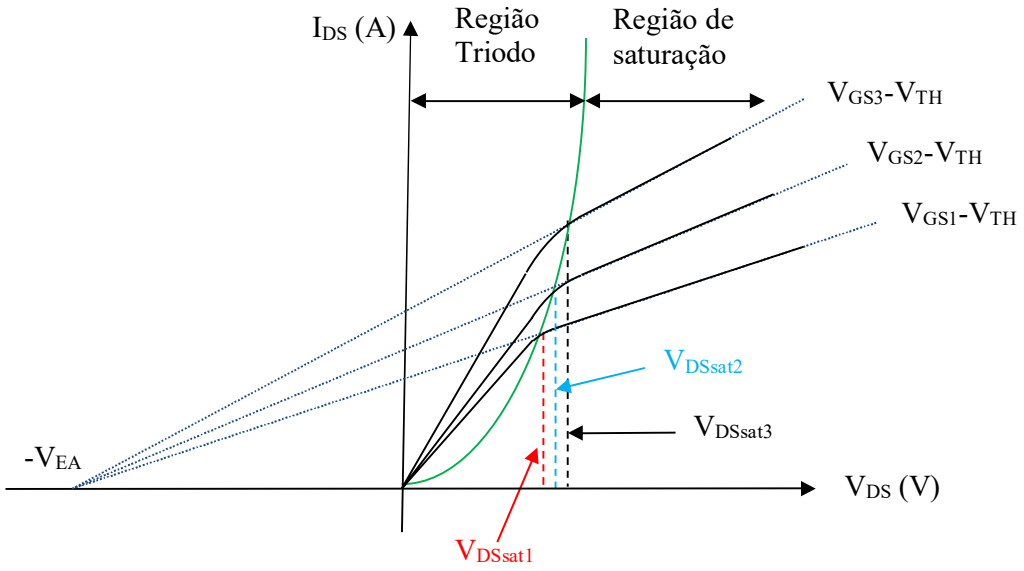
O valor da $R_{ON}$ pode ser calculado através da razão entre a variação da $V_{DS}$ e a variação da $I_{DS}$, considerando a parte linear da região Triodo.

### 2.1.5 Tensão *Early*

A partir da curva da $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ para um determinado valor de $V_{GT}$ é possível determinar a tensão *Early* ($V_{EA}$) por extrapolação da parte linear da região de saturação até encontrar o eixo da $V_{DS}$ [57]. Valores mais negativos de tensão *Early*, significam uma menor dependência da corrente do MOSFET operando na região de saturação em relação à tensão de dreno, para um determinado valor de sobretensão ($V_{GT}$) aplicado à porta [57]. Devido ao efeito da modulação do comprimento de canal, quando $V_{DS}$ ultrapassa a tensão de dreno de saturação, o comprimento efetivo do canal diminui, resultando num aumento da corrente de dreno na região de saturação [57]. A Figura 8 apresenta um exemplo de um

gráfico da $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$, para diferentes valores de $V_{GT}$ [57], ilustrando a extração da tensão *Early* para um determinado MOSFET.

Figura 8 – $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ ilustrando a extrapolação da região linear da região de saturação para determinar $V_{EA}$




Fonte: Autor "adaptado" de SEDRA A. S.; SMITH C. K. Microeletronic Circuits. ed. 5, Oxford University Press, p. 254-255, 2004

Na Figura 8, $V_{DSsat1}$, $V_{DSsat2}$, $V_{DSsat3}$ indicam o início das regiões de saturação das curvas parametrizadas em função das sobretensões de porta: $V_{GS1}$-$V_{TH}$, $V_{GS2}$-$V_{TH}$ e $V_{GS3}$-$V_{TH}$, onde $V_{GS1}$, $V_{GS2}$, $V_{GS3}$ são as diferentes tensões de porta consideradas para extrair a $V_{EA}$.

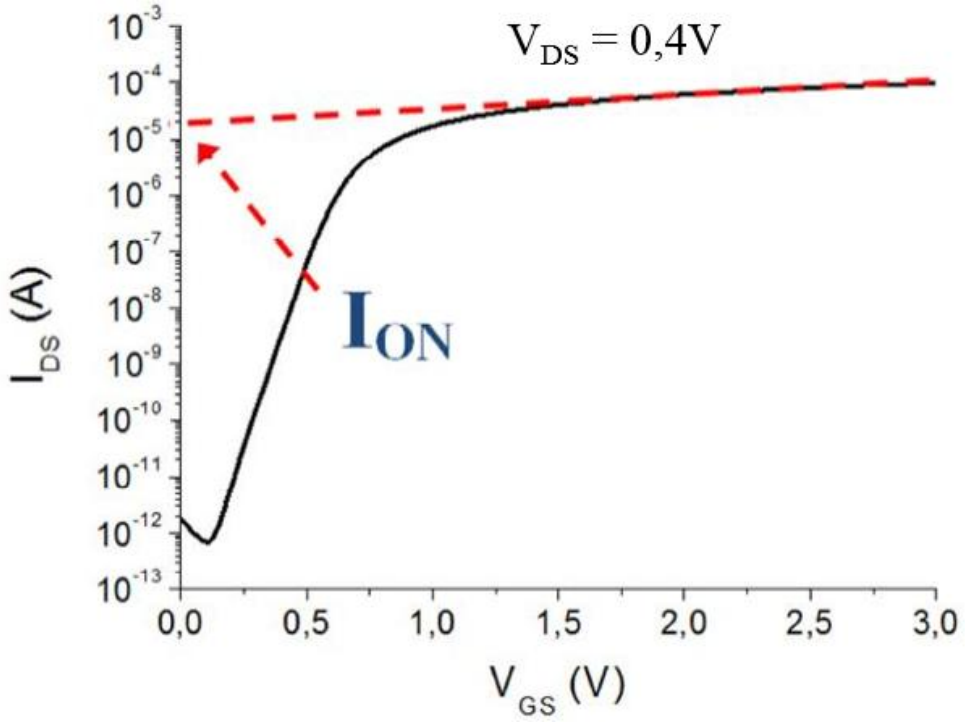
### 2.1.6 Corrente de dreno de estado ligado

A corrente de dreno de estado ligado ($I_{ON}$) de um MOSFET operando como uma chave fechada (curto-circuito) pode ser definida como o valor da $I_{DS}$ para um $V_{GS}$ igual à tensão de $V_{DS}$ [58].

$I_{ON}$ pode ser extraída a partir da curva do logaritmo da $I_{DS}$ em função do $V_{GS}$, para um determinado $V_{DS}$, prolongando-se a região linear dessa curva, quando o transistor estiver operando na região Triodo.

A Figura 9 apresenta um exemplo de curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET de formato de porta retangular, utilizada para ilustrar a extração do parâmetro $I_{ON}$.

Figura 9 - Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{ON}$




Fonte: Autor

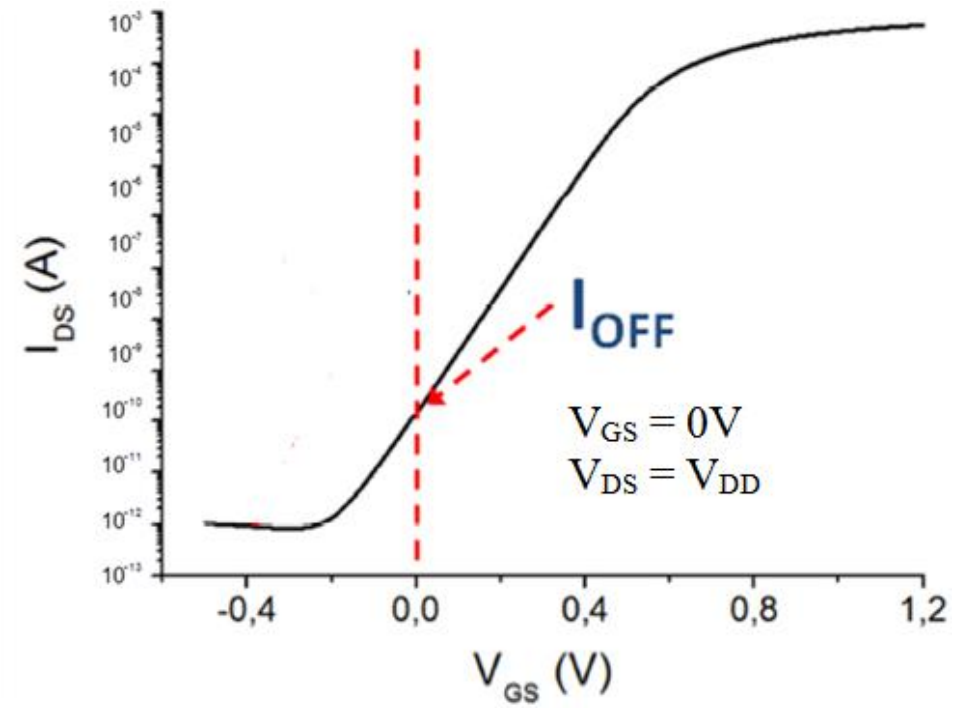
### 2.1.7 Corrente de dreno de estado desligado

A corrente de dreno de estado desligado ($I_{OFF}$) de um MOSFET operando como chave aberta (circuito aberto) é obtida quando $V_{GS}$ é nulo e $V_{DS}$ é igual à tensão de alimentação ($V_{DD}$) [58].

Uma das formas de se extrair $I_{OFF}$ é a partir da curva do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, para $V_{GS}$ igual a 0 V, considerando-se um valor de $V_{DS}$ igual a $V_{DD}$.

A Figura 10 apresenta um exemplo de curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, para um valor de $V_{DS}$ igual a $V_{DD,}$ nMOSFET de formato de porta retangular, utilizada para extrair a corrente de dreno estado desligado.

Figura 10 - Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{OFF}$




Fonte: Autor

Idealmente $I_{OFF}$ deveria ser igual à zero, porém existem diferentes correntes de fuga na estrutura do MOSFET, que impedem que isso ocorra [41]

### 2.1.8 Corrente de dreno de fuga

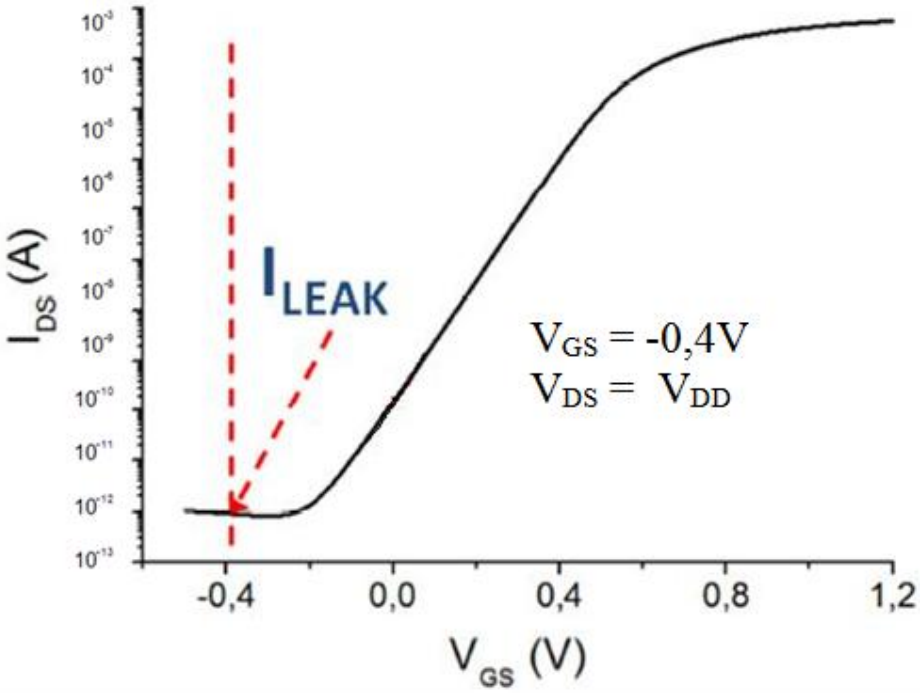
Quando os MOSFETs estão em estado desligado, não deveria haver corrente elétrica entre os terminais de fonte e dreno, no entanto, mesmo que não haja um canal formado, há uma pequena corrente de dreno indesejável atravessando o canal do transistor. Esta corrente é considerada como uma corrente de dreno de fuga ($I_{leak}$) [41].

A $I_{leak}$ pode ser afetada pelo ambiente externo, principalmente pelo aumento da temperatura, onde há o aumento da corrente do transistor [41].

Uma das formas de se extrair a $I_{leak}$ é a partir da curva do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, para um determinado valor de $V_{DS}$, considerando-se um valor negativo de $V_{GS}$ [41].

Define-se $I_{leak}$ como sendo a corrente de dreno de fuga para tensões negativas de porta (importante parâmetro para aplicações analógicas quando o circuito é polarizado com fonte simétrica) [41], como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Exemplo de uma curva experimental do logaritmo da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$ de um nMOSFET utilizada para extrair $I_{leak}$




Fonte: Autor

Neste trabalho $I_{OFF}$ e $I_{leak}$ são similares, pois as curvas apresentadas apresentam valores simulares tanto para $V_{GS}$= 0V, quanto para $V_{GS}$ mais negativo, por exemplo igual a -0,4V.

### 2.1.9 Razão $I_{ON}/I_{OFF}$

A razão $I_{ON}/I_{OFF}$ está diretamente relacionada com o desempenho elétrico do MOSFET operando em altas frequências e com o alto consumo de potência [58]. Quanto maior é a razão $I_{ON}/I_{OFF}$, melhor é o desempenho elétrico dos MOSFETs quando ele opera em altas frequências e com reduzidos valores de consumo de energia elétrica [58].

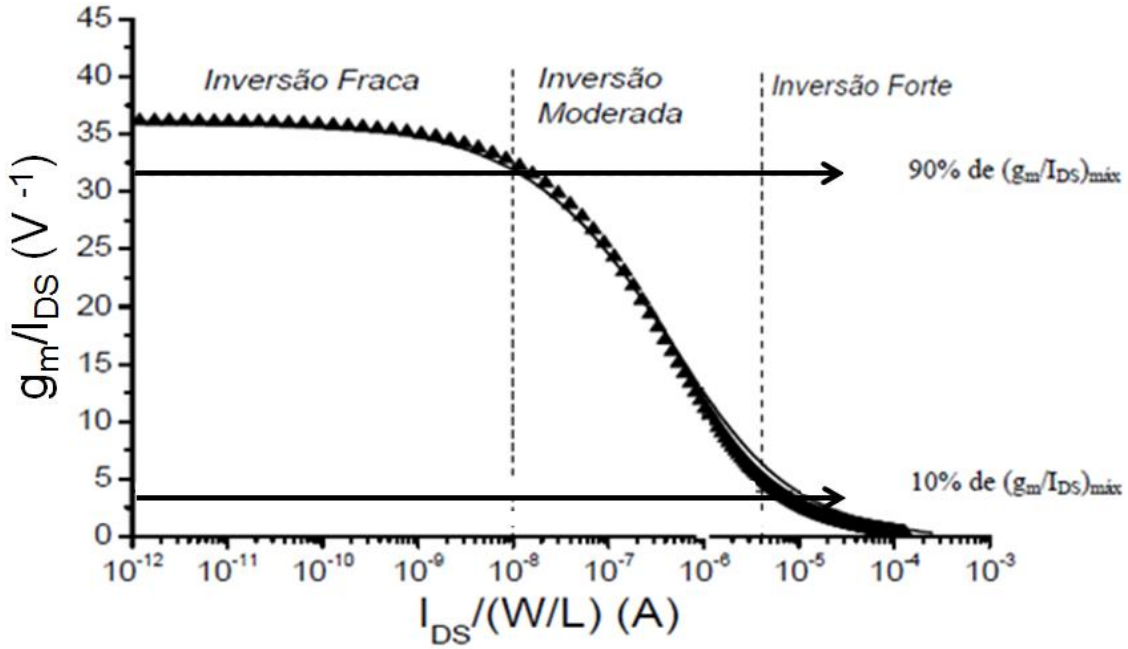
$I_{ON}/I_{OFF}$ também mede o quanto o transistor pode fornecer de corrente elétrica para uma determinada carga em relação ao que ele consome de corrente de dreno quando ele está operando como chave aberta (estado desligado), ou seja, quando ele não alimenta essa mesma carga [58].

### 2.1.10 Razão da transcondutância pela corrente de dreno em função da corrente de dreno normalizada em relação ao fator geométrico

A curva $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ geralmente é usada para determinar qual é a região do regime de inversão em que os transistores operam, principalmente nas aplicações de CIs CMOS analógicos [45]. Além disso, ela é usada nos projetos de CIs CMOS analógicos de baixa potência e baixa tensão (*low power- low voltage*) [55]. Essa curva está diretamente relacionada com as características elétricas da resposta em frequência dos CIs CMOS analógicos, tais como o ganho de tensão de malha aberta ($A_{V0}$), a frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$), a margem de fase (PM) e taxa máxima de variação da tensão de saída em função do tempo (*slew rate*, SR) [59].

A Figura 12 traz um exemplo da curva de $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$, onde estão indicadas as regiões dos regimes de inversão fraca, moderada e forte. O critério para definir as regiões dos regimes de inversão fraca, moderada e forte é aquele que acima de 90% do valor máximo de $g_m/I_{DS}$, encontra-se a região do regime de inversão fraca, e abaixo de 10% do valor máximo de $g_m/I_{DS}$, encontra-se a região de inversão forte. Entre essas duas regiões do regime inversão, encontra-se a região de inversão moderada [3,47].

Figura 12 – Exemplo de uma curva $g_m/I_{DS}$ em função de $[I_{DS}/(W/L)]$ (representada em escala logarítmica), com a identificação das regiões dos regimes de inversão fraca, moderada e forte




Fonte: Autor

Quando o MOSFET é polarizado na região de saturação e no regime de inversão fraca, ele é capaz de alcançar altos valores de ganho de tensão ($A_{V0}$) e baixos valores de frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$) [60]. Quando o transistor é polarizado na região de saturação e no regime de inversão moderada, tem-se um bom compromisso entre os valores de $A_{V0}$ e $f_T$. Quando polarizado na região de regime de inversão forte, o MOSFET é apto a conseguir altos valores de $f_T$ e baixos valores de $A_{V0}$ [3, 47,59].

### 2.1.11 Ganho de tensão de um único transistor

O valor de $A_{V0}$ de um único MOSFET pode ser determinado através da equação (8) [60].

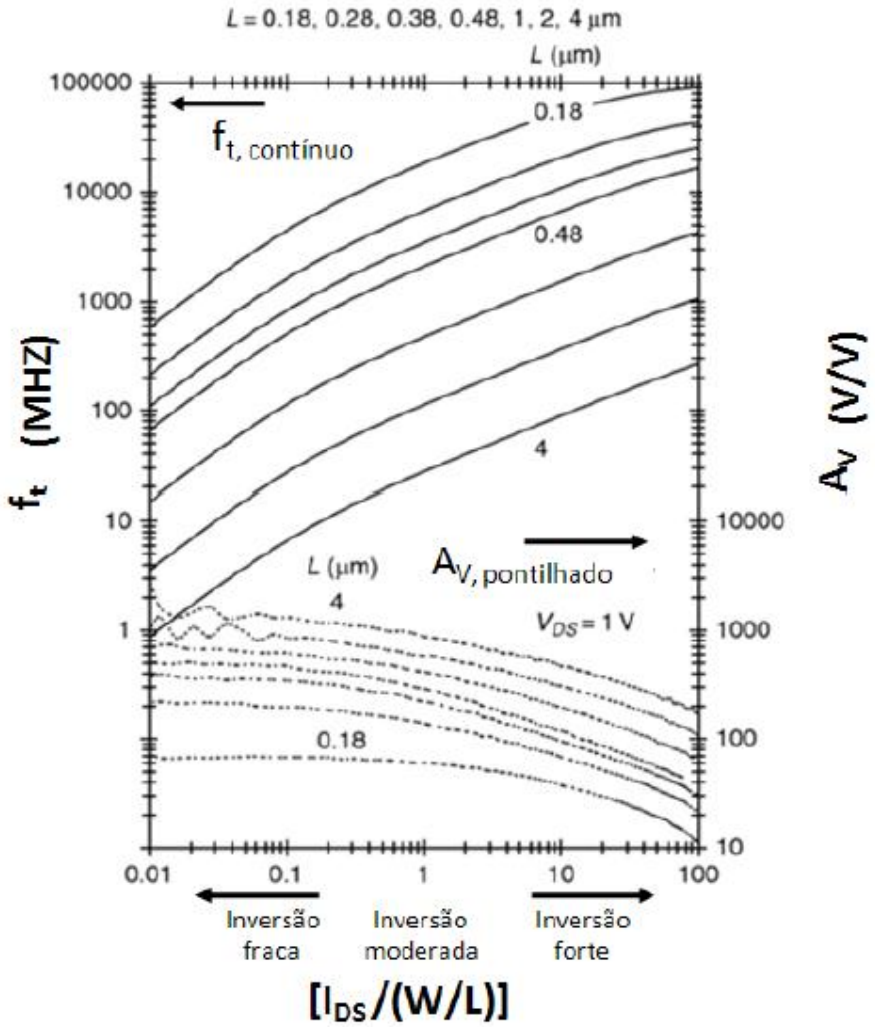
$$A_{V0} = \frac{g_m}{I_{DS}} V_{EA} \tag{8}$$

Quanto maior for a razão $g_m/I_{DS}$ e quanto maior for o módulo de $V_{EA}$, maior é o ganho de tensão do dispositivo.

Observa-se que o comportamento de $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ de um MOSFET é similar ao da curva de $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$, em que o valor do ganho de tensão aumenta proporcionalmente com o incremento do comprimento do canal, devido ao aumento do módulo da tensão *Early* [60].

A Figura 13 ilustra o comportamento entre $A_{V0}$ e $f_T$, que ao aumentar o valor da $I_{DS}/(W/L)$, $A_{V0}$ reduz, enquanto que a $f_T$ aumenta [61].

Figura 13 - Curvas de $A_{V0}$ e $f_T$ em função de $[I_{DS}/(W/L)]$




Fonte: BINKLEY, D. M. Tradeoffs and optimization in analog CMOS design. England: John Wiley & Sons, 2008.

### 2.1.12 Frequência de ganho de tensão unitário

A frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$) pode ser determinada pela equação (9) [60].

$$f_T = \frac{1}{2\pi}\frac{g_m}{C_L} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{g_m}{I_{DS}}\right)\frac{I_{Ds}}{C_L} \tag{9}$$

A $f_T$ do MOSFET é diretamente proporcional a sua transcondutância e inversamente proporcional a capacitância de carga ($C_L$) que o transistor tem que alimentar [60].

## 2.2 AS RADIAÇÕES IONIZANTES E SEUS EFEITOS NOS MOSFETs

O primeiro caso que evidenciou a influência das radiações ionizantes no comportamento elétrico de um CI CMOS foi em 1962. Isso ocorreu no satélite de telecomunicações Telstar, depois de um teste nuclear realizado em alta altitude pelos Estados Unidos [62]. Isso motivou a pesquisa nessa área pela comunidade científica no âmbito de obter CIs CMOS tolerantes às radiações ionizantes.

Algumas grandezas relacionadas às radiações ionizantes são a atividade, a energia, a dose, o fluxo, a fluência e a transferência linear de energia (*Linear Energy Transfer*, LET). A unidade de atividade no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o becquerel (Bq), que equivale a uma desintegração por segundo (Bq = $s^{-1}$) [63]. A unidade de energia no SI é o joule (J) [64] e em processos atômicos, a unidade mais utilizada é o elétron-volt (1 eV = 1,6 $x10^{-19}$ J) [64]. A dose absorvida de radiação é definida como sendo a energia fornecida, para determinada matéria, por unidade de massa [63]. O Gray (Gy ou J/kg) é a unidade de dose no SI, porém a unidade rad é mais utilizada para dispositivos eletrônicos sujeitos às radiações ionizantes, e equivale a 0,01 Gy [63]. O fluxo é definido como sendo o número de partículas (ou fótons) que passa por uma dada área de material num intervalo de tempo e sua unidade é $cm^{-2}s^{-1}$ [64].

A atmosfera terrestre atua como um filtro (meio absorvedor), reduzindo a intensidade da radiação direcionada à superfície da Terra [65]. Quanto maior for a altitude de um objeto/material em relação ao nível do mar, maior é a dose de radiação recebida por ele [65]. Além disso, quanto mais próximo das regiões polares, maior é a exposição às radiações ionizantes devido às influências dos cinturões de radiação gerados pelo sol [65].

Devido à miniaturização dos dispositivos, a exposição dos mesmos às radiações ionizantes que não são filtradas pela atmosfera do planeta Terra pode acarretar em alteração das suas características elétricas, mesmo ao nível do mar [66].

Os tipos das radiações ionizantes que podem afetar o funcionamento dos circuitos integrados e consequentemente dos equipamentos eletrônicos são:

a) <u>irradiação por prótons:</u> um próton, que corresponde ao núcleo de hidrogênio [64], é a radiação ionizante mais abundante nos raios cósmicos [64]. O próton possui uma energia na faixa de MeV, e é capaz de penetrar dezenas de micrometros num material composto por alumínio [64];

b) <u>irradiação por nêutrons:</u> o nêutron possui aproximadamente a mesma massa que a do próton, porém com carga nula [64]. A ausência de carga elétrica do nêutron

dificulta o seu freamento durante a penetração no material [64], podendo, portanto, ocasionar danos ainda maiores nos dispositivos semicondutores [67];

c) irradiação por partículas Alfa (α): a partícula α corresponde a um 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 [64]. No silício, a partícula α pode penetrar 23 μm para uma faixa de energia em torno de MeV [64];

d) irradiação por partículas Beta (β): a partícula β possui a mesma massa do elétron, porém pode possuir carga positiva (pósitron) ou negativa (elétron). Comparada com a partícula α, a partícula β pode penetrar facilmente nos materiais e ser facilmente defletida por um campo elétrico [64];

e) irradiação por raios gama (γ) e raios X: são ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda [64]. Os raios X são originados por meio do choque de partículas carregadas com uma superfície [64], enquanto que os raios γ são originados durante as reações nucleares [64]. Os raios γ e X interagem de forma similar com a matéria e possuem alto poder de interação com a mesma [64].

Partículas com energias cinéticas consideravelmente superiores, geralmente possuem maiores chances de danos nos dispositivos semicondutores e consequentemente nos CIs CMOS [64]. A colisão de uma partícula com alto nível de energia com um determinado material pode gerar outras partículas subatômicas, tais como o b-méson, o pósitron, o píon, o múon, o neutrino e o quark [64].

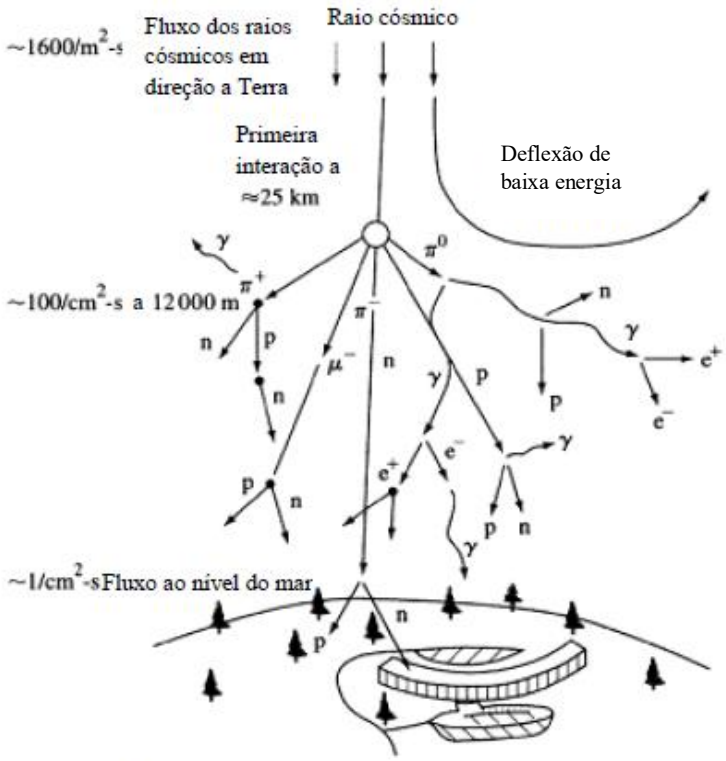
As principais fontes de radiações ionizantes encontradas no espaço são:

a) cinturões de *Van Allen*: são regiões do espaço ao redor da Terra, que estão repletas de prótons e elétrons. Essas partículas são oriundas da interação do campo magnético terrestre com o vento solar [64];

b) Raios Cósmicos, que são classificados como:

- Galácticos: originados fora do sistema solar [68], esse tipo de radiação ionizante é constituída por 85% de prótons, 14% de partículas α e 1% de núcleos pesados;
- Solares: constituído por partículas, raios ultravioletas (UV) e raios X [64];
- Terrestres: são formados por partículas secundárias, produzidas pelo choque das partículas espaciais com a atmosfera terrestre [64], que reagem com o oxigênio e o nitrogênio, formando complexas cascatas de partículas secundárias e terciárias, também conhecidas como “chuveiros de partículas" [66], conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Raios cósmicos terrestres




Fonte: Autor "adaptado"de DODD, P. E. Basic Mechanisms for Single Event Effects. IEEE NSREC Short Course. [S.l.]: [s.n.]. 1999

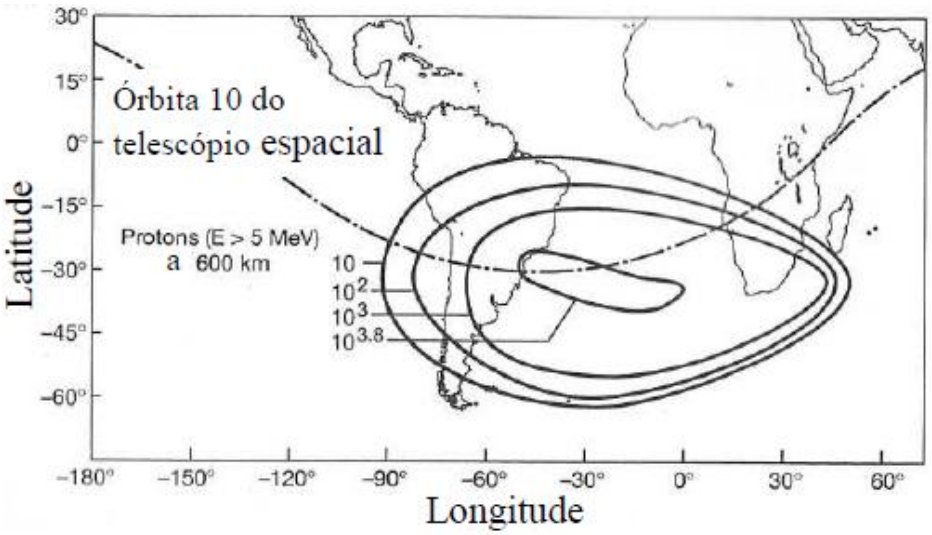
Na Figura 14, p significa próton, n significa nêutron, γ está relacionada aos Raios γ, $e_+$ se refere ao pósitron, $e_-$ se refere ao elétron, $\pi_-$, $\pi_0$ e $\pi_+$ são partículas fundamentais píons de carga negativa, neutra e positiva, respectivamente, $\mu_-$ é a partícula fundamental múon de carga negativa [69].

No campo magnético terrestre existem prótons, elétrons e íons de oxigênio armadilhados. Estas partículas, aprisionadas no campo magnético da Terra, podem afetar a durabilidade dos satélites, dependendo da altitude, inclinação e blindagem utilizada [68].

O campo magnético terrestre não é geograficamente simétrico. Influências geológicas podem causar inclinação e deslocamento das linhas magnéticas [64, 68]. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic Anomaly,* SAA) é considerada a distorção magnética que mais influência a Terra.

A Figura 15 mostra a posição da SAA, incluindo a órbita do telescópio espacial Hubble [70].

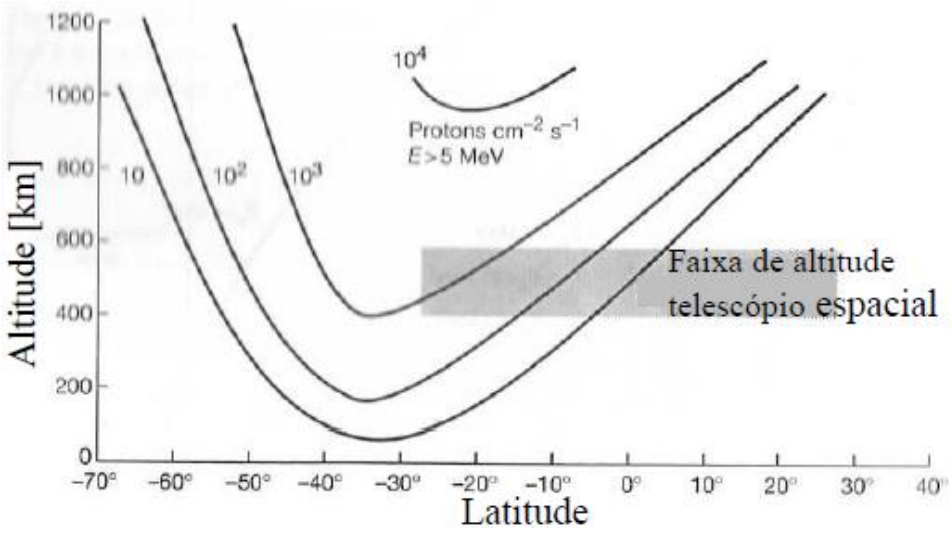
Figura 15 - SAA e trajetória do telescópio espacial Hubble




Fonte: Autor "adaptado" de CRABB, R. L. Solar Cell Radiation Damage. Radiation Physics and Chemistry, 1994

A Figura 16 apresenta a incidência de prótons por $cm^{-2}s^{-1}$ considerando a altitude e a latitude, assim como a faixa de altitude do telescópio espacial que passa por regiões com alto fluxo de prótons [70].

Figura 16 - Curva da incidência de prótons por $cm^{-2}$ $s^{-1}$ considerando a altitude e a latitude, assim como a faixa de altitude do telescópio espacial




Fonte: Autor "adaptado" de CRABB, R. L. Solar Cell Radiation Damage. Radiation Physics and Chemistry, 1994.

O campo magnético terrestre também pode criar uma blindagem natural aos raios cósmicos [64]. Isto acontece devido à resultante da superposição do campo elétrico com o campo magnético que atua sobre uma partícula carregada que se move no espaço, definida como força de Lorentz [64,71]. Portanto, uma partícula pode ser desviada da Terra dependendo de sua energia [64].

As radiações ionizantes afetam os componentes eletrônicos de diferentes maneiras [72], e seus efeitos podem ser divididos em três grandes categorias:

a) Dose Ionizante Total (*Total Ioninzing Dose*, TID): trata-se de um efeito acumulativo de longo prazo, onde as características elétricas dos dispositivos são degradadas ao longo do tempo, decorrente das radiações ionizantes [72];

b) Danos de Deslocamento (*Displacement Damage*, DD): é um efeito acumulativo que pode surgir no silício do dispositivo. Os átomos de silício são deslocados e a estrutura cristalina do silício é interrompida criando regiões carregadas. Cerca de 90% destas partículas se recombinam, porém, em outros casos, elas podem formar defeitos na estrutura dos dispositivos[73]. Os defeitos na estrutura cristalina podem aumentar a resistividade em determinadas regiões dos dispositivos, isto afeta o seu desempenho elétrico [74];

c) Eventos de Efeito Único (*Single Event Effects*, SEEs): são eventos de efeito único causados por partículas individuais com elevada energia [75] e são classificados da seguinte maneira:

- Evento Perturbante Único (*Single Event Upset*, SEU): é responsável por modificar o estado lógico de um ou de mais bits de uma memória de dados [76];
- Evento Transiente Único (*Single Event Transient*, SET): trata-se de um evento transiente que pode ou não modificar os estados lógicos de na memória de dados [77, 78];
- Evento Único de Interrupção Funcional (*Single Event Functional Interrupt*, SEFI): ocorre geralmente em dispositivos complexos, tais como FPGAs, microprocessadores ou em memórias de dados dinâmicas. Este fenômeno é comumente derivado de uma corrupção de um caminho de controle, onde o dispositivo deixa de funcionar normalmente. Um exemplo é um CI CMOS que pode entrar no modo de teste ou executar uma instrução não intencional. O dispositivo sujeito a um SEFI pode causar danos parcialmente ou completamente catastróficos para a operação de um determinado sistema [79].

- Eventos singulares catastróficos são eventos destrutivos que danificam permanentemente o dispositivo, tais como: o Evento de Travamento Único *Single Event Latchup*, SEL); o Evento Único de Queima (*Single Event Burnout*, SEB); o Evento de Ruptura de Porta Único (*Single Event Gate Rupture*, SEGR); o Erro Único de Disco (*Single Hard Error*, SHE) [80].

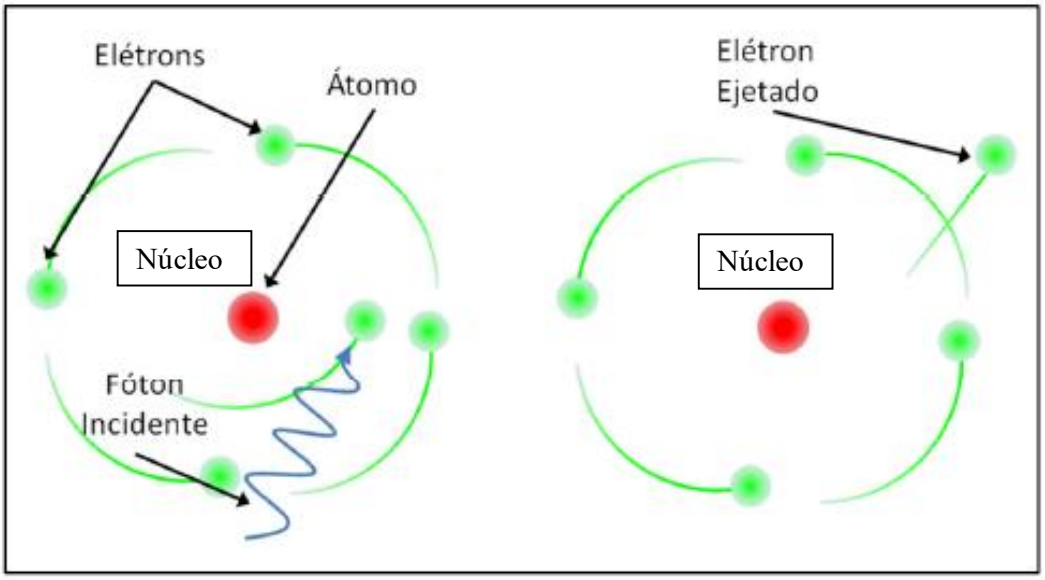
### 2.2.1 Radiação ionizante por raios X e seus efeitos em MOSFETs

A radiação ionizante por raios X foi descoberta pelo físico alemão Wilhelm Röntgen e é constituída por ondas eletromagnéticas com comprimento de 5 pm a 1 nm [64]. Este tipo de radiação ionizante pode interagir com a matéria por meio de efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares elétron-pósitron [64].

Na primeira interação, denominada de efeito fotoelétrico, um fóton é absorvido pelo átomo e um elétron ligado a uma órbita interna é ejetado da sua órbita, o que causa a liberação de energia [64].

A Figura 17 apresenta a interação de um fóton com um átomo.

Figura 17 – Efeito Fotoelétrico



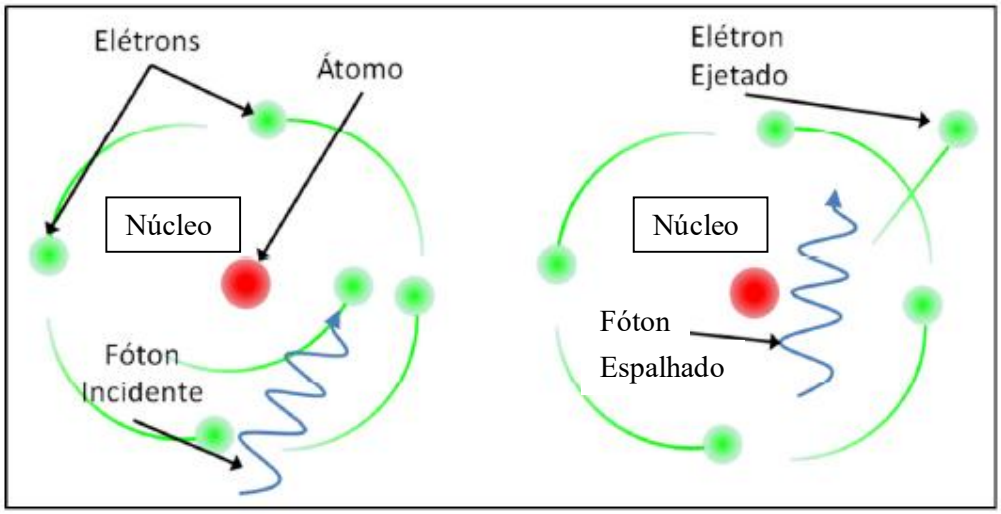

Fonte: Autor

Na segunda interação, denominada de efeito Compton, há o espalhamento inelástico do fóton com um elétron fracamente ligado ao átomo. Isso faz com que o fóton mude de direção com menor energia e o elétron é ejetado da órbita do átomo [64]. Neste efeito, o elétron perde

sua energia por meio de colisões (ionização do meio) e o fóton espalhado interage com o meio novamente [64].

A Figura 18 ilustra o efeito Compton.

Figura 18 - Efeito Compton

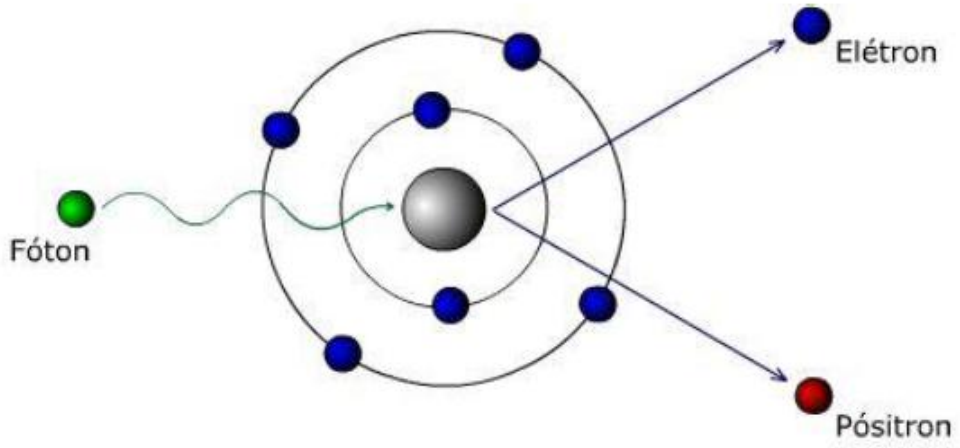



Fonte: Autor

Além dos efeitos citados acima, pode ocorrer também a produção de pares elétron-pósitron (desde que o fóton incidente tenha energia maior que 1,022 MeV), onde a radiação ionizante interage com o núcleo de determinada partícula e dá origem ao par com energia cinética alterada [64]. O pósitron é definido como uma partícula que possui as mesmas características que o elétron, mas com uma carga positiva [64]. No entanto, para que a produção de pares elétron-pósitron ocorra é necessária interação em uma região próxima do núcleo do átomo, pois nesta área há um campo elétrico muito intenso [64].

A Figura 19 apresenta a interação de um fóton e a geração de um par elétron-pósitron.

Figura 19 - Produção de pares elétron-pósitron




Fonte: Autor

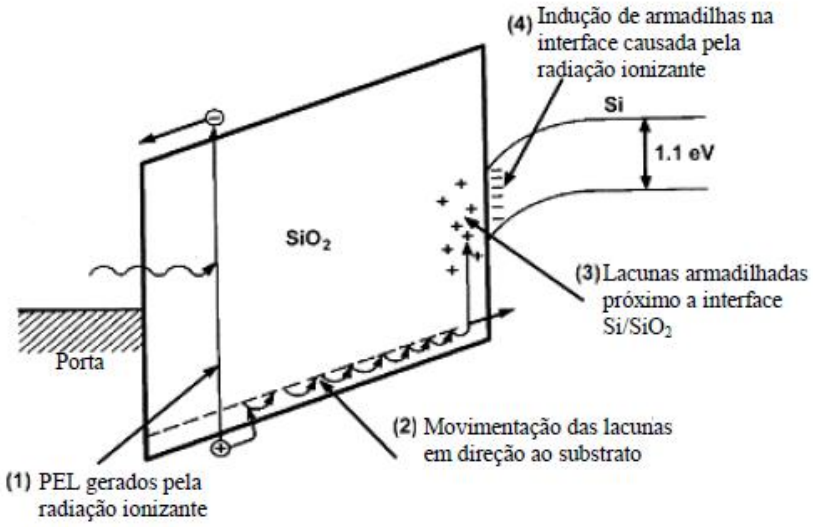
### 2.2.2 *Total Ionizing Dose* (TID) e seus efeitos nos MOSFETs

A Dose Ionizante Total (*Total Ionizing Dose,* TID) está relacionada com a dose total acumulada por um determinado material ou um dispositivo eletrônico devido à exposição às radiações ionizantes ao longo do tempo [81]. A ionização nada mais é do que um processo de adição ou remoção de elétrons (ou outras partículas carregadas) dos átomos. Estes efeitos estão atrelados à intensidade e ao tempo de exposição às radiações ionizantes. Através da interação da radiação com o meio, os elétrons da banda de valência dos materiais podem ganhar energia suficiente para passar para a banda de condução. A geração de corrente elétrica pode ocorrer (inclusive em isolantes) caso seja aplicado um campo elétrico no material irradiado. Pelo fato da mobilidade da lacuna ser menor que a do elétron, cargas positivas podem ficar armadilhadas dentro dos materiais isolantes. O armadilhamento de lacunas dentro do $S_iO_2$ causa degradação das características elétricas dos dispositivos MOSFETs e dos Transistores Bipolares de Junção (TBJs) [64].

A interação de fótons de alta energia ou partículas carregadas com o material culmina com a ionização do mesmo [82], e os seus danos se iniciam quando pares elétron-lacuna (PEL) são gerados no material [10].

A Figura 20 apresenta como a radiação ionizante atua no óxido de porta dos MOSFETs.

Figura 20 - Atuação da radiação ionizante no óxido de porta




Fonte: 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

Os efeitos das radiações ionizantes ilustrados na Figura 20 podem ser sumarizados em quatro etapas:

a) Os pares elétron-lacuna são gerados no óxido de porta durante o processo de radiação ionizante e os elétrons são atraídos para a porta do transistor devido à aplicação de tensão positiva, enquanto que as lacunas se movem na direção do substrato. Neste intervalo de tempo alguns elétrons se recombinam com as lacunas, a fração de portadores que se recombinam depende da energia e do tipo de material [83];

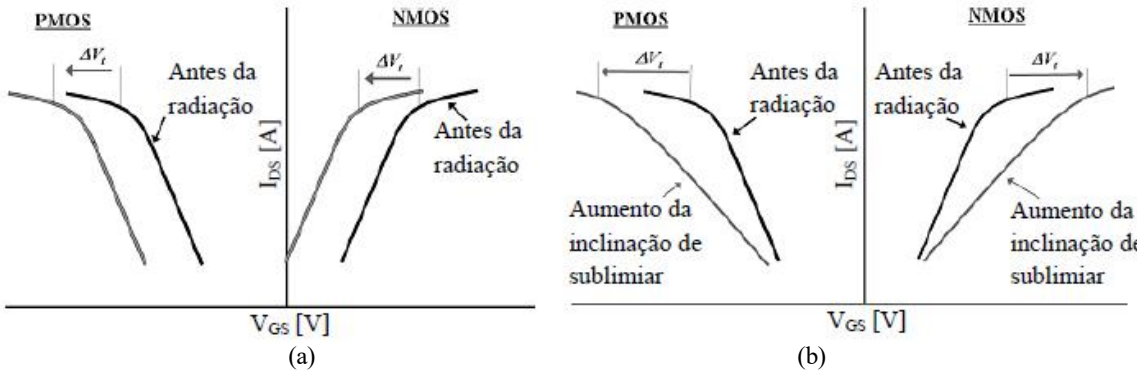
b) As lacunas movimentam-se no interior do óxido de porta em direção ao substrato [83];

c) As lacunas localizadas dentro do $SiO_2$ acumulam-se na proximidade da interface $S_i/SiO_2$, alterando a tensão de limiar do dispositivo [83];

d) Ocorre também o armadilhamento de cargas na interface $Si/SiO_2$.

A Figura 21 apresenta as possíveis alterações que podem ocorrer tanto da tensão de limiar como na inclinação de sublimiar do dispositivo, que são ocasionadas pelo armadilhamento de cargas no $SiO_2$ e na interface Si/ $SiO_2$.

Figura 21 - Influência da radiação ionizante nas características elétricas do MOSFET, (a) cargas armadilhadas no óxido de porta, (b) na interface Si/ $SiO_2$




Fonte: Autor "adaptado" de BARNABY, H. J. Total-Ionizing-Dose effects in modern CMOS technologies. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 6, p. 3103- 3120, 2006

As cargas armadilhadas no óxido de porta causam um decréscimo das $V_{THs}$ dos MOSFETs, sejam eles de canal n ou p. As cargas armadilhadas na interface $Si/SiO_2$ causam aumento nas $V_{THs}$ dos nMOSFETs e uma diminuição nas $V_{THs}$ dos pMOSFETs [10, 83, 84]. Além disso, ocorre também o aumento na inclinação de sublimiar desses MOSFETs [10, 83, 84].

Os estudos referentes ao acúmulo de cargas nos óxidos de isolação dos MOSFETs que são induzidos pelas radiações ionizantes iniciaram em 1967 [85]. Os óxidos de isolação ou de campo e das camadas de isolação são menos imunes aos efeitos da TID, quando comparados com as regiões ativas dos MOSFETs atuais [86]. As tecnologias de fabricação de CIs CMOS atuais apresentam óxidos de porta mais finos, quando comparados com aqueles de tecnologia menos sofisticadas e, portanto, observa-se uma menor geração de cargas quando submetidos às radiações ionizantes. Geralmente essas cargas são conduzidas por fora do óxido, ou seja, por tunelamento, ocasionando um menor aprisionamento de cargas nessas regiões. Em contrapartida, esses óxidos mais finos são mais vulneráveis aos efeitos relacionados a corrente de fuga [81].

Os elétrons podem ocasionar a ionização dos átomos nas camadas de óxido dos MOSFETs, gerando os pares elétron-lacuna. Caso a energia dos portadores gerados for maior do que a mínima energia necessária para gerar um par elétron-lacuna, poderá ocorrer a geração de mais de um par de portadores. Desta maneira, um único fóton de alta energia pode criar de forma indireta um número muito grande de pares elétron-lacuna [72].

Posteriormente à geração dos portadores no óxido (consequência do efeito de ionização), ocorre a chamada recombinação inicial, em que parte dos pares eletrón-lacuna gerados sofrem recombinação mútua antes mesmo de deixarem a camada de óxido e são guiados pelo campo elétrico vertical que atravessa esta camada. A taxa de recombinação inicial é dependente do campo elétrico vertical que atravessa o óxido. Os elétrons possuem uma alta mobilidade no óxido e são rapidamente (em tempo de pico segundo) "empurrados" para fora da camada de óxido sob ação do campo elétrico vertical [72]. Em dispositivos sem polarização ou polarização fraca, a recombinação inicial ocorre em maior intensidade [72].

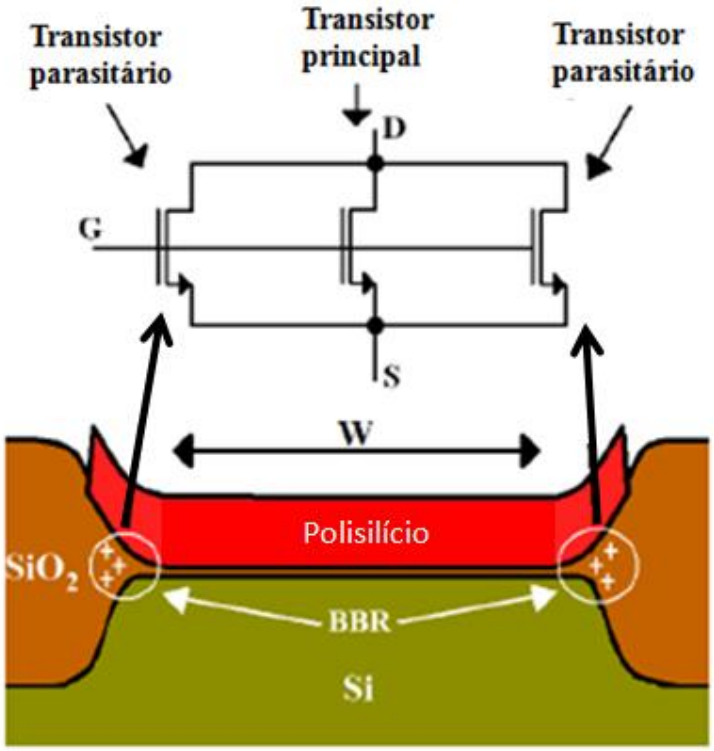
Parte das lacunas que se move na direção da interface $S_i/S_iO_2$ (admitindo-se uma tensão positiva na porta) pode ser aprisionada ou armadilhada no óxido. À medida que as cargas positivas se dirigem na direção da interface $Si/S_iO_2$, ocorre a liberação de íons de hidrogênio que são, por sua vez, transportados até a interface onde podem interagir e formar regiões de aprisionamento [72]. O aprisionamento de cargas na interface $S_i/S_iO_2$ é mais lento do que no óxido e depende do campo elétrico vertical e longitudinal aplicado (similarmente ao processo do aprisionamento no óxido) [72].

Desta forma, caso um nMOSFET esteja sendo polarizado para ter uma determinada $I_{DS}$, os elétrons da camada de inversão podem interagir com essas regiões de aprisionamento localizadas na interface $Si/S_iO_2$, consequentemente o ruído intrínseco do dispositivo aumenta. Quando o transistor estiver operando como chave aberta (alta impedância) pode ocorrer à inversão da polarização na interface $Si/S_iO_2$ e, consequentemente, gera-se um caminho para o fluxo de corrente para a $I_{DS}$ (dando origem a corrente de fuga), aumentando o consumo de corrente do dispositivo a ponto inclusive de danificá-lo. Além desses efeitos, as cargas aprisionadas, sejam no óxido ou na interface, são responsáveis por alterar a tensão de limiar dos MOSFETs [81].

Na técnica de isolação *Local Oxidation of Silicon* (LOCOS) existe uma propensão à elevação da corrente de fuga nos MOSFETs que sofreram o efeito da TID, isto acontece devido às cargas armadilhadas nas regiões de bico de pássaro (BBRs) [84].

A Figura 22 ilustra as regiões de bico de pássaro e o circuito elétrico equivalente do MOSFET levando-se em conta os transistores parasitários existentes nessas regiões.

Figura 22 – Ilustração das regiões de bico de pássaro da estrutura do MOSFET e o seu circuito elétrico equivalente, levando-se em conta os transistores parasitários associados às regiões de bico de pássaro




Fonte: Autor

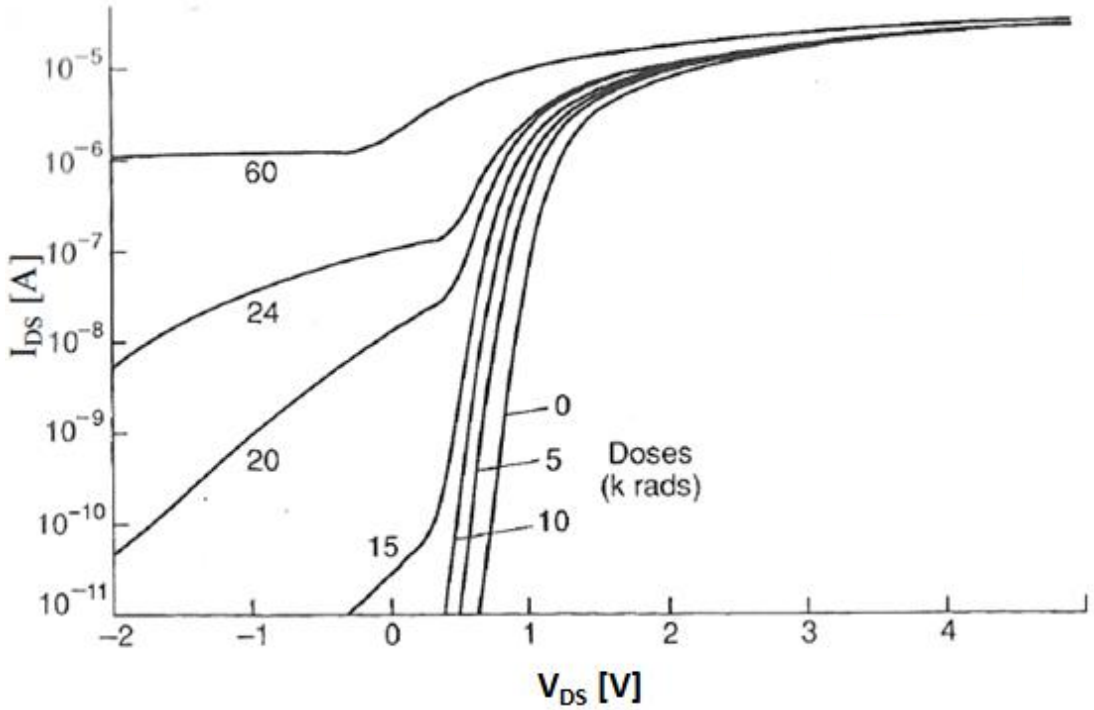
Devido às radiações ionizantes, ocorre a geração de cargas positivas (remoção dos elétrons) nas regiões de bico de pássaro (BBRs). Consequentemente, a tensão de limiar dos transistores parasitários associados a essas regiões é reduzida, que resulta na condução antecipada desses transistores em relação ao transistor principal. Como consequência desse efeito, a corrente de fuga da estrutura MOSFET apresentada na Figura 22 aumenta [84].

No caso do *Wave* MOSFET, quando submetido às radiações ionizantes, o MOSFET parasitário associado a sua região de bico de pássaro (BBR), considerando que o transistor principal associado a essa região está polarizado na configuração de dreno externo (EDBC), tende a influenciar menos o seu desempenho elétrico no que diz respeito à corrente de fuga, pois o campo elétrico longitudinal é radial e menor que o do MOSFET equivalente de porta retangular. Além disso, a região de dreno do *Wave* MOSFET apresenta uma maior área que a do MOSFET de porta retangular equivalente. Quando se considera a outra parte do *Wave* MOSFET, ou seja, o semicírculo superior que está polarizado na configuração de dreno interno (IDBC), sabendo-se que o campo elétrico potencializa os efeitos das radiações ionizantes quanto à criação de cargas positivas nas regiões isolantes do MOSFET, o campo

elétrico longitudinal próximo à região de dreno do *Wave* MOSFET é maior que aquele observado no MOSFET de porta retangular equivalente. Isto ocorre em virtude de a área de dreno do WM ser menor do que a do MOSFET com formato de porta retangular equivalente. No entanto, o campo elétrico longitudinal próximo à área de dreno na região de bico de pássaro também é radial, o que reduz os efeitos dos MOSFETs parasitários associados a essa região na corrente de fuga do *Wave* MOSFET.

A Figura 23 ilustra os efeitos das diferentes doses de radiações ionizantes de raios X na corrente de fuga entre dreno e fonte e na inclinação de sublimiar num nMOSFET.

Figura 23 – Curvas dos logaritmos das $I_{DS}$ em função de $V_{DS}$ de um nMOSFET irradiado várias vezes




Fonte: Autor "adaptado" de BARNABY, H. J. Total-Ionizing-Dose effects in modern CMOS technologies. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 6, p. 3103- 3120, 2006

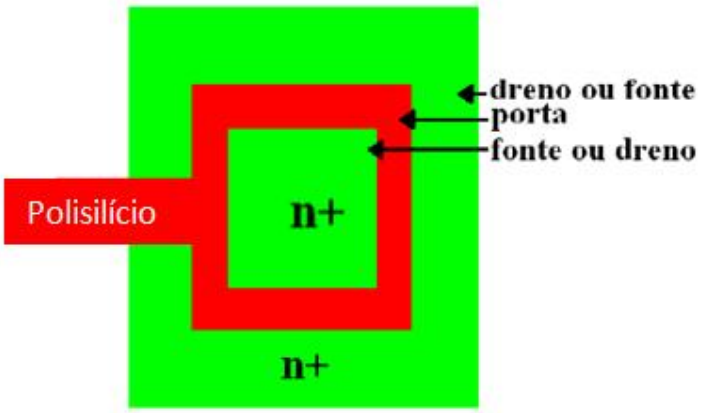
A utilização da técnica de isolação *Shallow-Trench Isolation* (STI) pode reduzir significativamente a corrente de fuga nas BBRs [9]. Mesmo assim, a técnica STI por si só não é suficiente para prover maior tolerância à exposição de radiações ionizantes nos MOSFETs no que diz respeito aos efeitos da TID [9].

### 2.2.3 Técnicas de leiaute para reduzir os efeitos das radiações ionizantes em MOSFETs

Uma das alternativas para atenuar os efeitos das radiações ionizantes em MOSFETs é através de novos estilos de leiaute para MOSFETs, também chamada de *Hardening-By-Design* (HBD). Essa técnica é viável por aumentar a tolerância aos efeitos de TID [18], como por exemplo, ser capaz de reduzir a corrente de fuga dos MOSFETs. O Transistor de Leiaute Fechado ou o *Enclosed Layout Transistors* (ELT) é um exemplo desse tipo de dispositivo, conforme ilustrado na Figura 24 [23]. Nesta topologia, o terminal de fonte é totalmente envolto pela região de porta, ou seja, não há um óxido de campo em contato com a fonte e dreno ao mesmo tempo, região na qual poderia surgir um canal parasitário induzido pelo acúmulo de cargas positivas [86]. Portanto, as regiões de bico de pássaro da estrutura convencional dos MOSFETs (geometria de porta retangular) são eliminadas, o que promove uma significante redução na corrente de fuga dos nMOSFETs [87]. Como nos dispositivos pMOSFETs não ocorre à inversão nas BBRs, não há necessidade do emprego da técnica ELT [87,88].

A Figura 24 representa um MOSFET implementado com um leiaute do tipo ELT anelar quadrado [88].

Figura 24 – Exemplo de um ELT com formato de porta anelar quadrado




Fonte: 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.

Além do leiaute ELT, pode-se utilizar anéis de guarda em torno dos MOSFETs de tal forma a contribuir para uma maior robustez dos efeitos das radiações ionizantes. Esta proteção extra tem a função de impedir a fuga de corrente elétrica entre dispositivos vizinhos, dado que

os surgimentos de canais parasitários induzidos pelo acúmulo de carga nos óxidos de campo são prontamente absorvidos pelos anéis de guarda. No entanto, o dispositivo ELT apresenta algumas restrições, como por exemplo, a não simetria entre dreno e fonte, o aumento de sua largura mínima (W) e a área do canal que não é completamente aproveitada, resultando no aumento de sua área total ocupada e reduzindo a capacidade integração nas aplicações de CIs CMOS [29, 30].

Um outro conceito empregado é o da Porta Postiça Assistida ou *Dummy Gate-Assisted* (DGA), onde o dispositivo possui portas fictícias isolando a fonte e dreno dos óxidos da parede lateral com o intuito de suprimir as cargas criadas naquela região que ocasiona a corrente de fuga induzida pelas radiações ionizantes [27]. No entanto, a adição de portas fictícias torna o processo mais complexo em relação ao dispositivo nMOSFET convencional [27] e degrada a velocidade de operação em CIs digitais.

# 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os estudos comparativos experimentais dos efeitos das radiações ionizantes de raios X, levando-se em conta os efeitos da TID entre os MOSFETs do tipo *Wave* e dos seus equivalentes convencionais (com formato de porta retangular).

## 3.1 PROJETO, LEIAUTE E FABRICAÇÃO DOS MOSFETS

Diferentes MOSFETs do tipo *Wave* e do tipo convencional (geometria de porta retangular) equivalentes (mesma área de porta), com diferentes comprimentos de canal (2,3 μm, 6,0 μm e 12 μm), foram projetados no Centro Universitário da FEI, com o processo de fabricação de CIs CMOS convencional (*Bulk*) da *ON Semiconductor* de 0,35μm, por meio do Programa Educacional MOSIS (*MOSIS Educational Program*, MEP) [38]. Este CI CMOS opera em 5 V [89, 90, 91].

### 3.1.1 Descrição dos MOSFETs utilizados nesse trabalho e seus leiautes

A Tabela 1 apresenta as dimensões dos MOSFETs do tipo *Wave* e seus equivalentes convencionais (geometria de porta retangular) que foram utilizados neste trabalho. As diferenças entre as dimensões geométricas dos dispositivos estudados ocorreram por conta do valor do lambda (λ) do processo de fabricação de CIs CMOS da *ON Semicondutor* e considerando que o MOSFET do tipo *Wave* é uma geometria não convencional. Para eliminar as pequenas diferenças das dimensões das geometrias, os parâmetros elétricos e figuras de méritos estudados estão normalizados em relação ao seu fator geométrico (W/L).

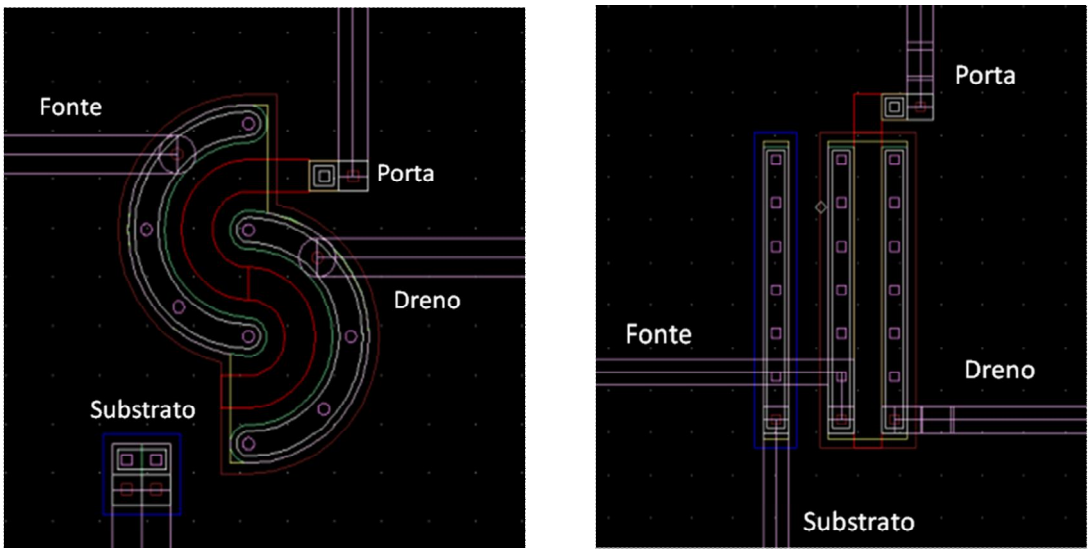
Tabela 1 – Dimensões dos MOSFETs do tipo *Wave* e do tipo retangular utilizados neste trabalho

| | Convencional | | *Wave* | |
|---|---|---|---|---|
| L (µm) | W (µm) | W/L | W (µm) | W/L |
| 2,3 | 24,50 | 10,65 | 23,45 | 10,19 |
| 6 | 30,87 | 5,14 | 32,22 | 5,37 |
| 12 | 44,59 | 3,71 | 44,49 | 3,70 |

Fonte: Autor

A Figura 25 apresenta os leiautes dos MOSFETs do tipo *Wave* (Fig. 25 a) e do tipo retangular equivalente (Fig. 25 b), onde os comprimentos de canal são iguais a 2,3 µm.

Figura 25 – Leiaute dos MOSFETs dos tipos *Wave* (a) e do seu equivalente convencional retangular (b) com L=2,3 µm [37]

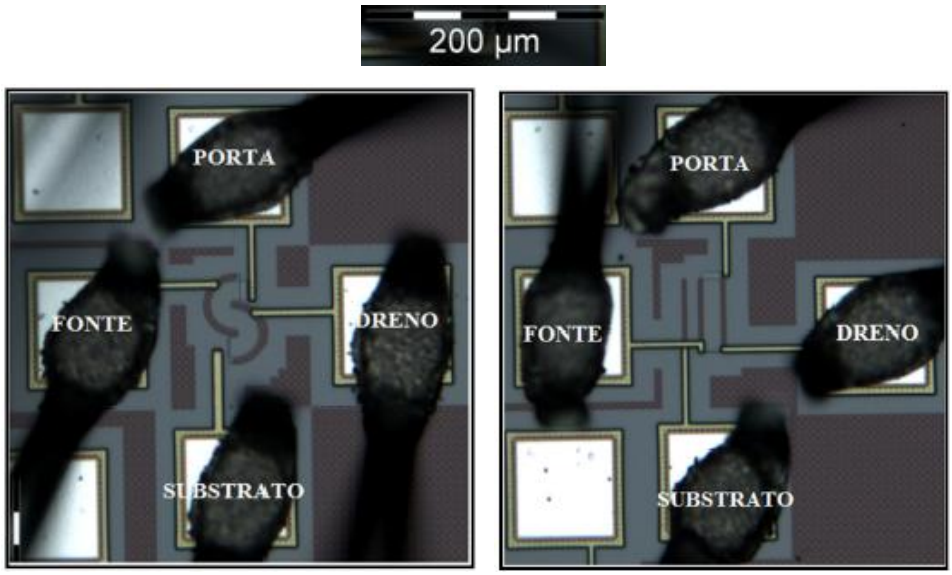



(a) (b)

Fonte: Autor

A Figura 26 apresenta as imagens do MOSFET do tipo *Wave* (Fig. 26 a) e do seu convencional retangular equivalente (Fig. 26 b), ambos com um comprimento de canal de 12µm.

Figura 26 – Imagem do MOSFET do tipo *Wave* (a) e do seu convencional retangular equivalente (b), ambos com um comprimento de canal de 12µm




(a) (b)

Fonte: Autor

## 3.2 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os dispositivos foram expostos às radiações ionizantes de raios X por meio de um Difratômetro de raios X, modelo XRD-7000 da marca Shimadzu, utilizando energia de 10 KeV, que são capazes de gerar elétrons secundários com uma faixa de alcance médio de 500 nm (comparável à espessura do óxido de isolamento de campo) [92].

Os ensaios foram divididos em três etapas.

a) Em um primeiro CI (*chip 1*), os dispositivos foram mantidos na condição *Floating* (sem polarização durante o procedimento de radiações ionizantes), com uma dose total acumulada de 1,5 Mrad (de 500 krad até 1500 krad, com passos de 500 krad) e com uma taxa de dose de 23,5 krad/min ou 392 rad/s.

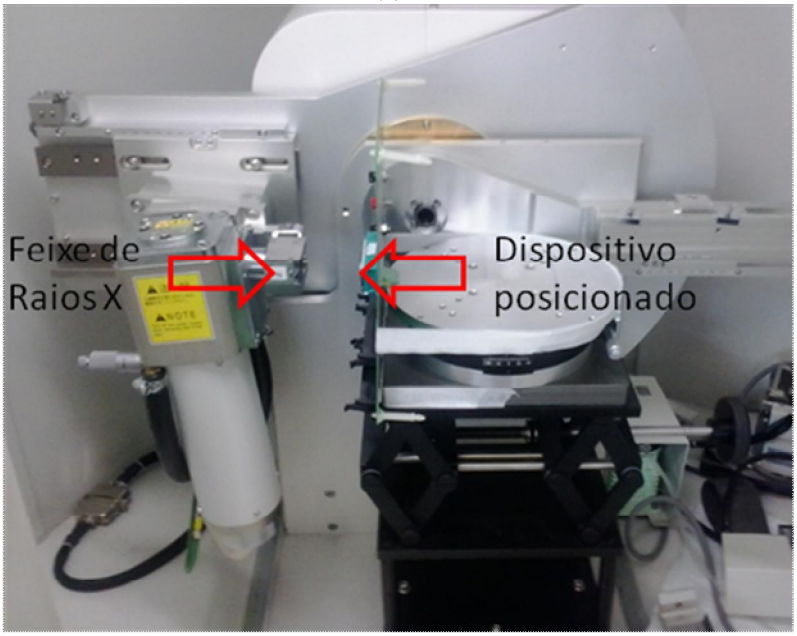
b) Um segundo CI (*chip 2*) foi encapsulado com um encapsulamento de 48 pinos e, através de uma giga de testes, os MOSFETs foram polarizados durante o procedimento das radiações ionizantes de raios X na condição chamada de *ON State*, ou seja, foi aplicado 5 V na porta e 0 V no dreno, na fonte e no substrato. A dose total acumulada pelos MOSFETs foi de 2 Mrad (de 1 Mrad até 2 Mrad, com passos de 500 krad, utilizando uma taxa de dose de 23,5 krad/min ou 392 rad/s);

c) Um terceiro CI foi usado (*chip 3*), onde os MOSFETs também foram acomodados em um encapsulamento de 48 pinos. Os MOSFETs foram polarizados durante a procedimento das radiações ionizantes de raios X na condição intitulada de *OFF State*, isto é, foi aplicado 5 V ao dreno e 0 V na porta, na fonte e no substrato. A dose total acumulada nesses dispositivos foi de 1,5 Mrad (de 0,5 Mrad até 1,5 Mrad, com passos de 500 krad, com uma taxa de dose de 23,5 krad/min ou 392 rad/s).

A Figura 27 ilustra o Difratômetro de raios X (Fig. 27 a), Shimadzu modelo XRD-7000, e o dispositivo posicionado para receber o feixe de raios X (Fig. 27 b).

Figura 27 – Difratômetro de raios X (a) e o dispositivo posicionado em seu interior para receber a irradiação de raios X (b)

(a)

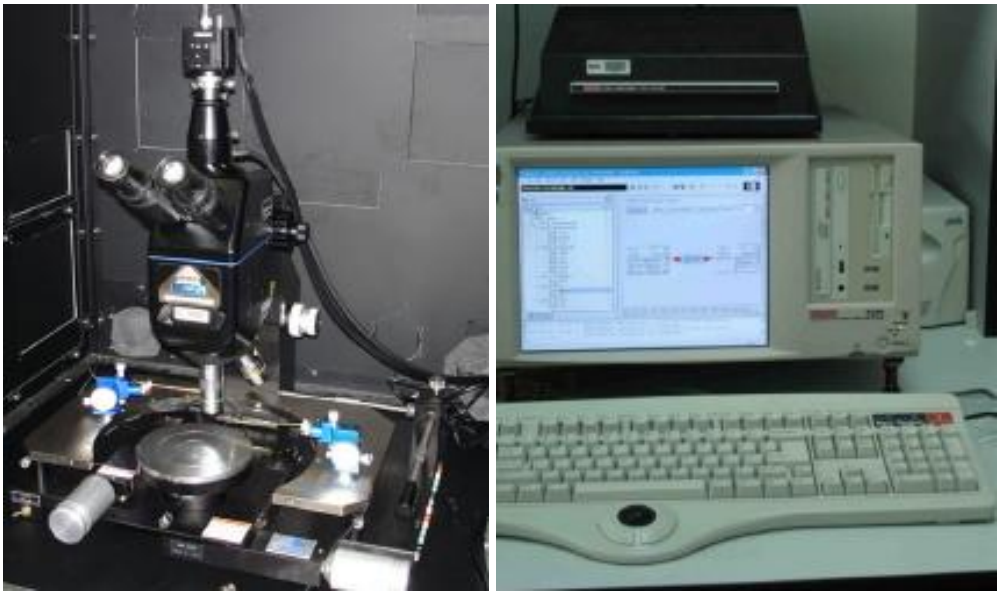



(b)

Fonte: Autor

A Figura 28 apresenta o microprovador da *Cascade da Microtech* (Fig. 28 a) e do analisador de dispositivos semicondutores *Keithley* 4200, da *Keithley Instruments Inc.* (Fig. 28 b), utilizados para realizar as caracterizações elétricas dos transistores.

Figura 28 - Microprovador *Cascade* da *Microtech* (a) e o analisador de dispositivos semicondutores *Keithley* 4200, da *Keithley Instruments Inc.* (b).



(a) (b)

Fonte: Autor

Antes do procedimento de irradiações, todos os transistores foram caracterizados eletricamente utilizando o analisador de dispositivos semicondutores *Keithley* 4200. Logo depois de realizada a primeira irradiação com uma determinada dose de radiação ionizante de raios X, todos os dispositivos foram caracterizados eletricamente e os seus principais parâmetros elétricos e figuras de mérito foram extraídos e comparados com os mesmos parâmetros elétricos e figuras de méritos obtidos desses mesmos dispositivos não irradiados. Caso fosse observado que esses valores eram os mesmos ou muito próximos aos das medidas anteriores, uma nova dose era definida e aplicada nos dispositivos. Este procedimento foi feito até observar algumas mudanças (em torno de 5% a 10%) nesses parâmetros e figuras de mérito.

Além disso, para identificar os danos permanentes nesses dispositivos (após o procedimento de radiações ionizantes de raios X com uma determinada dose), a cada dia eram feitas novas caracterizações desses mesmos parâmetros elétricos e figuras de mérito e comparadas com aquelas obtidas no dia anterior. Quando se observou que os valores desses

parâmetros e figuras de mérito não variavam mais, foi possível identificar o período de tempo que os danos permanentes eram gerados nesses dispositivos. No caso, esse período de tempo foi exatamente o de uma semana (7 dias).

Todas as caracterizações elétricas foram realizadas em temperatura ambiente e durante os intervalos de espera para os novos procedimentos de radiações ionizantes de raios X, os dispositivos permaneceram não polarizados e em condições controladas de temperatura (20 ºC).

### 3.2.1 Procedimento de polarização dos dispositivos

Os procedimentos adotados para polarizar os dispositivos durante as radiações ionizantes de raios X dependeram do tipo de estudo a ser realizado: sem polarização (*Floating*), com polarização em *ON State* (enfatizando a criação de armadilhas através do campo elétrico vertical) e *OFF State* (enfatizando a criação de armadilhas através do campo elétrico longitudinal) [92- 96].

#### *3.2.1.1 Condições de polarização dos dispositivos no estado "Floating"*

As primeiras irradiações ionizantes de raios X foram executadas no CI CMOS desencapsulado e na condição de polarização dos dispositivos em *Floating* [93, 94, 95]. Isso significa que nenhuma polarização foi aplicada nos terminais do transistor durante o procedimento das irradiações ionizantes de raios X, ou seja, os terminais dos dispositivos ficaram todos em aberto.

Este caso reflete a condição real dos componentes/placas de circuitos impressos/equipamentos de reposição, que mesmo não sendo utilizados numa determinada operação (aviões, missões aeroespaciais, etc.), também sofrem os efeitos das radiações ionizantes [93]. Os resultados referentes ao estudo comparativo experimental entre os dispositivos nMOSFETs do tipo *Wave* e os seus respectivos convencionais retangulares equivalentes, levando-se em consideração a exposição aos raios X e a influência da radiação em condição *Floating* serão abordadas na Seção 3.3.1.

#### *3.2.1.2 Condições de polarização "ON State" e "OFF State" dos dispositivos*

De maneira geral, essas condições refletem as operações dos MOSFETs operando ou como chave aberta (*ON State*) ou como chave fechada (*OFF State*).

Ao polarizar os dispositivos nessas condições (*ON* e *OFF*), é possível potencializar os efeitos das radiações ionizantes dos MOSFETs. No caso da polarização na condição *ON State* dos MOSFETs durante o procedimento de irradiação de raios X, o campo elétrico vertical existente na estrutura dos transistores é capaz de potencializar os efeitos das radiações ionizantes. No caso da polarização na condição *OFF State* dos MOSFETs durante o procedimento de irradiação de raios X, o campo elétrico longitudinal presente na estrutura dos transistores é capaz de potencializar os efeitos dessas radiações ionizantes [96].

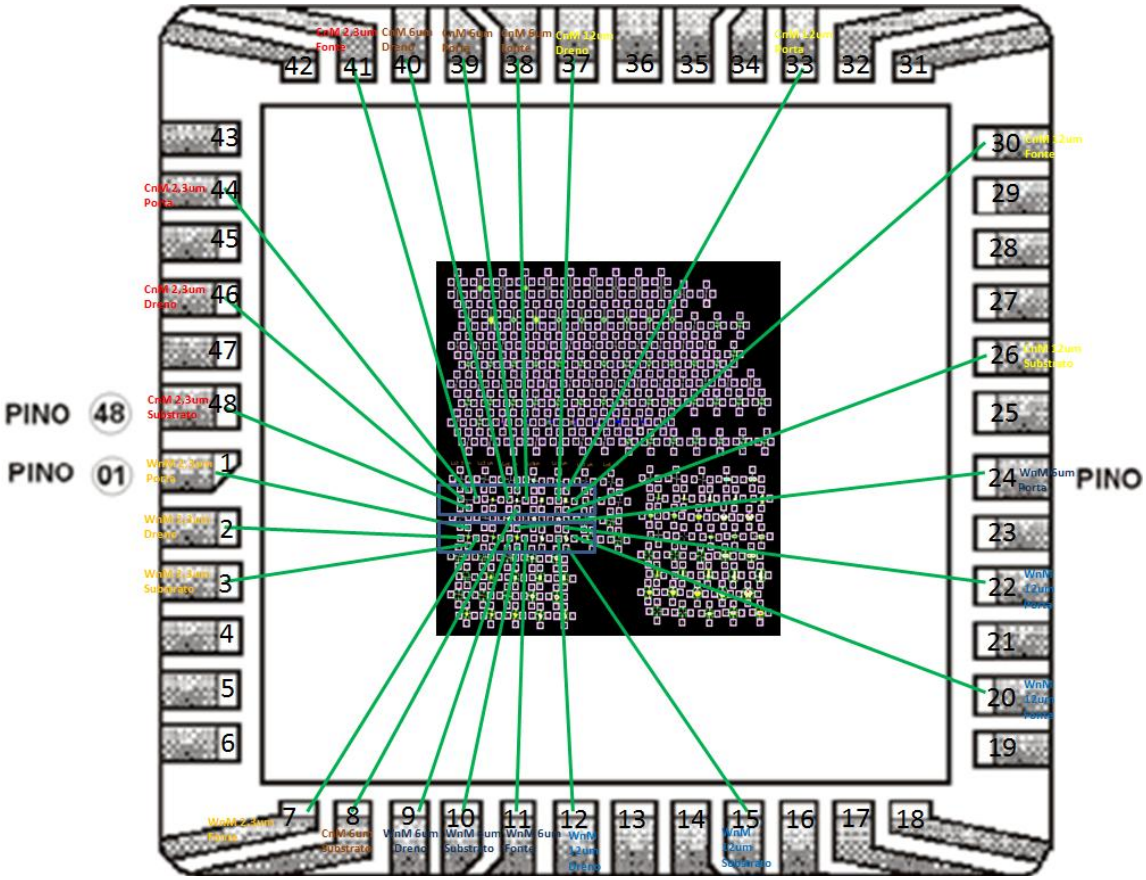
Para as tecnologias avançadas com óxidos de porta bastante finos (<10 nm) [92] (em que as respostas às radiações ionizantes são dominadas pelo aumento da corrente de fuga provocada pelos transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro) a condição de polarização *ON State* maximiza este efeito, onde a porta é polarizada com $V_{DD}$ e os outros terminais, fonte, dreno e corpo encontram-se aterrados [96]. Neste caso, o campo elétrico vertical (aplicado à porta do MOSFET) potencializa as condições para que a radiação ionizante seja capaz de aumentar ainda mais o número de armadilhas criadas nos óxidos de porta e de isolação dos dispositivos [96].

Alguns ensaios publicados na literatura mostram que a condição de polarização *OFF State* dos MOSFETs, onde se polariza o dreno com $V_{DD}$ e os demais terminais são aterrados, pode causar grandes variações nos seus parâmetros elétricos e nas suas figuras de mérito, uma vez que se tem altos valores de campo elétrico longitudinal próximo na região de dreno durante o procedimento de radiações ionizantes [95,99].

#### *3.2.1.3 Projeto dos encapsulamentos dos dispositivos*

A Figura 29 apresenta uma imagem do encapsulamento do CI que contém os diferentes MOSFETs utilizados neste projeto de pesquisa. O encapsulamento foi confeccionado no Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) com apoio do projeto intitulado de Circuitos Integrados Tolerantes à Radiação (CITAR).

Figura 29 – Imagem do encapsulamento do CI que contém os dispositivos usados para realizar esse estudo




Fonte: Autor

## 3.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e analisados os principais resultados experimentais obtidos sobre os efeitos das radiações ionizantes de raios X nos nMOSFETs dos tipos *Wave* e convencionais equivalentes.

### 3.3.1 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudos dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos sem polarização (*Floating*) durante o processo de radiações ionizantes

Nesta subseção são apresentados os principais resultados dos efeitos das radiações ionizantes de raios X entre os MOSFETs do tipo *Wave* e de seus equivalentes retangulares convencionais, na condição *Floating*, com as correspondentes análises dos resultados.

Para um melhor entendimento, as seguintes simbologias são adotadas para o estudo desse projeto de pesquisa:

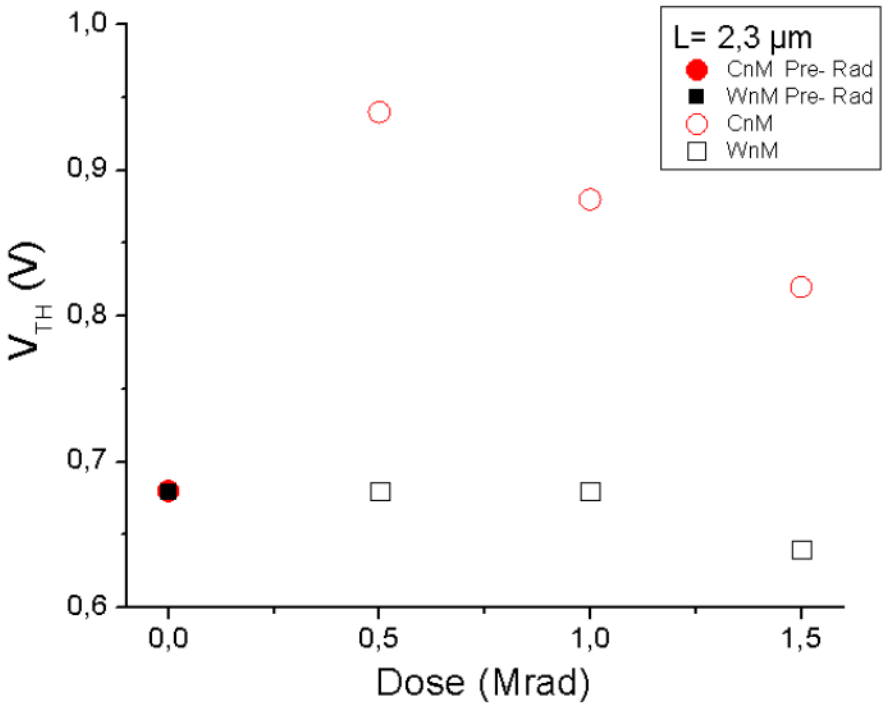
a) Pre-rad, refere-se aos valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs que são obtidos antes da exposição ao procedimento das radiações ionizantes de raios X;
b) Perm TID= 0,5 Mrad ou Perm 1, representa os valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs obtidos sete dias após a primeira dose de radiações ionizantes de raios X, objetivando-se o estudo dos efeitos da TID nos dispositivos;
c) Perm TID 1 Mrad ou Perm 2, representa os valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs obtidos sete dias após a segunda dose de radiações ionizantes de raios X, objetivando-se o estudo dos efeitos da TID nos dispositivos;
d) Perm TID 1,5 Mrad ou Perm 3, representa os valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs obtidos sete dias após a terceira dose de radiações ionizantes de raios X, objetivando-se o estudo dos efeitos da TID nos dispositivos.

#### *3.3.1.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões de limiar na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

Através do método da segunda derivada da curva de $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, com $V_{DS}$ igual a 10 mV [50], foram extraídas as tensões de limiar dos MOSFETs do *chip* 1 (sem encapsulamento e sem polarização durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X, ou seja, na condição *Floating*).

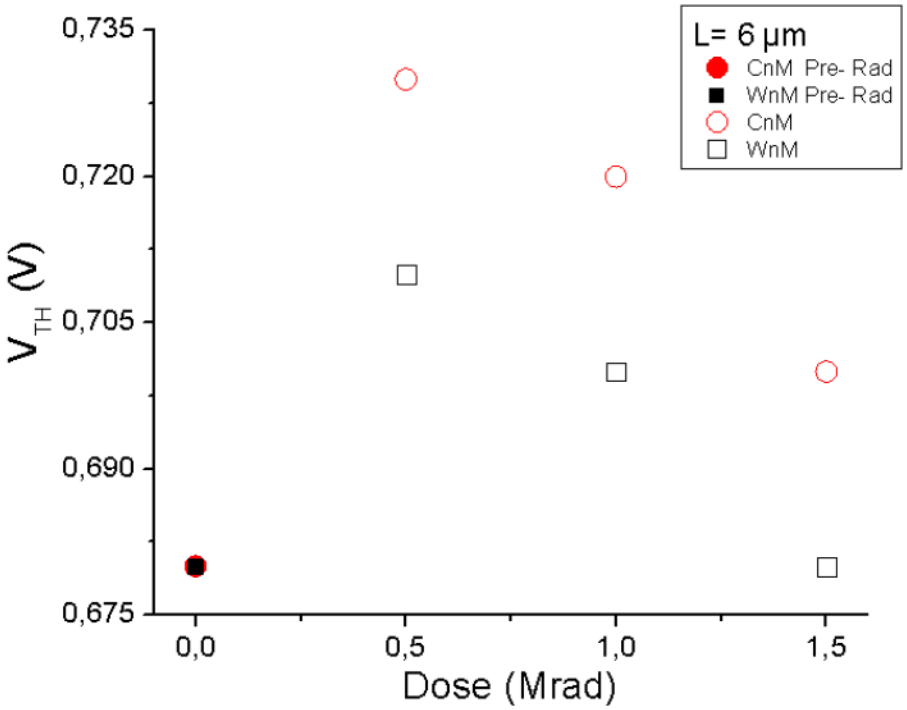
As Figuras 30, 31 e 32 apresentam os resultados experimentais das $V_{THs}$ dos WnMs e dos seus equivalentes CnMs em função da TID para os diferentes dispositivos estudados nesse trabalho de pesquisa.

Figura 30 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *Floating*



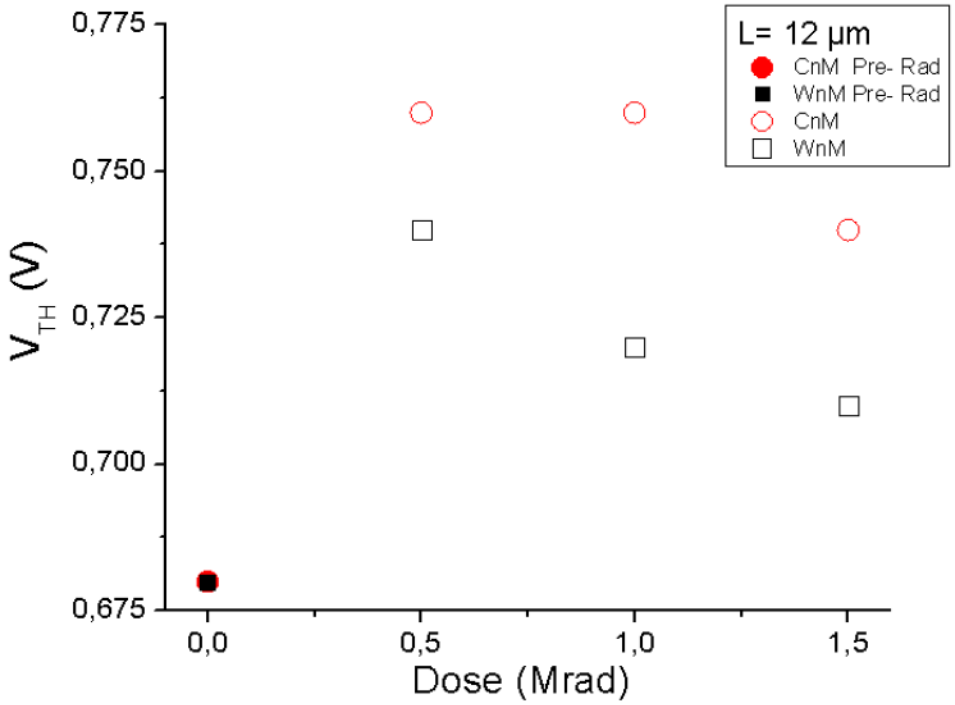

Fonte: Autor

Figura 31 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 µm na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

Figura 32 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 µm na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

A Tabela 2 sumariza os valores das $V_{THs}$ e suas variações ($\Delta V_{THs}$) para os dispositivos com diferentes comprimentos de canal em diferentes condições da TID, na condição de polarização *Floating*.

Tabela 2 – Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *Floating* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs.

| L (µm) | Dispositivo | Pre-rad | Perm 1 | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 2 | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 3 | $\Delta V_{TH}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 Mrad | 0,5 Mrad | | 1 Mrad | | 1,5 Mrad | |
| 2,3 | CnM | 0,68 | 0,94 | 38,2 | 0,88 | 29,4 | 0,82 | 20,6 |
| | WnM | 0,68 | 0,68 | 0 | 0,68 | 0 | 0,64 | -5,9 |
| 6 | CnM | 0,68 | 0,73 | 7,4 | 0,72 | 5,9 | 0,70 | 2,9 |
| | WnM | 0,68 | 0,71 | 4,4 | 0,70 | 2,9 | 0,68 | 0 |
| 12 | CnM | 0,68 | 0,76 | 11,8 | 0,76 | 11,8 | 0,74 | 8,8 |
| | WnM | 0,68 | 0,74 | 8,8 | 0,72 | 5,9 | 0,71 | 4,4 |

Fonte: Autor

Analisando os resultados da Tabela 2, observa-se que todos os MOSFETs do tipo *Wave* apresentam menores variações das $V_{THs}$ em relação àquelas observadas nos MOSFETs

do tipo convencional retangular equivalente, levando-se em conta diferentes TID, em decorrência dos efeitos das radiações ionizantes de raios X. Para exemplificar, no caso dos MOSFETs de comprimentos de canal iguais a 2,3 μm, considerando-se uma TID de 1,5 Mrad (coluna Perm 3 da Tabela 2), o WnM e o CnM apresentaram respectivamente variações nas $V_{THs}$ de 5,9% e 20,6% quando comparados aos valores das $V_{THs}$ dos MOSFETs não irradiados. Portanto, o estilo de leiaute do tipo *Wave* é capaz de mitigar os efeitos das radiações ionizantes de raios X nos MOSFETs, pois a $V_{TH}$ variou menos de 3% (em média) contra aproximadamente 10% do CnM, levando-se em conta todos os dispositivos analisados e as diferentes doses ionizantes totais consideradas. Isto acontece porque o campo elétrico longitudinal (LEF) das regiões de bico de pássaro (BBRs) dos MOSFETs do tipo *Wave* é radial e, consequentemente, menor que aqueles observados nos equivalentes com portas retangulares. Portanto, o estilo de leiaute do tipo *Wave* tem a capacidade de reduzir a influência das radiações ionizantes de raios X nos MOSFETs parasitários pertencentes às BBRs.

Além disso, a primeira dose de radiações ionizantes que foi aplicada aos dispositivos (0,5 Mrad) acarretou no aumento de todas as $V_{THs}$ de todos os dispositivos. Isso se justifica por ter havido uma maior geração de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X na interface $Si/SiO_2$ do que no óxido de porta. Posteriormente, após a segunda radiação ionizante de raio X de 0,5 Mrad, ou seja, com uma TID de 1 Mrad, pode-se observar que as $V_{THs}$ de todos os dispositivos reduziram. Isso se justifica pelo fato de que para essa TID tem-se um maior número de cargas positivas induzidas no óxido de porta ($SiO_2$) do que na interface [10,83,84], considerando-se a última radiação ionizante de raios X aplicada nos dispositivos.

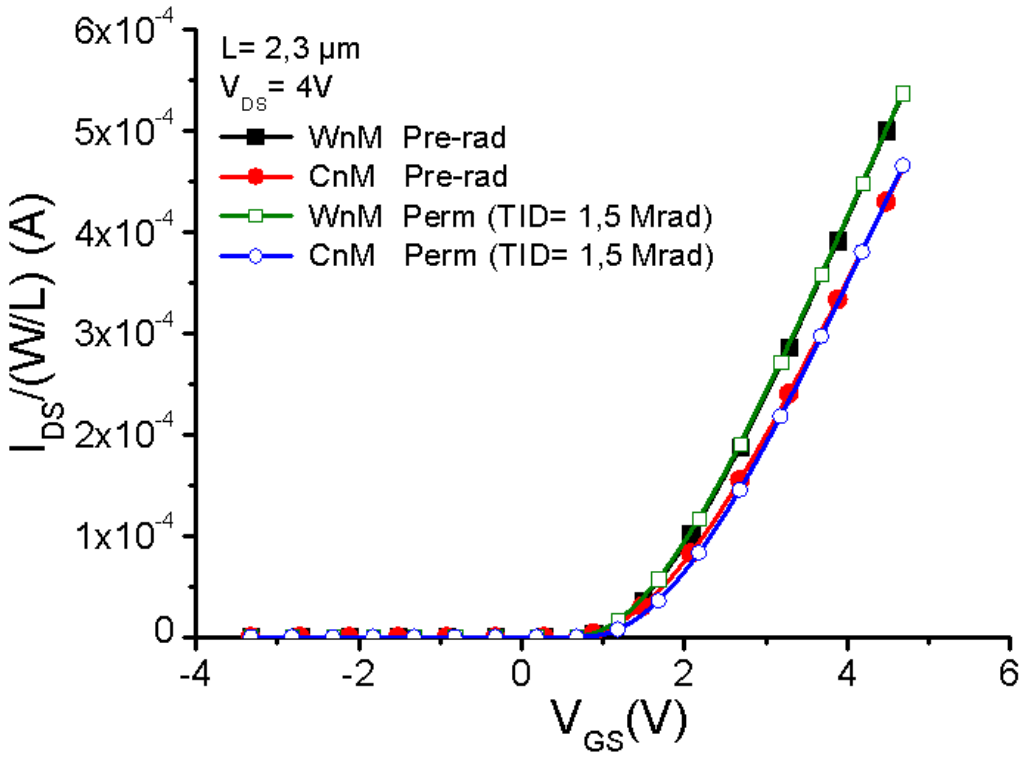
E, finalmente, levando-se em consideração o último procedimento de radiações ionizantes de raios X de 0,5 Mrad, totalizando uma TID de 1,5 Mrad, pode-se verificar o mesmo comportamento observado anteriormente, ou seja, as $V_{THs}$ dos MOSFETs estudados apresentaram uma redução em relação a segunda TID, devido ao aumento adicional das cargas positivas induzidas por radiação ionizante de raios X no $SiO_2$. Por conseguinte, para uma TID de 1,5 Mrad, todos os dispositivos apresentaram maiores $V_{THs}$ do que aqueles encontrados na condição de pré-radiação, com exceção do WnM com um L de 2,3 μm. Portanto, pode-se concluir que as cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X na interface $Si/SiO_2$ foi o principal motivo pelos aumentos das $V_{THs}$ dos dispositivos nesse procedimento em relação às condições de Pre-rad.

### *3.3.1.2 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "Floating" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$*

Neste caso, os dados foram levantados para os dispositivos sem polarização, ou seja, na condição *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes. A corrente de dreno foi normalizada em função da razão de aspecto (W/L, onde W e L são respectivamente a largura e o comprimento de canal) devido às pequenas diferenças das geometrias dos MOSFETs, geradas pelas das regras de projeto do processo de fabricação de CIs CMOS e da estrutura não convencional de porta do *Wave* MOSFET.

A Figura 33 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ dos WnMs e dos equivalentes CnMs, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual a 4 V para análise na região de saturação ($V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$), considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 33 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID=1,5Mrad para L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 4 V, na condição de polarização *Floating*

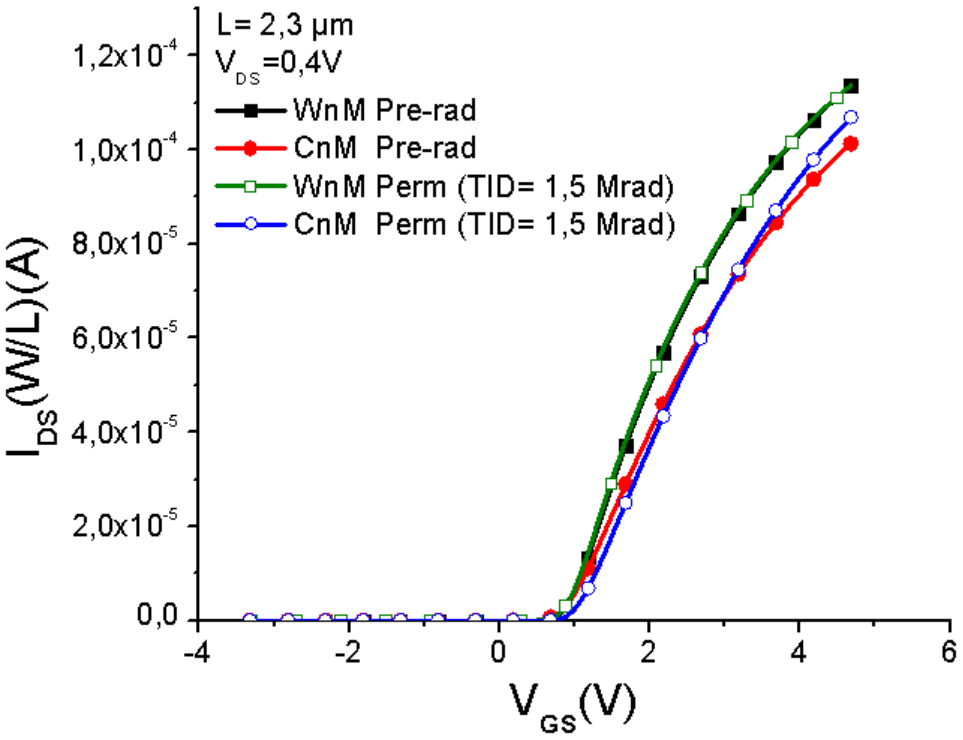



Fonte: Autor

Na Figura 33, verifica-se que para a condição de Pre-rad, a $I_{DS}/(W/L)$ do WnM é 22% maior do que aquela observada no CnM equivalente para um $V_{GS}$ igual a 3V (região de saturação). Isto se deve às características elétricas do WnM, onde ele possui um maior campo elétrico longitudinal resultante (menor no semicírculo em configuração de polarização de dreno externo e maior no semicírculo em configuração de polarização de dreno interno) originando uma $I_{DS}$ maior [33-37]. Contudo, para a condição Permanente (TID de 1,5 Mrad), os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente têm variações similares, ou seja, o comportamento das suas $I_{DS}/(W/L)$ na região de saturação foi similar à condição Pre-Rad mesmo após a TID de 1,5 Mrad.

A Figura 34 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ dos WnMs e dos equivalentes CnMs, para L igual 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual a 0,4 V para análise em Triodo ($V_{DS} \leq V_{GS} - V_{TH}$), considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 34 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID= 1,5Mrad para L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 0,4 V, na condição de polarização *Floating*



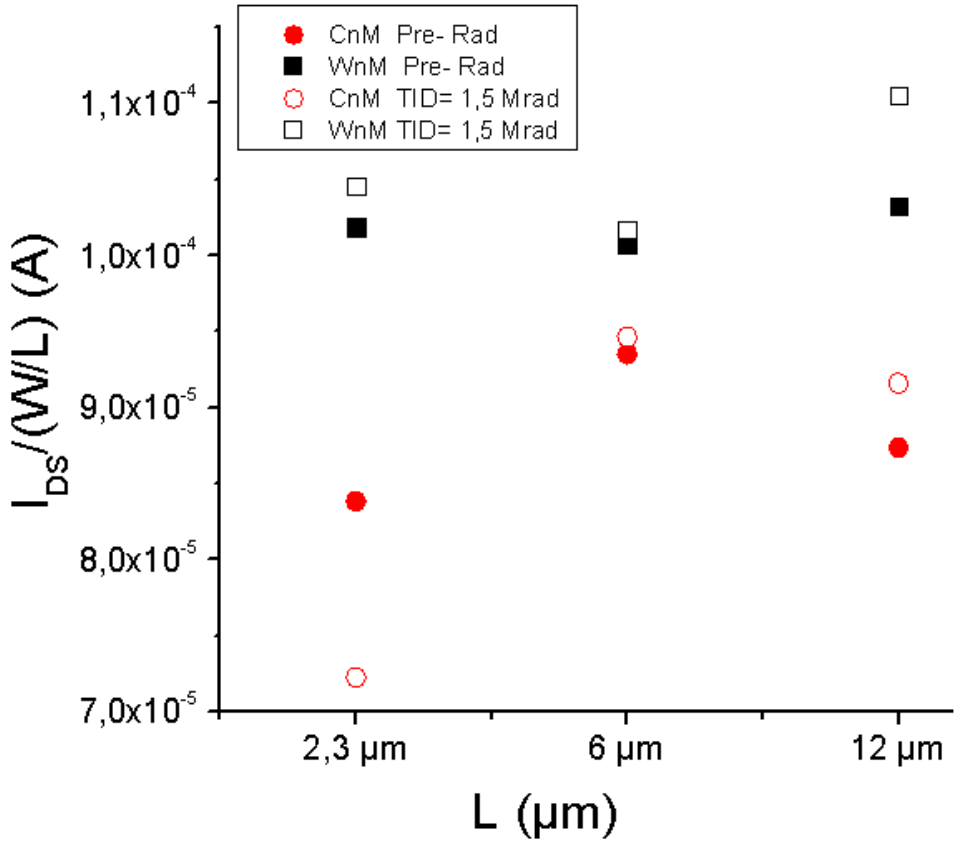

Fonte: Autor

Na Figura 34, verifica-se que para a condição de Pre-rad, a $I_{DS}/(W/L)$ do WnM é 25% maior do que aquela medida do CnM equivalente na condição Pre-rad para um $V_{GS}$ igual a 3V

(região Triodo). Isto se deve às características elétricas do WnM, onde se tem um maior campo elétrico longitudinal resultante e por consequência uma $I_{DS}$ maior [33-37] quando comparado ao CnM equivalente. No entanto, para a condição Permanente (TID de 1,5 Mrad), os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente têm variações similares, ou seja, as $I_{DS}$/(W/L) quando eles operam na região Triodo foram similares às condições de Pre-Rad, mesmo após uma TID de 1,5 Mrad.

A Figura 35 apresenta os resultados das $I_{DS}$/(W/L) em função do comprimento de canal dos dispositivos WnMs e CnMs equivalentes (2,3 µm, 6 µm e 12 µm) na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), com $V_{DS}$ igual a 4 V e com valores das $I_{DS}$/(W/L) extraídos da região de saturação, considerando um $V_{GS}$ de 2 V.

Figura 35 – Resultados experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$=4 V e $V_{GS}$=2 V (região de saturação) na condição de polarização *Floating*



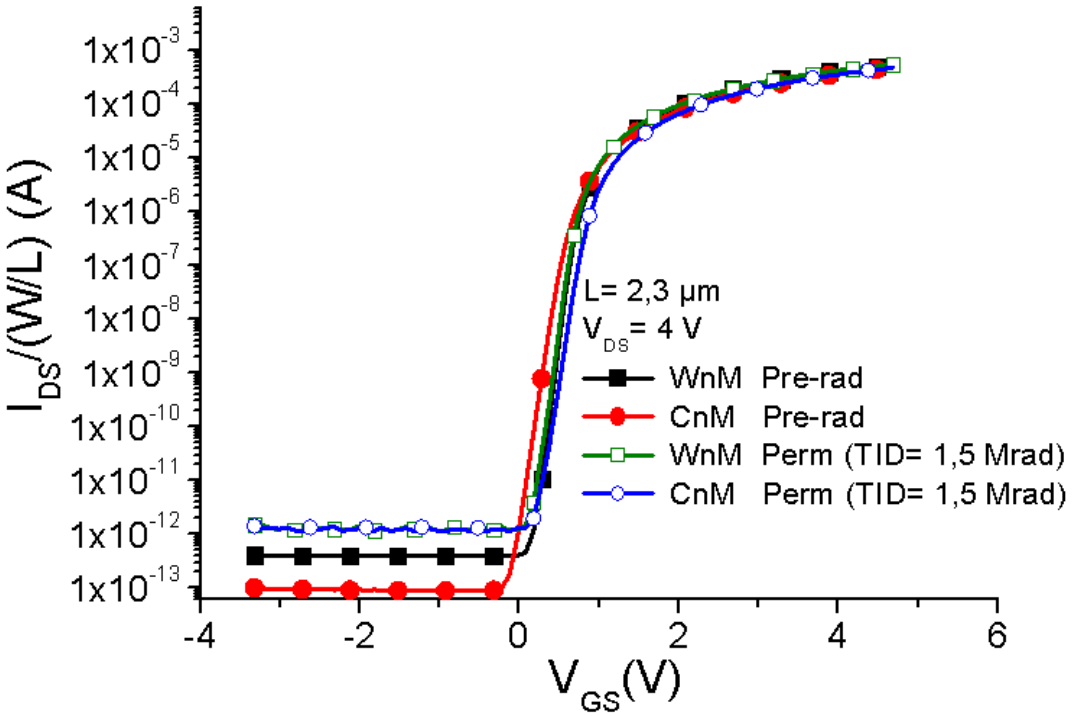

Fonte: Autor

Na Figura 35, verifica-se que para a condição de Pre-rad, as $I_{DS}$/(W/L) dos WnM são sempre maiores, aproximadamente 15% em média, para todos os comprimentos de canal,

quando comparados com aqueles dos CnMs equivalentes. Isto se deve às características elétricas do WnM (maior campo elétrico longitudinal resultante nas diferentes regiões de dreno quando comparado ao equivalente de porta retangular). Para a condição Permanente (TID de 1,5 Mrad), o CnM tem uma variação média de 7 % na $I_{DS}/(W/L)$, enquanto o WnM tem uma variação média de 3 %, considerando-se esses MOSFETs operando na região de saturação. Portanto, as flutuações dos valores são muito próximas. Na região Triodo, também se encontram resultados semelhantes (8% de variação para o CnM e % 3 para o WnM), uma vez que as alterações são próximas, conforme já observado nas Figuras 33 e 34, respectivamente. Desta maneira, as características geométricas do *Wave* não influenciaram os resultados analisados da Figura 35 e das curvas das Figuras 33 e 34 de forma significativa, quando comparado aos equivalentes de porta retangular e, assim, ambos possuem variações muito próximas após uma TID de 1,5 Mrad.

A Figura 36 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ dos WnMs e dos equivalentes CnMs, para um L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual 4V para análise da corrente de estado desligado ($I_{OFF}$), considerando-se as condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente.

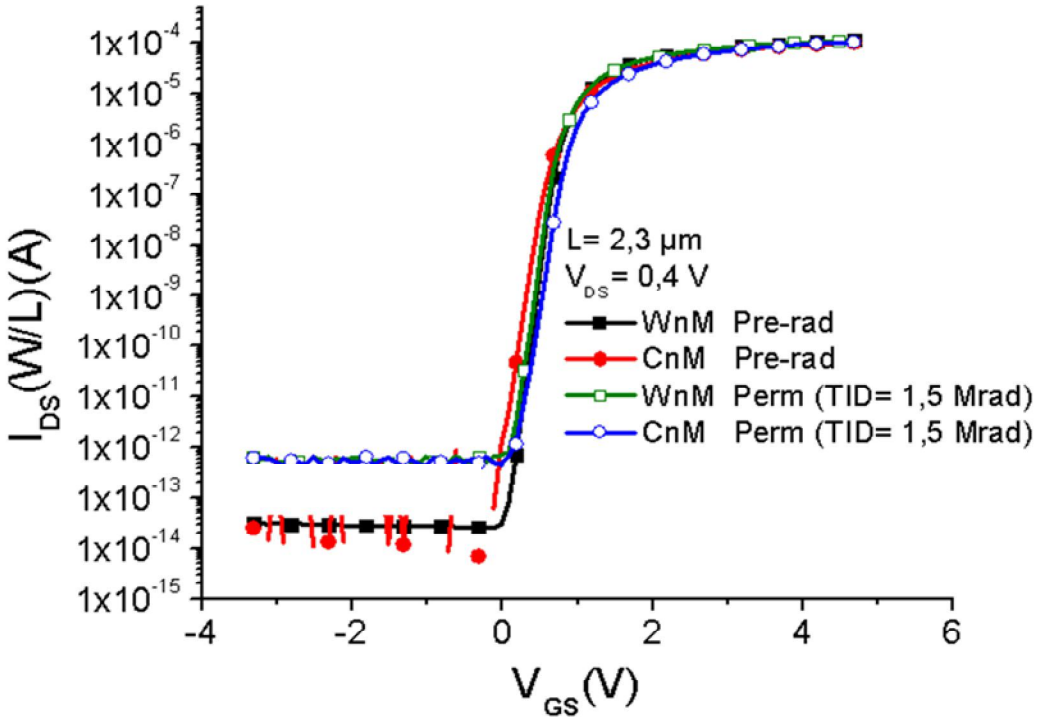
Figura 36 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=4 V, para análise da $I_{OFF}$ na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

A Figura 37 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 0,4 V, para análise da corrente de estado ligado ($I_{ON}$), considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 37 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID= 1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 0,4 V, para análise da $I_{ON}$ na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

Nas Figuras 36 e 37, nota-se que existem diferentes comportamentos entre o WnM e o CnM equivalente. Os valores da $I_{OFF}$ e $I_{ON}$ obtidos das Figuras 36 e 37, respectivamente, são apresentados nas Tabelas 3 e 4, com o objetivo de discutir e compreender os resultados.

A Tabela 3 sumariza os valores da $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ obtidas das Figuras 36 e 37 do WnM e do seu CnM equivalente antes da TID (Pre-rad) e na condição Permanente com TID de 1,5Mrad, onde o símbolo ΔP %, é o representa a variação dos parâmetros e figuras de mérito entre o WnM e o CnM equivalente (onde P é o parâmetro ou figura de mérito em questão) nas condições de Pre-rad e Permanente para um TID de 1,5 Mrad, de forma a quantizar a diferença do desempenho de cada dispositivo nas condições avaliadas e se dá pela equação (10):

$$\Delta P\% = \left[\frac{(WnM - CnM)}{CnM}\right] x100 \tag{10}$$

O símbolo ΔP' % representa a variação dos parâmetros e figuras de mérito do CnM da condição de Pre-rad para a condição do Permanente, considerando-se uma TID de 1,5 Mrad, para quantizar a variação do desempenho do dispositivo nas condições avaliadas e compreender os efeitos da TID no comportamento elétrico do CnM e se dá pela equação 11:

$$\Delta P'\% = \left[\frac{(CnMperm - CnMpre)}{CnMpre}\right] x100 \tag{11}$$

O símbolo ΔP" % representa a variação dos parâmetros e figuras de mérito do WnM da condição de Pre-rad para a condição de Permanente, considerando-se uma TID de 1,5 Mrad, de forma a quantizar a variação do desempenho do dispositivo nas condições avaliadas e compreender os efeitos da TID no comportamento elétrico do WnM e se dá pela equação 12:

$$\Delta P''\% = \left[\frac{(WnMperm - WnMpre)}{WnMpre}\right] x100 \tag{12}$$

As variações em porcentagem dos valores dos parâmetros e figuras de mérito apresentados neste trabalho são calculadas de acordo com as equações (10), (11) e (12) e, portanto, foram usadas para estabelecer as variações da $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ da Tabela 4.

Tabela 3 - $I_{ON}$, $I_{OFF}$, e a razão $I_{ON}/I_{OFF}$ dos WnMs e seus respectivos CnMs para as condições de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como as variações desses parâmetros em função da TID, para L=2,3µm, na condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X

| L= 2,3 µm | Condição | Pre-rad | Perm | Variação em % depois do TID para o CnM e WnM |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 1,5 | |
| | | | | **Δ $I_{ON}$ ' %** |
| $I_{ON}$ (A) do CnM | | $8{,}97x10^{-5}$ | $9{,}53x10^{-5}$ | **6%** |
| $I_{ON}$ (A) do WnM | | $1{,}04x10^{-4}$ | $1{,}04x10^{-4}$ | **0%** |
| **Δ $I_{ON}$ %** | | **15,94%** | **9,13%** | **Δ $I_{ON}$ " %** |
| | | | | **Δ $I_{OFF}$ ' %** |
| $I_{OFF}$ (A) do CnM | | $9{,}88x10^{-14}$ | $1{,}23x10^{-12}$ | **1145%** |
| $I_{OFF}$ (A) do WnM | | $4{,}03x10^{-13}$ | $1{,}27x10^{-12}$ | **215%** |
| **Δ $I_{OFF}$ %** | | **307,89%** | **3,25%** | **Δ $I_{OFF}$ " %** |
| | | | | **Δ $I_{ON}/I_{OFF}$ ' %** |
| $I_{ON}/I_{OFF}$ do CnM | | $0{,}91x10^{+9}$ | $0{,}078x10^{+9}$ | **-92%** |
| $I_{ON}/I_{OFF}$ do WnM | | $0{,}26x10^{+9}$ | $0{,}082x10^{+9}$ | **-68%** |
| **Δ $I_{ON}/I_{OFF}$ %** | | **-71,43%** | **5,13%** | **Δ $I_{ON}/I_{OFF}$ " %** |

Fonte: Autor

Na Tabela 3 é possível notar que a $I_{ON}$ do WnM é cerca de 16% maior quando comparado aquele do seu CnM equivalente, e nenhuma variação da $I_{ON}$ do WnM é verificada após a TID, enquanto que para a $I_{ON}$ do CnM existe uma variação de 6% $I_{ON}$. Por outro lado, a $I_{OFF}$ do CnM é menor (portanto melhor), quando comparado a $I_{OFF}$ do WnM equivalente (o *Wave* MOSFET possui um campo elétrico longitudinal resultante maior na região de dreno, aumentando seu $I_{OFF}$), tanto na condição da Pre-rad quanto para a condição do Permamente de 1,5 Mrad. Porém, vale ressaltar que o CnM tem uma variação da $I_{ON}$ extremamente significante após essa TID de 1,5 Mrad, isto é, que foi de 1145%, enquanto que o WnM se mostrou mais tolerante, tendo uma variação para esse parâmetro de 215% em relação ao valor da pré-radiação. Este resultado mostra que o WnM apresenta uma maior tolerância para os efeitos da TID em relação ao seu convencional equivalente. A menor variação da $I_{OFF}$ do WnM após a TID de 1,5 Mrad resulta numa melhor razão $I_{ON}/I_{OFF}$ em comparação ao CnM equivalente, que é de aproximadamente de 5%. Além disso, a variação desde parâmetro é de 92% para o CnM e 68% para o WnM, ou seja, o WnM foi mais tolerante aos efeitos da TID neste experimento. Isso é justificado pelas características geométricas do *Wave* MOSFET, onde o seu LEF resultante nas regiões de bico de pássaro é menor que aquele observado no CnM equivalente e, portanto, os transistores parasitários daquelas regiões influenciam menos o desempenho elétrico dos WnMs após TID de 1,5 Mrad.

Para confirmar os resultados experimentais obtidos para um L igual a 2,3 μm, a Tabela 4 sumariza os valores das razões $I_{ON}/I_{OFF}$ dos dispositivos com um $V_{DS}$ de 0,4 V (para $I_{ON}$) e um $V_{DS}$ de 4 V (para $I_{OFF}$), agora considerando os comprimentos de canal de 6 μm e de 12 μm. As equações 10, 11 e 12 foram usadas para calcular as variações da $I_{ON}/I_{OFF}$ da Tabela 4, considerando um L de 6 μm e de 12 μm, respectivamente.

Tabela 4 - Comportamento da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ dos WnMs e equivalentes CnMs para as condições de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, considerando-se um L= 6μm e L=12μm, na condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X

| L (μ m) | Condição | Pre-Rad | Perm | Variação em % depois do TID para o CnM e WnM |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 1,5 | |
| 6 | | | | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ ' %** |
| | $I_{ON}/I_{OFF}$ do CnM | $1,71x10^{+8}$ | $5,40x10^{+9}$ | 3064% |
| | $I_{ON}/I_{OFF}$ do WnM | $6,94x10^{+7}$ | $5,41x10^{+7}$ | - 22% |
| | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ %** | -59,42% | -99,00% | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ " %** |
| 12 | | | | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ ' %** |
| | $I_{ON}/I_{OFF}$ do CnM | $3,35x10^{+8}$ | $3,06x10^{+7}$ | -91% |
| | $I_{ON}/I_{OFF}$ do WnM | $3,56x10^{+8}$ | $3,43x10^{+7}$ | -90% |
| | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ %** | 6,27% | 12,10% | **$\Delta I_{ON}/I_{OFF}$ " %** |

Fonte: Autor

Para os dispositivos com L de 6 μm, as variações das razões $I_{ON}/I_{OFF}$ do WnM quando comparado ao CnM foram bem distintas, ou seja, 22% e 3064%, respectivamente. Isto se deve ao fato da corrente $I_{OFF}$ do CnM ter variado de maneira significativa após uma TID de 1,5 Mrad, confirmando a maior influência das radiações ionizantes de raios X, pelo fato de criarem um número maior de armadilhas nas regiões das BBRs do CnM, quando comparado aquelas do WnM equivalente. Para este dispositivo de L igual 6 μm, o CnM tem uma razão $I_{ON}/I_{OFF}$ maior do que aquela do WnM equivalente, pois o valor da $I_{OFF}$ do CnM é menor na condição de Pre-rad e para a condição de uma TID de 1,5 Mrad.

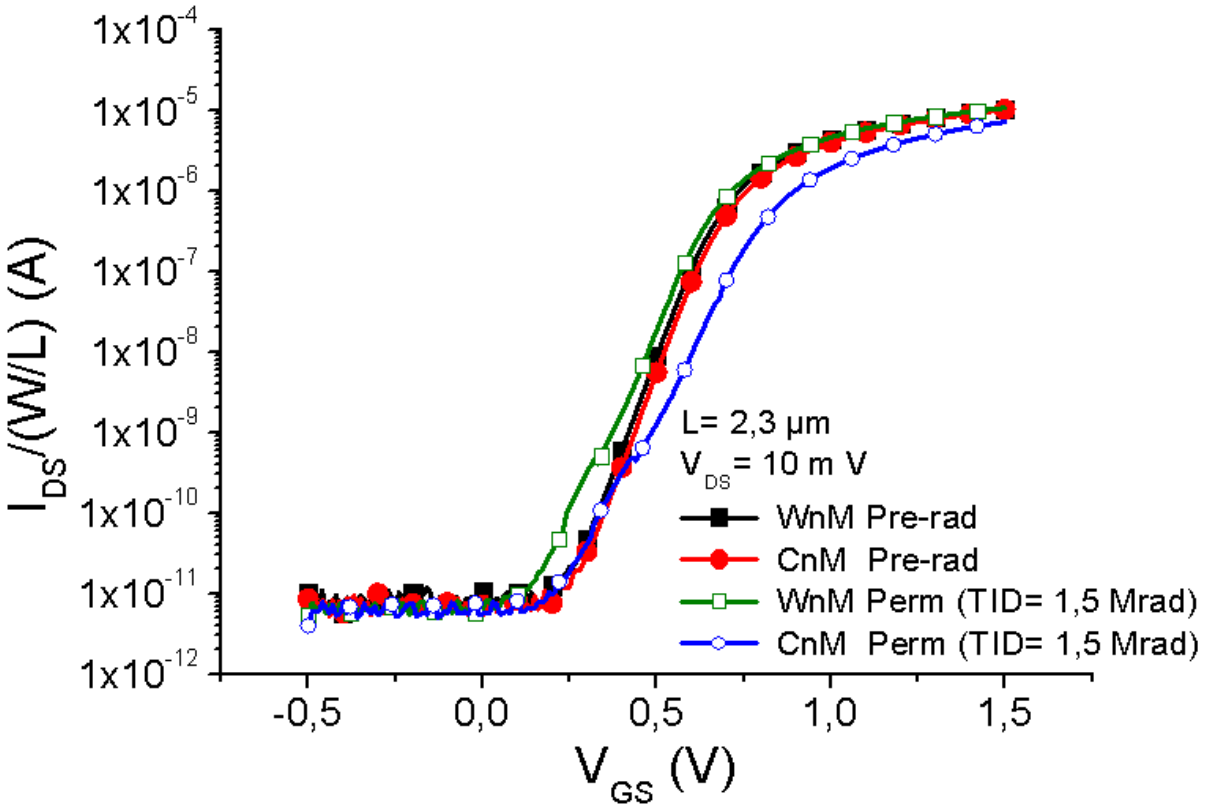
Para o dispositivo com L de 12 μm, a variação da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ do WnM quando comparado ao CnM foi similar, 91% e 90%, respectivamente. Entretanto, o valor da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ reduzem bastante, principalmente pelo aumento da corrente $I_{OFF}$ após uma TID de 1,5 Mrad, ou seja, no dispositivo com maior comprimento de canal não houve uma grande diferença da variação da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ entre o WnM e o CnM, mas vale ressaltar que o WnM ainda mantém um valor da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ maior em 12% que aquela observada no CnM equivalente, após uma TID de 1,5 Mrad.

#### *3.3.1.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinações de sublimiar na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A inclinação sublimiar dos dispositivos foi extraída da curva do logaritmo da $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para um $V_{DS}$ igual a 10 mV.

A Figura 38 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do seu equivalente CnM, para um L de 2,3 μm e com um $V_{DS}$ igual a 10 mV para análise da inclinação de sublimiar, considerando-se as condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente.

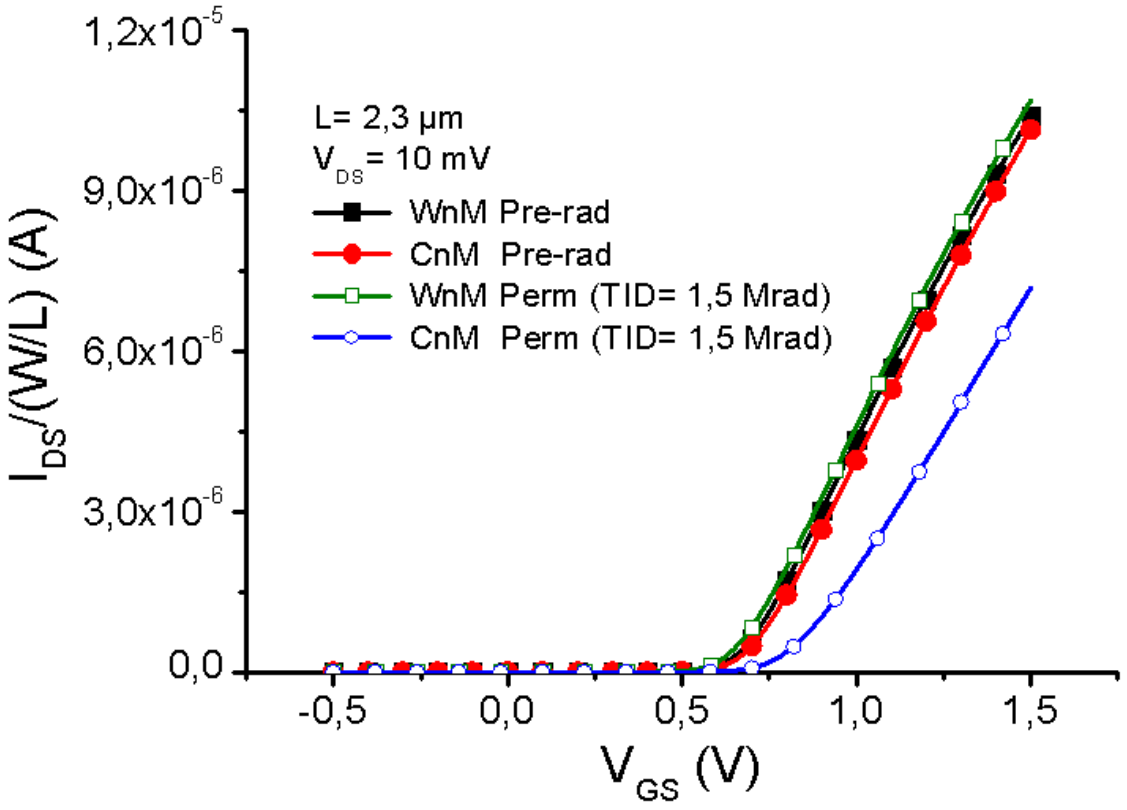
Figura 38 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

A Figura 39 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para um L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual a 10 mV, objetivando-se a análise da degradação da inclinação de sublimiar, considerando-se as condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente.

Figura 39 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 10m V, na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

As Figuras 38 e 39 evidenciam o quanto o CnM é influenciado pelas radiações ionizantes de raios X, quando comparado ao WnM equivalente. Há uma variação de cerca de 20% na corrente de dreno do CnM após os procedimentos de radiações ionizantes, quando comparado àquela observada no WnM. Portanto, por meio dessa análise, o estilo de leiaute *Wave* é menos afetado pelos transistores parasitários das BBRs após as radiações ionizantes de raios X. Isso pode ser justificado pelo fato do campo elétrico longitudinal nas regiões de bico de pássaro do *Wave* MOSFET serem menores do que aqueles encontrados nos MOSFETs convencionais equivalentes.

A Tabela 5 sumariza os valores da inclinação sublimiar (S) dos dispositivos com L de 2,3 µm, considerando-se a condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X. As equações 10, 11 e 12 foram usadas para calcular as variações das inclinações sublimiares da Tabela 5.

Tabela 5 - Comportamento das inclinações de sublimiar do WnM e do seu respectivo CnM equivalente para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3µm e considerando-se a condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X

| L (µ m) | Condição | Pre-rad | Perm | Variação em % depois do TID para o CnM e WnM |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 1,5 | |
| **2,3** | | | | **Δ S ' %** |
| | S do CnM (mV/dec) | 87,8 | 127,2 | 44,9% |
| | S do WnM (mV/dec) | 89,6 | 97,8 | 9,2% |
| | **Δ S%** | 2,0% | 30,1% | **Δ S '' %** |

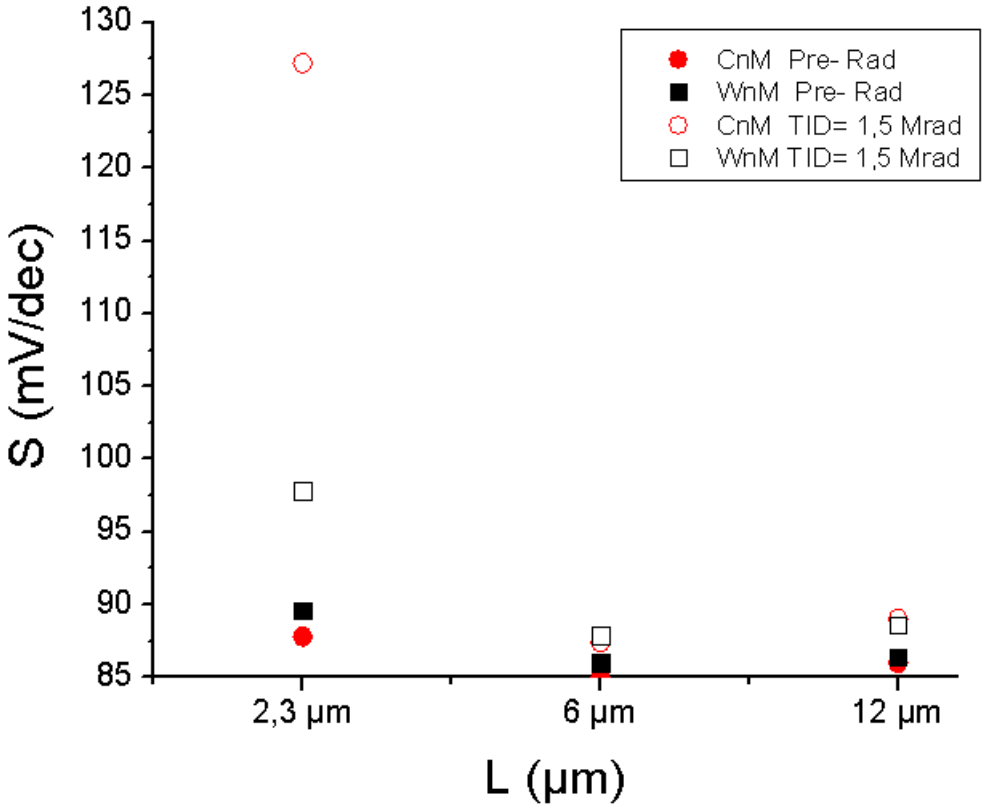
Fonte: Autor

Analisando-se a Tabela 5, verifica-se que as inclinações de sublimiar desses dois dispositivos são similares na condição Pre-rad, indicando uma diferença entre elas menor que 2%.

Após o procedimento de radiações ionizantes para uma TID de 1,5 Mrad, observa-se que a inclinação de sublimiar do WnM tem um desempenho 30,1 % melhor que aquele observado do CnM equivalente. Além disso, o WnM apresentou uma menor variação (9,2%) em relação ao equivalente CnM, que foi de 44,9%. Este resultado mostra que o estilo de leiaute *Wave* para MOSFETs é menos influenciado pelos efeitos da TID. Isso é justificado pelo fato do campo elétrico longitudinal do WnM ser radial e consequentemente menor que aquele do CnM equivalente nas BBRs.

A Figura 40 apresenta os resultados das S (mV/dec) em função dos comprimentos de canal dos dispositivos analisados, que apresentam comprimentos de canal de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm, respectivamente, na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 40 – Resultados experimentais de S (mV/dec) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

Na Figura 40, observam-se variações das S muito pequenas, inferiores a 3,5 %, para os dispositivos com comprimentos de canal iguais a 6 µm e 12 µm, respectivamente. Portanto, as inclinações de submiliar dos dispositivos com comprimentos de canal maiores e iguais a 6 µm não foram praticamente afetadas pelas radiações ionizantes de raios X (TID de 1,5 Mrad) na condição *Floating*. Porém, o CnM com comprimento de canal de 2,3 µm foi fortemente afetado, conforme verificado na Tabela 5. Considerando-se a média das variações para todos os comprimentos de canal, o CnM indica 17% de variação contra 5% do WnM. Isto é justificado pelos mesmos motivos já discutidos anteriormente.

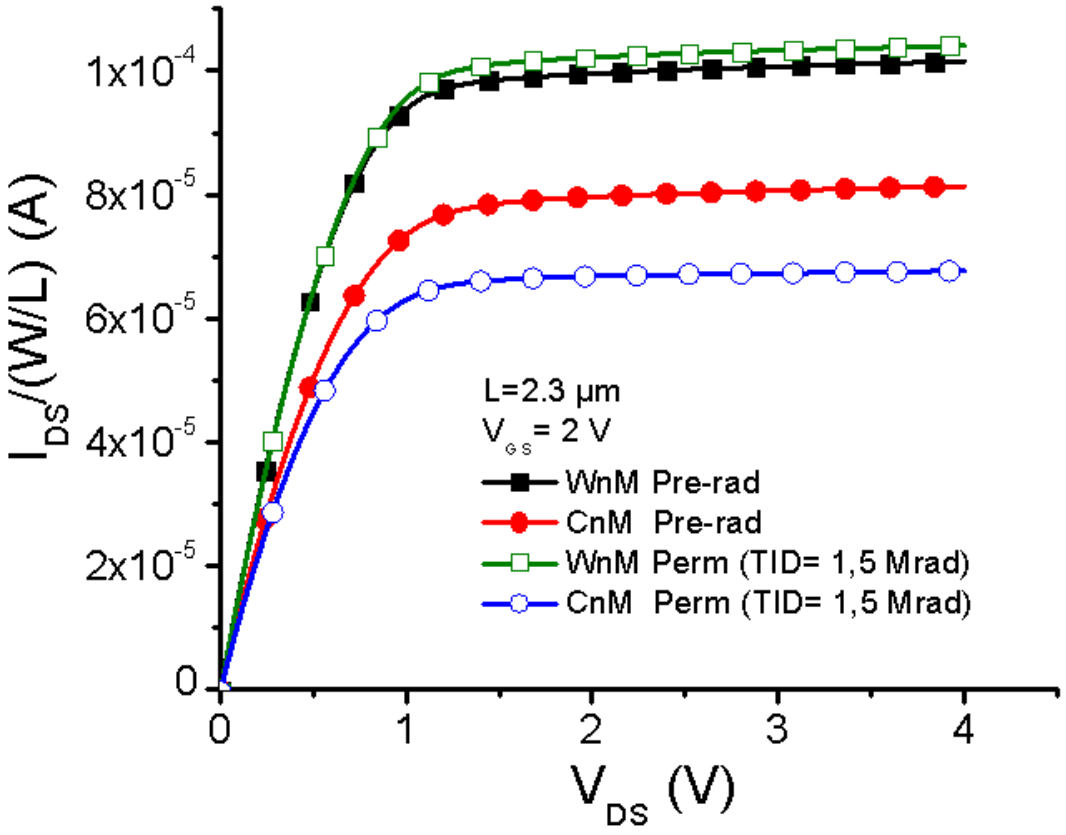
#### *3.3.1.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A curva da corrente de dreno normalizada em função do fator geométrico [$I_{DS}/(W/L)$] em função da tensão de dreno ($V_{DS}$) dos MOSFETs é usada para extrair diversos parâmetros importantes, visando as aplicações de CIs CMOS analógicas e digitais, tais como a corrente de dreno de saturação normalizada pelo fator geométrico, a tensão *Early* e a resistência série entre fonte e dreno de estado ligado, entre outras.

A $I_{DS}$ dos dispositivos foi normalizada em função da razão de aspecto pelos mesmos motivos já descritos quando foi tratada a outra curva característica do MOSFET [$I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$].

A Figura 41 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função das $V_{DS}$ do WnM e do seu equivalente CnM, com um L de 2,3 µm, considerando-se um $V_{GS}$ igual a 2 V, e levando-se em conta as condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente.

Figura 41 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para um Perm TID= 1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{GS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

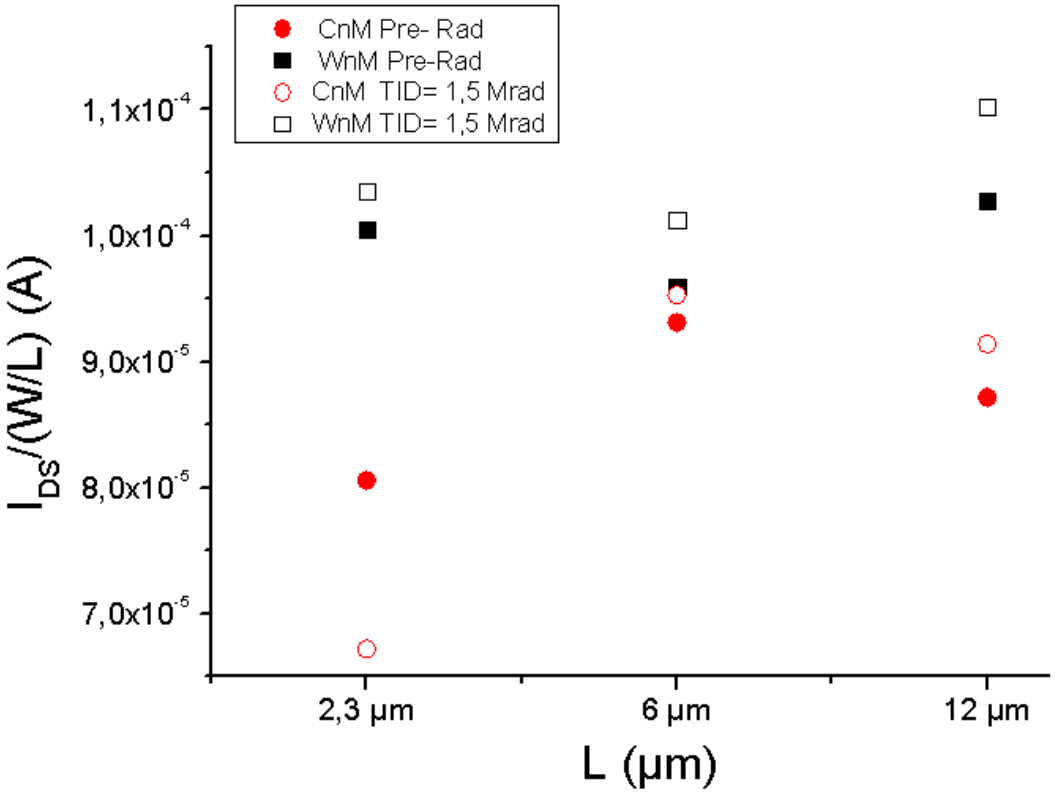
Analisando-se a Figura 41, inicialmente observa-se que a $I_{DS}/(W/L)$ de saturação do WnM é 25% maior do que aquela encontrada no CnM equivalente na condição Pre-rad. Isso é justificado em decorrência do maior campo elétrico longitudinal na região de dreno do WnM (transistor principal) do que aquele que se tem no CnM equivalente. Além disso, após a TID de 1,5 Mrad, o CnM apresentou uma redução de 16% no valor de sua $I_{DS}/(W/L)$ de saturação em relação a condição de Pre-rad. Isso ocorre devido ao aumento de sua tensão de limiar (maior quantidade de cargas positivas na interface $SiO_2/Si$ induzidas pelas radiações ionizantes de raios X, conforme pode ser observado na Tabela 2, e também pela redução da mobilidade dos portadores móveis do canal, decorrente da geração das cargas positivas na interface $Si/SiO_2$ do CnM. No entanto, isso não se ocorre no estilo de leiaute *Wave* para MOSFETs, graças a característica do campo elétrico longitudinal nas regiões de bico de pássaro desse transistor ser radial e consequentemente os transistores parasitários associados a

essas regiões estarem praticamente desativados. O que se observa é um pequeno aumento (2%) da corrente de dreno de saturação normalizada em função da razão de aspecto após uma TID de 1,5 Mrad. Isso ocorre porque o campo elétrico longitudinal resultante do *Wave* MOSFET é maior que o do convencional equivalente e não se observa a degradação da mobilidade no estilo de leiaute do tipo *Wave* após o procedimento de radiação ionizante de 1,5 Mrad, mas sim a geração de portadores decorrente das cargas geradas na interface $Si/SiO_2$ nos *Wave* MOSFETs.

Pode-se dizer então que a corrente de dreno de saturação normalizada em função da razão de aspecto do WnM apresentou uma melhor tolerância às radiações ionizantes de raios X (14%) quando comparadas ao do seu equivalente convencional. Isso faz do estilo *Wave* de leiaute para MOSFETs uma alternativa bastante interessante para as aplicações de CIs CMOS analógicos em ambientes de radiações ionizantes.

A Figura 42 apresenta as $I_{DS}/(W/L)$ em função dos comprimentos de canal dos WnMs e dos seus CnMs equivalentes nas condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente, considerando-se $V_{GS}$ igual a 2V e $V_{DS}$ igual a 3V.

Figura 42 – Resultados experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V e $V_{DS}$=3V na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

Na Figura 42, pode-se observar que para a condição de Pre-rad, as $I_{DS}$/(W/L) do WnM são sempre maiores, ou seja, 15% na média para todos os comprimentos de canal, quando comparadas com os valores das $I_{DS}$/(W/L) dos CnMs equivalentes. Após uma TID de 1,5 Mrad, os CnMs apresentam variações de suas $I_{DS}$/(W/L) de saturação de 7 % em média, enquanto que os WnMs equivalentes possuem variações em torno de 3,5 %, em média. Portanto, as menores variações das $I_{DS}$/(W/L) do WnM, especialmente quando analisado o menor comprimento canal de 2,3 µm, indica que o WnM é menos sensível aos efeitos das radiações ionizantes de TID (1,5 Mrad).

### *3.3.1.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

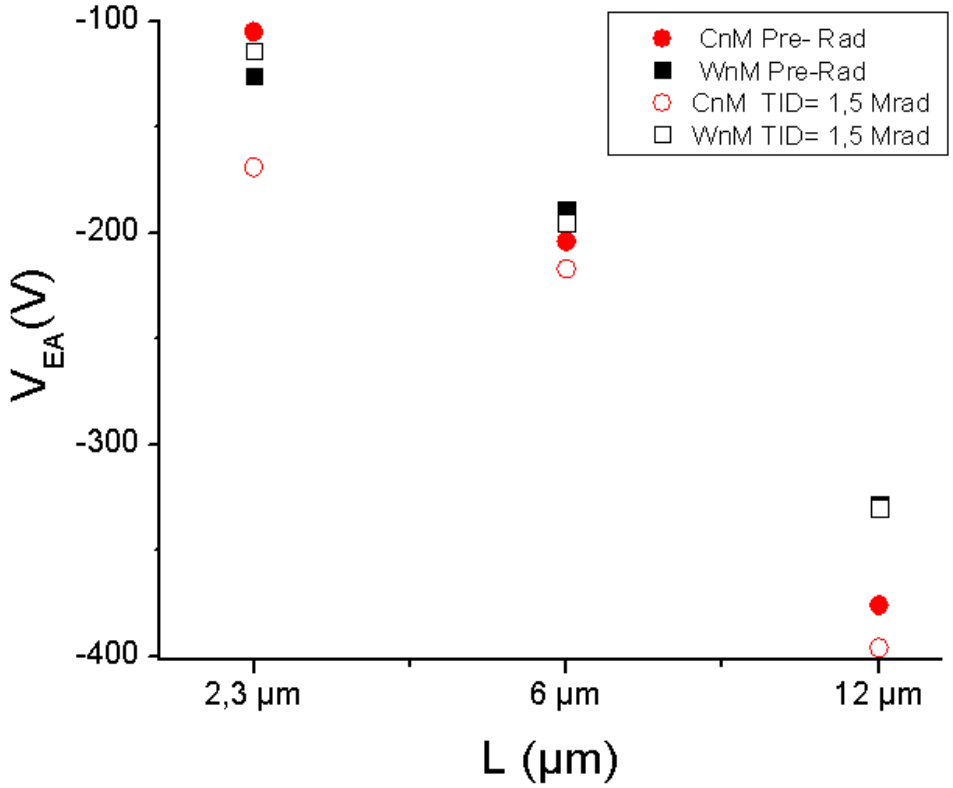
A tensão *Early* foi extraída a partir das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ em função das $V_{DS}$ com os dispositivos não encapsulados para a condição de Pre-Rad e, depois, para a condição Permanente (TID de 1,5 Mrad), onde nenhuma polarização foi aplicada nos dispositivos (*Floating*) durante o procedimento das radiações ionizantes de raios X.

Analisando-se a Figura 41, observa-se que para os MOSFETs com um L de 2,3 µm para $V_{GS}$ igual 2 V e $V_{DS}$ de 3 V, o WnM apresenta uma tensão *Early* em módulo (126 V) 20% maior (melhor) que a do CnM equivalente (105V) na condição de pré-radiação. Isso pode ser justificado, pois o *Wave* MOSFET apresenta um campo elétrico longitudinal resultante na região de dreno maior que o do convencional equivalente e consequentemente gera uma corrente de dreno de saturação normalizada em relação a razão de aspecto muito maior (25%) que a do CnM equivalente e, portanto, gera esse resultado.

Após a TID de 1,5 Mrad, a $V_{EA}$ do WnM reduziu para 114 V em módulo (variação de 10%), enquanto que a do CnM equivalente aumentou para 169 V em módulo (variação de 61%). A variação do *Wave* MOSFET para valores menores de tensão *Early* em módulo pode ser justificada pelo fato de ter aumentado a inclinação da região de saturação em decorrência do aumento da corrente de dreno de saturação normalizada em relação a razão de aspecto, devido à redução de sua tensão de limiar (maior número de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X no óxido de porta), conforme pode ser visto na Tabela 2. No entanto o CnM tem uma tensão *Early* maior em módulo, isto acontece de acordo com a mesma explicação dada para a corrente de dreno de saturação normalizada em função da razão de aspecto (aumento da sua tensão de limiar, conforme Tabela 2 e redução da mobilidade dos portadores móveis no canal em decorrência de um maior número de cargas positivas induzidas na interface $Si/SiO_2$, após um TID de 1,5 Mrad). No entanto, é importante ressaltar que o estilo de leiaute *Wave*, diferentemente do estilo de leiaute retangular, tende a induzir um número maior de cargas positivas no óxido de porta do que na interface $Si/SiO_2$ em decorrência das radiações ionizantes de raios X, para uma TID de 1,5 Mrad e consequentemente gerando uma menor variação da tensão Early.

A Figura 43 apresenta os resultados das tensões *Early* em função do comprimento de canal dos dispositivos WnMs e CnMs equivalentes na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad) para um $V_{GS}$ de 2 V e um $V_{DS}$ de 3V.

Figura 43 – Resultados experimentais das tensões *Early* em função do comprimento de canal dos MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

Observando a Figura 43, após uma TID de 1,5 Mrad, verifica-se que as tensões *Early* de todos os MOSFETs aumentam em módulo à medida que o comprimento de canal aumenta (menor efeito da modulação do comprimento de canal) [46]. Além disso, as tensões *Early* dos WnMs apresentam menores variações (5% em média) quando comparados as variações dos convencionais equivalentes (25% em média). Portanto, o estilo de leiaute *Wave* para MOSFETs é uma interessante alternativa de leiaute para as aplicações de CIs CMOS analógicos em ambientes de radiações ionizantes, visto que o ganho de tensão é diretamente proporcional a esse parâmetro.

### *3.3.1.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A resistência série de estado ligado dos dispositivos foi obtida da parte linear da região Triodo da curva da $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$, parametrizada em função do valor de $V_{GS}$.

A Tabela 6 ilustra os valores da resistência série em estado ligado ($R_{ON}$) dos dispositivos com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X. As equações 10, 11 e 12 foram usadas para calcular as variações de $R_{ON}$ da Tabela 6.

Tabela 6 - Comportamento de $R_{ON}$ para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3µm e considerando-se a condição de polarização *Floating* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X

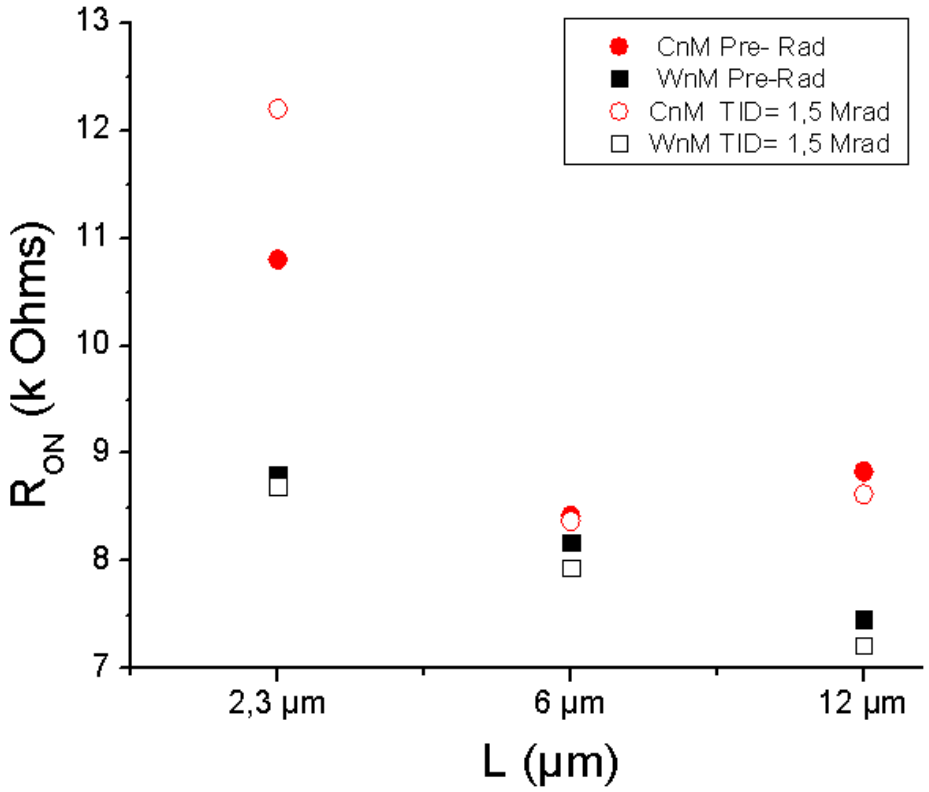
| L (µ m) | Condição | Pre-rad | Perm | Variação em % depois do TID para o CnM e WnM |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 1,5 | |
| 2,3 | | | | **$\Delta R_{ON}$' %** |
| | $R_{ON}$ do CnM(KΩ) | 10,8 | 12,2 | 13% |
| | $R_{ON}$ do WnM (KΩ) | 8,8 | 8,7 | -1% |
| | **$\Delta R_{ON}$%** | -18,5% | -28,7% | **$\Delta R_{ON}$'' %** |

Fonte: Autor

Na Tabela 6, observa-se que na condição de pré-radiação, o valor da $R_{ON}$ do WnM é menor quando comparado com o do CnM equivalente, ou seja, é melhor em 18,5% em relação ao do CnM equivalente. Isso se justifica, pois o WnM apresenta um campo elétrico longitudinal resultante maior que o do convencional equivalente. Além disso, após uma TID de 1,5 Mrad, o WnM praticamente não varia (1% de variação), ao passo que o CnM equivalente apresenta uma variação de 13%.

A Figura 44 apresenta os resultados das $R_{ON}$ em função do comprimento de canal dos dispositivos WnMs e CnMs equivalentes na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad) para um $V_{GS}$ de 2 V.

Figura 44 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{GS}$=2 V na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

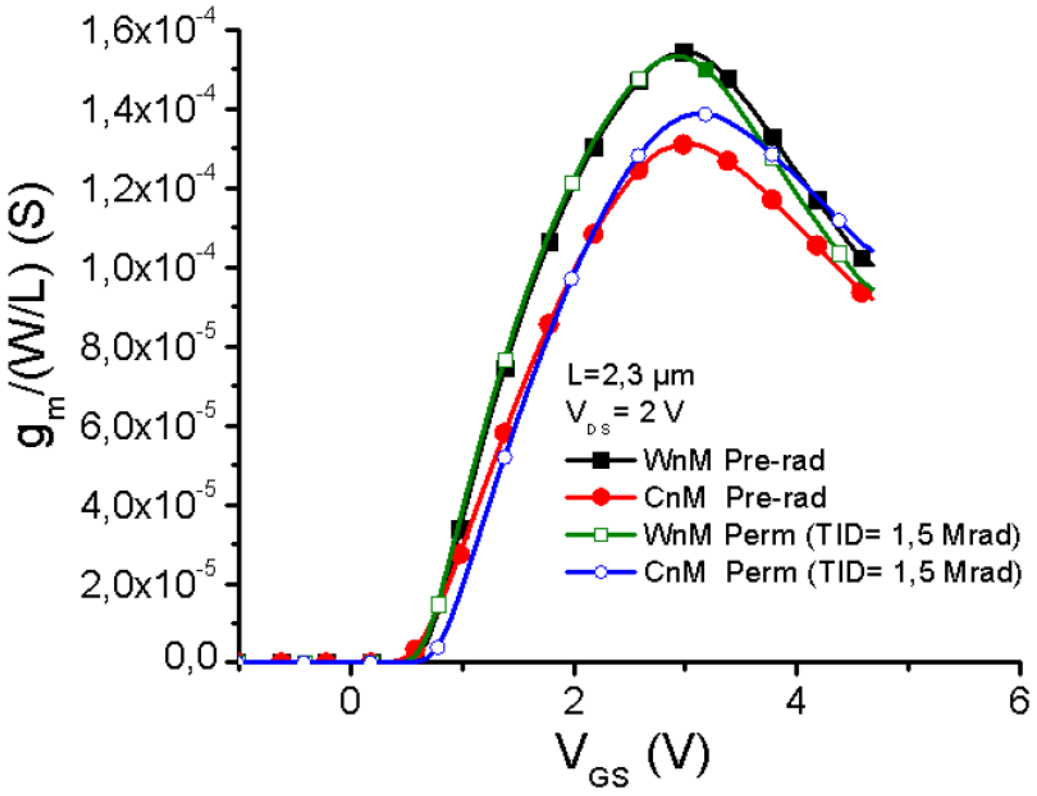
Na Figura 44, observa-se que as $R_{ON}$ dos dispositivos reduzem com o aumento do comprimento de canal, pois são diretamente proporcionais ao L [46], com exceção o MOSFET de porta retangular convencional de L de 12 µm devido algum desvio do processo de fabricação. Adicionalmente, pode-se observar que as $R_{ON}$ dos MOSFETs diminuem na maioria dos casos após uma TID de 1,5 Mrad, isto acontece devido ao maior número de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X no óxido de porta, acarretando num aumento da corrente de dreno e uma redução da $R_{ON}$. No caso do CnM com L de 2,3 µm, onde existe um aumento da $R_{ON}$, isso acontece devido a degradação da mobilidade como consequência das cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X na interface $Si/SiO_2$. Em média, os WnMs apresentaram menores variações da $R_{ON}$ (2%) em relação aos dos CnMs equivalentes (6%), considerando os diferentes L. Portanto, o estilo de leiaute *Wave* também pode ser considerando uma alternativa de leiaute para MOSFETs para as aplicações de CIs CMOS digitais em ambientes de radiações ionizantes levando-se e conta a $R_{ON}$.

### *3.3.1.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A transcondutância dos dispositivos foi extraída da primeira derivada da curva $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$.

A Figura 45 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 45 – Curvas experimentais das $g_m/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*



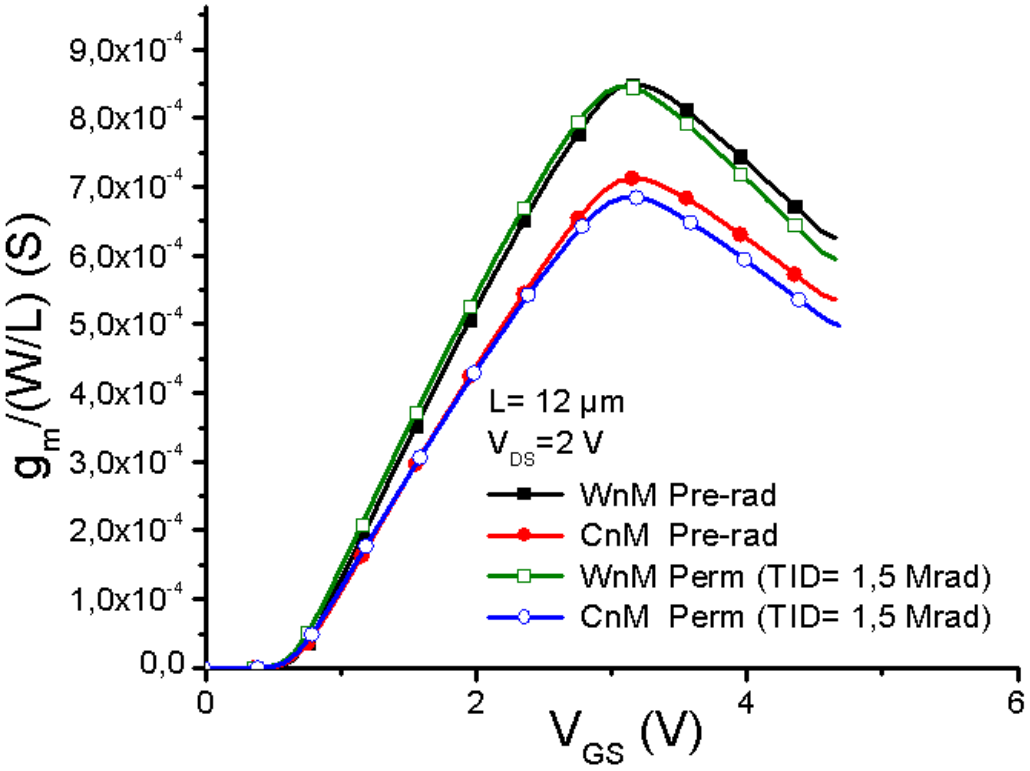

Fonte: Autor

Na Figura 45, observa-se que a $g_m$ máxima ($g_{m\,max}$) normalizada em relação a razão de aspecto na região de saturação do WnM de L igual a 2,3 µm é 18% maior do que a do CnM equivalente, pois o campo elétrico longitudinal resultante na região de dreno do WnM é maior do que aquele observado no CnM equivalente. Também observa-se que o WnM praticamente não varia (variação de apenas 2%) após a TID de 1,5 Mrad, enquanto que o CnM apresenta

uma variação de 6% em relação ao seu valor de pré-radiação. Isso pode ser justificado pelas características diferenciadas do campo elétrico longitudinal do estilo de leiaute *Wave* para MOSFETs já discutidas anteriormente.

A Figura 46 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 12 µm e com $V_{DS}$ igual 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 46 – Curvas experimentais das $g_m/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos Wave e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=12 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*



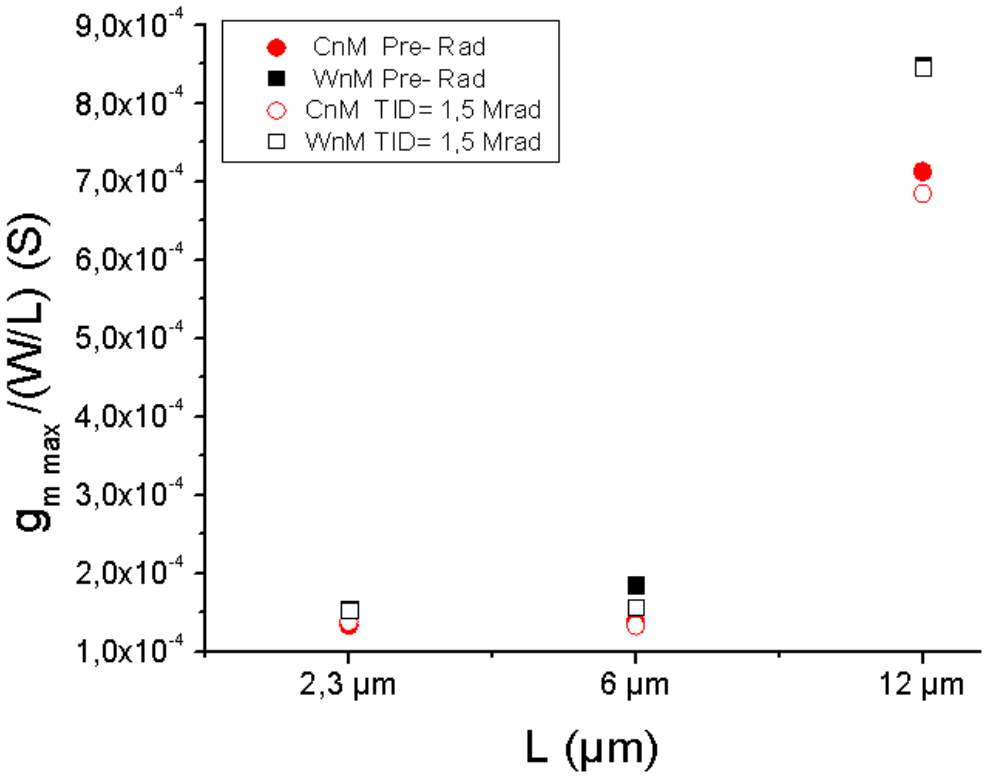

Fonte: Autor

Os resultados experimentais apresentados têm um melhor desempenho do *Wave* MOSFET com relação ao CnM equivalente, considerando-se as mesmas condições de polarização e fator geométrico para diferentes valores de $V_{GS}$ e com diferentes comprimentos de canal.

Portanto, mais uma vez o *Wave* MOSFET é indicado como uma alternativa de transistor para aumentar o desempenho de CIs CMOS analógicos em ambientes de radiações ionizantes.

A Figura 47 apresenta os resultados da $g_{m\ max}/(W/L)$ em função do comprimento de canal dos dispositivos WnMs e CnMs equivalentes de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm, respectivamente, na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad) com $V_{DS}$ igual a 2V.

Figura 47 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}/(W/L)$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$= 2 V na condição de polarização *Floating*



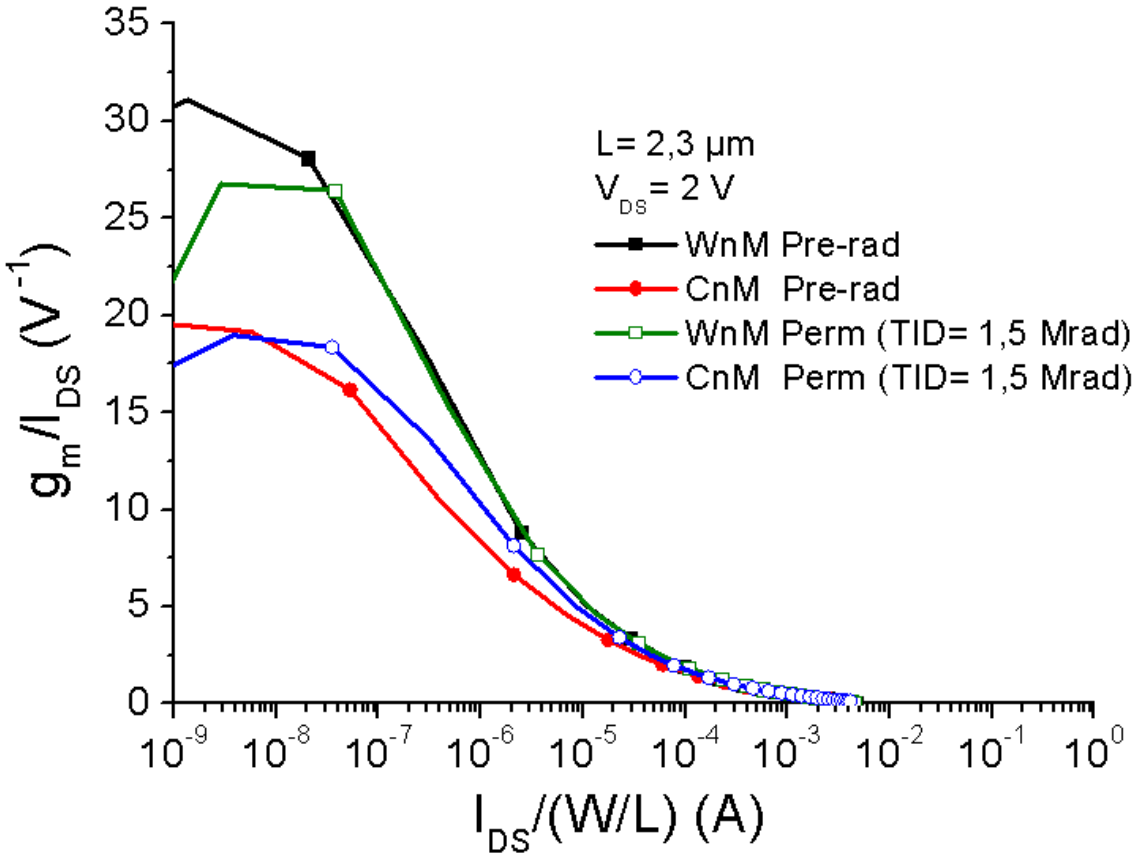

Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 47, observa-se que as $g_{m\ max}/(W/L)$ dos WnMs são maiores em todos os casos quando comparados aos convencionais equivalentes, em decorrência dos MOSFET do tipo *Wave* apresentar um maior campo elétrico longitudinal resultante maior do que o CnM equivalente. Em média, após TID de 1,5 Mrad, as $g_{m\ max}/(W/L)$ dos WnMs apresentam variações similares aos dos CnM equivalentes (5%) e, portanto, não degradam suas características analógicas para as aplicações de CIs CMOS em ambientes de radiações ionizantes.

### *3.3.1.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 48 apresenta as curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função das $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e do seu equivalente CnM, considerando-se um L de 2,3 µm e um $V_{DS}$ de 2 V, considerando-se as condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), respectivamente. As curvas apresentadas e os resultados de $g_m/I_{DS}$ estão normalizados para comparações fidedignas do CnM e do WnM para condição de Pre-rad e de Perm 3 (TID = 1,5 Mrad) em CIs CMOS convencional (*Bulk*).

Figura 48 – Curvas experimentais das $g_m$ /$I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*



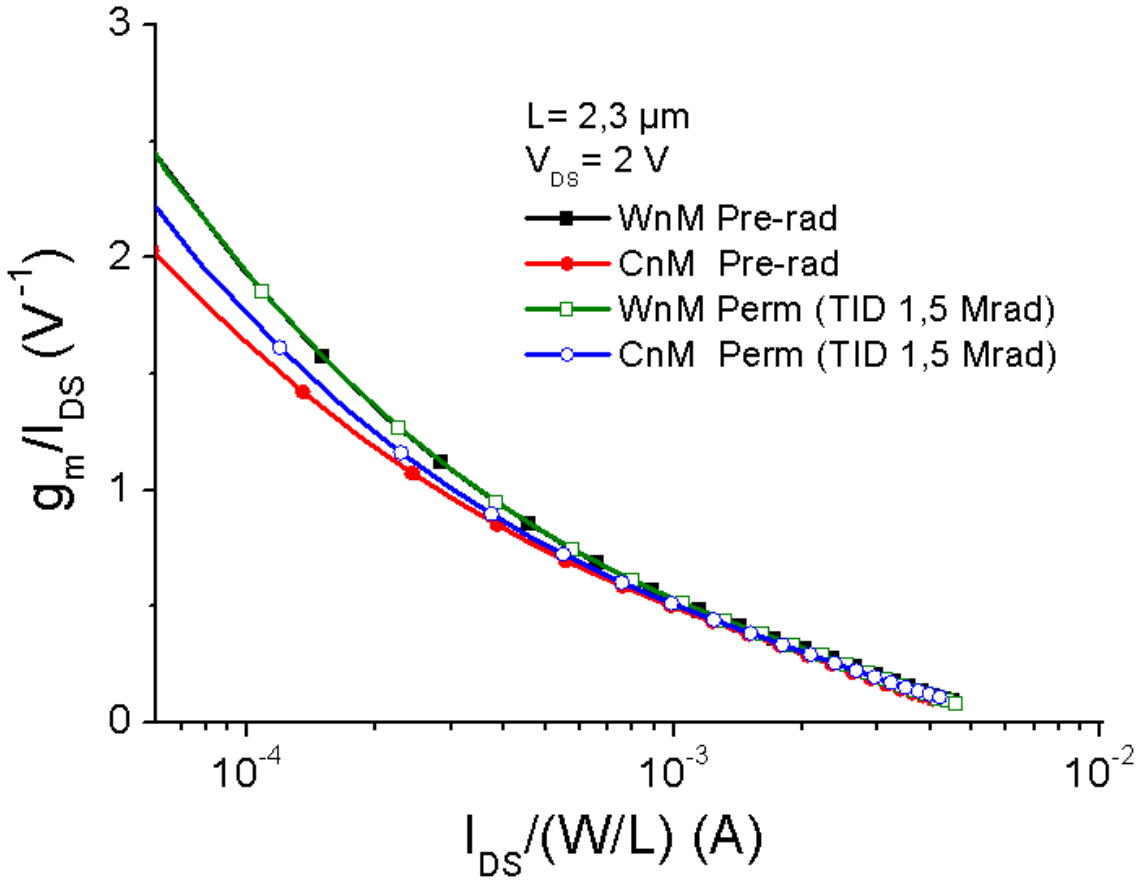

Fonte: Autor

Na Figura 48, pode-se observar que os valores das razões das $g_m/I_{DS}$ do WnM nas diferentes regiões dos regimes de inversão são maiores (inversão fraca: 53%, inversão moderada: 56%, e inversão forte 13%), quando comparado com as do CnM equivalente na condição de pré-radiação. Desta forma, pode-se extrair do WnM um alto ganho no regime de inversão fraca, um significativo compromisso de ganho de tensão e resposta em frequência no regime de inversão moderada, ou uma alta resposta em frequência no regime de inversão forte sem comprometer tanto o ganho de tensão quando comparado ao CnM. Adicionalmente, após uma TID de 1,5 Mrad, considerando uma $I_{DS}/(W/L)$ de $3x10^{-8}$ (A) (região de inversão moderada), o CnM apresentou uma variação de 21%, e uma variação de 8% na região do regime de inversão forte, considerando-se uma $I_{DS}/(W/L)$ de $1x10^{-4}$ (A). Na região do regime de inversão fraca houve uma degradação de 20% para uma $I_{DS}/(W/L)$ de $9x10^{-10}$ (A).

A razão $g_m/I_{DS}$ do WnM praticamente não apresentou nenhuma variação para as regiões dos regimes de inversão moderada e forte, exceto no início da região do regime de inversão fraca, onde houve uma degradação de 40%. Portanto, o estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs pode ser considerado uma excelente alternativa para as aplicações de CIs CMOS analógicos operando em ambientes de radiações ionizantes, quando os mesmos operam nas regiões dos regimes de inversão moderada (bom compromisso entre ganho de tensão e frequência de ganho de tensão unitário) e forte (altos valores de frequência de ganho de tensão unitário ou aplicações em rádio frequência).

A Figura 49 ilustra as curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e dos seu equivalentes CnM, considerando a região do regime de inversão forte, com um L de 2,3 μm, para um $V_{DS}$ de 2 V, e levando-se em conta a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 49 – Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) com o detalhamento do regime de inversão forte para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *Floating*

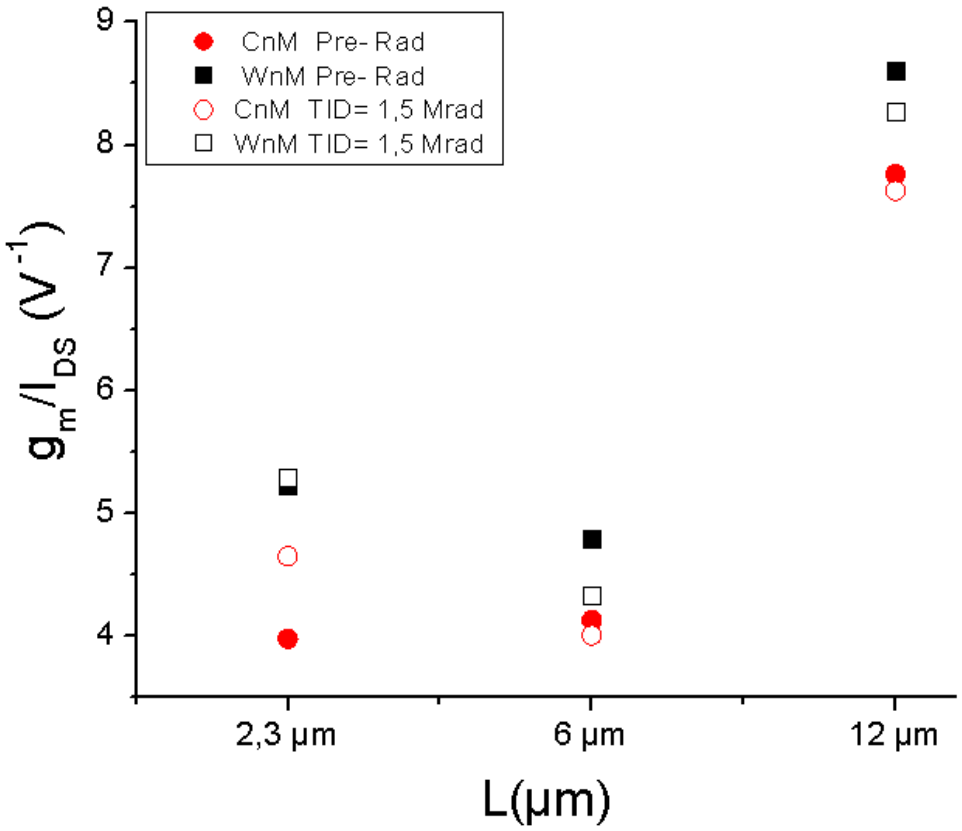



Fonte: Autor

Na Figura 49, pode-se observar que a $g_m/I_{DS}$ do WnM em função da $I_{DS}/(W/L)$ praticamente não apresenta variação na inversão forte, em decorrência da característica de suas regiões de bico de pássaro. Portanto, pode-se concluir que o WnM além de apresentar uma maior $g_m/I_{DS}$ em relação ao convencional equivalente, ele também apresenta uma maior tolerância as radiações ionizantes de raios X (13%).

A Figura 50 apresenta os resultados das $g_m/I_{DS}$ em função dos comprimentos de canal dos dispositivos WnM e CnM equivalentes para diferentes L na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), considerando-se uma $I_{DS}/(W/L)$ de $1x10^{-6}$ (A) (região do regime de inversão moderada), e para um $V_{DS}$ igual a 2 V.

Figura 50 – Resultados experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$ = 2 V e para $I_{DS}/(W/L)$ = $1x10^{-6}$ (A) (região do regime de inversão moderada) na condição de polarização *Floating*



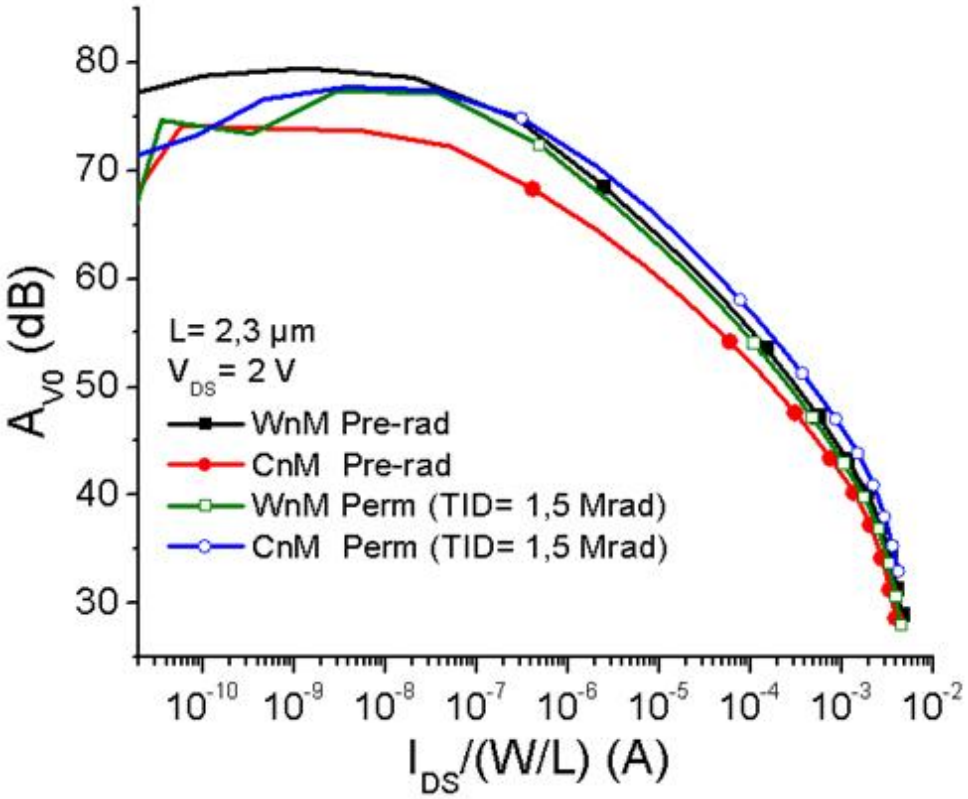

Fonte: Autor

Observando-se a Figura 50, verifica-se que as $g_m/(I_{DS})$ dos WnM para uma $I_{DS}/(W/L)$ de $1x10^{-6}$ (A) são maiores que as dos equivalentes CnMs para todos os comprimentos de canal, levando-se em conta os dados da pré-radiação e depois de uma TID de 1,5 Mrad. Porém, ao analisar somente os MOSFETs com comprimentos de canal de 6 µm e 12 µm, nota-se que o estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs apresentaram maiores variações (12% e 9%, respectivamente) em relação aos convencionais equivalentes (5% e 4%, respectivamente).

### *3.3.1.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nos ganhos de tensão em malha aberta na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 51 apresenta as curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 51 – Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*



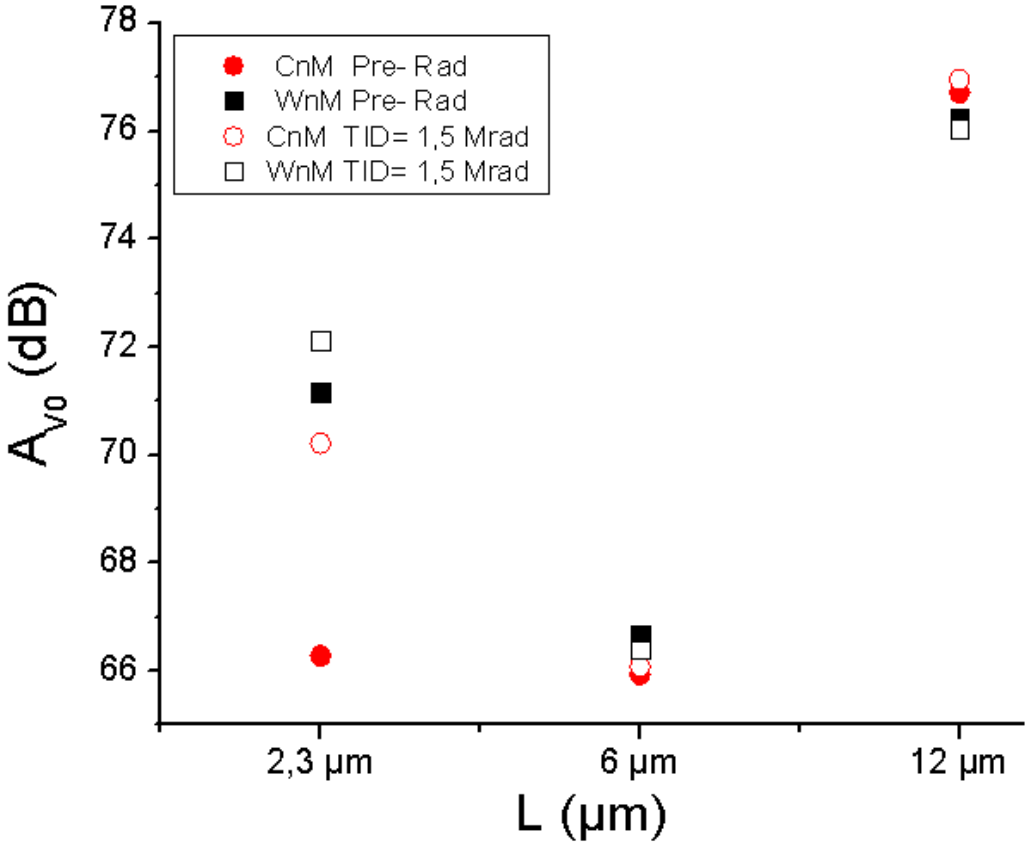

Fonte: Autor

Ao analisar a Figura 51, assim como verificado na Figura 48, observa-se que os $A_{V0}$ do WnM operando nos regimes de inversão moderada e forte são maiores (9% em média) que aqueles observados nos CnM equivalente. Além disso, eles não apresentam praticamente nenhuma variação entre os valores de pré-radiação e após uma TID de 1,5 Mrad, enquanto o CnM equivalente varia cerca de 10%. No regime de inversão fraca, o $A_{V0}$ do WnM apresenta uma maior degradação em relação ao CnM equivalente (16% contra 11%, respectivamente).

Isto indica que para um par diferencial de um OTA, o *Wave* MOSFET deve ter um resultado melhor em termos de $A_{V0}$ (dB) comparado ao CnM, e ainda sua resposta em frequência é superior (Seção 3.3.1.10).

A Figura 52 apresenta os $A_{V0}$ em função dos comprimentos de canal dos WnMs e CnMs equivalentes para diferentes L, na condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), considerando uma $I_{DS}/(W/L)$ igual a $1x10^{-6}$ (A) (regime de inversão moderada), com uma $V_{DS}$ igual a 2 V (*Floating*)

Figura 52 – Resultados experimentais dos $A_{V0}$ em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$=2 V e para $I_{DS}/(W/L)=1x10^{-6}$ (A) na condição de polarização *Floating*




Fonte: Autor

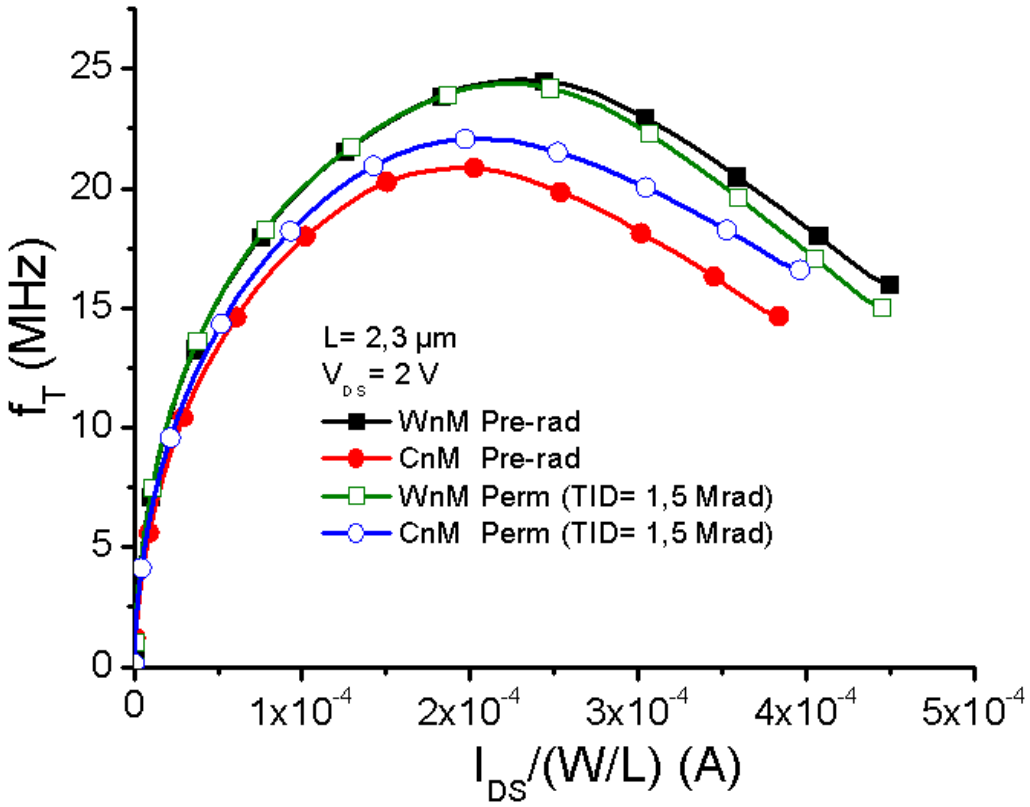
Observando-se a Figura 52, verifica-se que os $A_{V0}$ dos WnM são sempre maiores que os dos CnM equivalentes para todos os comprimentos de canal estudados, com exceção do L igual a 12 μm. Na média, os WnM possuem maiores $A_{V0}$ e menores variações de $A_{V0}$ após as radiações ionizantes de raios X de 1,5 Mrad. Isso pode ser justificado em decorrência das características diferenciadas das regiões de bico pássaros dos WnM, conforme descrito anteriormente.

#### *3.3.1.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas frequências de ganho de tensão unitário na condição de polarização "Floating" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A frequência de ganho de tensão unitário dos dispositivos foi extraída das curvas da transcondutância dividido por $2\pi C_L$, considerando-se um $C_L$ igual a 10pF.

A Figura 53 apresenta as curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 μm e um $V_{DS}$ igual a 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad).

Figura 53 – Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=1,5Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *Floating*

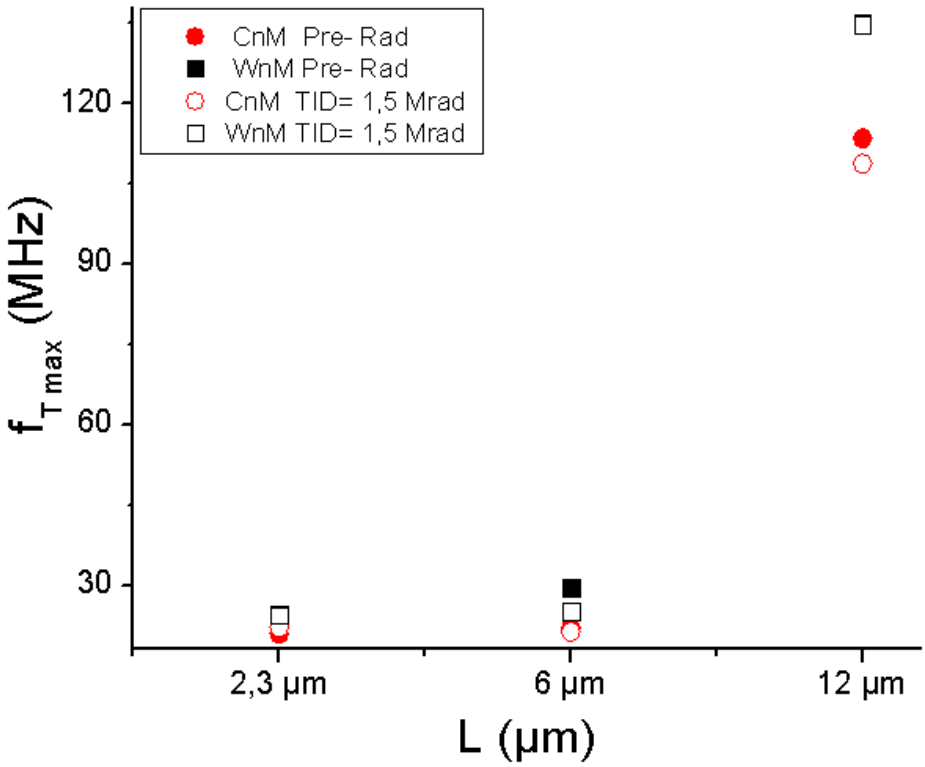



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 53, verifica-se que a $f_T$ do WnM com L de 2,3 µm na condição de pré-radiação, é 23% maior do que a do CnM equivalente, considerando um $I_{DS}$/(W/L) igual a 250 µA (regime de inversão moderada). Além disso, a $f_T$ do WnM praticamente não variou (menos de 2% de variação) após TID de 1,5 Mrad em relação ao valor de pré-radiação, enquanto que o do CnM equivalente variou cerca de 8%.

A Figura 54 apresenta os valores máximos de $f_T$ ($f_{Tmax}$) em função dos comprimentos de canal dos WnMs e CnMs equivalentes nas condições de Pre-rad e Permanente (TID de 1,5 Mrad), considerando-se um $V_{DS}$ de 2 V.

Figura 54 – Resultados experimentais das $f_T$ máximo em função do comprimento de canal para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangulares equivalentes com $V_{DS}$ =2 V na condição de polarização *Floating*




Fonte Autor

Observando-se a Figura 54, verifica-se que as $f_{Tmax}$ dos WnMs sempre apresentam maiores valores que os dos CnM equivalentes (20% em média) e também mostram variações similares a dos CnM equivalentes (5% em média) para todos os comprimentos de canal, tanto na condição de pré-radiação como também após uma TID de 1,5 Mrad. Portanto, o estilo de leiaute de leiaute *Wave* pode ser considerado mais uma alternativa de leiaute para serem usados principalmente nas aplicações de CIs CMOS analógicos de rádio frequência (RF).

### 3.3.2 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudos dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos na condição de polarização *"ON State"* durante o processo de radiações ionizantes

Nesta subseção são apresentados os principais resultados dos efeitos das radiações ionizantes de raios X entre os MOSFETs do tipo *Wave* e de seus equivalentes retangulares

convencionais, na condição de polarização *ON State*, com as correspondentes análises dos resultados.

Neste caso, as simbologias são as mesmas já definidas na seção 3.3.1, com as seguintes diferenças:

a) Perm 1 equivale a TID = 1 Mrad.
b) Perm 2 equivale a TID = 1,5 Mrad.
c) Perm 3 equivale a TID = 2 Mrad.

Em todos os casos são obtidos os valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs obtidos sete dias após as radiações ionizantes de raios X, objetivando-se o estudo dos efeitos da TID nos dispositivos, como explicado anteriormente para condição *Floating*.

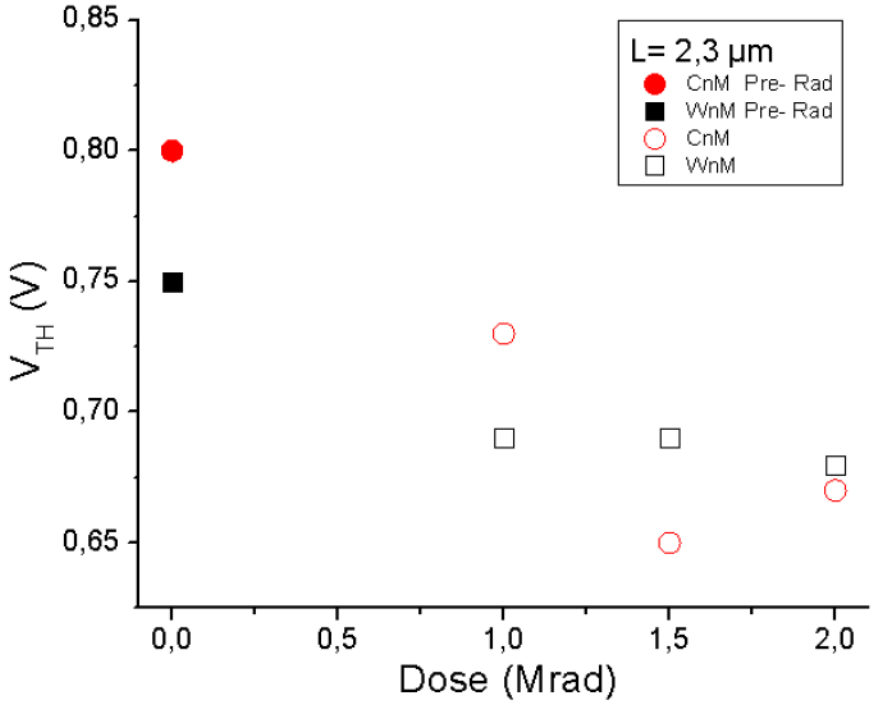
Aqui serão apresentados os resultados experimentais em uma condição de estresse (com polarização). Neste caso a polarização *ON State* foi aplicada durante o procedimento de radiações ionizantes usando o segundo CI, a qual potencializa a criação de um campo elétrico vertical, aumentando o armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e na interface $Si/SiO_2$.

#### *3.3.2.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões de limiar na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

Através do método da segunda derivada da curva da $I_{DS}$ em função de $V_{GS}$, com $V_{DS}$ igual a 10 mV [50], foram extraídas as tensões de limiar dos MOSFETs do *chip* 2 (com encapsulamento e com polarização na condição *ON State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X).

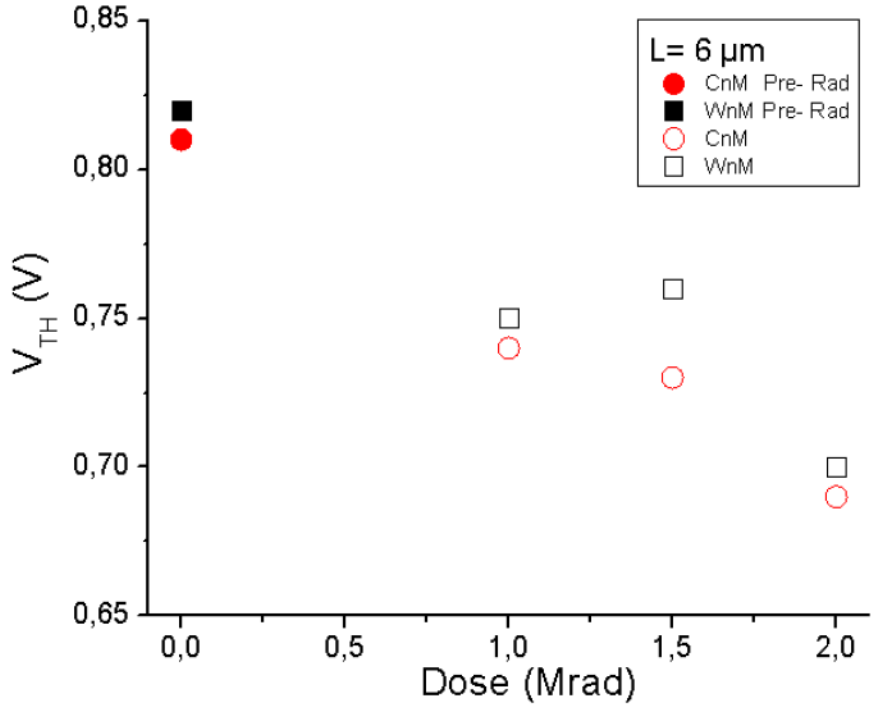
As Figuras 55, 56 e 57 apresentam os resultados experimentais das $V_{THs}$ dos WnMs e dos seus equivalentes CnMs em função da TID para os diferentes dispositivos estudados nesse trabalho de pesquisa.

Figura 55 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *ON State*



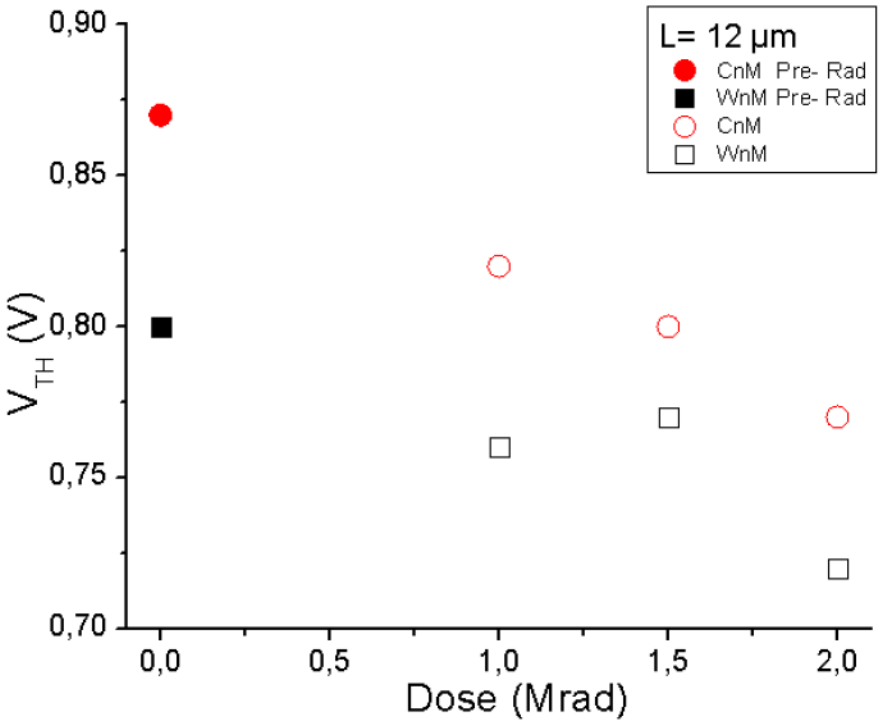

Fonte: Autor

Figura 56 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 µm na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 57 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 µm na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

A Tabela 7 sumariza os valores das $V_{THs}$ dos dispositivos com diferentes comprimentos de canal na condição de polarização *ON State*.

Tabela 7 - Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *ON State* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs

| L (µm) | Dispositivo | Pre-rad | Perm 1 | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 2 | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 3 | $\Delta V_{TH}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 Mrad | 1 Mrad | | 1,5 Mrad | | 2 Mrad | |
| 2,3 | CnM | 0,80 | 0,73 | 8,75 | 0,65 | 18,8 | 0,67 | 16,3 |
| | WnM | 0,75 | 0,69 | 8,0 | 0,69 | 8,0 | 0,68 | 9,3 |
| 6 | CnM | 0,81 | 0,74 | 8,6 | 0,73 | 9,9 | 0,69 | 14,8 |
| | WnM | 0,82 | 0,75 | 8,5 | 0,76 | 7,3 | 0,70 | 14,6 |
| 12 | CnM | 0,87 | 0,82 | 5,7 | 0,80 | 8,0 | 0,77 | 11,5 |
| | WnM | 0,80 | 0,76 | 4,0 | 0,77 | 3,8 | 0,72 | 10,0 |

Fonte: Autor

Na Tabela 7, observa-se que antes do procedimento de radiações ionizantes com raios X (Pre-rad), as $V_{THs}$ dos CnMs e WnMs apresentaram valores próximos (3% de variação em

média). É possível verificar que os WnMs tiveram menor variação da $V_{TH}$ na maioria dos casos após os procedimentos de radiações ionizantes quando comparados aos CnMs, por exemplo, para L igual a 2,3 μm, considerando-se uma TID de 2 Mrad (Perm 3), o CnM e o WnM apresentaram respectivamente: 16,3% e 9,3% de variações quando comparados aos valores de Pre-rad. Portanto, o estilo de leiaute *Wave* foi capaz de mitigar os efeitos das radiações ionizantes no MOSFET em torno de 7% para este caso, com as mesmas condições de polarização e fator geométrico.

Considerando-se a média das variações das $V_{THs}$ para as doses aplicadas em todos os comprimentos de canal, é possível notar uma similaridade dos resultados. Isto acontece porque na condição de polarização *ON State*, tem-se uma maior diferença de potencial entre a porta e o dreno, o qual acaba gerando mais cargas positivas no óxido de porta e na interface Si/SiO2 na região de dreno do WnM que aqueles observados no CnM. Consequentemente, embora os transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro estejam praticamente desativados, a carga no óxido de porta do WnM intensifica a variação na $V_{TH}$ do WnM e acaba ficando bem próxima da variação do CnM.

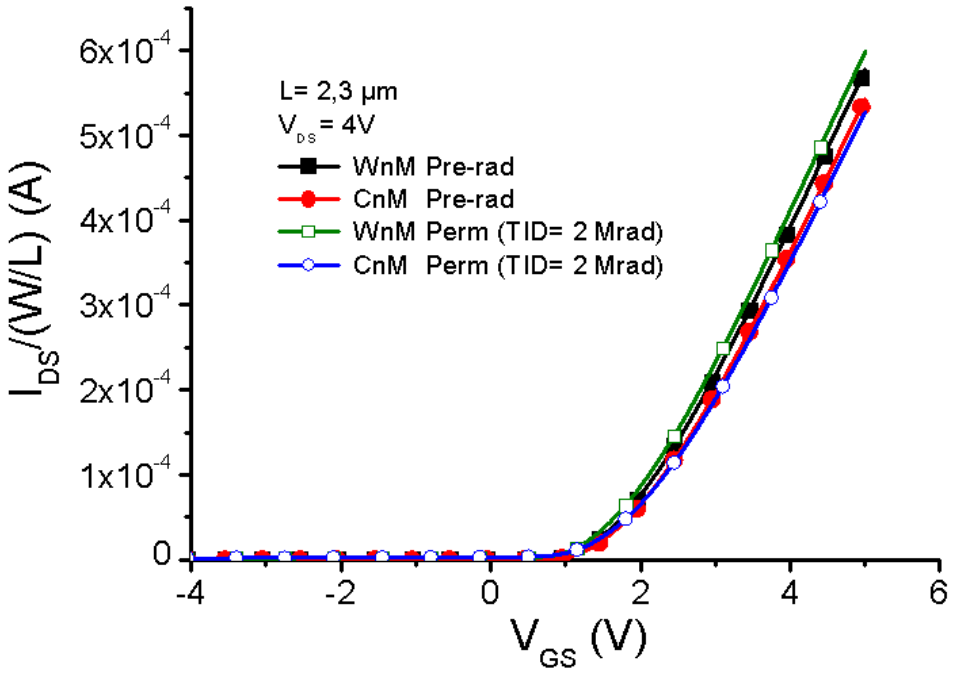
Todavia, nota-se que a resultante da influência dos transistores parasitários no WnM é menor do que no CnM após as armadilhas criadas devido à exposição às radiações ionizantes e, por conta disso, verifica-se uma menor variação das $V_{THs}$ dos WnMs na TID final de 2 Mrad. Percebe-se também que, depois de todas as doses de radiações ionizantes acumuladas, as $V_{THs}$ de todos os dispositivos estudados diminuíram, isto acontece devido às cargas positivas induzidas por radiação ionizante no $SiO_2$. [10,83,84]. Desse modo, conclui-se que as cargas positivas induzidas por radiação ionizante no $SiO_2$ foram o principal motivo para causar a diminuição das $V_{THs}$ na condição *ON State*.

#### *3.3.2.2 Efeitos das radiações ionizantes nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "ON State" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$*

A corrente de dreno foi normalizada em função da razão de aspecto devido às pequenas diferenças das geometrias dos MOSFETs, e isto acontece devido as regras de projeto do processo de fabricação CMOS e da estrutura não convencional de porta do *Wave* MOSFET.

A Figura 58 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 4 V para análise na região de saturação ($V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$), considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 58 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID= 2 Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=4 V, na condição de polarização *ON State*

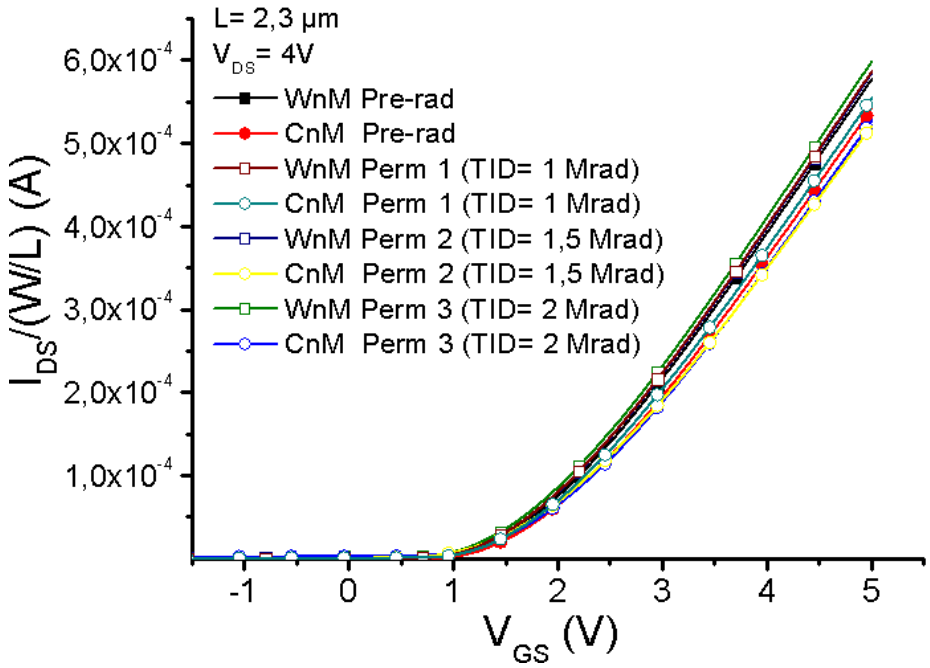



Fonte: Autor

Na Figura 58, verifica-se que para a condição de Pre-rad, a $I_{DS}/(W/L)$ do WnM é 10% maior do que a observada no CnM para região de saturação, e isto se deve as características geométricas e elétricas do WnM explicadas anteriormente. Além disso, para uma TID de 2 Mrad, o WnM tem uma variação média de 4% da $I_{DS}/(W/L)$ positiva e o CnM 4% negativa. Em termos de variação da corrente de dreno, o estilo de leiaute *Wave* não influenciou essa análise quando comparado ao retangular equivalente. Os resultados na região Triodo apresentaram as mesmas tendências.

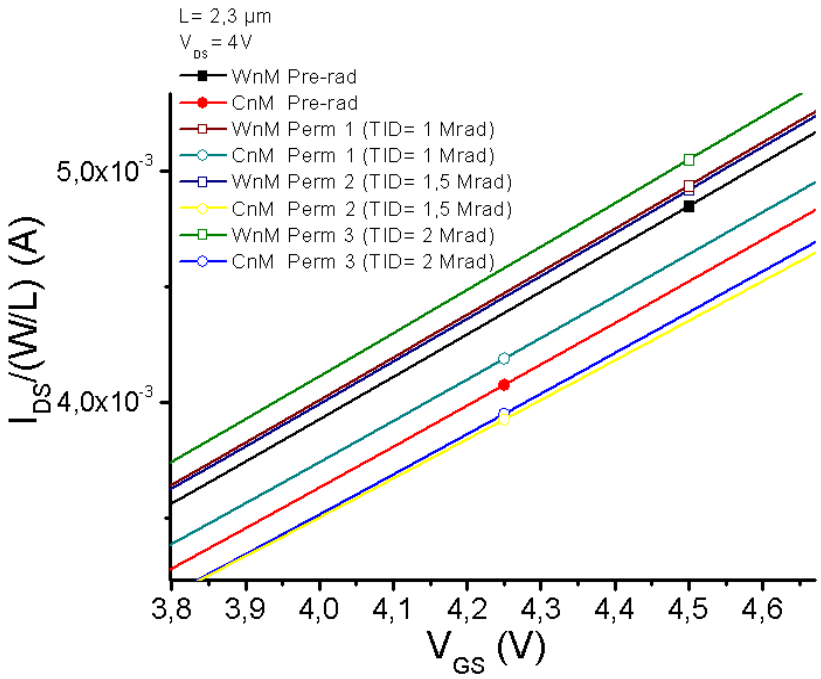
Para uma análise mais detalhada, nas Figuras 59 e 60, respectivamente, são apresentadas as curvas de $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$, considerando-se um $V_{DS}$ de 4 V (região de saturação), considerando-se as diferentes TID realizadas.

Figura 59 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e Perm TID 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad para L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 4 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 60 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ ampliadas para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=4 V, na condição de polarização *ON State*

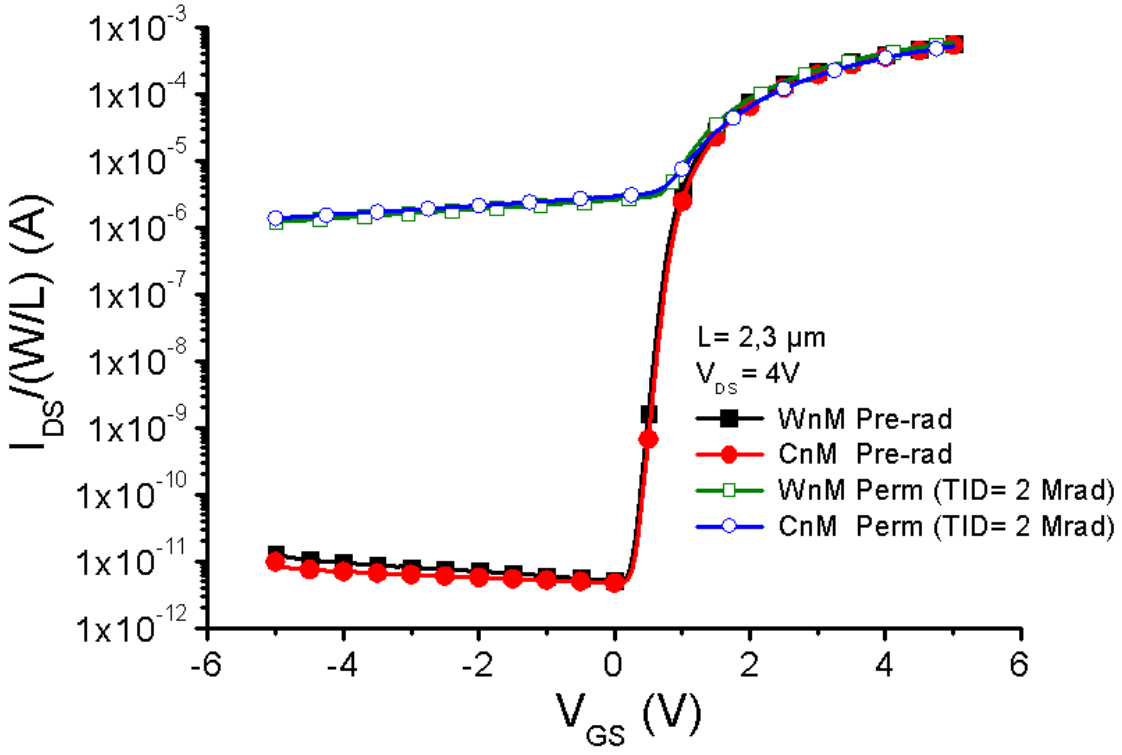



Fonte: Autor

Nas Figuras 59 e 60, verifica-se que após as TID, considerando a média de todas as variações dos dispositivos, o CnM e o WnM variam 2,8% e 3,2%, respectivamente. Portanto, as características geométricas do *Wave* não influenciaram os resultados analisados quando comparado aos equivalentes de porta retangular, já que ambos possuem variações similares após uma TID de 2 Mrad na condição de polarização *ON State.* Lembrando, que ainda são mantidos os melhores desempenhos das $I_{DS}$/(W/L) do WnM quando comparados ao CnM da condição Pre-rad.

A Figura 61 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ dos WnMs e dos equivalentes CnMs, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual a 4V para análise da corrente de estado desligado ($I_{OFF}$), considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 61 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=4V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*

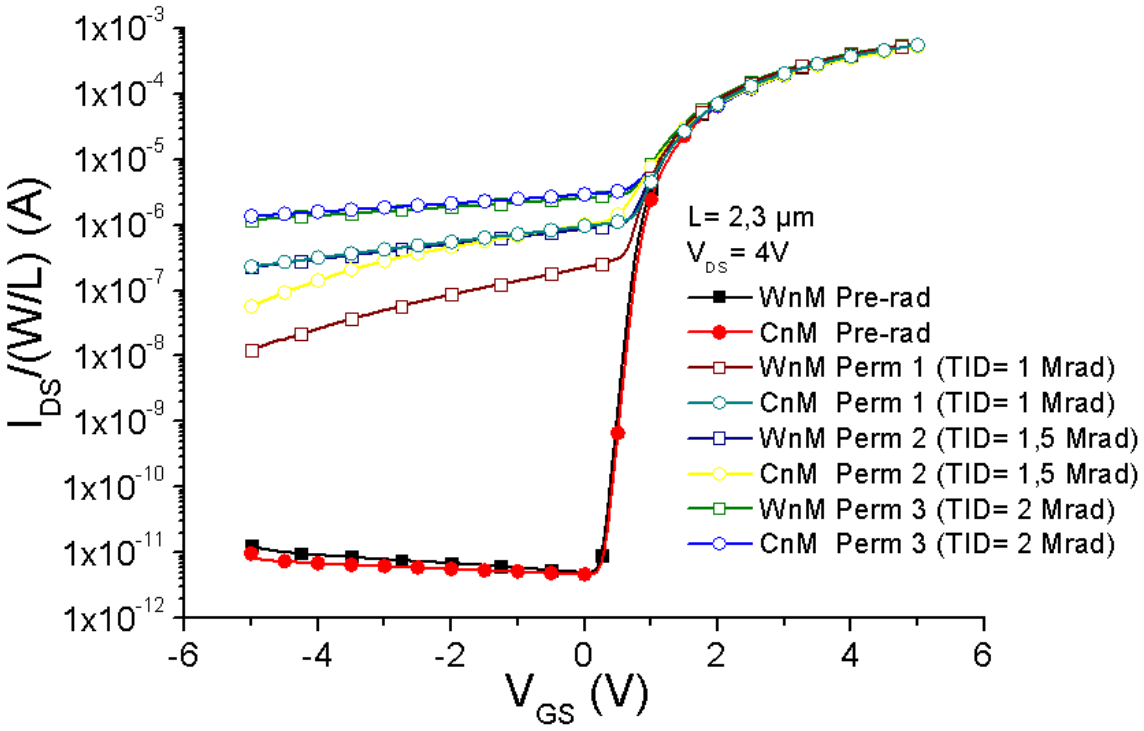



Fonte: Autor

Este resultado da Figura 61 demonstra o quanto ficou degradada a corrente $I_{OFF}$ dos dispositivos CnM e WnM para TID de 2 Mrad, e isto acontece devido às cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes no $SiO_2$ e na interface Si/ $SiO_2$.

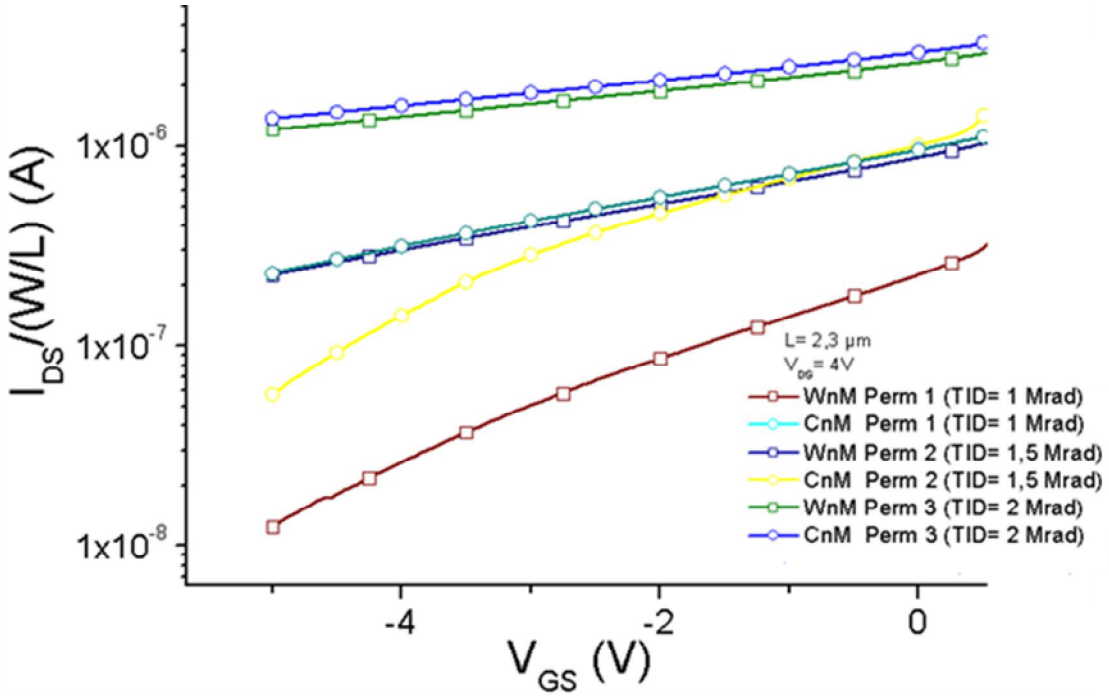
A partir das Figuras 62 e 63, verifica-se que após todos os procedimentos de radiações ionizantes, as $I_{OFF}$ dos dispositivos são alteradas de forma semelhante.

Figura 62 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$=4 V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 63 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ ampliadas para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$=4V, para análise da $I_{OFF}$, na condição de polarização *ON State*

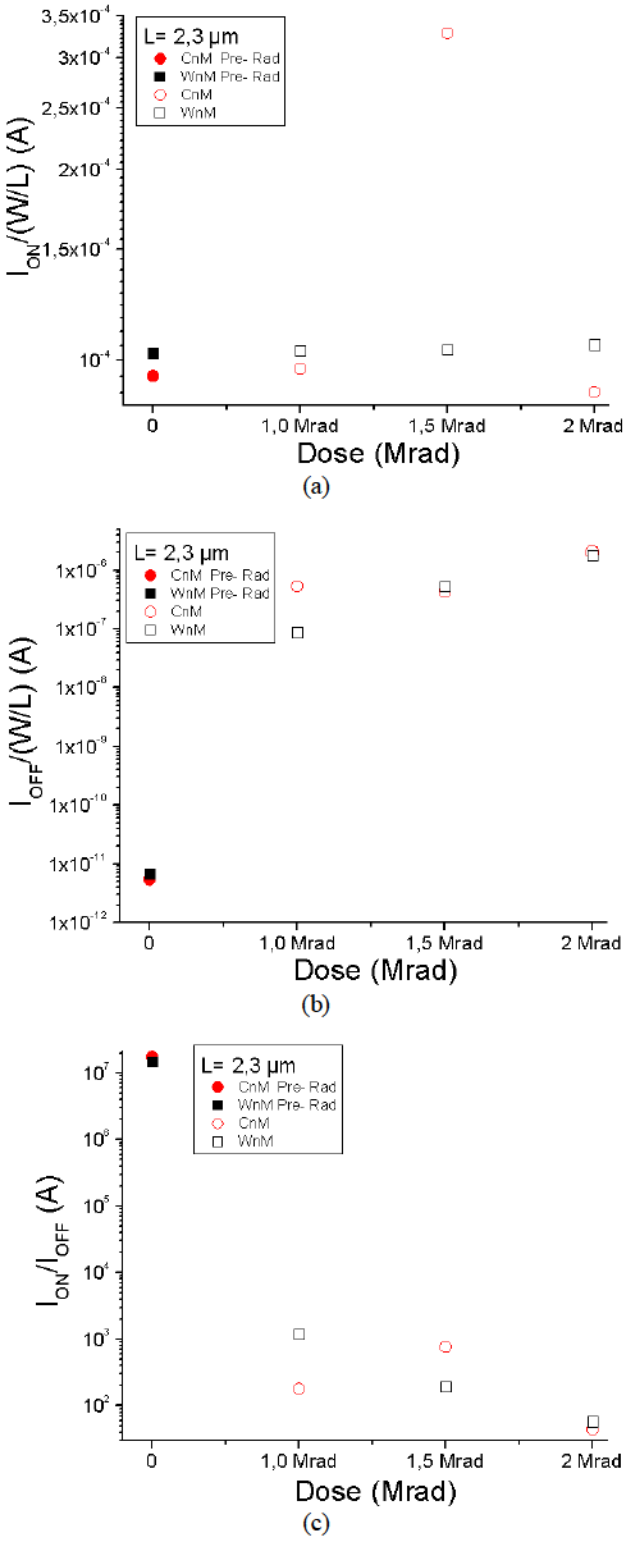



Fonte: Autor

Considerando a média das variações das $I_{OFF}$, após todos os três procedimentos de radiações ionizantes com L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ de 4 V, a $I_{OFF}$ do CnM degrada mais (valores mais altos) e tem maiores variações em comparação aos dos WnM equivalentes, em especial após o Perm 1.

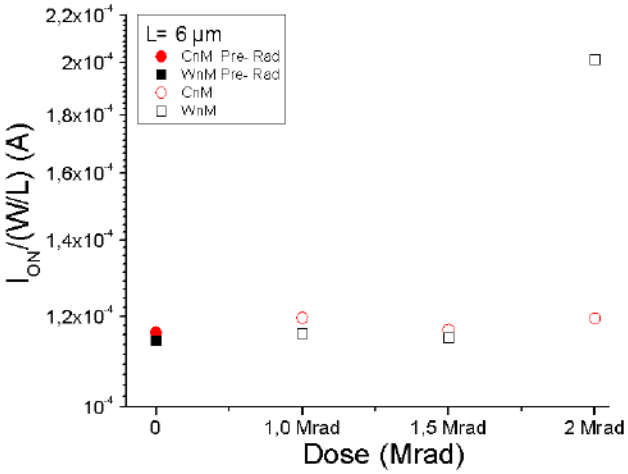
As figuras de mérito ilustradas pelas Figuras 64, 65 e 66, respectivamente, ajudam a visualizar a variação da $I_{ON}$ (para $V_{DS}$= 0,4V), da $I_{OFF}$ (para $V_{DS}$= 4V) e da razão $I_{ON}/I_{OFF}$ para cada comprimento de canal e para cada dose de radiações ionizantes (totalizando uma TID igual a 2 Mrad).

Figura 64 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm, na condição de polarização *ON State*

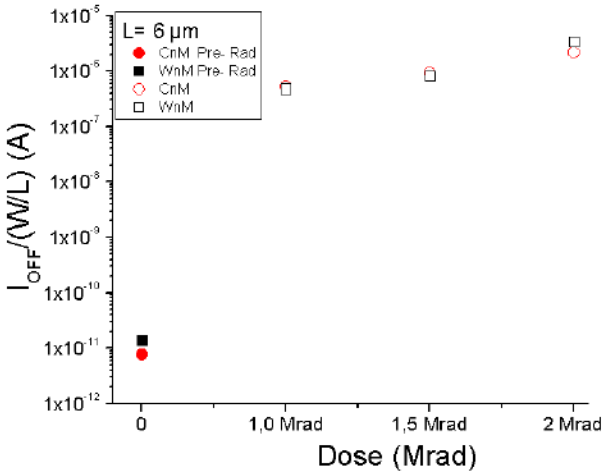



Fonte: Autor

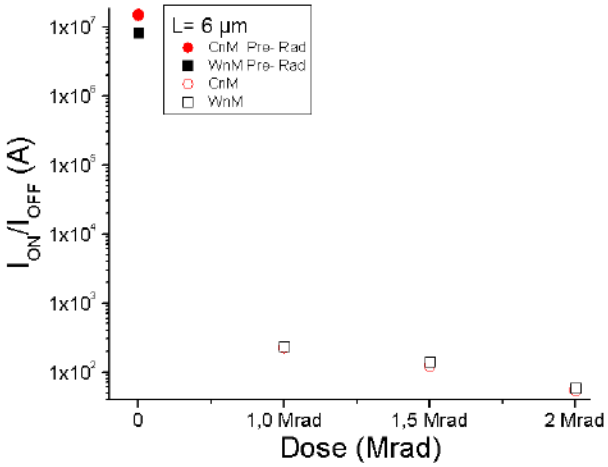
Figura 65 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm, na condição de polarização *ON State*




(a)



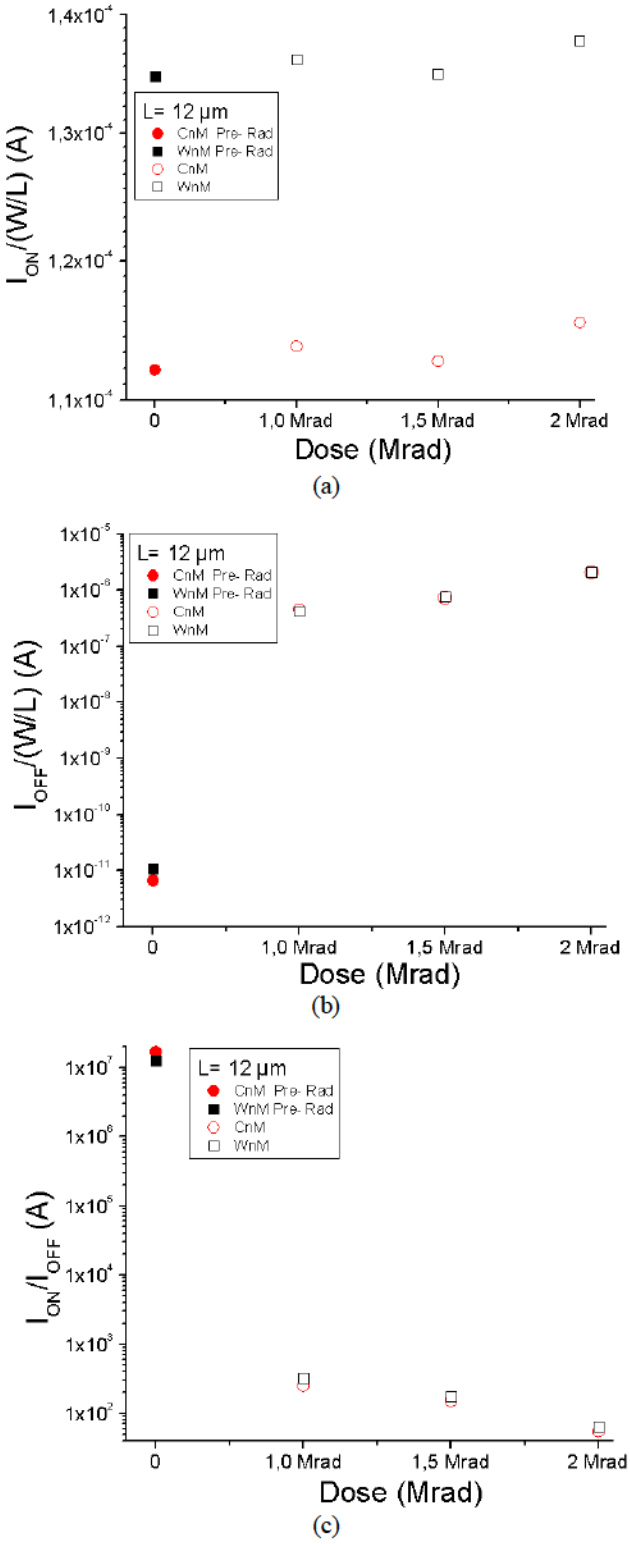

(b)




(c)

Fonte: Autor

Figura 66 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Através das análises das Figuras 64, 65 e 66, pode-se concluir que as razões $I_{ON}/I_{OFF}$ dos dispositivos foram degradadas levando-se em conta todas as TID. Neste procedimento criaram-se mais cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes no $SiO_2$ (diminuições dos valores das $V_{THs}$ dos dispositivos) do que na interface $Si/SiO_2$ (devido ao alto campo elétrico vertical criado durante o procedimento de radiações ionizantes.

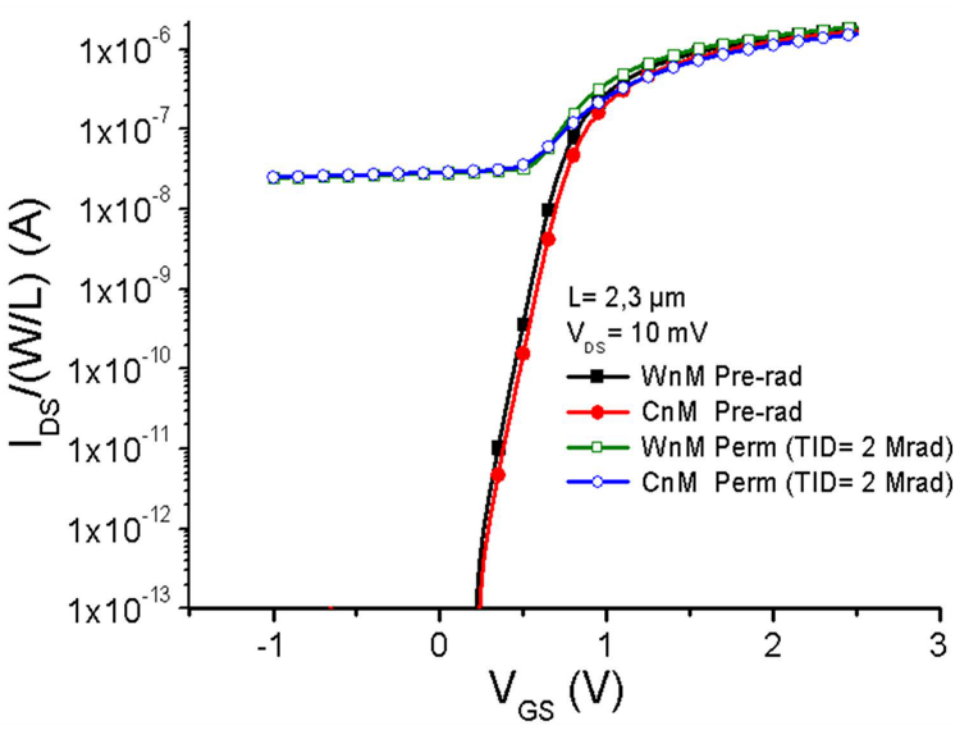
No entanto, ainda assim o WnM foi capaz de apresentar maior tolerância as radiações ionizantes. Considerando-se a média dos resultados, verifica-se que as $I_{ON}$ dos CnMs variaram em 36% enquanto as dos WnMs variaram em 9%. Com relação as $I_{OFF}$ dos dispositivos, observa-se um aumento dos CnMs de 4,4 vezes enquanto dos WnMs foram de 4 vezes, ambos levando-se em conta a média dos resultados. Analisando-se as razões $I_{ON}/I_{OFF}$, observa-se variações de 102% para o CnM e de 74% para o WnM em média. Mesmo que o WnM apresenta maior tolerância quando comparado com o CnM na condição de radiações ionizantes com polarização *ON State* para os parâmetros elétricos apresentados acima, ele não eleva sua tolerância contra as radiações ionizantes para estes parâmetros como aquela observada da condição *Floating*, pois existiram mais cargas na região de óxido de porta em decorrência da polarização entre porta e dreno durante o procedimento de radiações ionizantes.

#### *3.3.2.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinações de sublimiar na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A inclinação sublimiar dos dispositivos foi extraída da curva dos logaritmos da $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para $V_{DS}$ = 10 mV.

A Figura 67 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ dos WnMs e dos equivalentes CnMs, para L de 2,3 μm e com $V_{DS}$ igual a 10 mV para análise da inclinação de sublimiar, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 67 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2Mrad com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

A Tabela 8 sumariza os valores da inclinação sublimiar (S) dos dispositivos de L= 2,3 µm com na condição de polarização *ON State.*

As equações 10, 11 e 12 foram usadas para calcular as variações das inclinações sublimiares da Tabela 5.

Tabela 8 - Comportamento das inclinações de sublimiar do WnM e do seu respectivo CnM equivalente para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 1,5 Mrad), assim como suas variações em função da TID, para L= 2,3µm e considerando-se a condição de polarização *ON State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X

| L (µ m) | Condição | Pre-rad | Perm 3 | Variação em % depois do TID para o CnM e WnM |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 2 | |
| | | | | **Δ S ' %** |
| **2,3** | S do CnM (mV/dec) | 106 | 586 | 453% |
| | S do WnM (mV/dec) | 101 | 453 | 349% |
| | **Δ S%** | -4,7% | -23% | **Δ S '' %** |

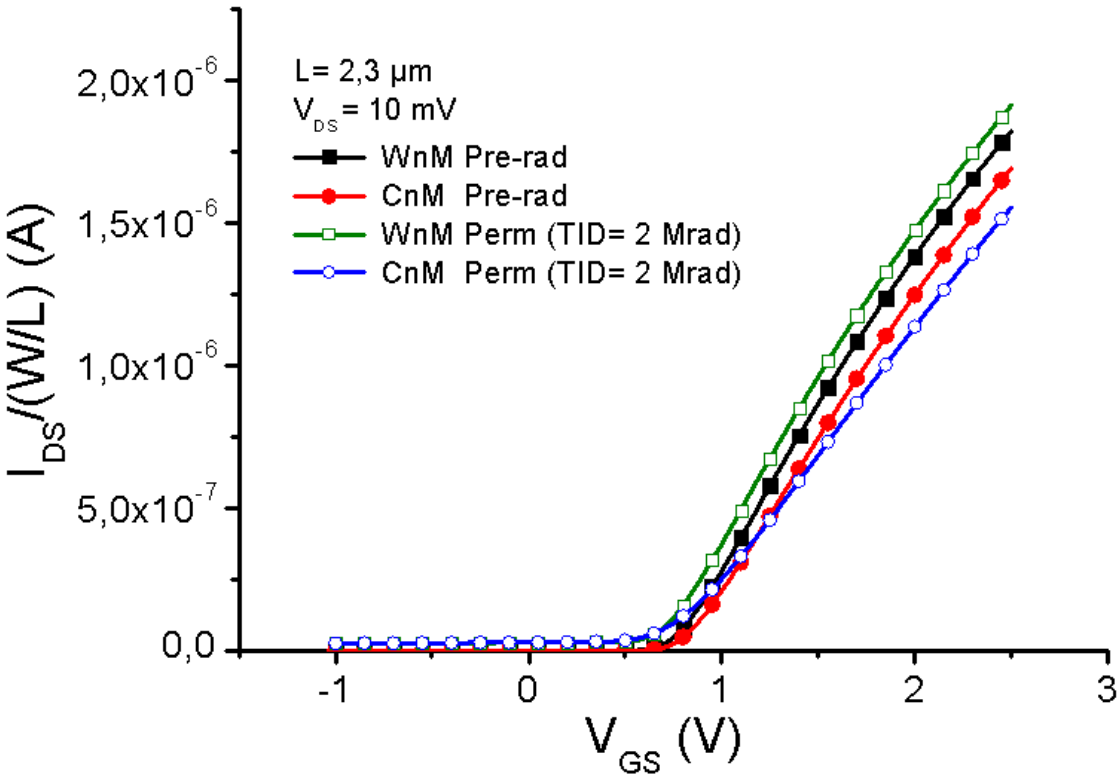
Fonte: Autor

Ao analisar a Tabela 8, verifica-se que a inclinação sublimiar é similar entre o WnM e o CnM equivalente na condição Pre-rad, uma diferença menor de 5%.

Após o procedimento de radiações ionizantes na condição Perm TID 2 Mrad, observa-se que os dispositivos tiveram uma grande variação com relação ao Pre-Rad, todavia, o WnM teve uma menor variação dessa característica elétrica, 349% contra 453% de variação do CnM.

A Figura 68 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$ igual a 10 mV para análise da degradação da curva $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS,}$ considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 68 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2Mrad, com L= 2,3 µm e com $V_{DS}$ = 10m V, na condição de polarização *ON State*



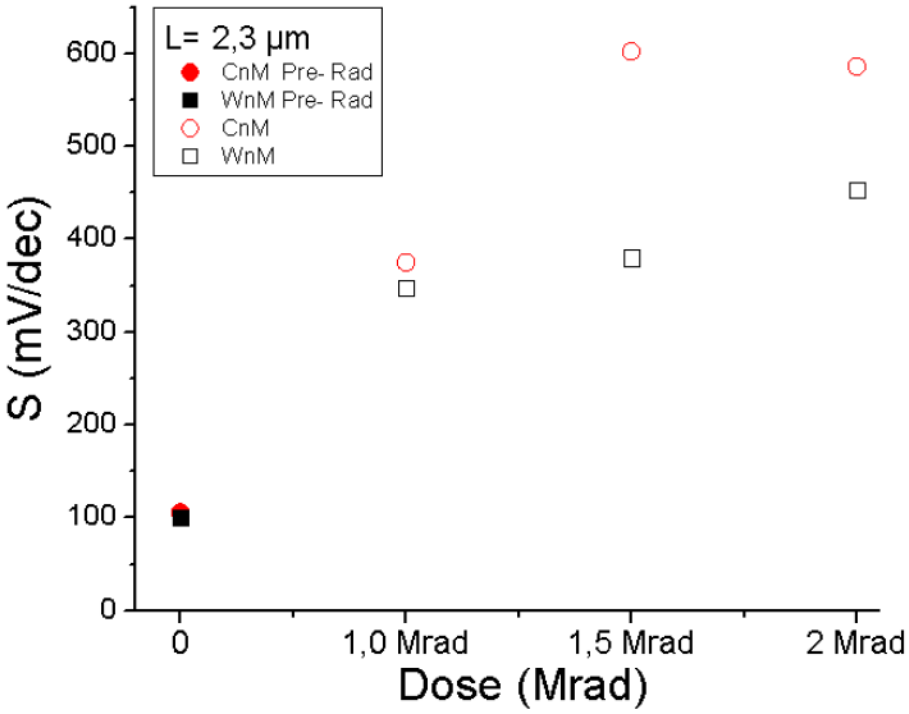

Fonte: Autor

A Figura 68 ilustra a variação do CnM quando comparado ao WnM. A seção 3.3.2.1 demonstra claramente a variação da $V_{TH}$ em cerca de 16,3%, ou seja, o CnM é mais suscetível às cargas positivas induzidas por radiações ionizantes nas BBRs. O estilo de leiaute *Wave* é

menos exposto aos transistores parasitários das BBRs devido a menor influência do campo elétrico longitudinal naquela área, pois o mesmo é radial em relação às BBRs.

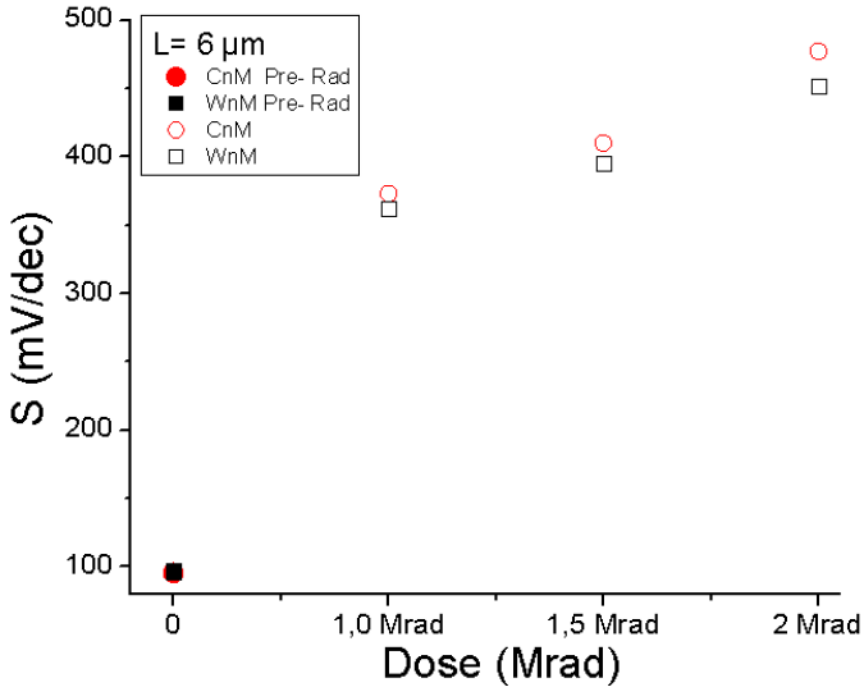
As Figuras 69, 70 e 71 apresentam os resultados de S (mV/dec) em função das doses de radiações ionizantes para o WnM e CnM equivalentes de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm, respectivamente.

Figura 69 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm, na condição de polarização *ON State*



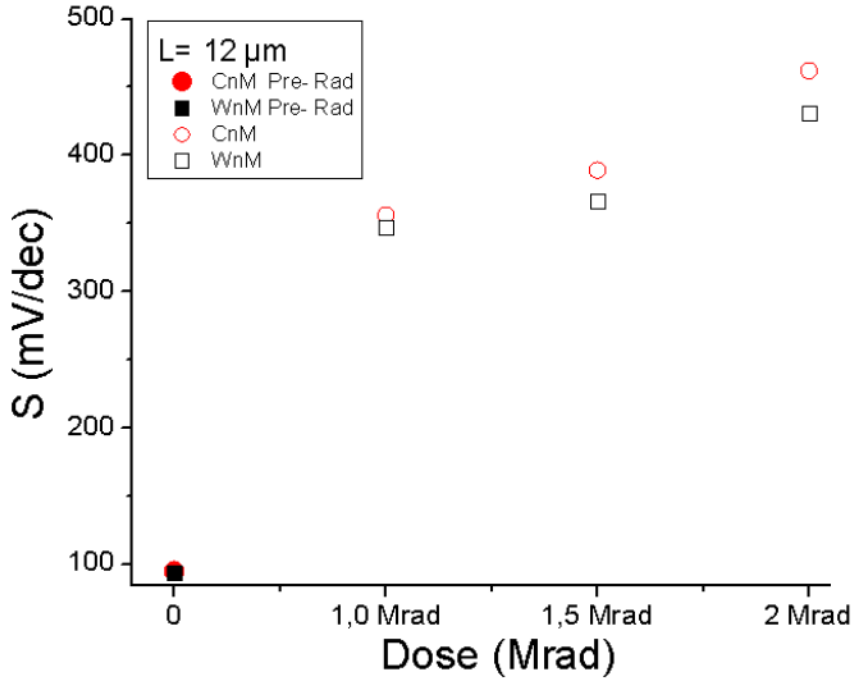

Fonte: Autor

Figura 70 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 71 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Com a análise das Figuras 69, 70 e 71, os resultados corroboram com as conclusões apresentadas. O WnM possui menor variação da S (mV/dec) a cada dose de radiações ionizantes comparado ao CnM (90% e 102% em média, respectivamente). Este resultado mostra que o estilo de leiaute *Wave* tem uma menor suscetibilidade aos efeitos da TID, ou seja, uma menor variação da inclinação sublimiar após a exposição às radiações ionizantes, justamente pela diferente influência dos transistores parasitários nas BBRs.

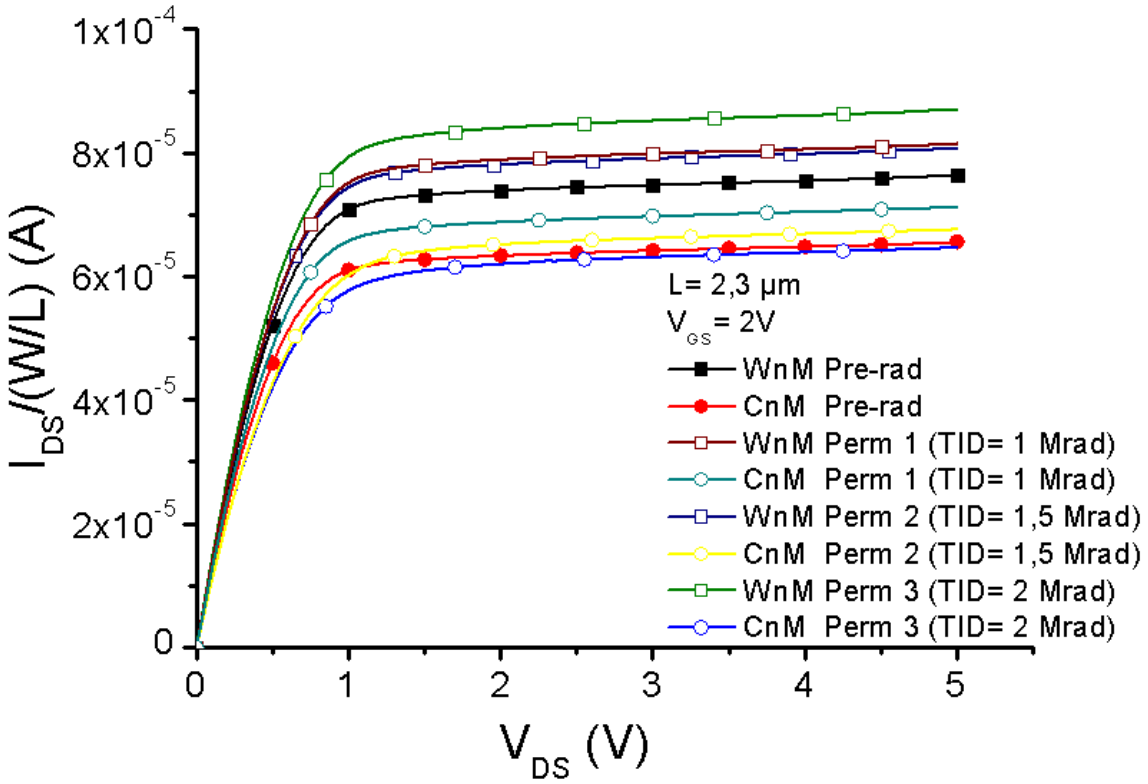
#### *3.3.2.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A corrente de dreno normalizada em função do fator geométrico [$I_{DS}/(W/L)$] em função de $V_{DS}$ dos MOSFETs dos tipos *Wave* e convencionais equivalentes de porta retangular é usada para extrair importantes parâmetros dos dispositivos visando às implementações analógicas e digitais, tais como a corrente de dreno normalizada pelo fator geométrico em função da tensão de dreno, a tensão *Early* e a resistência série entre fonte e dreno de estado ligado, entre outras.

As $I_{DS}$ dos dispositivos foram normalizadas em função da razão de aspecto para eliminar as pequenas diferenças das geometrias dos MOSFETs, decorrentes das regras de projeto do processo de fabricação de CIs CMOS e da estrutura não convencional de porta do *Wave* MOSFET.

A Figura 72 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ do WnM e do equivalente CnM, para um L de 2,3 µm e com $V_{GS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad, Perm 1, 2 e 3.

Figura 72 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L= 2,3 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Na Figura 72, verifica-se que a $I_{DS}/(W/L)$ de saturação do WnM é 16% maior do que aquele encontrado no seu CnM equivalente na condição Pre-rad. Após o Perm 3 (TID igual a 2 Mrad), a $I_{DS}/(W/L)$ de saturação do WnM é 36% maior que aquela encontrada no CnM equivalente.

Este resultado é muito importante para se entender o comportamento elétrico do WnM comparado ao CnM. Além do WnM apresentar um valor maior da $I_{DS}/(W/L)$ na região Triodo ($I_{DS_tri}$), é possível observar que esse parâmetro continua sendo maior na região de saturação em comparação ao do CnM equivalente. Além disso, após uma TID de 2 Mrad, a média das variações do WnM foi de 24,5%, enquanto que a do CnM equivalente foi de 12,7%. A corrente $I_{DS}/(W/L)$ de saturação do WnM aumentou em decorrência de uma maior quantidade de cargas positivas induzidas pelo processo de radiações ionizantes no óxido de porta, que fez com que reduzissem as $V_{THs}$ desses dispositivos (Tabela 7) e não ocorreu a degradação da mobilidade do canal em decorrência de não ter havido cargas positivas na interface $Si/SiO_2$ em quantidade suficiente para que isso acontecesse. No entanto, no CnM equivalente, verifica-

se que a sua $V_{TH}$ também reduziu, isso tenderia a fazer com que sua $I_{DS}/(W/L)$ de saturação também aumentasse, porém em decorrência das cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes na interface $Si/SiO_2$, isso fez com que a mobilidade dos portadores na região de canal desses dispositivos fosse fortemente degradada.

Considerando-se a média das variações das $I_{DS_sat}$ e das $I_{DS_tri}$ dos diferentes MOSFETs para todas as TID, é possível notar que ambos apresentaram variações similares, ou seja, houve uma variação média desse parâmetro em 3% para o WnM (aumento) e para o CnM (redução).

#### *3.3.2.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

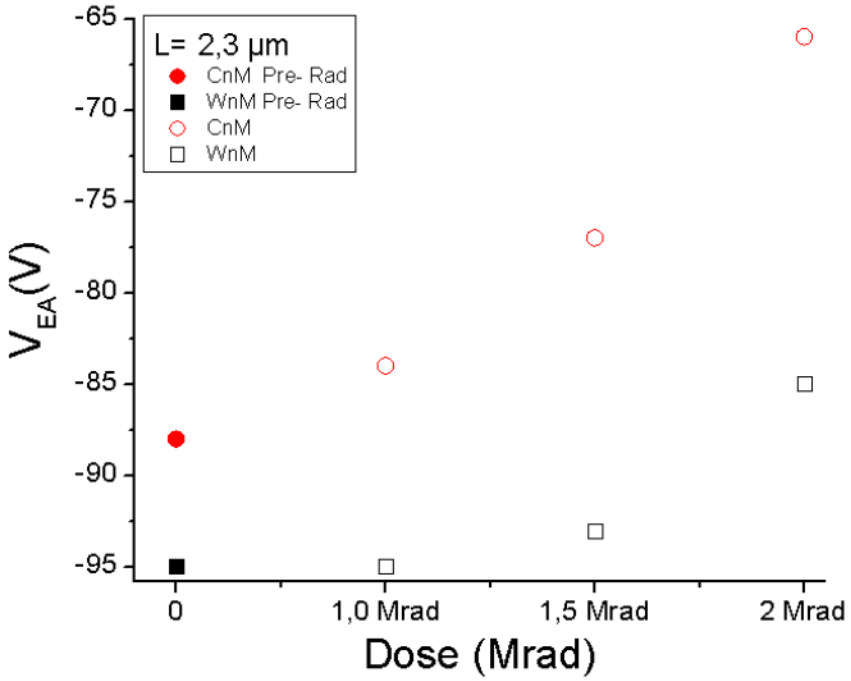
A tensão *Early* ($V_{EA}$) foi extraída a partir da curva $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ com os dispositivos encapsulados para o Pre-Rad e, depois, para o mesmo dispositivo na condição Permanente, o qual foi irradiado com polarização *ON State* durante o procedimento das radiações ionizantes.

Observa-se que para L de 2,3 µm e com $V_{GS}$ igual a 2 V, o WnM e o CnM apresentam um comportamento similar no Pre-rad, 95 V e 88 V (em módulo), respectivamente. Portanto, mesmo com um $I_{DS_sat}$ 15% superior (na média entre todos os comprimentos de canal), a tensão *Early* não fica degradada, pois o *Wave* MOSFET apresenta um campo elétrico longitudinal resultante na região de dreno maior que o do convencional equivalente e consequentemente gera uma corrente de dreno de saturação normalizada em relação a razão de aspecto maior que a do CnM equivalente e, portanto, gera esse resultado.

Além disso, após a TID de 2 Mrad, a $V_{EA}$ do WnM é igual a 85 V em módulo (variação de 10%) e a $V_{EA}$ do CnM é igual a 66 V em módulo (variação de 25%), ou seja, o WnM tem um comportamento elétrico superior na condição Permanente, pois tem uma tensão *Early* menor e variou menos. O CnM é mais sensível à radiação ionizante total que o WnM que pouco variou após a TID. O melhor resultado do WnM pode ser justificado devido às características do estilo de leiaute *Wave* quando comparado ao convencional de porta retangular (já explicado anteriormente).

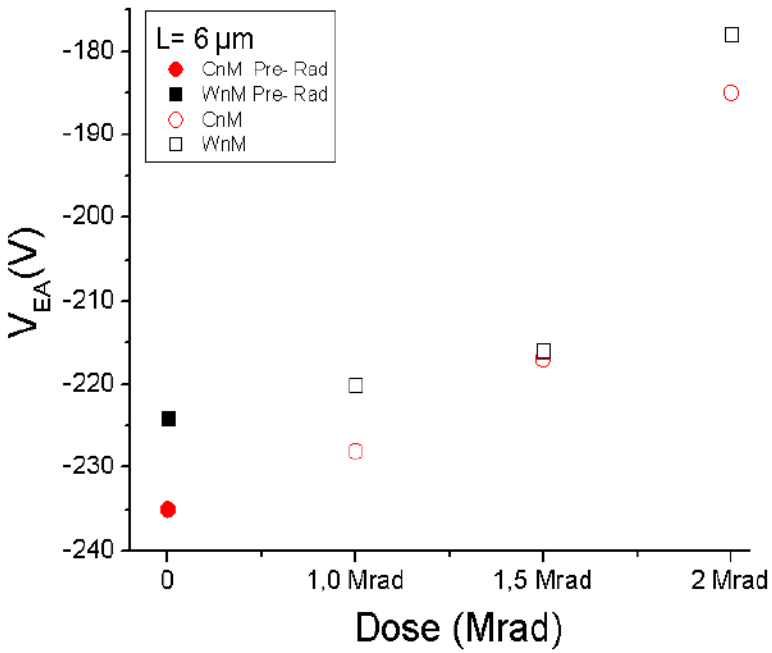
As Figuras 73, 74 e 75 apresentam os resultados das $V_{EA}$ dos CnMs e do WnMs em função das doses permanentes de 1 Mrad, 1,5 Mrad e 2 Mrad para os diferentes comprimentos de canal.

Figura 73 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*



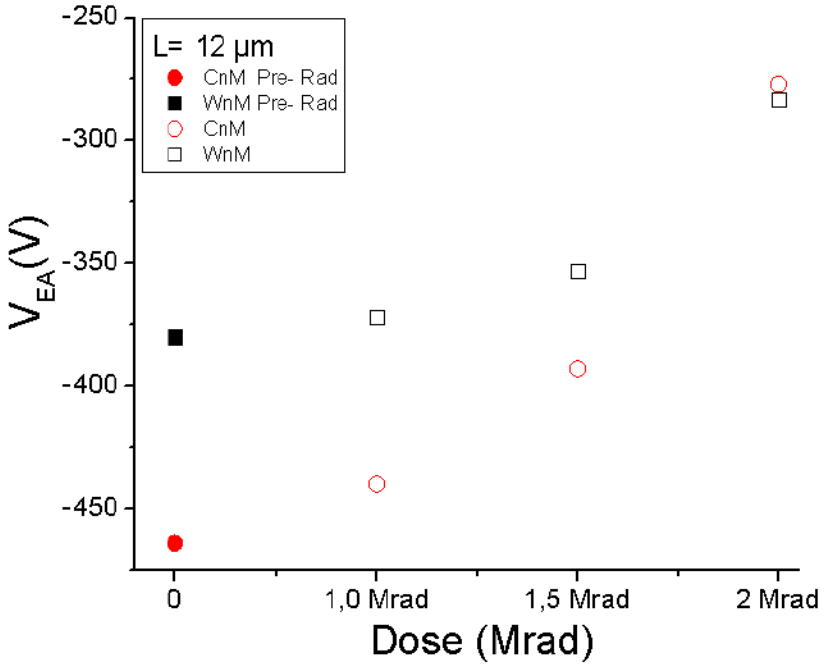

Fonte: Autor

Figura 74 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 75 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{GS}$=2V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Analisando-se as Figuras 73, 74 e 75, os WnMs variam menos sua tensão *Early* quando comparado aos CnM equivalente. Considerando-se a TID final de 2 Mrad, o WnM mantém um valor melhor (mais baixo de tensão *Early*) para os WnMs de 2,3 µm e 12 µm. O WnM de 2,3 µm tem melhor resultado e varia menos sua tensão *Early* a cada dose de radiação ionizante quando comparado ao CnM. No WnM de 6 µm houve uma maior dependência da corrente dreno na saturação em relação a tensão de dreno quando comparado ao CnM de 6 µm, e isto foi observado do Pre- rad até a TID final de 2Mrad. O WnM de 12 µm, assim como no WnM de 6 µm, também possui um resultado pior comparado ao CnM (exceto para a TID de 2Mrad), porém o WnM de 12 µm teve uma variação menor deste parâmetro elétrico após cada dose de radiações ionizantes.

O *Wave* MOSFET, em média, sofreu menos variação a cada dose comparado ao CnM (11% e 6%, respectivamente) e mostrou-se mais tolerante aos efeitos da radiação ionizante, especialmente no L de 2,3 µm. O melhor resultado do WnM pode ser justificado devido às características do estilo de leiaute *Wave*, onde as armadilhas criadas neste dispositivo após o procedimento de radiações ionizantes de raios X foram menos influentes.

#### *3.3.2.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A resistência série de estado ligado dos dispositivos foi obtida da parte linear da região Triodo da curva da $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$, parametrizada em função do valor de $V_{GS}$.

A Tabela 6 ilustra os valores da resistência série em estado ligado ($R_{ON}$) dos dispositivos com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *ON State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X.

Tabela 9 - Comportamento de $R_{ON}$ para a condição de Pre-rad e Perm (TID de 2 Mrad), assim como suas variações em função da TID, considerando-se um L de 2,3µm na condição de polarização *ON State* durante o processo de radiações ionizantes de raios X

| L (µ m) | Condição | Pre-rad | Perm 3 | **Variação em % depois do TID para o CnM e WnM** |
|---|---|---|---|---|
| | Dose (Mrad) | 0 | 2 | |
| **2,3** | | | | **$\Delta R_{ON}$' %** |
| | $R_{ON}$ do CnM(KΩ) | 11,1 | 12,2 | 9,9% |
| | $R_{ON}$ do WnM (KΩ) | 9,4 | 8,7 | -7,4% |
| | **$\Delta R_{ON}$%** | -15,3% | -31,2% | **$\Delta R_{ON}$'' %** |

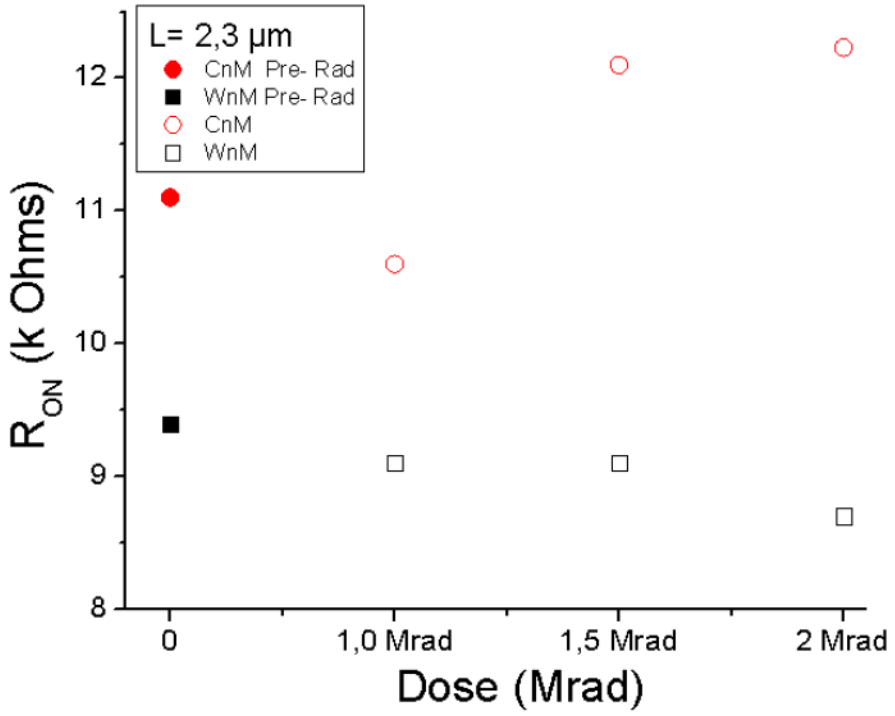
Fonte: Autor

Observando-se os resultados da Tabela 9, verifica-se que na condição de Pre-rad, o valor da $R_{ON}$ do WnM é menor quando comparado a $R_{ON}$ do CnM (15% menor). O WnM mantém um resultado ainda melhor que o CnM após a TID de 2 Mrad, $R_{ON}$ 31% menor. As variações são similares 9,9% para o CnM e 7,4% para o WnM, mas ao passo que o WnM melhora seu valor absoluto, o CnM degrada. Isto denota que o WnM apresenta um melhor resultado para este parâmetro elétrico quando comparado ao CnM.

Os resultados apresentam um melhor desempenho do *Wave* com relação convencional equivalente de porta retangular considerando-se as mesmas condições de polarização e o fator geométrico para diferentes valores de $V_{GS}$, portanto, o WnM pode ser mais uma opção de aplicação para circuitos integrados digitais, levando-se em conta $R_{ON}$, com quase nenhuma degradação após TID de 2 Mrad.

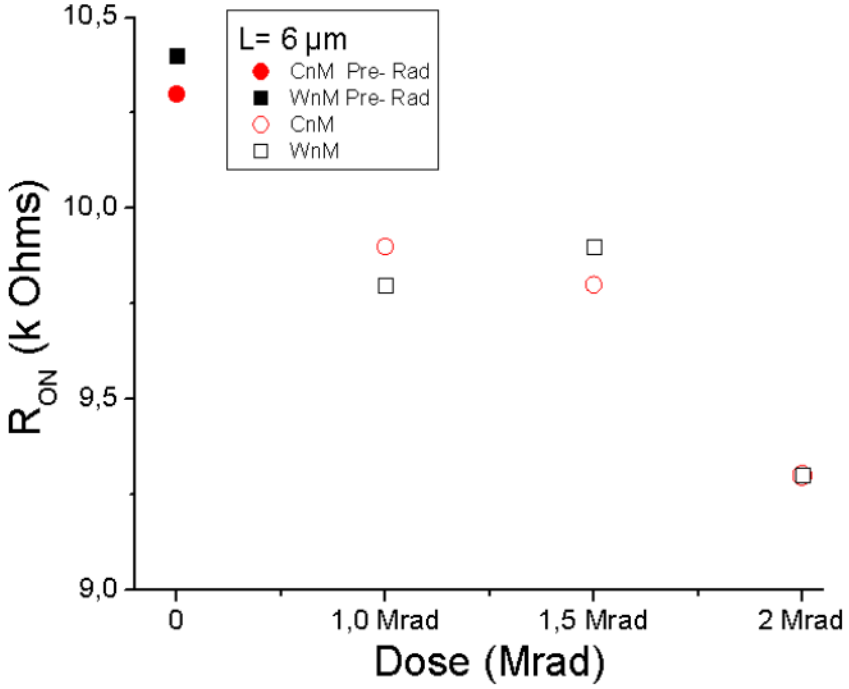
As Figuras 76, 77 e 78 ilustram os resultados das $R_{ON}$ dos CnMs e dos WnM em função das doses permanentes de 1 Mrad, 1,5 Mrad e 2 Mrad para os diferentes comprimentos de canal.

Figura 76 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 μm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*



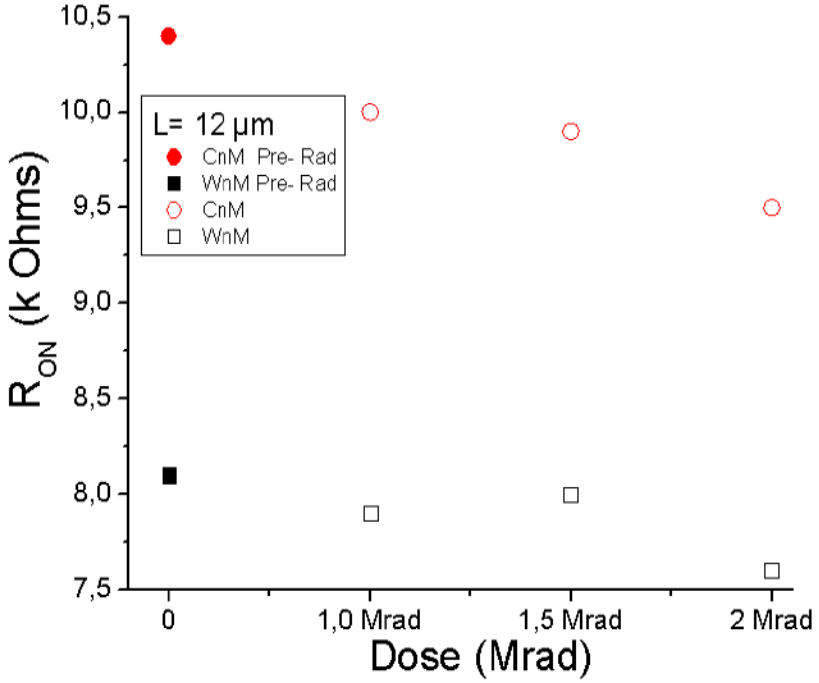

Fonte: Autor

Figura 77 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 78 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{GS}$=2V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

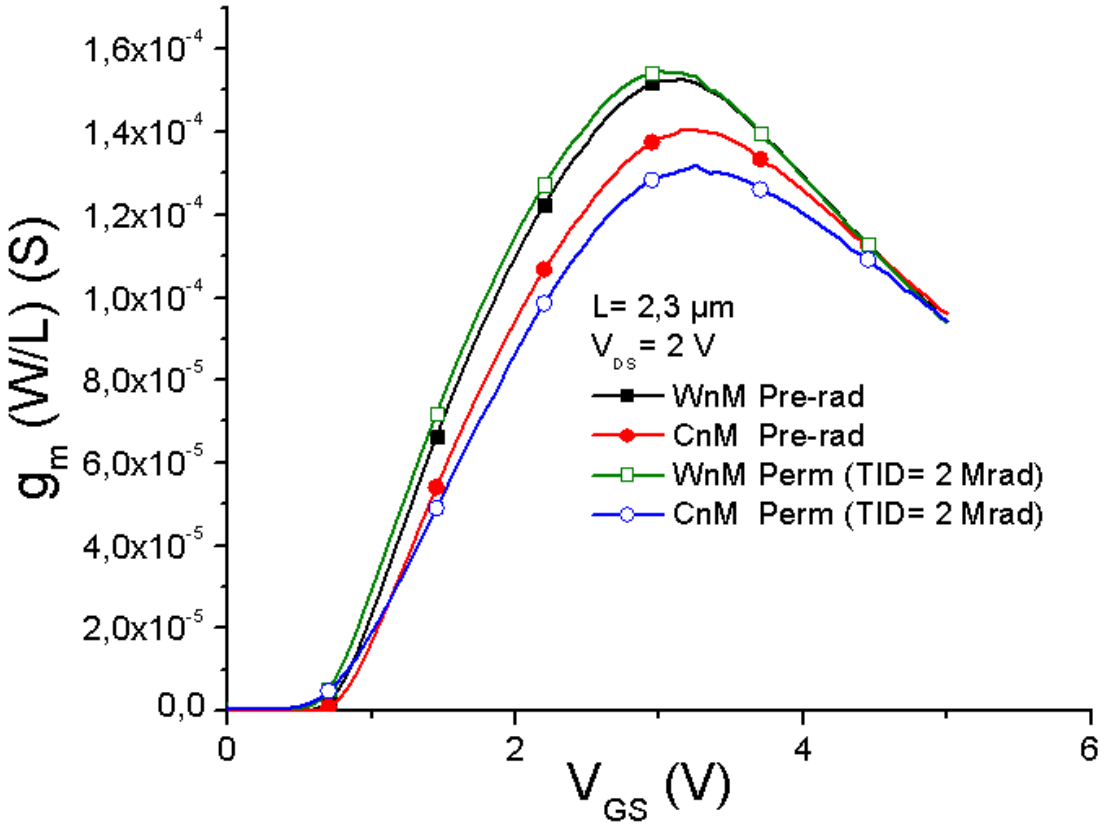
Ao analisar as Figuras 76, 77 e 78 onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, os WnMs possuem menores valores das resistências ente dreno e fonte em estado ligado na maioria dos casos quando comparados com aquelas dos CnMs equivalentes. Em média, as variações do *Wave* são menores após cada dose, ou seja, o WnM foi mais tolerante às radiações ionizantes quando comparado ao CnM (5% e 8%, de variação respectivamente) e isso fica mais evidente no L de 2,3 μm, já que as variações a cada procedimento de radiações ionizantes são bem menores que a do CnM equivalente e praticamente constante. Essa característica oferece ao projetista a possibilidade de ter uma maior estabilidade deste parâmetro elétrico mesmo após a exposição às radiações ionizantes. Contudo, nota-se que a influência dos transistores parasitários nas BBRs do WnM foi menor quando comparado ao CnM após as armadilhas criadas devido aos efeitos da TID e, portanto, verifica-se uma menor variação da $R_{ON}$ dos WnMs.

#### *3.3.2.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A transcondutância dos dispositivos foi extraída da primeira derivada da curva $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$.

A Figura 79 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 μm e com $V_{DS}$ igual a 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 79 – Curvas experimentais de $g_m$ (W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *ON State*

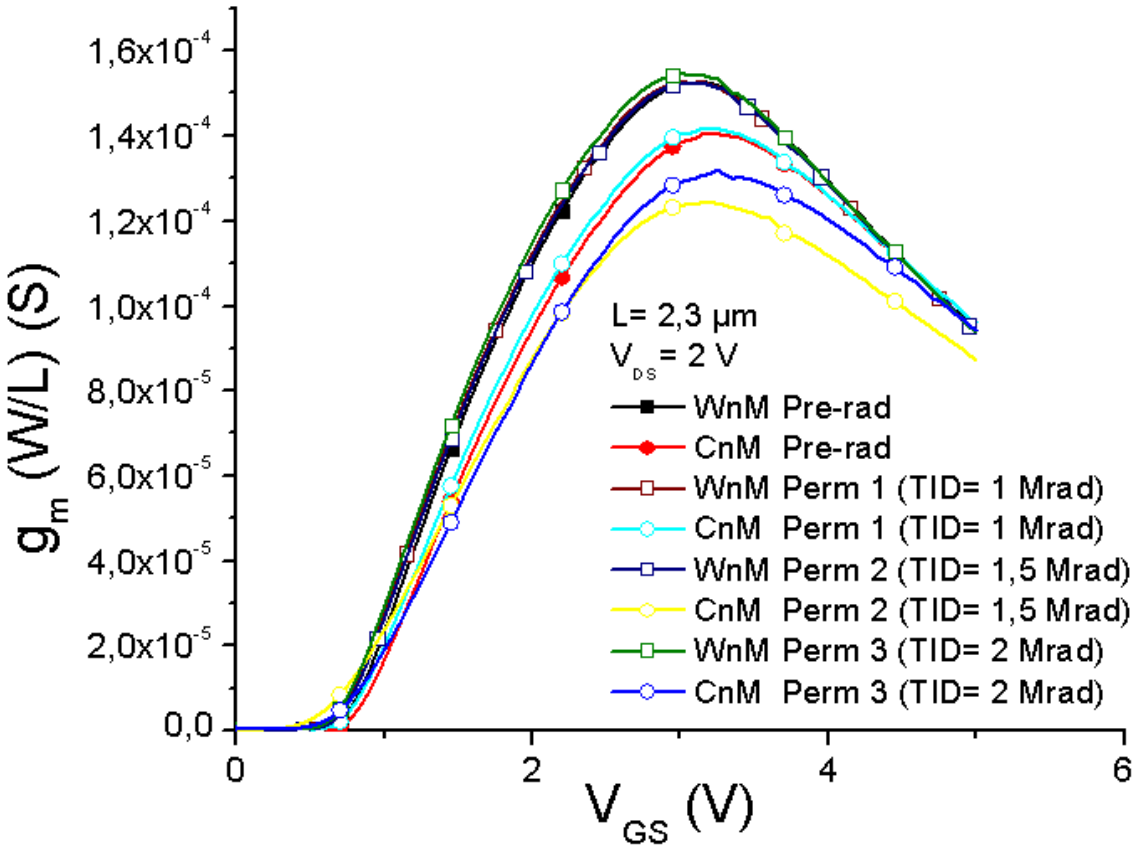



Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 79, observa-se que a $g_m$ do WnM para $V_{GS}$ igual a 3 V é 6% maior do que aquela verificada no CnM para o Pre-rad. Além disso, o WnM praticamente não varia (~ 2%) após a TID de 2 Mrad, enquanto a CnM tem 7% de variação. O WnM tem um alto campo elétrico longitudinal na região de dreno interno o que acarreta em uma maior $I_{DS}$ para um menor $V_{GS}$, portanto necessita de menos tensão de porta para obter mais corrente de dreno (25% a mais de eficiência para o dispositivo com um L igual 2,3 µm), e isto dá ao WnM um melhor controle da corrente de dreno. Além do mais, há um resultado mais elevado do que o CnM em ambientes de radiações ionizantes (menos variação após os efeitos da TID).

A Figura 80 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias em função de $V_{GS}$ do *Wave* MOSFET e do MOSFET convencional equivalente, para L de 2,3 µm e com $V_{GS}$ igual 2V, para a condição de Pre-rad, Perm 1,2 e 3.

Figura 80– Curvas experimentais das $g_m$ (W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, para L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*



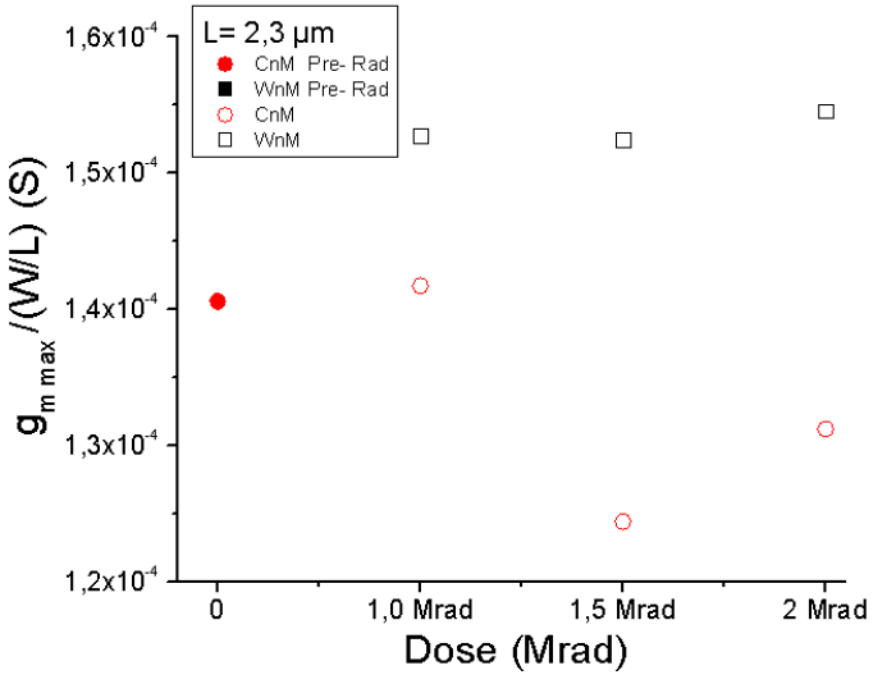

Fonte: Autor

Analisando-se a $g_{m\,max}$ do WnM para diferentes TID, verifica-se que o *Wave* MOSFET é mais eficiente no controle da tensão de porta sobre a corrente entre o dreno e a fonte, e pode ser mais uma alternativa de transistor para o aumento do desempenho em circuitos integrados em ambientes de radiações ionizantes.

É observada uma pequena degradação (3%) da $g_m$ do WnM para valores elevados de $V_{GS}$ (maior que 4 V) e com $V_{DS}$ igual a 2 V quando comparado à $g_m$ do CnM, isto pode ser explicado devido ao seu elevado campo elétrico na região de dreno interno do WnM.

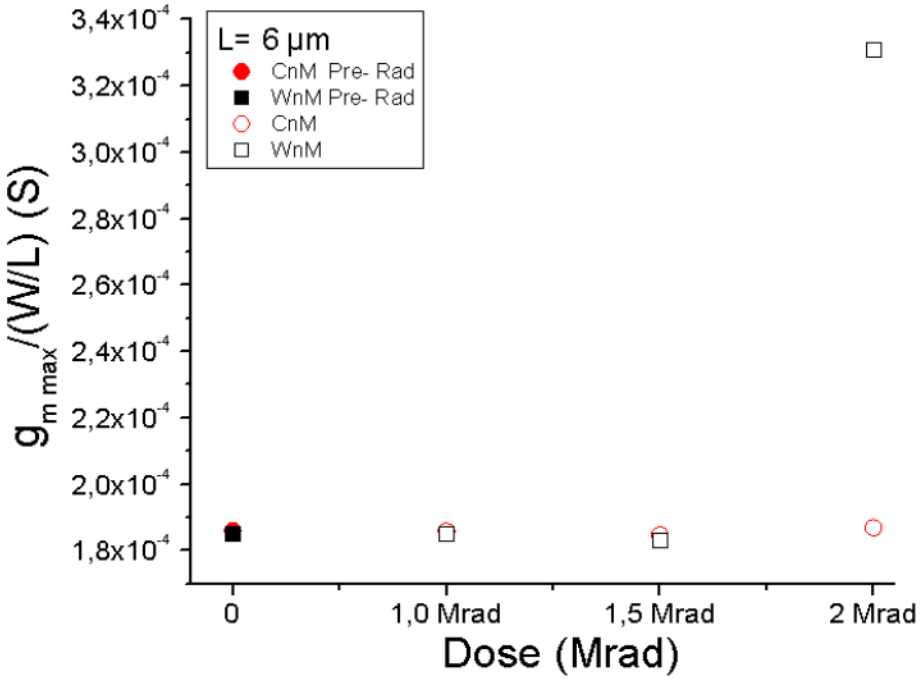
As Figuras 81, 82 e 83 apresentam os resultados das $g_{m\,max}$ do CnM e do WnM em função das doses permanentes de 1 Mrad, 1,5 Mrad e 2 Mrad para os diferentes comprimentos de canal.

Figura 81 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*



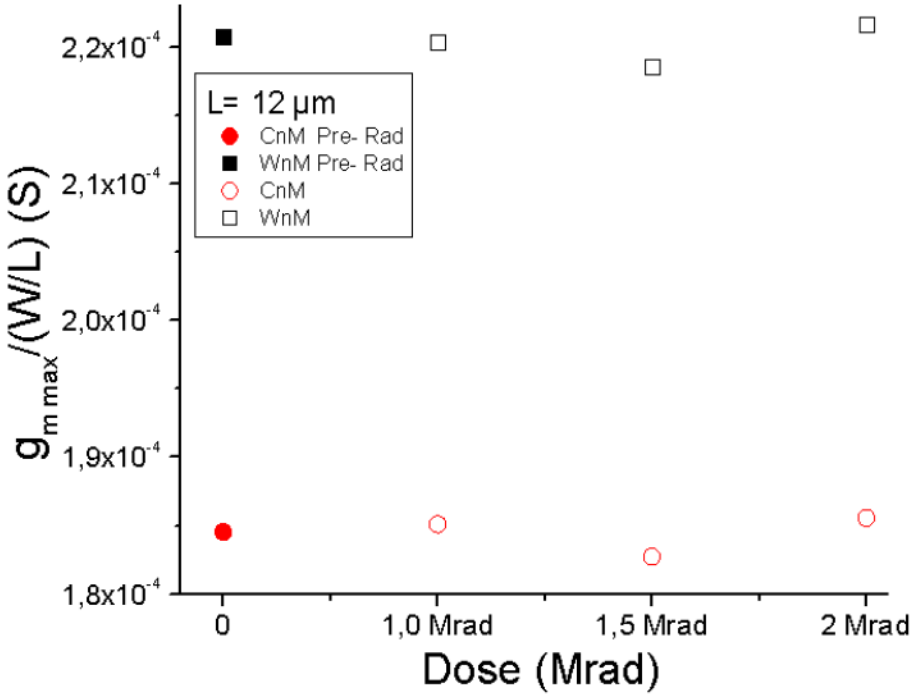

Fonte: Autor

Figura 82 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 83 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Ao analisar as Figuras 81, 82 e 83 onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, os resultados mostram que os WnMs possuem maiores valores das $g_m$ em praticamente todos os casos, o *Wave* MOSFET é mais eficiente no controle da tensão de porta sobre a corrente entre o dreno e a fonte mesmo após os efeitos da TID.

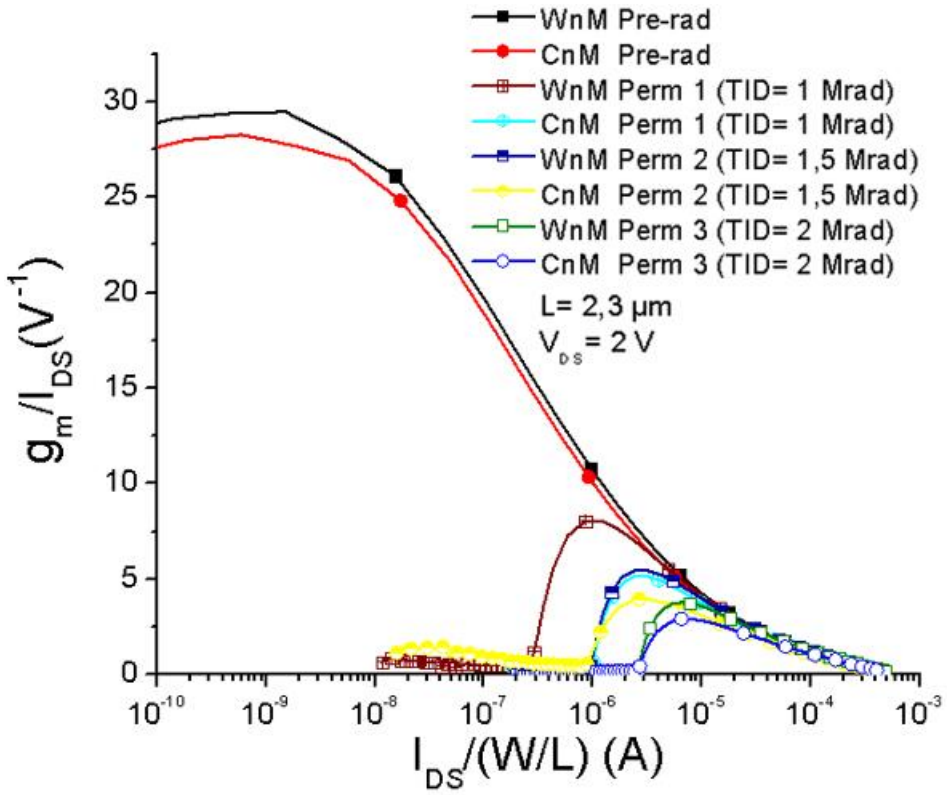
Considerando-se L de 2,3 µm, as variações são menores após cada dose de radiações ionizantes, ou seja, o WnM foi mais tolerante a TID quando comparado ao CnM. No entanto, para o L de 6 µm observa-se um aumento representativo para a $g_m$ máximo do WnM para a TID final de 2 Mrad quando comparado ao CnM, elevando a média final da variação deste parâmetro elétrico ao analisar todos os dispositivos, deixando o WnM desfavorável. Isto acontece - pois a corrente de dreno do WnM com L de 6 µm aumenta bastante após TID de 2 Mrad - para este dispositivo em específico e, sabendo que as cargas criadas na região de óxido de porta neste método de irradiação são altas devido à polarização na condição *ON State* (onde o campo elétrico vertical é altíssimo durante a irradiação), este resultado pode ser justificado pela a indução dessas cargas na região de dreno, originando mais corrente com menos tensão de porta. No dispositivo de 12 µm as variações são similares para o WnM e o CnM, assim sendo o WnM manteve o melhor desempenho elétrico. Contudo, na média da

variação entre os dispositivos, sem considerar o alto valor do CnM com TID igual 2 Mrad, o WnM mostrou-se mais favorável ao comportamento da mudança da corrente de dreno em relação à mudança da tensão de porta quando comparado ao CnM, e isto pode ser justificado pelo fato pela menor influência dos transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro do WnM.

#### *3.3.2.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 84 apresenta as curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad, Perm 1,2 e 3.

Figura 84– Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*

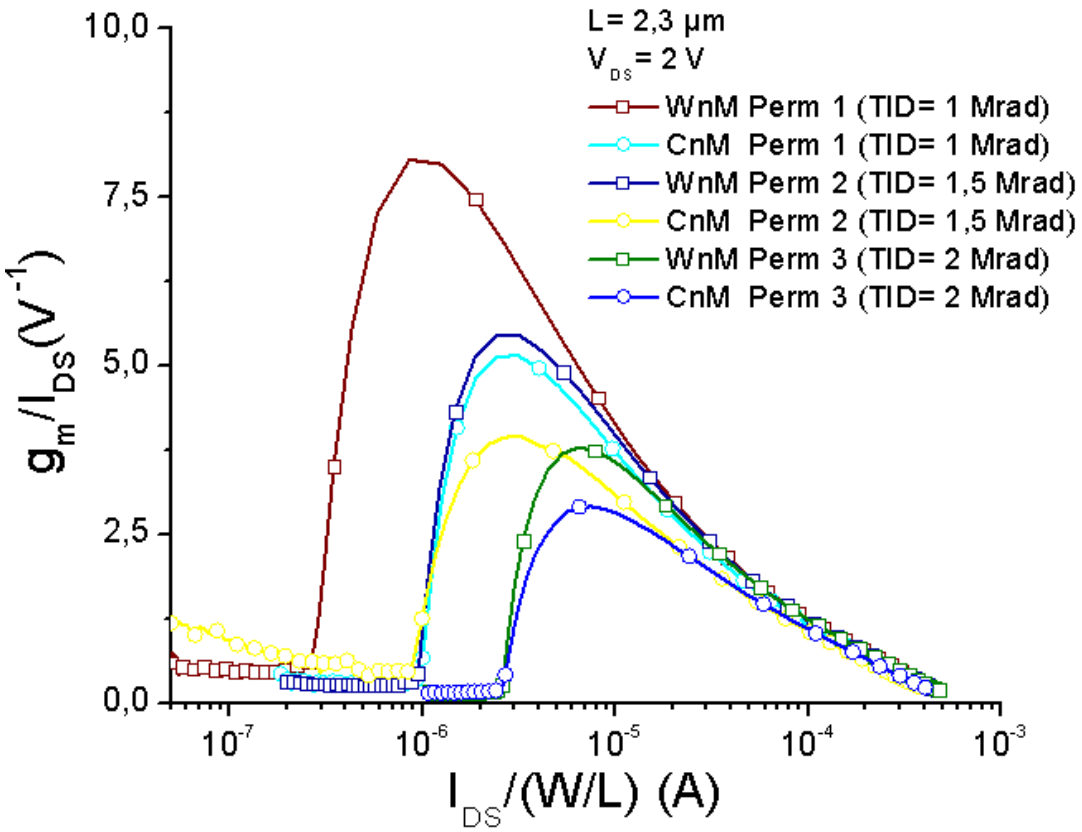



Fonte: Autor

Na Figura 84, observa-se que a razão $g_m/(I_{DS})$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM apresenta melhor resultado em todos os regimes de inversão quando comparado ao CnM, cerca de 5% maior antes da TID, ou seja, pode-se extrair do WnM: melhor ganho na inversão fraca, uma boa relação de ganho de tensão e resposta em frequência na inversão moderada, ou até um baixo ganho de tensão com uma alta resposta em frequência no modo de inversão forte. Deve-se avaliar a tensão *Early* da condição quando se deseja o melhorar o ganho.

Para as análises das condições de Permanente TID 1 Mrad, 1,5 Mrad e 2 Mrad, a Figura 85 ilustra o resultado da TID ampliado da Figura 84.

Figura 85– Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Nas Figuras 84 e 85, verifica-se que a $g_m/(I_{DS})$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ fica bastante degradada após os procedimentos de radiações ionizantes com raios X. Considerando a nova excursão da curva para o regime de inversão moderado e forte, para Perm TID 1 Mrad a degradação é cerca de 73% em todos os regimes de inversão para o WnM e cerca de 81% para

o CnM. Para TID de 1,5 Mrad é possível observar 82% de degradação para o WnM e 86% para o CnM. Para TID de 2 Mrad a degradação é muito grande, cerca de 87% para o WnM e 90% para o CnM em todos os regimes de inversão. De forma geral, nos dados observados, o WnM tem um desempenho melhor no Pre-rad e tem menos degradação após cada TID para todos os dispositivos estudados.

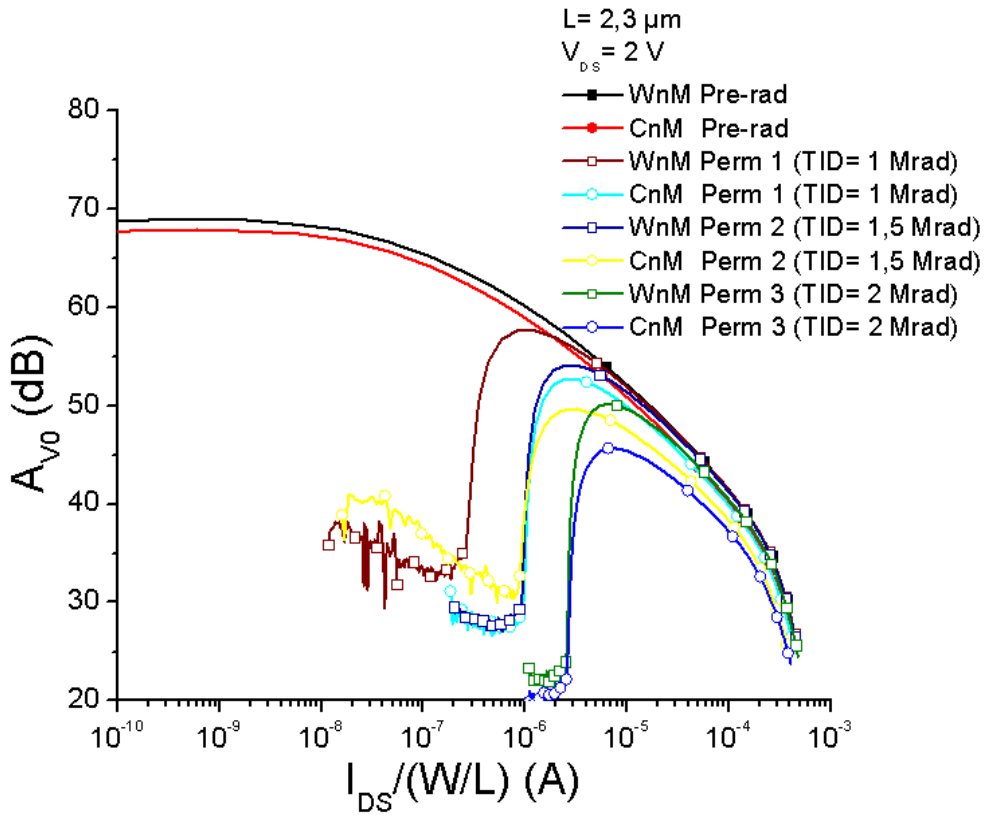
Devido às características geométricas do *Wave* MOSFET e a menor influência dos transistores parasitários nas regiões de bico de pássaro, há um desempenho maior do WnM ao comparar com o CnM em ambientes de radiações ionizantes (menos variação após TID). Confirma-se que o *Wave* MOSFET é mais eficiente no controle da tensão de porta sobre a corrente entre o dreno e a fonte e pode ser uma alternativa de transistor para aumento de desempenho em circuitos integrados analógicos em ambientes de radiações ionizantes.

Figuras de mérito com valores absolutos da $g_m$ /$I_{DS}$ em função da dose não fazem sentido neste caso, pois a avaliação do comportamento da curva em cada regime de inversão é o mais importante, tendo em vista a forte degradação após TID, onde inclusive não é mais possível valores para o regime de inversão fraca. Os dispositivos estudados de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm têm comportamentos similares para esta análise.

#### *3.3.2.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nos ganhos de tensão em malha aberta na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 86 apresenta as curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$/(W/L) do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{GS}$ 2 V, para a condição de Pre-rad, Perm 1, 2 e 3.

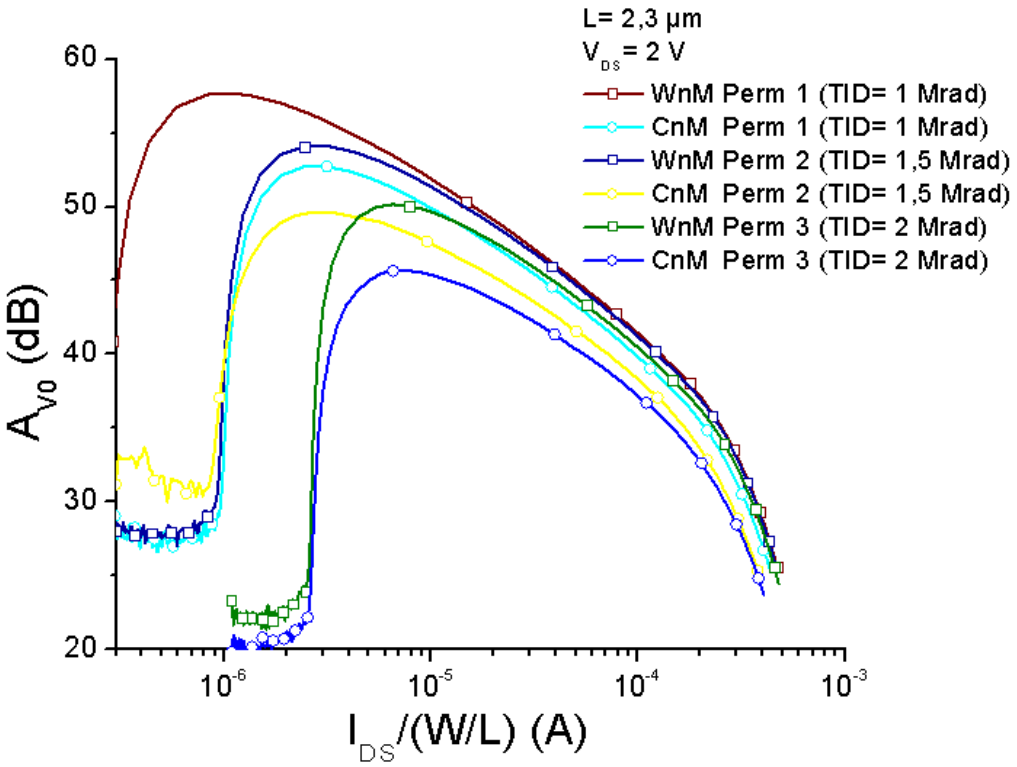
Figura 86– Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Ao analisar a Figura 86, observa-se a mesma tendência da curva $g_m/(I_{DS})$ em função da $I_{DS}/(W/L)$, frente a forte degradação das curvas. É possível considerar a mesma análise da seção 3.2.2.8. A Figura 87 apresenta o resultado dos efeitos da TID ampliado da Figura 86.

Figura 87– Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para TID iguais a 1Mrad, 1,5Mrad e 2Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

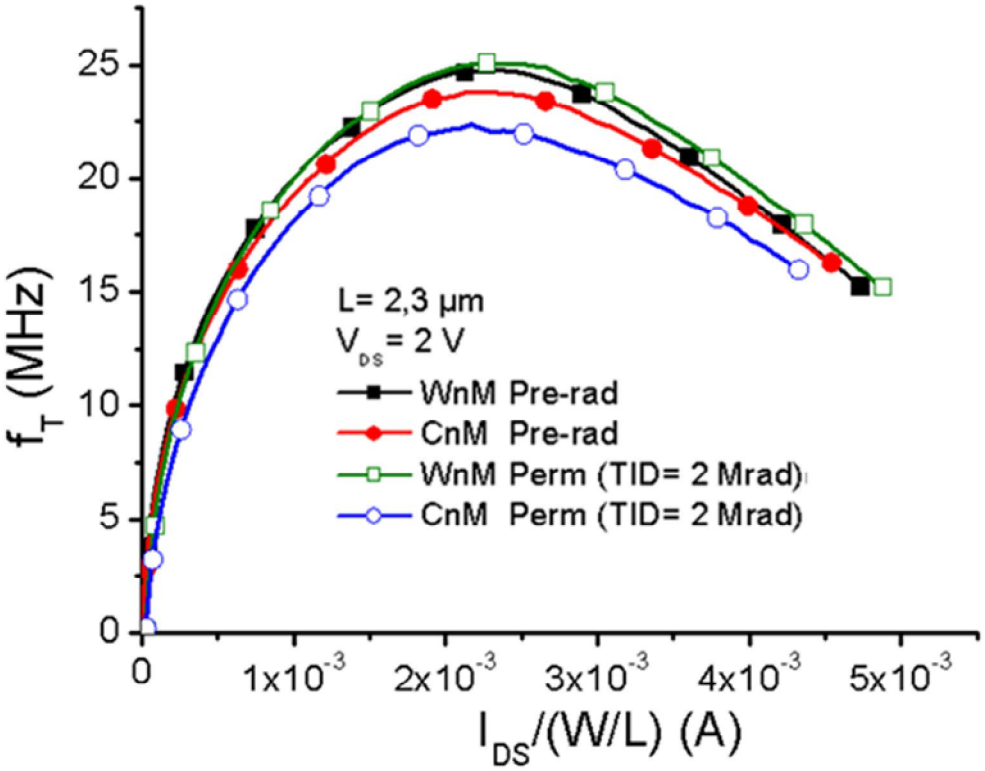
Portanto, conclui-se que o *Wave* MOSFET é indicado para circuitos analógicos aplicados em ambientes de radiações ionizantes como um CMOS de baixa tensão e baixa potência (*low power-low voltage*), onde a região de inversão moderada geralmente é usada, devido a boa relação entre ganho de tensão de malha aberta, velocidade (resposta em altas frequências ou altos valores de frequência de ganho unitário, $f_T$) e consumo de potência elétrica. Isto é explicado pela menor sensibilidade do estilo de leiaute *Wave* com relação às armadilhas criadas nas regiões de bico de pássaro, onde os transistores parasitários daquela região têm menor influência no seu desempenho elétrico após os efeitos da TID.

#### *3.3.2.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas frequências de ganho de tensão unitário na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A frequência de ganho de tensão unitário ($f_T$) dos dispositivos foi extraída das curvas da transcondutância por $2\pi C_L$, considerando-se um $C_L$ igual a 10pF.

A Figura 88 apresenta as curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$/(W/L) do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad e Permanente (TID de 2 Mrad).

Figura 88– Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para uma TID=2 Mrad, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*

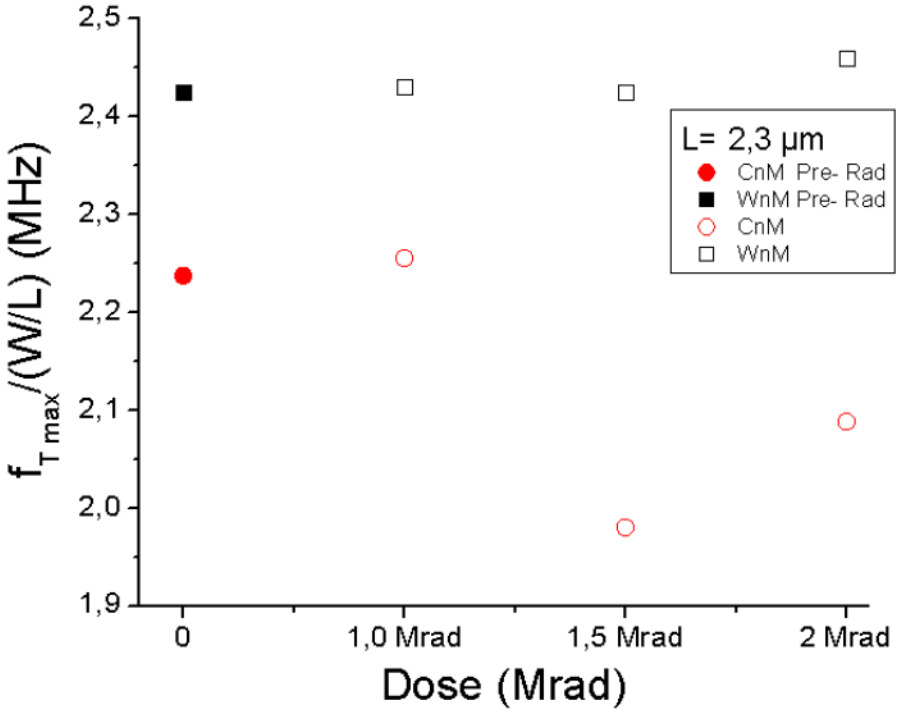



Fonte: Autor

Nota-se que a $f_T$ do WnM é 15% maior do que CnM equivalente, considerando-se uma $I_{DS}$/(W/L) igual a 250 µA. Além disso, o WnM tem um comportamento semelhante (menos de 2% de variação) após TID, enquanto a CnM variou de 18%. Os efeitos da TID podem ser atenuados por meio de estratégias de projeto (*Hardening-By-Design*, HBD) no qual os efeitos dos transistores parasitários nas BBR são reduzidos, pois há menor influência das cargas positivas criadas após a radiação ionizante no estilo de leiaute *Wave*. O WnM apresenta um melhor desempenho elétrico neste parâmetro e pode melhorar o projeto de circuitos analógicos com uma maior frequência de ganho de tensão unitário.

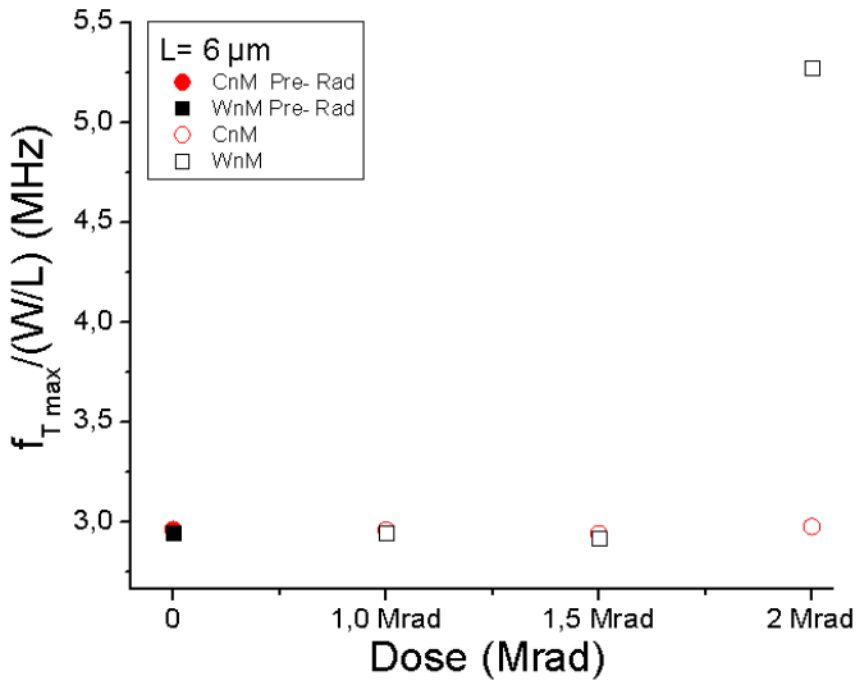
As Figuras 89, 90 e 91 apresentam os resultados das $f_{T\ max}$ dos CnMs e do WnMs em função das doses permanentes de 1 Mrad, 1,5 Mrad e 2 Mrad para os diferentes comprimentos de canal.

Figura 89 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*



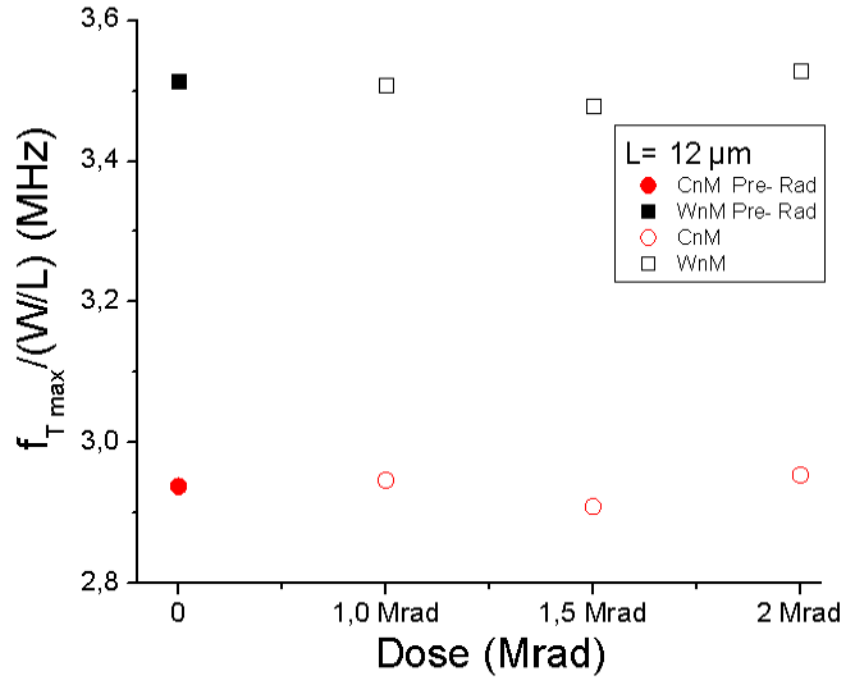

Fonte: Autor

Figura 90 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Figura 91 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

Ao verificar as Figuras 89, 90 e 91 onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, os resultados mostram que o WnM possui maior valor da $f_{T\ max}$ (W/L) em praticamente todos os casos.

Considerando-se L de 2,3 µm as variações são mais suaves após cada dose, assim sendo o WnM foi mais tolerante a TID quando comparado ao CnM. No entanto, para o L de 6 µm observa-se um aumento significativo para a $f_{T\ max}$ (W/L) do WnM para a TID final de 2 Mrad quando comparado ao CnM, elevando a média final da variação deste parâmetro elétrico ao analisar todos os dispositivos, deixando o WnM desfavorável (9% para o WnM contra 3% do CnM). Isto acontece, pois a corrente de dreno do WnM (assim como a $g_m$ do WnM de L igual a 6 µm) aumenta bastante após TID de 2 Mrad. Sabe-se que as cargas criadas na região de óxido de porta neste método de irradiação são altas devido à polarização *ON State*, e este resultado pode ser explicado pela a indução dessas cargas na região de dreno resultando em mais corrente com menos tensão de porta. No dispositivo de 12 µm as variações são similares para o WnM e CnM, assim sendo o WnM manteve o melhor desempenho elétrico.

Contudo, devido a $f_T$ do WnM ter um maior desempenho, conclui-se que *Wave* MOSFET pode ser uma boa alternativa para o estágio de saída do OTA, por exemplo, com altas frequências de saída.

### 3.3.3 Resultados experimentais e análises dos resultados dos estudos dos efeitos das radiações ionizantes de raios X com os dispositivos com polarização *OFF State* durante o processo de radiações ionizantes

Nesta subseção são apresentados os principais resultados dos efeitos das radiações ionizantes de raios X entre os MOSFETs do tipo *Wave* e de seus equivalentes retangulares convencionais, na condição de polarização *OFF State*, com as correspondentes análises dos resultados.

Além da condição Pre-Rad, encontra-se as seguintes simbologias nesta subseção:

a) Perm 1 ou TID = 0,5 Mrad.
b) Perm 2 ou TID = 1,0 Mrad.
c) Perm 3 ou TID = 1,5 Mrad.

Em todos os casos são obtidos os valores dos parâmetros elétricos ou figuras de mérito dos MOSFETs obtidos sete dias após as radiações ionizantes de raios X, objetivando-se o estudo dos efeitos da TID nos dispositivos, assim como da condição *Floating* e *ON State*.

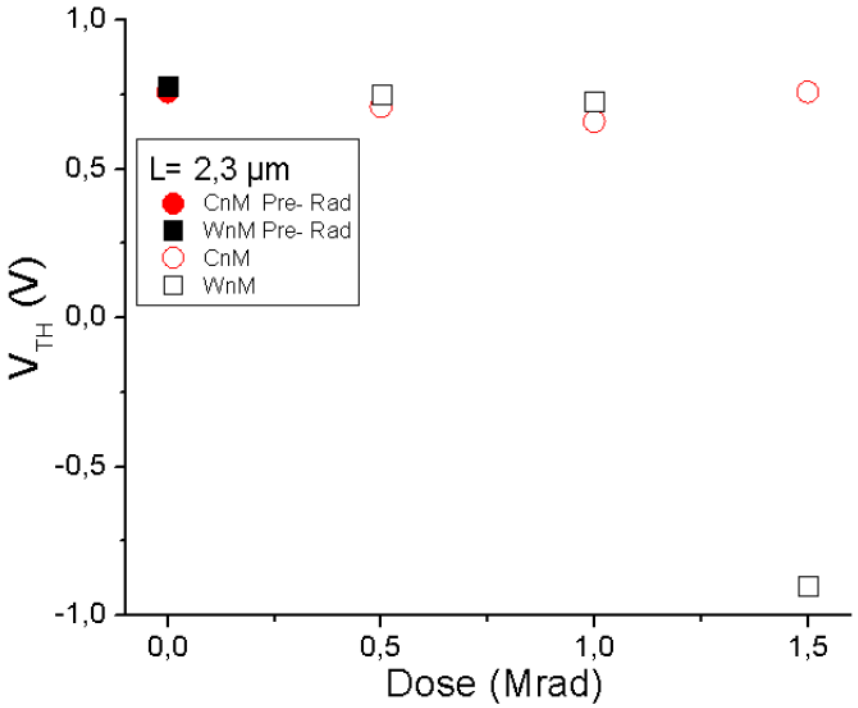
Aqui serão apresentados os resultados experimentais em uma outra condição de estresse ou com polarização. Neste caso a polarização *OFF State* foi aplicada durante o procedimento de radiações ionizantes usando o terceiro CI, a qual potencializa a criação de um campo elétrico longitudinal, aumentando o armadilhamento de cargas positivas no óxido de porta e na interface $Si/SiO_2$.

#### *3.3.3.1 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões de limiar na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

Através do método da segunda derivada da curva da $I_{DS}$ em função de $V_{GS,}$ com $V_{DS}$ igual a 10 mV [50], foram extraídas as tensões de limiar dos MOSFETs do *chip* 3 (com encapsulamento e com polarização *OFF State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X).

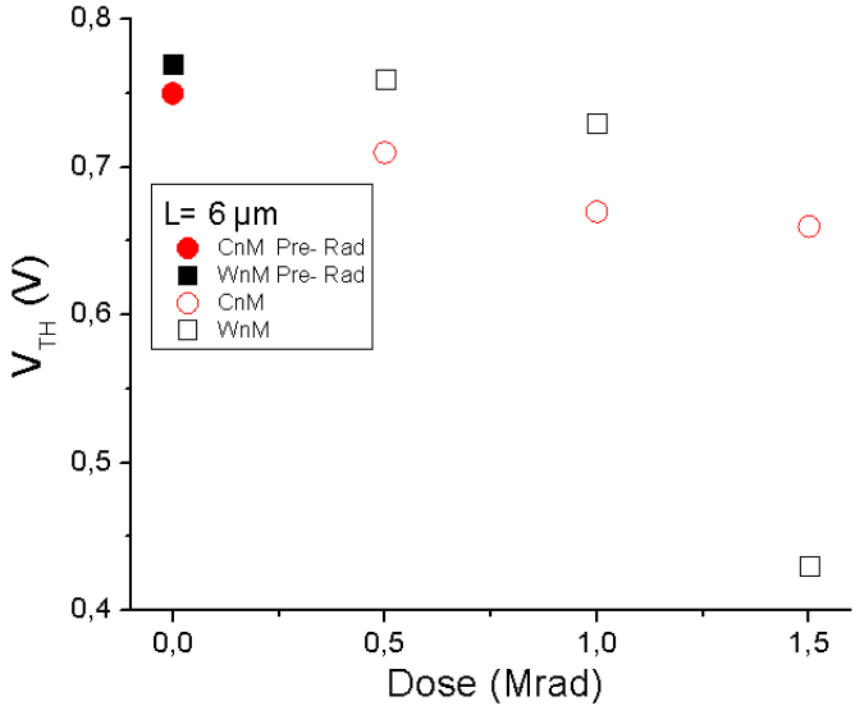
As Figuras 92, 93 e 94 apresentam os resultados experimentais das $V_{THs}$ dos WnMs e dos seus equivalentes CnMs em função da TID para os diferentes dispositivos estudados nesse trabalho de pesquisa.

Figura 92 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *OFF State*



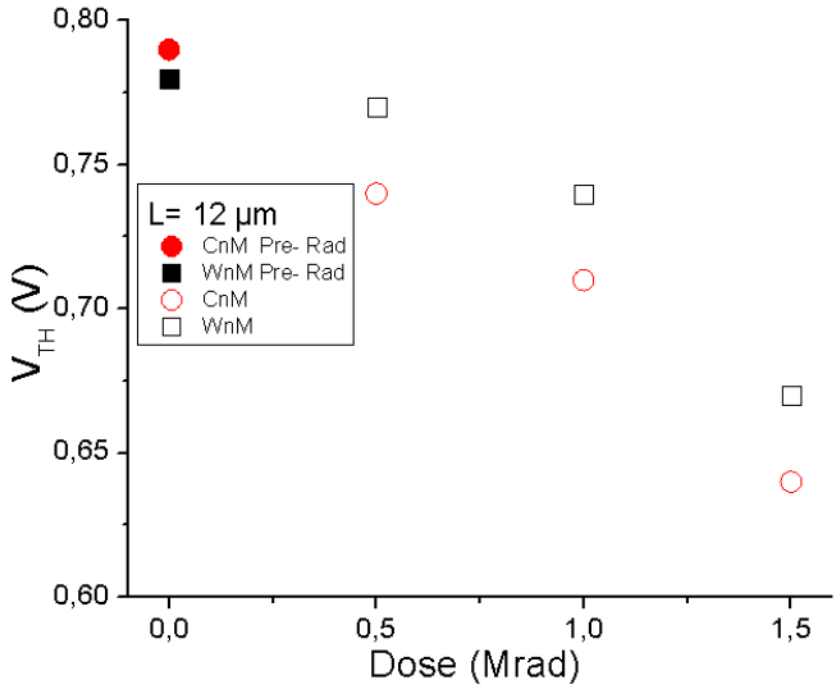

Fonte: Autor

Figura 93 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 µm na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 94 – Resultados experimentais das $V_{THs}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 µm na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

A Tabela 10 sumariza os valores das $V_{THs}$ dos dispositivos com diferentes comprimentos de canal na condição de polarização *OFF State*.

Tabela 10 - Comportamento das $V_{THs}$ e de suas $\Delta V_{THs}$, levando-se em conta os MOSFETs na condição de polarização *OFF State* durante o processo de radiações ionizantes em função da TID, considerando diferentes comprimentos de canais dos MOSFETs

| L (µm) | Dispositivo | Pre-rad 0 Mrad | Perm 1 0,5 Mrad | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 2 1 Mrad | $\Delta V_{TH}$ (%) | Perm 3 1,5 Mrad | $\Delta V_{TH}$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,3 | CnM | 0,76 | 0,71 | 6,58 | 0,66 | 13,16 | 0,76 | 0 |
| | WnM | 0,78 | 0,75 | 3,84 | 0,73 | 6,41 | -0.90 | 215,4 |
| 6 | CnM | 0,75 | 0,71 | 5,33 | 0,67 | 10,67 | 0,66 | 12,0 |
| | WnM | 0,77 | 0,76 | 1,30 | 0,73 | 5,19 | 0,43 | 44,16 |
| 12 | CnM | 0,79 | 0,74 | 6,33 | 0,71 | 10,13 | 0,64 | 19,0 |
| | WnM | 0,78 | 0,77 | 1,28 | 0,74 | 5,13 | 0,67 | 14,1 |

Fonte: Autor

Observando-se a Tabela 10, observa-se que antes do procedimento de radiações ionizantes com raios X (Pre-rad), as $V_{THs}$ dos CnMs e WnMs apresentaram valores próximos (média de menos de 2,2% de diferença).

É também possível verificar que as $V_{THs}$ dos diferentes dispositivos diminuem após cada TID. Isso se deve em decorrência de um maior número de cargas positivas que foram induzidas pelas radiações ionizantes no $SiO_2$. A polarização dos dispositivos na condição de *OFF State* durante o procedimento de radiações ionizantes é responsável por gerar um campo elétrico longitudinal no canal desses transistores (nessa situação o campo elétrico vertical é nulo durante tal procedimento de radiações ionizantes). Além disso, é possível verificar que os diferentes WnMs sempre tiveram menores variações das $V_{THs}$ (em média 5%) após os procedimentos das radiações ionizantes Perm1 e Perm 2, quando comparados aos equivalentes CnM. Portanto, com uma dose acumulada de até 1Mrad, o estilo de leiaute *Wave* é capaz de aumentar a tolerância aos efeitos das radiações ionizantes dos MOSFETs, levando-se em conta as mesmas condições de polarização e fatores geométricos.

Contudo, ao observar a condição de Perm 3 (1,5 Mrad), os MOSFETs dos tipos *Wave* com comprimentos de canais menores que 12 μm (2,3 μm e 6 μm) apresentaram variações de 215% e 44%, respectivamente, em relação aos valores de pré-radiação. Estes resultados encontrados podem ser justificados devido à forte influência do campo elétrico longitudinal presente na região de dreno dos WnM, principalmente em decorrência da parte do MOSFET do tipo *Wave* associada ao semicírculo com polarização de dreno interno, nos quais são muito maiores que aqueles encontrados nos equivalentes CnM.

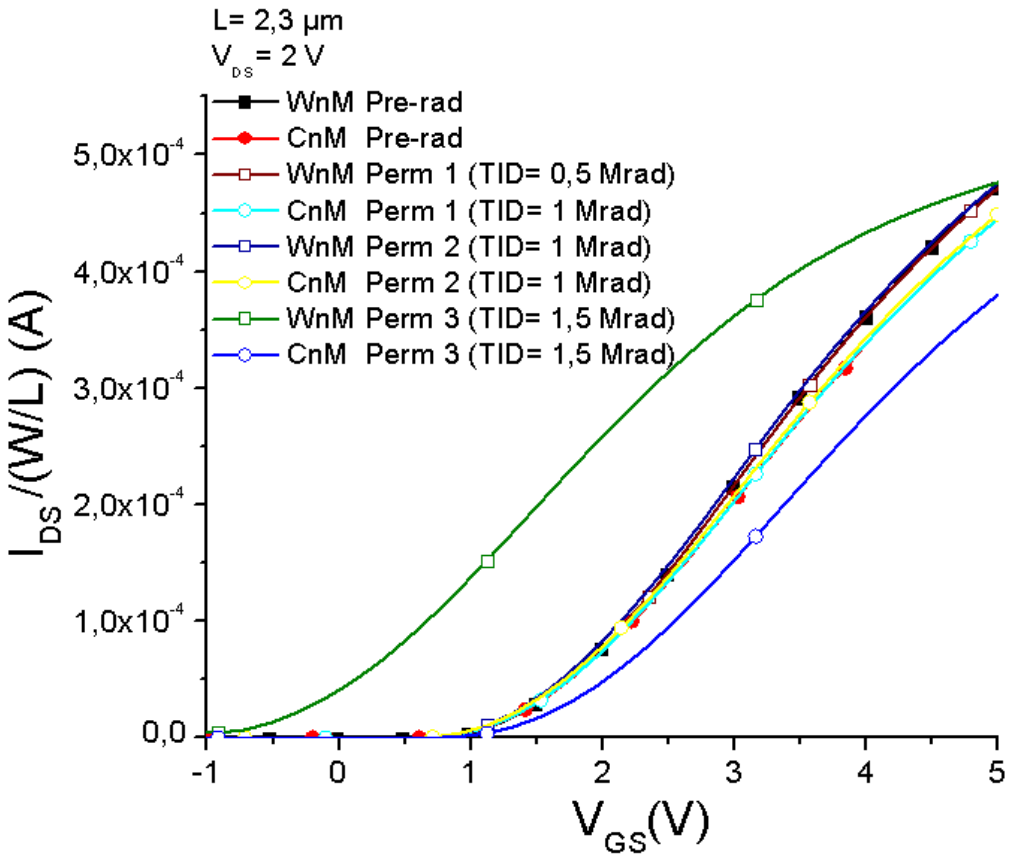
Observa-se que as armadilhas são mais expressivas no $SiO_2$ devido à queda nos valores das $V_{THs}$. Portanto, o benefício do *Wave* MOSFET de menor ativação dos transistores parasitários na região do bico de pássaro não foi suficiente para se obter melhores resultados, pois a indução de cargas devido às armadilhas no óxido de porta é maior e mais influente neste caso. No entanto, é importante salientar que isso acontece em 2 dispositivos e na última dose. Nas análises em *Floating*, *ON State* e nas doses intermediárias, o *Wave* MOSFET tem uma variação similar ao CnM.

### *3.3.3.2 Efeitos das radiações ionizantes nas $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e razões $I_{ON}/I_{OFF}$ considerando os MOSFETs na condição de polarização "OFF State" durante o procedimento das radiações ionizantes através da análise das curvas das $I_{DS}/(W/L)$ e dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$*

Neste caso, os dados foram levantados para os dispositivos polarizados na condição *OFF State* durante o procedimento de radiações ionizantes.

A Figura 95 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad, Permanente 1, 2 e 3.

Figura 95 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para as diferentes TID, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



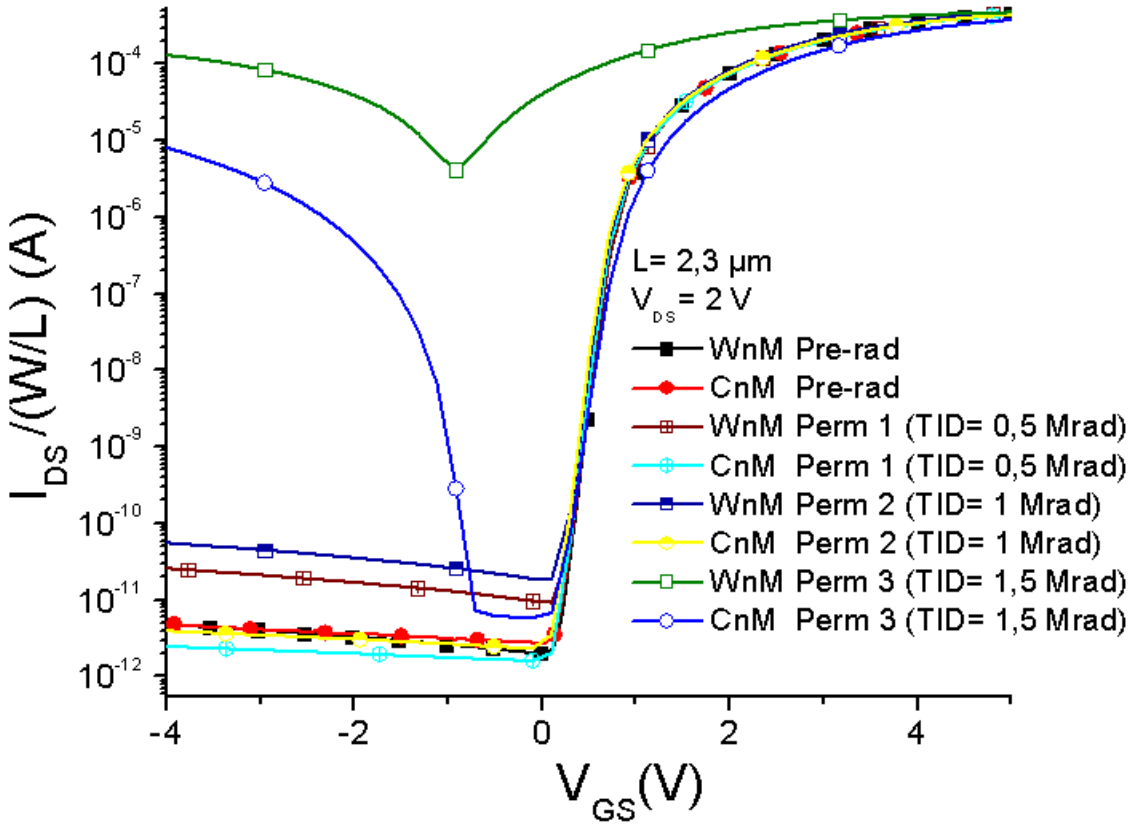

Fonte: Autor

Analisando-se a Figura 95, verifica-se que após às TID de 0,5 Mrad e 1 Mrad, respectivamente, as variações das correntes de dreno normalizadas em funções das razões de aspecto nas regiões Triodo de ambos os dispositivos são inferiores a 5%, considerando-se uma $V_{GS}$ de 4 V e uma $V_{DS}$ 2 V.

Porém, para um TID de 1,5 Mrad, ambos os dispositivos apresentaram variações significantes da corrente de dreno em relação aos valores de pré-radiação, em decorrência das fortes variações das tensões de limiar de ambos os MOSFETs, conforme discutidas anteriormente. Portanto, levando-se em conta a corrente de dreno na região Triodo, verifica-se que ambos os dispositivos são fortemente influenciados por uma TID de 1,5 Mrad.

A Figura 96 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ do WnM e dos equivalentes CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2V, considerando-se a condição de Pre-rad e Perm TID de 0,5 Mrad, 1 Mrad e 2 Mrad.

Figura 96 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para diferente TID, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V



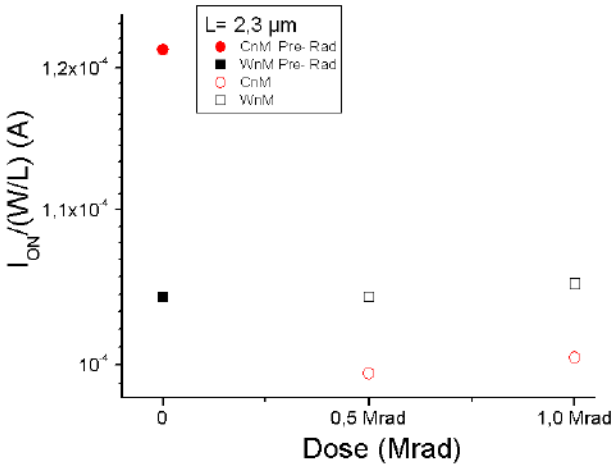

Fonte: Autor

Observando-se a Figura 96, verifica-se que as $I_{OFF}$ de ambos os dispositivos na condição de pré-radiação são praticamente as mesmas (erro máximo de 5%). No entanto, as $I_{OFF}$ do WnM para as TID de 0,5 Mrad e 1,0 Mrad, respectivamente, são maiores (aproximadamente uma década maiores) que aquelas observadas nos CnM equivalentes. Isso é justificado em decorrência dos maiores valores de campo elétrico longitudinal na região de dreno nos MOSFETs do tipo *Wave* durante os procedimentos de radiações ionizantes na condição *OFF State*, que foram capazes de induzir um número maior de cargas positivas no óxido de porta do WnM em comparação aquelas observadas no equivalente CnM. Mesmo com as características especiais das regiões de bico de pássaro dos WnM (campo elétrico longitudinal radial entre as regiões de fonte e dreno), não foram suficientes para evitar o aumento de $I_{OFF}$ dos WnM em relação ao dos equivalentes CnM. A análise do comportamento entre as correntes de fuga ($I_{leak}$) desses dispositivos são similares a da $I_{OFF}$.

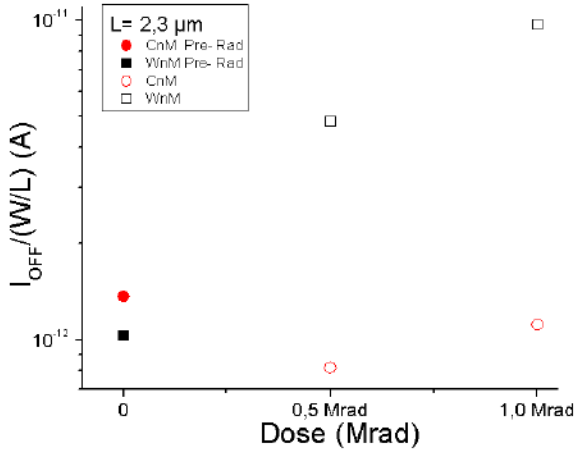
Considerando-se uma TID de 1,5 Mrad, ambos os dispositivos devem ser evitados para serem utilizados em ambientes de radiações ionizantes, levando-se em conta a $I_{OFF}$ e $I_{leak}$.

As Figuras 97, 98 e 99 ilustram, respectivamente, os comportamentos das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$ em função das TID, levando-se em conta os diferentes MOSFETs com diferentes comprimentos de canal.

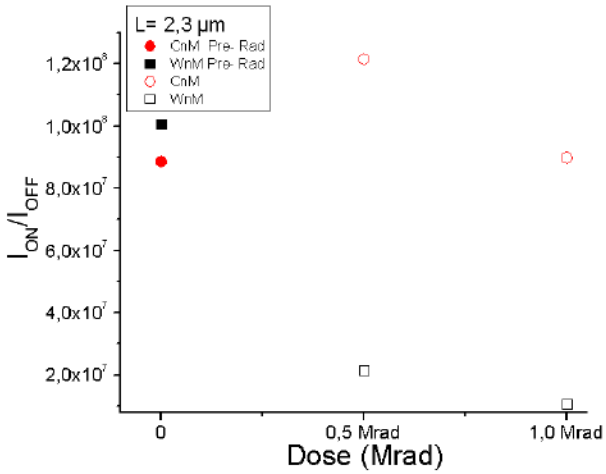
Figura 97 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm, na condição de polarização *OFF State*




(a)



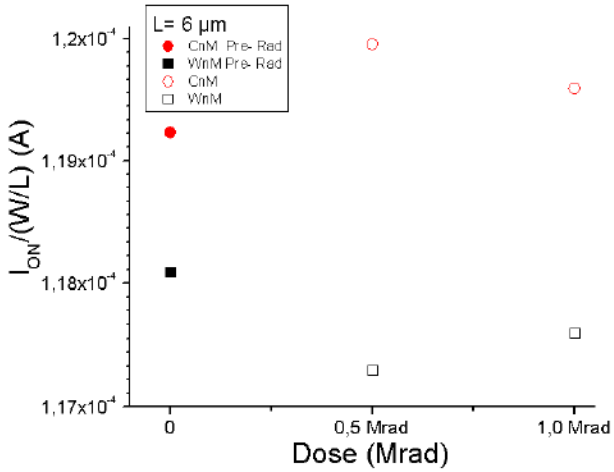

(b)



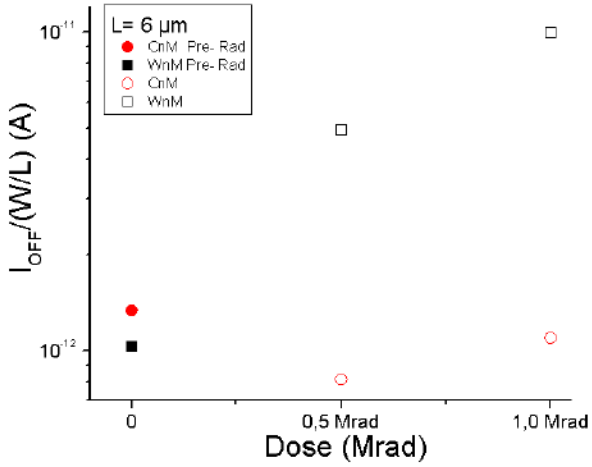

(c)

Fonte: Autor

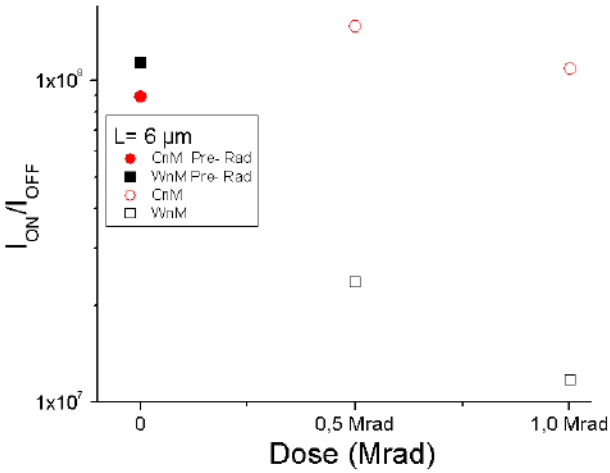
Figura 98 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm, na condição de polarização *OFF State*




(a)



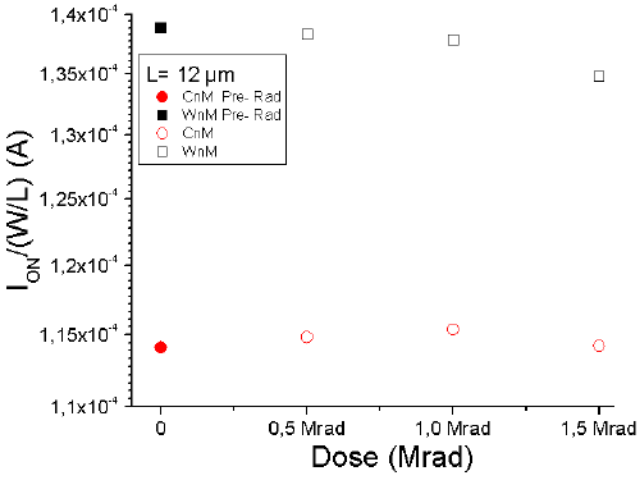

(b)



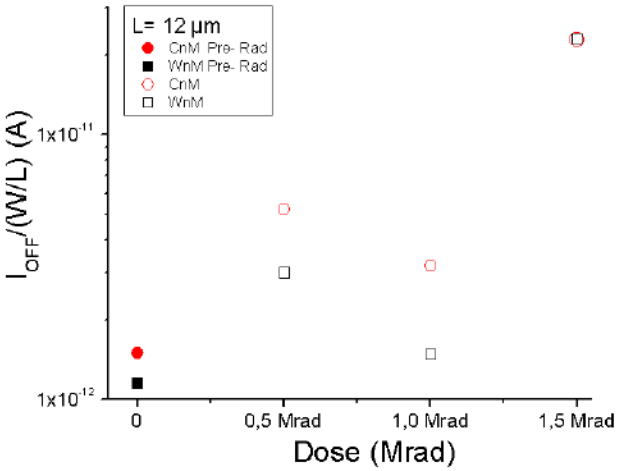

(c)

Fonte: Autor

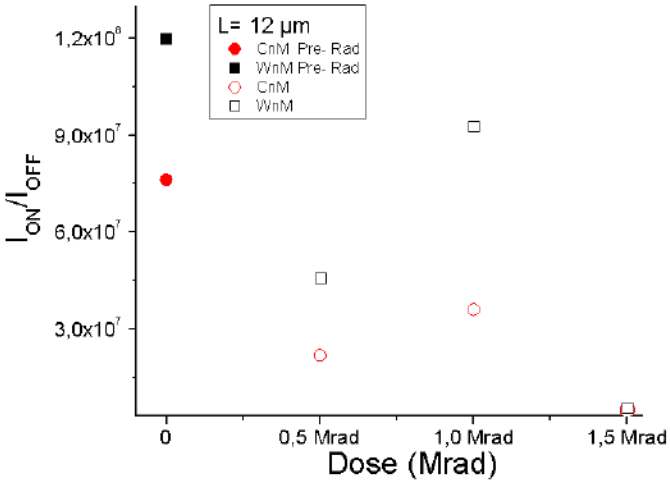
Figura 99 – Resultados experimentais das $I_{ON}$, $I_{OFF}$ e das razões $I_{ON}/I_{OFF}$, respectivamente, em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm, na condição de polarização *OFF State*




(a)




(b)




(c)

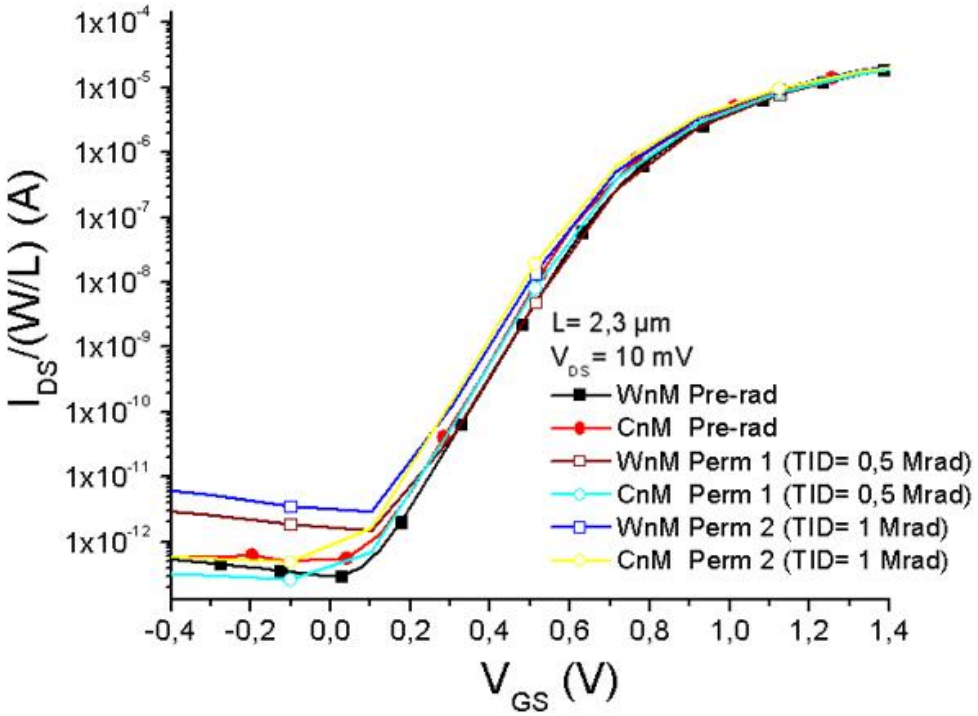
Fonte: Autor

Analisando-se as Figuras 97, 98 e 99, pode-se verificar que as $I_{ON}$ dos diferentes MOSFETs são similares e praticamente não variaram (erro máximo de 5%). Porém, as $I_{OFF}$ dos dois tipos de MOSFETs sofreram grandes variações em relação aos seus valores de pré-radiação e os WnMs apresentaram maiores variações (5,3 vezes maior) dos que aquelas observadas nos CnM equivalentes (4,3 vezes maior). Como consequência dessas maiores variações das $I_{OFF}$ dos WnMs, observa-se maiores variações das suas razões $I_{ON}/I_{OFF}$ (80%) em relação aquelas dos CnM equivalentes (64%). Portanto, os WnM apresentaram uma menor tolerância às radiações ionizantes em relação aos CnM equivalentes de 16%.

#### *3.3.3.3 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas inclinações de sublimiar na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 100 apresenta as curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ dos WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 μm e com $V_{DS}$= 10 mV para análise da inclinação de sublimiar, considerando-se a condição de Pre-rad, TID de 0,5 Mrad e TID de 1 Mrad.

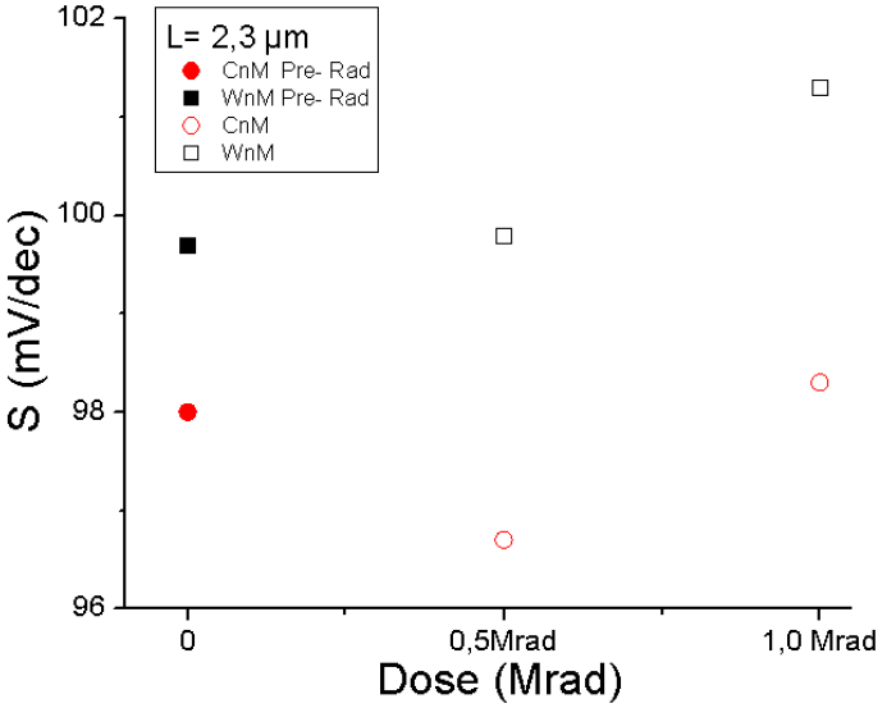
Figura 100 – Curvas experimentais dos logaritmos das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente considerando-se as diferentes TID, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=10 mV, para análise da inclinação de sublimiar, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

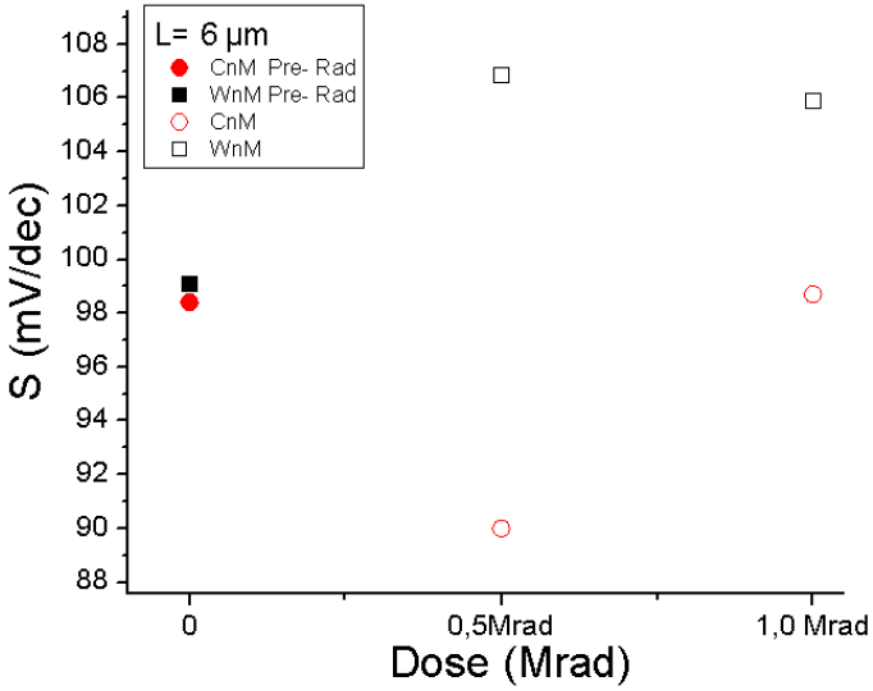
As Figuras 101, 102 e 103 apresentam os resultados das S (mV/dec) dos diferentes WnMs e dos CnMs equivalentes, para os em função das diferentes TID.

Figura 101 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 2,3 µm na condição de polarização *OFF State*



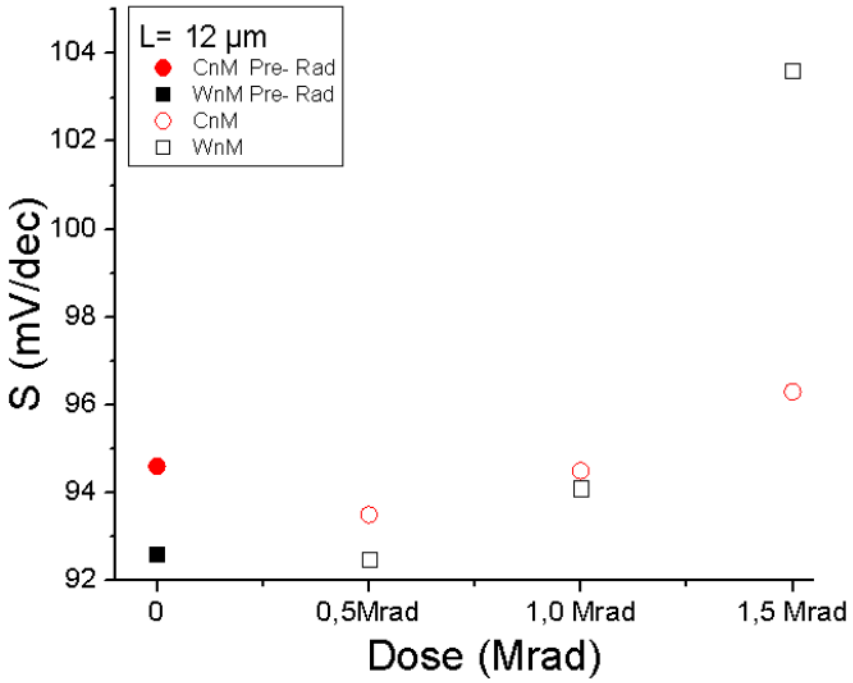

Fonte: Autor

Figura 102 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 6 µm na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 103 – Resultados experimentais das S (mV/dec) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 µm na condição de polarização *ON State*



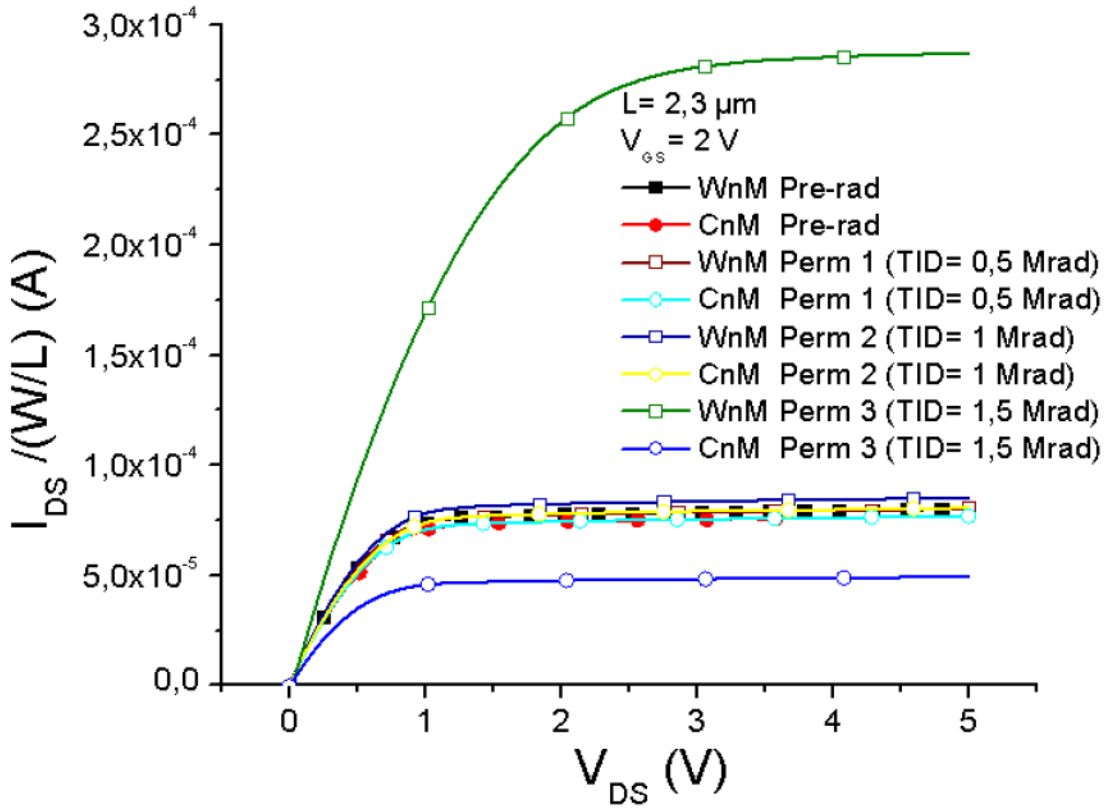

Fonte: Autor

Com a análise das Figuras 101, 102 e 103, onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, nota-se que as variações dos valores das inclinações sublimiares entre o WnM e o CnM são bem próximas em média (23% e 22%, respectivamente) em relação aos valores da pré-radiação. Essas variações das S dos MOSFETs estão associadas às variações das cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X nas interfaces $SIO_2$/Si desses dispositivos.

#### *3.3.3.4 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{DS}$ na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 104 apresenta as curvas experimentais das $I_{DS}$/(W/L) em função de $V_{DS}$ do *Wave* MOSFET e do MOSFET convencional equivalente, para L de 2,3 µm com $V_{GS}$= 2 V para as diferentes TID estudadas.

Figura 104 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{GS}$ = 2 V, na condição de polarização *OFF State*

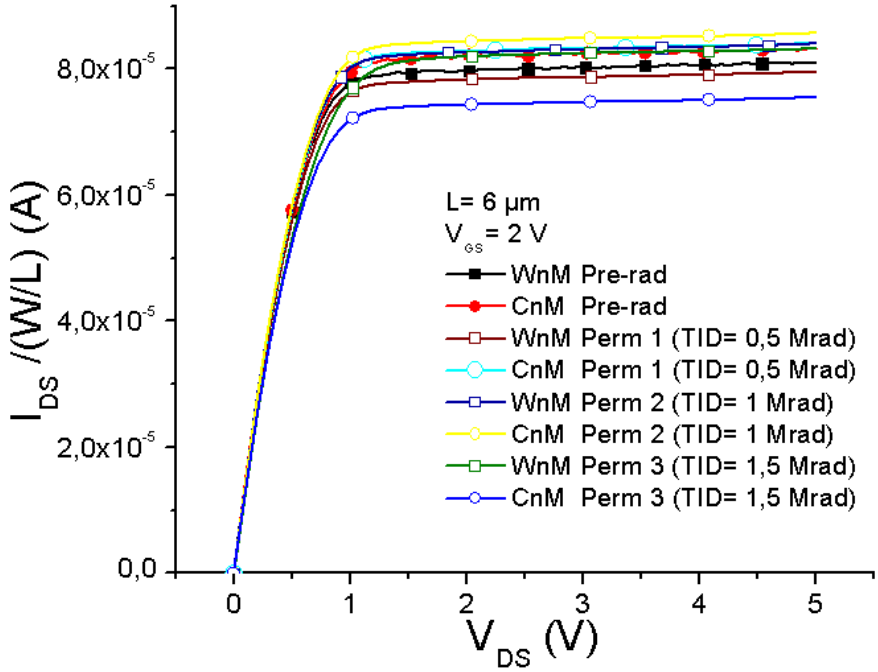



Fonte: Autor

Observando-se a Figura 104, verifica-se que as $I_{DS}/(W/L)$ nas regiões de saturação dos diferentes MOSFETs praticamente não sofrem a influência das radiações ionizantes de raios X para um TID de 1 Mrad (erro máximo de 6%), porém eles são fortemente afetados para uma TID de 1,5 Mrad (WnM: 3 vezes maior que o seu valor de pré-radiação; CnM: 36% menor), inviabilizando-se principalmente o uso do WnM de L igual a 2,3 µm para as aplicações de CIs CMOS.

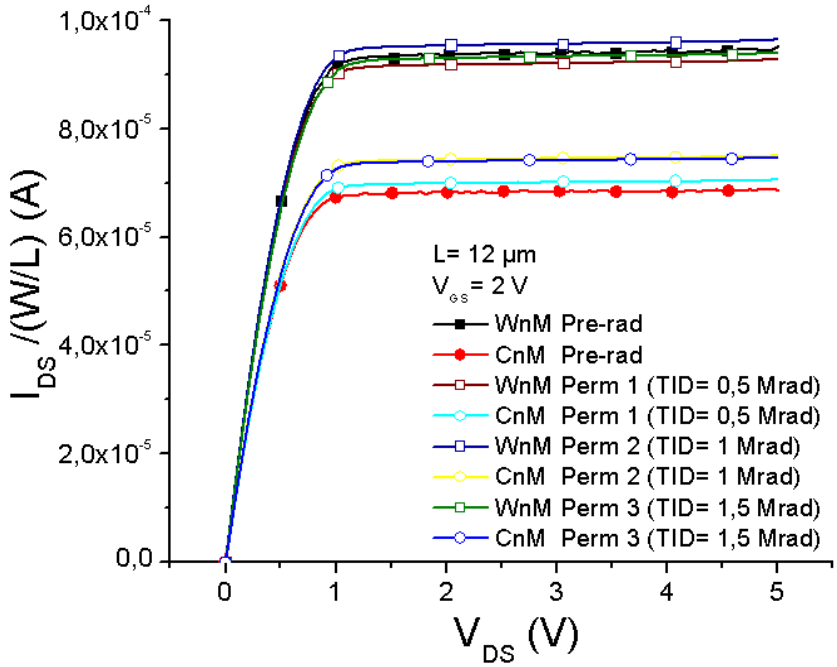
As Figuras 105 e 106 apresentam as curvas experimentais $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ do *Wave* MOSFET e do MOSFET convencional equivalente, para L de 6 µm e 12 µm, respectivamente, com $V_{GS}$= 2 V para as diferentes condições da TID.

Figura 105 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para as diferentes TID, com L=6 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 106 – Curvas experimentais das $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{DS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente para as diferentes TID, com L=12 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



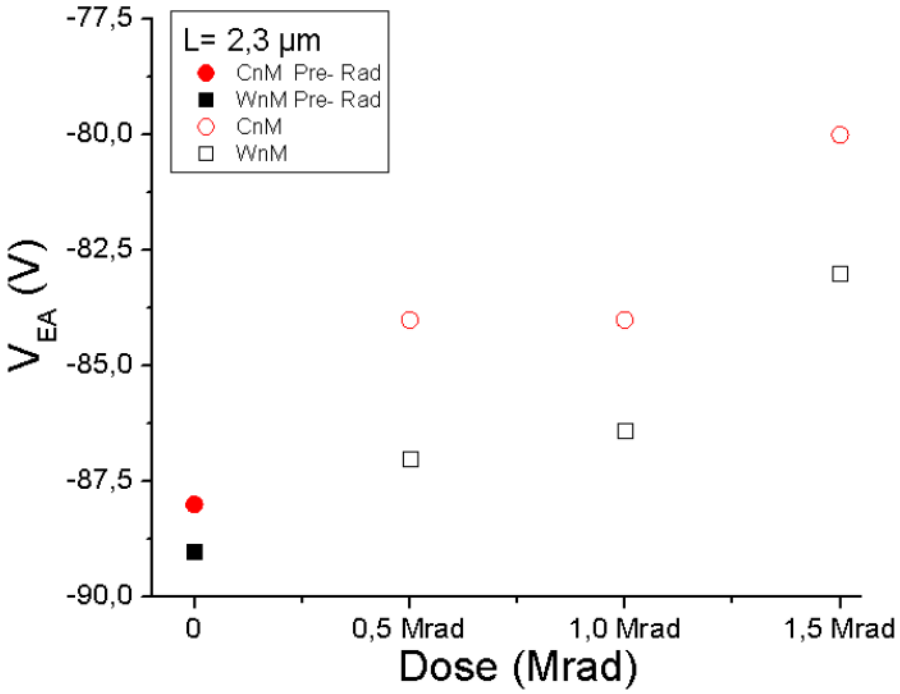

Fonte: Autor

Ao analisar as Figuras 105 e 106, nota-se que para os comprimentos de canal de 6 µm e 12 µm, respectivamente, o comportamento da curva é diferente com relação ao de 2,3 µm. Considerando-se os L de 6 µm e de 12 µm e uma TID de 1,5 Mrad, as $I_{DS}$/(W/L) de saturação dos WnM apresentam menores variações (erro máximo de 2,5% e 1%, respectivamente) em relação aos seus valores de pré-radiação em comparação aos dos seus convencionais equivalentes (erros máximo de 10% para ambos os casos).

#### *3.3.3.5 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas tensões Early na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

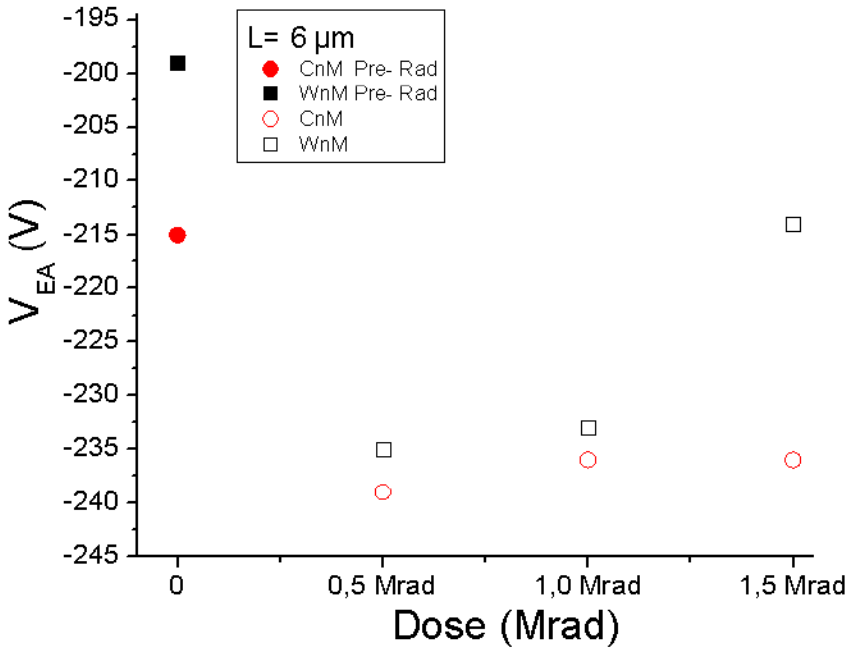
As Figuras 107, 108 e 109 apresentam os resultados das $V_{EA}$ dos CnMs e dos WnMs em função das doses permanentes de 0,5 Mrad, 1,0 Mrad e 1,5 Mrad para os diferentes comprimentos de canal.

Figura 107 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*



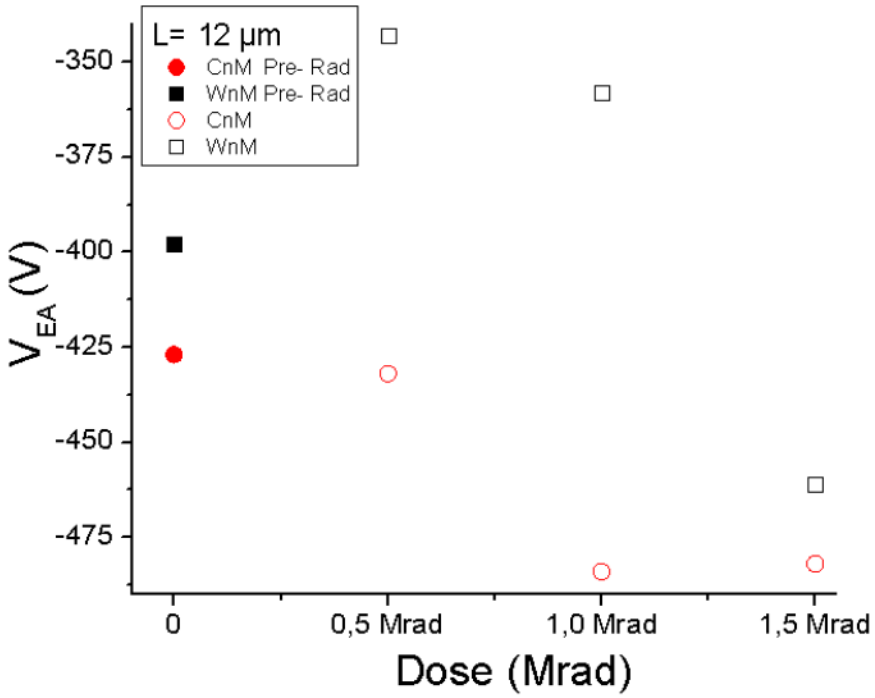

Fonte: Autor

Figura 108 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 109 – Resultados experimentais das $V_{EA}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{GS}$=2V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

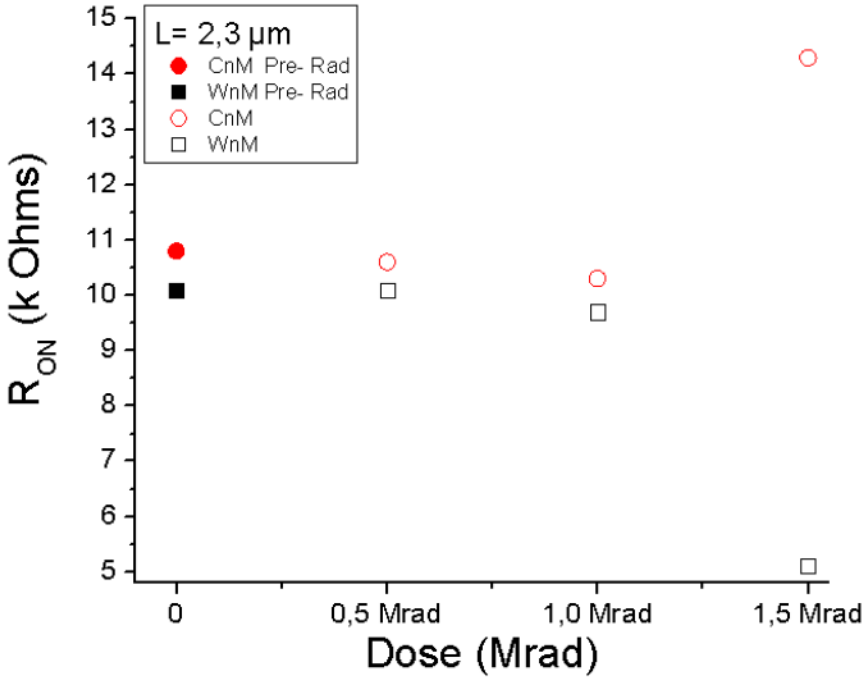
Com a análise da Figura 107, confirma-se que para L de 2,3 µm e com um $V_{GS}$ igual a 2 V, o WnM apresenta um comportamento similar ao do CnM em Pre-rad, 88 V e 89 V (em módulo), respectivamente. Essa tendência é vista em todas as doses. Considerando-se a TID de 1,5 Mrad, a $V_{EA}$ do WnM é igual a 83 V em módulo (variação de 6%) e a $V_{EA}$ do CnM é igual a 80 V em módulo (variação de 11%).

Com a análise das Figuras 108 e 109, observa-se que o WnM possui um maior (pior) valor da $V_{EA}$ em todos os casos. Em média, as variações acontecem pelo fato de ter aumentado a inclinação da região de saturação em decorrência do aumento da corrente de dreno de saturação normalizada em relação a razão de aspecto.

#### *3.3.3.6 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas resistências série de estado ligado na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

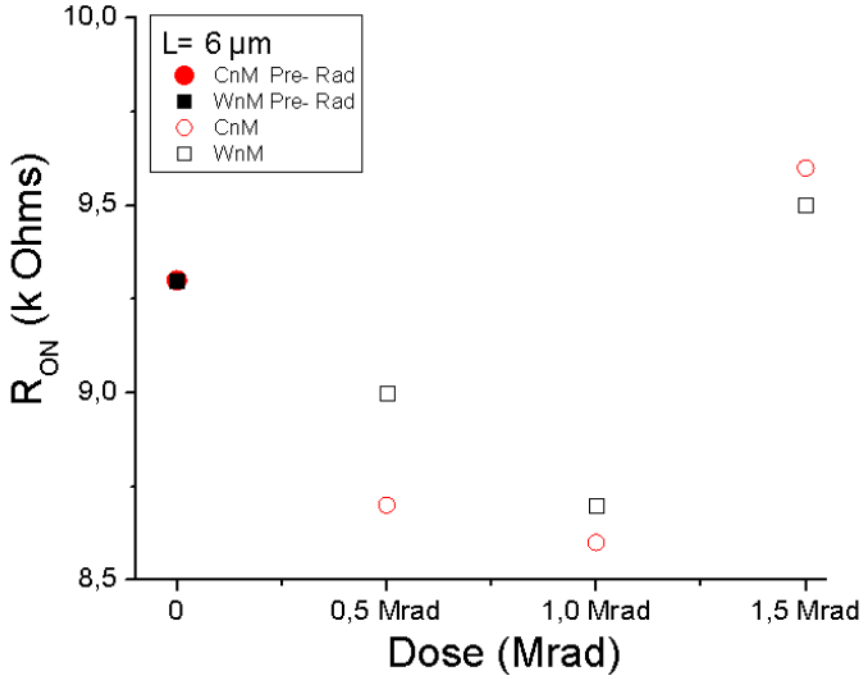
As Figuras 110, 111 e 112 apresentam os resultados das $R_{ON}$ dos CnMs e do WnMs em função das doses permanentes de 0,5 Mrad, 1,0 Mrad e de 1,5 Mrad para os diferentes comprimentos da canal.

Figura 110 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*



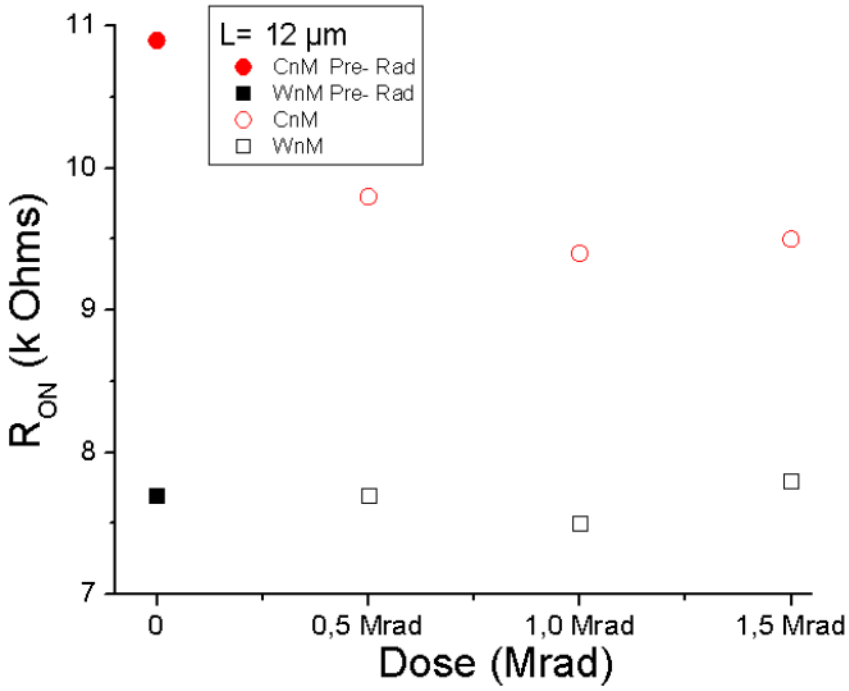

Fonte: Autor

Figura 111 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{GS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 112 – Resultados experimentais das $R_{ON}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{GS}$= 2 V, na condição de polarização *ON State*




Fonte: Autor

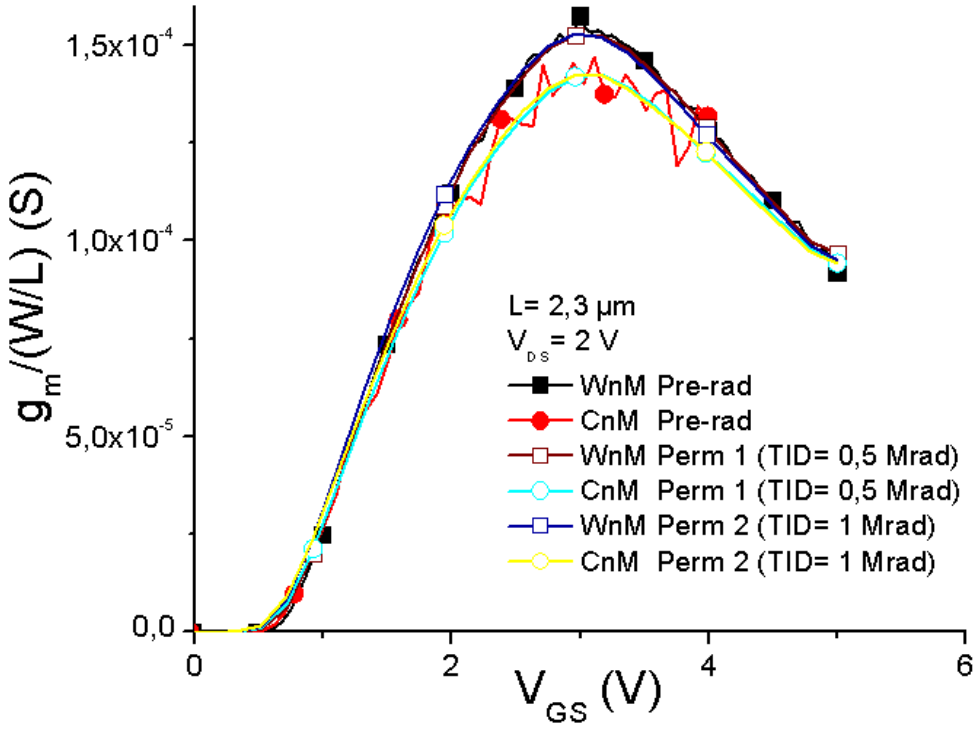
Ao analisar as Figura 110, verifica-se que as variações são muito próximas entre o WnM e o CnM para um L de 2,3 µm na condição Pre-Rad e, também, nas doses intermediárias deste dispositivo. Porém, na TID final de 1,5 Mrad, observa-se uma forte queda da $R_{ON}$ do *Wave* MOSFET (variação de 53%) e uma forte elevação no convencional equivalente (variação de 42%). Esse comportamento corrobora com a da elevação representativa da corrente $I_{DS}$ (devido ao maior número de cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X no óxido de porta) no WnM (com um L de 2,3 µm para uma TID de 1,5 Mrad) e a queda relevante da $I_{DS}$ no convencional equivalente (devido a degradação da mobilidade como consequência das cargas positivas induzidas pelas radiações ionizantes de raios X na interface Si/SiO2), ou seja, as radiações ionizantes com polarização em *OFF State* afetaram o WnM e o CnM de diferentes maneiras. Enquanto as armadilhas criadas no óxido de porta diminuem a $R_{ON}$, no CnM as armadilhas na interface Si/SiO2 causaram um forte impacto no fluxo de corrente entre fonte e dreno.

As Figuras 111 e 112 mostram uma variação bastante linear entre os dispositivos, na média da variação para cada dose, o WnM variou 8% e o CnM 9 % para uma TID final de 1,5 Mrad.

### *3.3.3.7 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas transcondutâncias na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 113 apresenta as curvas experimentais das transcondutâncias extraída da primeira derivada da $I_{DS}/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ do WnM e do equivalente CnM, para um L de 2,3 µm e com um $V_{DS}$ igual a 2 V, para a condição de Pre-rad, 0,5 Mrad, 1,0 Mrad com polarização *OFF State*.

Figura 113 – Curvas experimentais das $g_m/(W/L)$ em função de $V_{GS}$ para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 1 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*

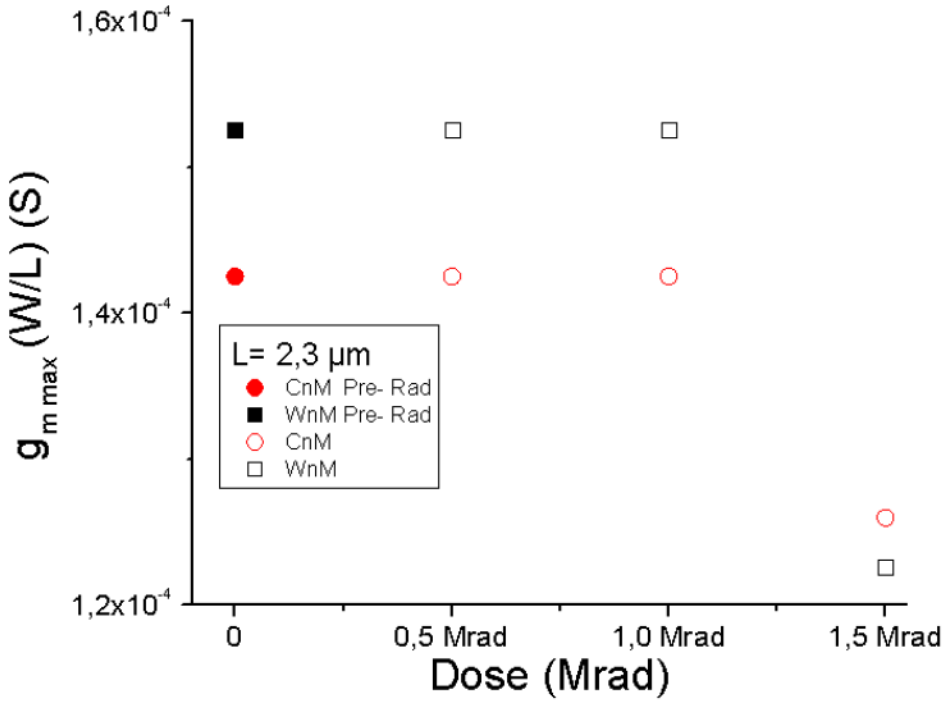



Fonte: Autor

Os resultados experimentais apresentados mostram um melhor resultado do *Wave* MOSFET com relação convencional equivalente de porta retangular, considerando-se as mesmas condições de polarização e o fator geométrico para diferentes valores de $V_{GS}$. Na condição de Pre-rad, o WnM tem um desempenho da $g_m/(W/L)$ 8,5% maior quando comparado ao CnM e esta diferença de desempenho superior é mantida após a TID de 0,5 Mrad e 1 Mrad, pois desconsiderando a mudança significativa de valores para uma TID de 1,5 Mrad, não houve variação nas doses intermediárias.

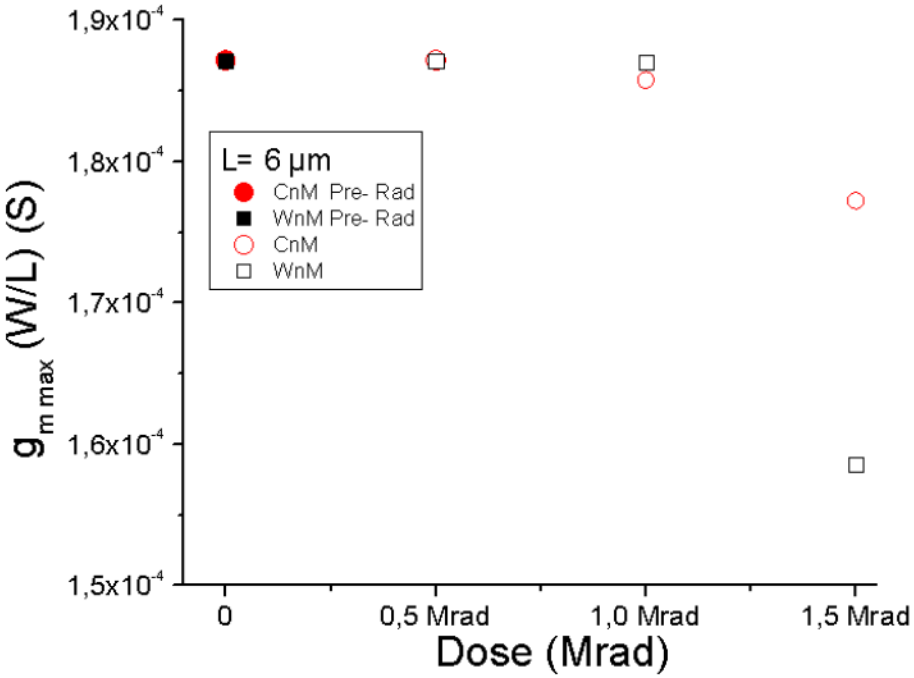
Para verificar as tendências dos resultados da $g_m/(W/L)$ em todos os comprimentos de canal em função da dose, as Figuras 114, 115 e 116 apresentam os resultados das $g_{m\ max}$ dos WnMs e do CnMs para $V_{DS}$ igual a 2 V em função das doses permanentes de 0,5 Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, para um L de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm, respectivamente.

Figura 114 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



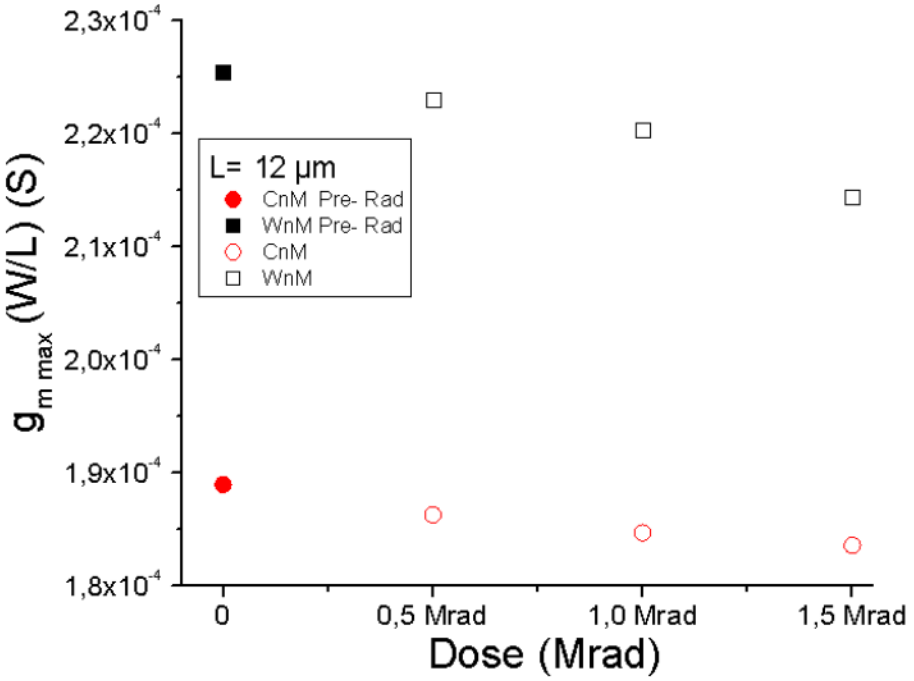

Fonte: Autor

Figura 115 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 116 – Resultados experimentais das $g_{m\ max}$ em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente com L igual a 12 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



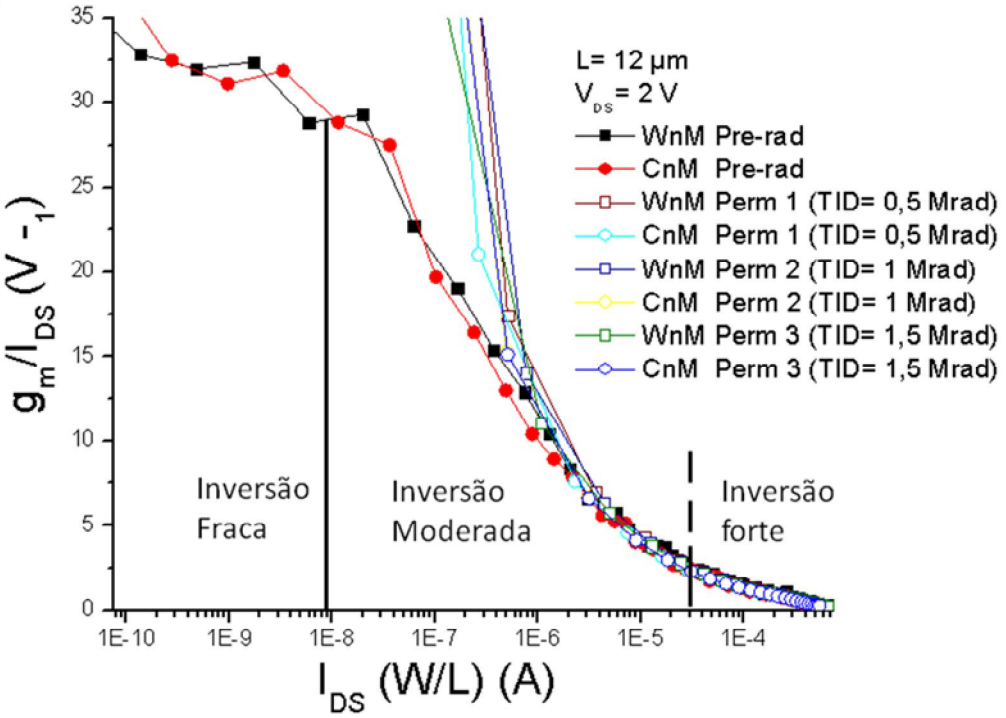

Fonte: Autor

Ao analisar as Figuras 114, 115 e 116 onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, os resultados mostram que os WnMs possuem maiores valores da $g_m$ máximo em praticamente todos os casos. Porém, ao considerar a TID de 1,5 Mrad nessa análise, nota-se uma queda significativa tanto para WnM quanto para o CnM no valor da $g_m$ máximo para o L de 2,3 µm e de 6 µm. Isto acontece porque nesses casos a mudança da corrente de dreno se comporta de maneira mais sensível em relação à mudança da tensão de porta, principalmente para o WnM onde as cargas criadas no óxido de porta elevam sua corrente de dreno de forma mais intensa. Em média, o *Wave* MOSFET se mostra similar ao CnM na variação deste parâmetro após uma TID de 1,5 Mrad (4% e 2%, respectivamente).

#### *3.3.3.8 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas curvas das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 117 apresenta as curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}/(W/L)$ do WnM e do equivalente CnM, para L de 12 µm e com $V_{DS}$ igual 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad, Perm 1,2 e 3.

Figura 117 – Curvas experimentais das $g_m/I_{DS}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais de 1 Mrad, 1,5Mrad e 2 Mrad, respectivamente, com L=12 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



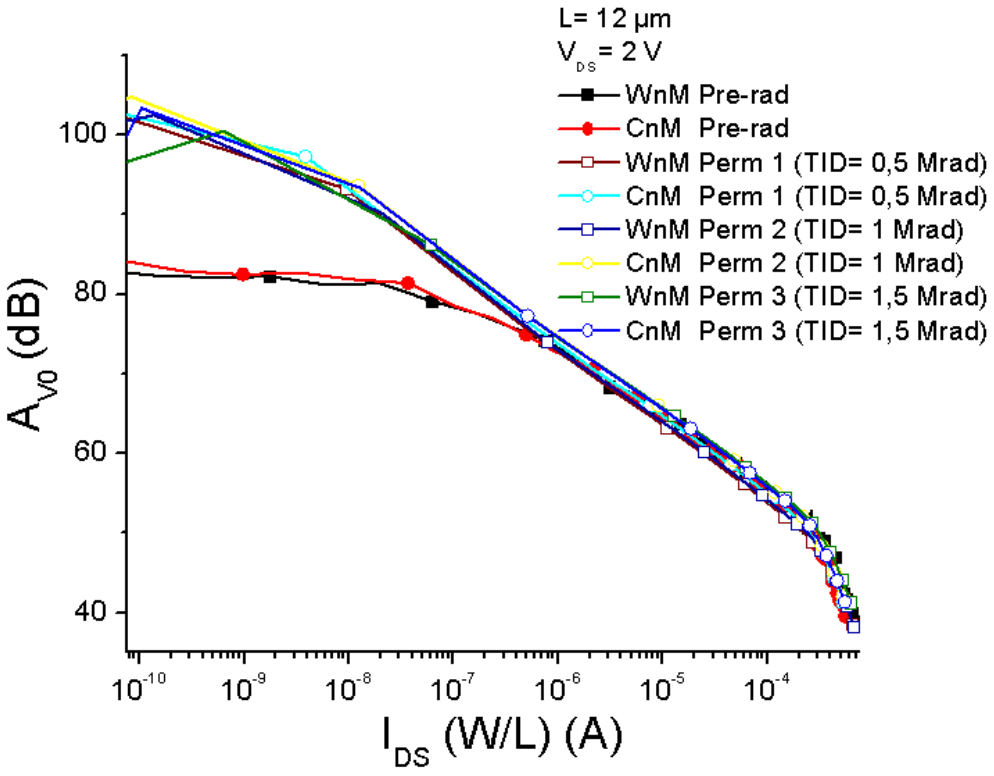

Fonte: Autor

Na Figura 117, observa-se que a $g_m/(I_{DS})$ do WnM e do CnM têm um comportamento bastante ruidoso após cada TID, tanto para o regime de inversão fraca quanto para o regime de inversão moderada, impossibilitando uma análise mais detalhada. Nota-se que na inversão forte os dispositivos pouco se alteraram (cerca de 2%), ou seja, tanto o WnM quanto o CnM indicam um impacto similar neste procedimento de radiações ionizantes com relação aos efeitos da TID com polarização em *OFF State*. As armadilhas criadas no óxido de porta alteraram completamente o funcionamento destes dispositivos para o regime inversão fraca e moderada. Os dispositivos de L 2,3 µm e de 6 µm apresentam um comportamento ainda mais ruidoso para a inversão fraca e moderada com comportamento similar entre o *Wave* MOSFET e seu convencional equivalente. As diferenças de leiaute do MOSFET do tipo *Wave* não contribuíram para atenuar os efeitos da radiação ionizante neste parâmetro elétrico quando comparado ao MOSFET convencional de porta retangular neste experimento.

### *3.3.3.9 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nos ganhos de tensão em malha aberta na condição de polarização "ON State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 118 apresenta as curvas experimentais do $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$/(W/L) do WnM e do equivalente CnM, para L de 12 µm e com $V_{GS}$ igual a 2 V, para a condição de Pre-rad e Perm 1,2 e 3.

Figura 118– Curvas experimentais dos $A_{V0}$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad, para TID iguais a 0,5 Mrad, 1 Mrad, 1,5 Mrad, respectivamente, com L=12 µm e com $V_{DS}$ = 2 V, na condição de polarização *OFF State*



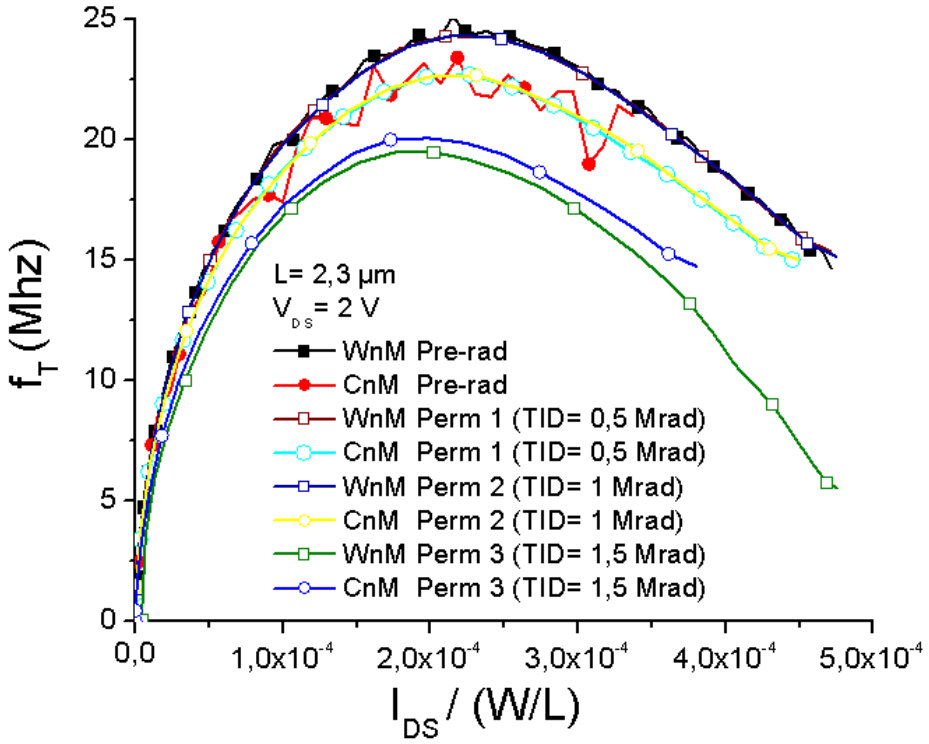

Fonte: Autor

Ao analisar a Figura 118, observa-se para o ganho de tensão em malha aberta a mesma tendência da curva $g_m/(I_{DS})$ em função da $I_{DS}$ / (W / L). É possível considerar a mesma análise da seção 3.2.3.8.

### *3.3.2.10 Efeitos das radiações ionizantes de raios X nas frequências de ganho de tensão unitário na condição de polarização "OFF State" dos transistores durante o processo de radiações ionizantes*

A Figura 119 apresenta as curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$/(W/L) do WnM e do equivalente CnM, para L de 2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, considerando-se a condição de Pre-rad, TID 0,5 Mrad, 1,0 Mrad e de 1,5 Mrad.

Figura 119– Curvas experimentais das $f_T$ em função da $I_{DS}$ /(W/L) para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente em Pre-rad e para TID iguais a 0,5 Mrad, 1,0 Mrad e 1,5 Mrad, respectivamente, com L=2,3 µm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*



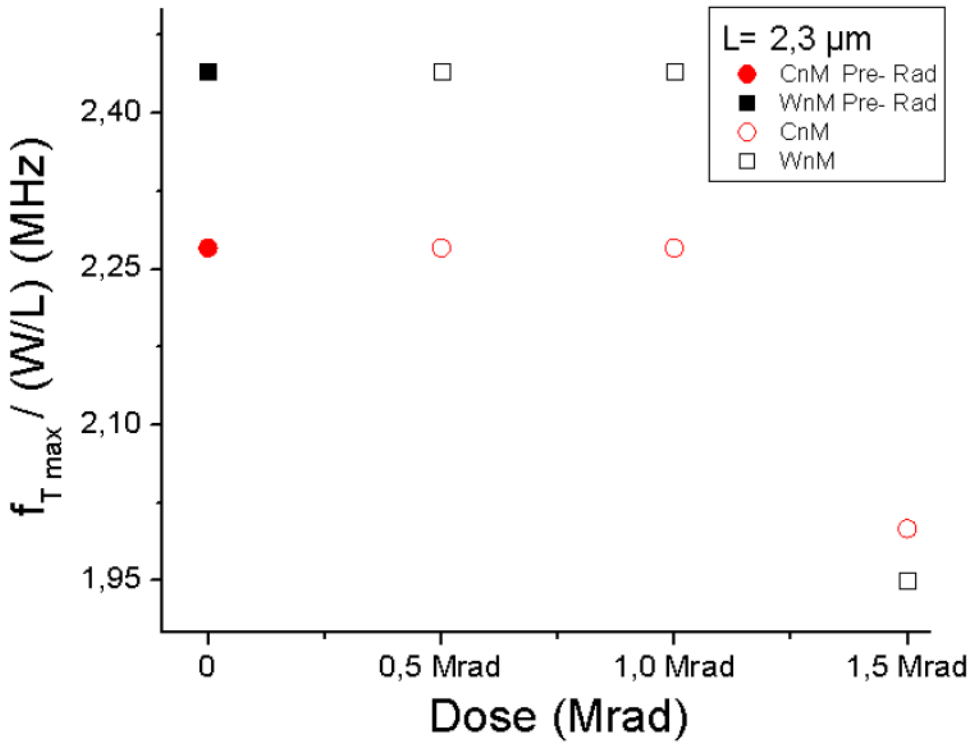

Fonte: Autor

Na Figura 119, nota-se que em Pre-rad a $f_T$ do WnM é 10% maior do que a $f_T$ do CnM equivalente, considerando uma $I_{DS}$/(W/L) igual a 250 µA. Observa-se que tanto o WnM quanto o CnM têm variações semelhantes para Perm 1 e Perm 2. Para Perm 3, o WnM é 2,5 % menor que o CnM e, o WnM tem uma variação de 23% contra 13% do CnM equivalente.

Todavia, com a última dose nota-se o aumento abruto da corrente $I_{DS}$. Para uma análise conclusiva considerando a média entre todos os comprimentos de canal, as Figuras 120, 121 e

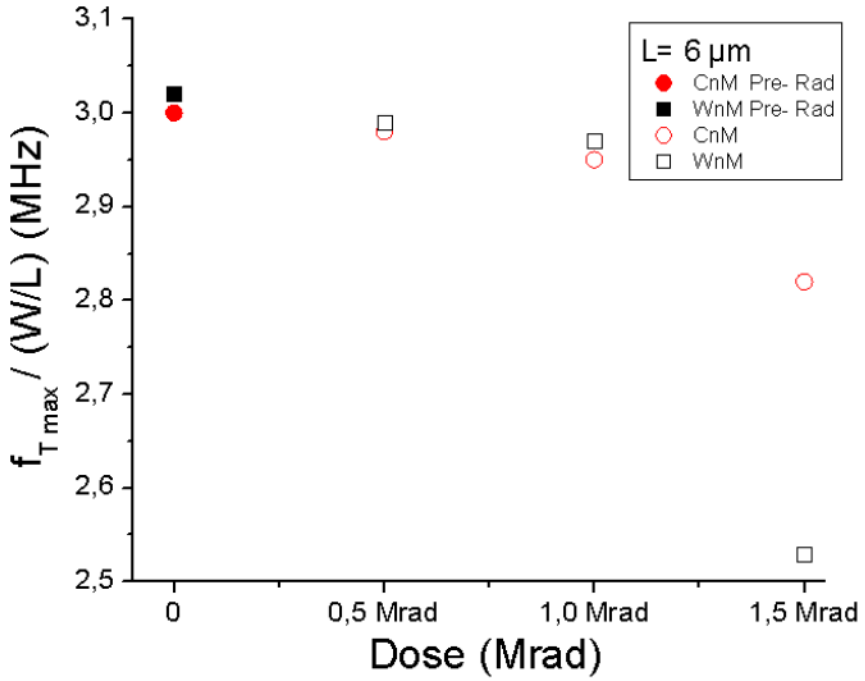
122 apresentam os resultados da $f_{T\ max}$ do CnM e do WnM em função das doses permanentes de 0,5 Mrad, 1 Mrad e 1,5 Mrad, para L de 2,3 µm, 6 µm e 12 µm, respectivamente.

Figura 120 – Resultados experimentais das $f_{T\ max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 2,3 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*



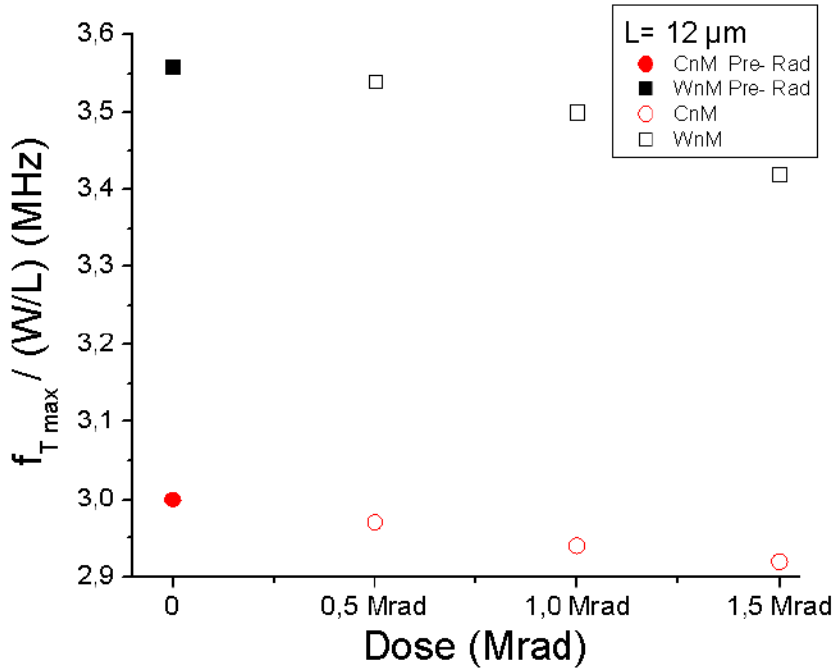

Fonte: Autor

Figura 121 – Resultados experimentais das $f_{T\,max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 6 µm e com $V_{DS}$=2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Figura 122 – Resultados experimentais das $f_{T\,max}$ (W/L) em função da TID para os MOSFETs dos tipos *Wave* e retangular equivalente, com L igual a 12 µm e com $V_{DS}$= 2 V, na condição de polarização *OFF State*




Fonte: Autor

Ao verificar as Figuras 120, 121 e 122, onde todos os comprimentos de canal em função da dose são apresentados, os resultados mostram que os WnMs possuem maiores valores das $f_{T\ max}$ /(W/L) em praticamente todos os casos, a exceção fica com a TID final de 1,5 Mrad para os dispositivos com L de 2,3 µm e de 6 µm, já que nestes as $f_{T\ max}$ /(W/L) foram menores. Isto pode ser explicado pelo aumento representativo das $I_{DS}$ devido aos impactos causados no óxido de porta no procedimento de radiações ionizantes em *OFF State*, no qual verificam-se que as transcondutâncias são bastantes afetadas na TID final de 1,5 Mrad.

Os efeitos da TID podem ser atenuados por meio de estratégias de projetos de leiaute, no qual os efeitos dos transistores parasitários nas BBRs são reduzidos, pois há menor influência das cargas positivas criadas após as radiações ionizantes no *Wave* leiaute naquelas regiões. No caso de polarização em *OFF State*, os efeitos das radiações ionizantes são bem intensos no óxido de porta e, portanto, o estilo de leiaute *Wave* não atenuou essas cargas criadas no óxido de porta e as variações são bem similares entre o WnM e o CnM neste procedimento de teste (4% e 2%, respectivamente). Todavia, o *Wave MOSFET* manteve seu maior desempenho de 20% (em média) quando comparado ao CnM.

# 4 QUADRO GERAL COMPARATIVO RESULTANTE DO ESTUDO DA TID ENTRE OS MOSFETS DOS TIPOS *WAVE* E SEUS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

A Tabela 11 apresenta as comparações entre os principais parâmetros elétricos estudados dos MOSFETs do tipo *Wave* e de seus equivalentes convencionais (retangulares), levando-se em conta diferentes comprimentos de canal e as diferentes condições de polarização (*Floating*, *ON State* e *OFF State*) durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios X, visando verificar quais são as vantagens e desvantagens do uso do estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs em relação aos estilos convencionais utilizados atualmente.

A Tabela 11 é dividia em duas partes: a primeira parte apresenta em porcentagem os valores dos WnMs em relação aos CnMs, em média, levando-se em conta os diferentes comprimentos de canal dos dispositivos estudados na condição de pré-radiação, ou seja, observa-se quanto cada parâmetro ou figura de mérito do estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs é melhor ou pior que o seus respectivos convencionais equivalentes antes do procedimento de radiações ionizantes (considerando-se as mesmas áreas de porta e razões de aspecto); a segunda parte apresenta as variações médias em porcentagem de cada parâmetro ou figura de mérito em relação aos seus valores de pré-radiação, levando-se em consideração os diferentes comprimentos de canal dos MOSFETs e as diferentes TID, em relação a cada condição de polarização dos transistores (*Floating*, *ON State* e *OFF State*) durante os procedimentos das radiações ionizantes de raios X.

Tabela 11- Quadro geral comparativo dos efeitos da TID nos principais parâmetros elétricos e figuras de mérito estudados dos MOSFETs dos tipos *Wave* e convencionais equivalentes de portas retangulares nas condições de polarizações *Floating*, *ON State* e *OFF State*, que foram consideradas durante o processo das radiações ionizantes, assim como a diferença de comportamento entre eles na condição de pré-radiação

| Parâmetros elétricos ou figuras de mérito | Valores dos parâmetros elétricos ou das figuras de mérito do WnM em relação ao CnM na condição Pre-Rad | Variações dos parâmetros elétricos ou das figuras de mérito | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | nMOSFET Convencional | nMOSFET do tipo *Wave* | nMOSFET Convencional | nMOSFET do tipo *Wave* | nMOSFET Convencional | nMOSFET do tipo *Wave* |
| | | *Floating* | | *ON State* | | *OFF State* | |
| $V_{TH}$ [%] | - | 10% | 3% | 6% | 4% | 7% | 32% |
| S [%] | - | 17% | 5% | 102% | 90% | 22% | 23% |
| $I_{ON}$ [%] | melhor em 9% | 5% | 1% | 36% | 9% | 5% | 4% |
| $I_{OFF}$ ou $I_{leak}$ [% ] ou n° X | pior em 127% | 730% | 390% | 4,4 X | 4 X | 4,3 X | 5,3 X |
| $I_{ON}$ / $I_{OFF}$ [%] | pior em 12% | 1080% | 70% | 102% | 74% | 64% | 80% |
| $R_{ON}$ [%] | melhor em 14% | 6% | 2% | 8% | 5% | 9% | 8% |
| $I_{DS\ saturação}$ [%] | melhor em 14% | 7% | 3% | 3% | 3% | 9% | 11% |
| $I_{DS\ triodo}$ [%] | melhor em 13% | 8% | 3% | 3% | 3% | 9% | 11% |
| $g_{m\ max}$ [%] | melhor em 11% | 4% | 5% | 3% | 11% | 2% | 4% |
| $V_{EA}$ [%] | melhor em 3% | 25% | 5% | 11% | 6% | 4% | 9% |
| $A_{V0}$ [%] reg. de inv. fraca | melhor em 10% | 11% | 16% | - | - | 23% | 21% |
| $A_{V0}$ [%] reg. de inv. moderada | melhor em 9% | 15% | 5% | 86% | 80% | 3% | 2% |
| $A_{V0}$ [%] reg. de inv. forte | melhor em 6% | 2% | 3% | 86% | 80% | 3% | 2% |
| $f_T$ [%] | melhor em 20% | 5% | 5% | 3% | 9% | 2% | 4% |

**Legenda:**

- Maior variação
- Similar (Diferença da variação menor que 5% entre o WnM e o CnM)
- Menor variação

Fonte: Autor

Analisando-se a primeira parte da Tabela 11, observa-se que a grande maioria dos parâmetros/figuras de mérito (total de 10) do WnM é melhor que os dos seus respectivos CnM equivalentes. Cabe aqui ressaltar que somente três parâmetros ($I_{OFF}$, $I_{leak}$ e a razão $I_{ON}/I_{OFF}$) apresentam um comportamento pior que o do equivalente CnM. Esses parâmetros pioram a condição de consumo de energia elétrica tanto nas aplicações de CI CMOS analógicos como digitais.

Observando-se a segunda parte da Tabela 11, para a condição *Floating*, nota-se que a maioria dos parâmetros e figuras de mérito analisados dos *Wave* nMOSFETs (57%) apresenta uma melhor tolerância aos efeitos das TID oriundas das radiações ionizantes de raios X, em relação àquelas observadas nos convencionais equivalentes de portas retangulares, levando-se em conta as diferentes condições de polarização dos MOSFETs durante os procedimentos das radiações ionizantes de raios X realizados. Além disso, 36% do total de parâmetros e figuras de mérito avaliados do WnM tiveram variações similares aos dos equivalentes CnM e somente 7% desses parâmetros e figuras de mérito tiveram piores variações.

Quando são analisados os dados referentes aos efeitos das TID nos principais parâmetros e figuras de mérito estudados na condição de polarização *ON State* durante o processo de radiações ionizantes de raios X, onde existe um alto valor de campo elétrico vertical aplicado na porta dos dispositivos, as cargas positivas geradas no óxido de porta e na interface entre o óxido fino de porta e a camada de silício, onde é formado o canal do MOSFET, os *Wave* MOSFETs apresentam melhores tolerâncias aos efeitos da TID (50% dos parâmetros e figuras de mérito analisados), quando comparados com os MOSFETs convencionais de formato de porta retangulares. Além disso, 36% desses parâmetros e figuras de mérito são similares aos dos convencionais equivalentes, sendo que 14% apresentaram um pior desempenho. Nota-se também que alguns parâmetros e figuras de mérito ($I_{ON}$, $I_{OFF}$, $I_{leak}$, $I_{ON}/I_{OFF}$ e $R_{ON}$, que correspondem principalmente aos parâmetros digitais) dos *Wave* MOSFETs nessa condição, degradaram em relação a condição de polarização *Floating* dos dispositivos durante o processo de radiações ionizantes de raios X. Isso se justifica devido ao campo elétrico vertical que é capaz de potencializar os efeitos das radiações ionizantes nos diferentes tipos de MOSFETs estudados. Mesmo nessa condição, os *Wave* MOSFETs não apresentam uma pior tolerância aos efeitos da TID em relação aos seus convencionais equivalentes.

Quando se analisa os efeitos da TID nos parâmetros e figuras de mérito dos MOSFETs na condição de polarização *OFF State* durante o procedimento de radiações ionizantes de raios X, onde tem-se um alto campo elétrico longitudinal aplicado nas estruturas dos MOSFETs, verifica-se que a influência das TID, decorrentes das radiações ionizantes de raios X dos parâmetros e figuras de mérito digitais dos *Wave* MOSFETs foram ainda mais afetados em relação às condições de polarização *Floating* e *ON State* durante os processos de radiações ionizantes de raios X. Isso mostra que o campo elétrico longitudinal decorrente da aplicação da polarização entre dreno e fonte, durante o procedimento de radiação de raios X, tem a capacidade de influenciar ainda mais o seu comportamento, principalmente os das correntes de fuga e $I_{OFF}$ dos *Wave* MOSFETs em relação ao comportamento dos convencionais equivalentes, pois o semicírculo do MOSFET do tipo *Wave* em configuração de dreno interno apresenta um campo elétrico longitudinal maior que o do convencional equivalente e, consequentemente, é responsável por potencializar ainda mais a influência da TID nesses parâmetros e figuras de mérito digitais ($I_{OFF}$ e $I_{ON}/I_{OFF}$). Todavia, nessa condição (*OFF State*), os parâmetros e figuras de mérito analógicos ($g_m$ e $f_T$) dos *Wave* MOSFETs ainda não foram significativamente degradados, indicando uma boa tolerância aos efeitos da TID para as aplicações de CIs CMOS analógicos. Ao considerar todos os parâmetros e figuras

de mérito desse procedimento, pode-se concluir que houve uma similaridade entre os WnMs e os CnMs.

Mediante as análises dos efeitos da TID nos parâmetros e figuras de mérito estudados e realizados nas diferentes condições de polarização durante o processo de radiações ionizantes de raios X, pode-se concluir que o estilo de leiaute do tipo *Wave* para MOSFETs é uma outra alternativa de leiaute para as aplicações de CIs CMOS analógicos, pois os *Wave* MOSFETs mantêm o melhor comportamento da condição Pre-rad para $g_m$ e $f_T$, assim como as suas variações são próximas as dos convencionais equivalentes, sem degradar o $A_{V0}$, principalmente para L com comprimentos de canal de 12 μm. Isto acontece devido ao seu diferenciado formato, o qual apresenta um campo elétrico longitudinal que é radial ao longo do canal e, portanto, ele é menor nas regiões de bico de pássaro do que aqueles observados no leiaute retangular convencional. Dessa maneira, o WnM tem a capacidade de reduzir a influência da TID nos transistores parasitários nas BBRs.

# 5 CONCLUSÕES

O estilo de leiaute *Wave* para MOSFETs é capaz de gerar um campo elétrico longitudinal radial ao longo do canal, inclusive nas regiões de bico de pássaro. Consequentemente, através desse estudo comparativo experimental, observa-se uma menor influência dos MOSFETs parasitários associados às regiões de bico de pássaro sobre os seus parâmetros elétricos e figuras de mérito, em relação ao estilo convencional equivalente (retangular), quando submetidos a ambientes de radiações ionizantes de raios X.

Constatou-se que o MOSFET do tipo *Wave* com o menor comprimento de canal (2,3 μm) apresenta uma menor tolerância aos efeitos da Dose Ionizante Total (TID), decorrentes das radiações ionizantes de raios X, em relação aos de comprimentos de canal maiores. Isto é justificado pois ele apresenta um maior campo elétrico longitudinal na região de dreno do semicírculo que está configurado na polarização de dreno interno.

A principal conclusão deste trabalho de pesquisa é que o MOSFET do tipo *Wave* com o maior comprimento de canal, que neste caso é de 12 μm, é mais tolerante aos efeitos da TID decorrentes das radiações ionizantes de raios X, em relação ao seu equivalente convencional (o de porta retangular), considerando-se todos os parâmetros elétricos e figuras de mérito estudadas e para as diferentes condições de polarização dos transistores durante os procedimentos de radiações ionizantes de raios X (condições *Floating*, *ON State* e *OFF State*). Isso é explicado pois quanto maior é o comprimento de canal do MOSFET do tipo *Wave*, menores são as influências dos transistores parasitários das regiões de bico de pássaro sobre os seus parâmetros elétricos e figuras de mérito, em virtude de um menor campo elétrico longitudinal nas regiões de bico de pássaro (mais radial e menos paralelo que os de comprimento de canal menores, que neste caso são de 2,3 μm e 6,0 μm, respectivamente).

Geralmente os comprimentos de canal dos MOSFETs dos estágios de saída das aplicações de CIs CMOS analógicos (Amplificadores Operacionais de Transcondutância, etc.) são bem maiores que a mínima dimensão permitida pelo processo de fabricação, objetivando-se maximizar as suas tensões *Early* e, consequentemente, os ganhos de tensão desses circuitos ($A_{V0}$ é diretamente proporcional a $V_{EA}$), com intuito de se usar um único estágio amplificador e, subsequentemente, reduzir de área de silício utilizada. Dentro desse contexto, o estilo de leiaute *Wave* pode ser considerado uma inovadora alternativa de leiaute para potencializar tanto o desempenho elétrico quanto a tolerância aos efeitos da TID nas aplicações espaciais e médicas de CIs CMOS analógicos.

Analogamente, como as fontes chaveadas integradas e os conversores de corrente contínua (CC ou *Direct Current*, DC) para CC (DC) integrados requerem uma menor resistência entre dreno e fonte de estado ligado ($R_{ON}$) e baixa carga na porta ($Q_G$) para produzir uma alta eficiência na conversão de potência em escala de multi-MHz (>5MHz), o estilo de leiaute do tipo *Wave* também pode ser considerado uma importante técnica de leiaute para implementar MOSFETs de potência planares (associação paralela de vários transistores em paralelo), pois além de apresentarem um maior fator de integração [(W/L)/A], também apresentam menores valores e variações de $R_{ON}$, quando submetidos as radiações ionizantes de raios X, em comparação ao estilo de leiaute retangular equivalente.

# 6 TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

a) Comparar o *Wave* MOSFET com o MOSFET de porta retangular considerando a mesma corrente de dreno, reduzindo-se a $V_{GS}$ ou a $V_{DS}$, ou ainda ambos, pois o *Wave* MOSFET tem maior $I_{DS}$ quando comparado ao convencional equivalente de porta retangular.

b) Polarizar na condição de operação analógica (região de saturação) os dispositivos durante os procedimentos de radiações ionizantes visando as aplicações de CIs CMOS analógicos.

c) Comparar o estilo de *Wave* MOSFET com outras geometrias não convencionais (*Fish* e outros) para aplicações de CIs CMOS operando em ambientes de radiações ionizantes.

d) Comparar o *Wave* MOSFET com o MOSFET de porta retangular considerando canal P.

e) Comparar o *Wave* MOSFET com o MOSFET de porta retangular considerando comprimentos de canal menores.

# REFERÊNCIAS


[1] SEDRA, A. S.; SMITH, J. C. **Microeletrônica**. São Paulo: Makron *Books*, 2000.

[2] KAHNG, D. A Historical perspective on the development of MOS transistors and related devices**. IEEE transactions on electron devices**, v. 23, n. 7, p. 655-657, Jul. 1976.

[3] COLINGE, J. P. **Silicon-on-insulator technology**: Materials to VLSI. 3. ed. Boston: Kluwer Academic, 2004.

[4] YU, B. et al. Short-channel effect improved by lateral channel-engineering in deep-submicronmeter MOSFET's. **IEEE transactions on electron devices**, v. 44, n. 4, p. 627-634, Apr. 1997.

[5] International technology roadmap for semiconductors (ITRS) [On-line] website. Available: http://public.itrs.net/, 2016.

[6] MOORE, G. E. Lithography and the future of moore's law**.** Copyright 1995 IEEE. Reprinted with permission. Proc. SPIE Vol. 2437, p. 2–17, **IEEE solid-state circuits society newsletter**, vol. 11, no. 5, p. 37- 42, Sep. 2006.

[7] MACK, C.A. Keynote: Moore's Law 3.0**. Microelectronics and electron devices (WMED) workshop**, Boise, ID, 2013.

[8] MCLAIN, M. et al. Enhanced TID susceptibility in sub-100 nm bulk CMOS I/O transistors and circuits. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 54, no. 6, p. 2210–2217, Dec. 2007.

[9] FACCIO, F. et al. Total ionizing dose effects in shallow trench isolation oxides. **Microelectron. reliab.**, vol. 48, p. 1000-1007, 2008.

[10] BARNABY, H. J. Total-Ionizing-Dose effects in modern CMOS technologies. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 53, no. 6, p. 3103- 3120, 2006.

[11] COLINGE, J. P. et al. Silicon on insulator "gate all around device". **Proc. IEDM tech. dig.**, p. 595, 1990.

[12] SANDERS, T. J. CMOS hardness assurance through process controls and optimized design procedures. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. NS-24, p. 2051–2055, Dec. 1977.

[13] SHANEYFELT, M. R. et al. Challenges in hardening technologies using shallow-trench isolation. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. NS-45, p. 2584–2592, Dec. 1998.

[14] NOWLIN, N. et al. A total-dose hardening-by-design approach for high-speed mixed-signal CMOS integrated circuits. **Int. J. high-speed electron. syst.**, vol. 14, no. 2, p. 367–378, 2004.

[15] FERLET-CAVROIS, V. et al. **Total dose induced latch in short channel NMOS/SOI transistors**. IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 45,no. 6, pt. 1, p. 2458–2466, Dec. 1998.

[16] MAMOUNI, F. E. et al. Gate length and drain-bias dependence of band-to-band tunneling-induced drain leakage in irradiated fully depleted SOI devices. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 55, no. 6, pt. 1, p. 3259–3264, 2008.

[17] CHOI, Y. K.; KING, T. J.; HU, C. Nanoscale CMOS spacer FinFET for the terabit era. **IEEE electr. device lett.**, vol. 23, no. 1, p. 25–27, Jan. 2002.

[18] ANDRIEU, F. et al. Planar fully depleted SOI technology: A powerful architecture for the 20 nm node and beyond. **IEDM tech. dig.**, p. 3.2.1–3.2.4, Dec. 2010.

[19] LEE, C. et al. Threshold voltage dependence of threshold voltage variability in intrinsic channel silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with ultrathin buried oxide. **Jpn. J. appl. phys.**, vol. 49, p. 04DC01-1, 2010.

[20] MAHATME, M. N. et al. Impact of back-Gate bias and device geometry on the total ionizing dose response of 1-transistor floating body RAMs. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 59, no. 6, p. 2966–2973, Dec. 2012.

[21] GAILLARDIN, M. et al. Impact of SOI substrate on the radiation response of ultra thin transistors down to the 20 nm Node. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 60, no. 4, p. 2583–2589, Aug. 2013.

[22] FACCIO, F.; CERVELLI, G. Radiation-induced edge effects in deep submicron CMOS Transistors. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 52, no. 6, p. 2413–2420, 2005.

[23] ALEXANDER, D. R. Design issues for radiation tolerant microcircuits for space. **NSREC Conf.**, Indian Wells, CA, Jul.1996.

[24] LACOE, R. C. Improving integrated circuit performance through the application of hardness-by-design methodology. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 55, no. 4, p. 1903–1925, Aug. 2008.

[25] CAMPBELL, M. et al. A pixel readout chip for 10–30 MRad in standard 0.25 µm CMOS. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 46, no. 3, p. 156–160, Jun. 1999.

[26] LACOE, R. C. et al. Application of hardness-by-design methodology to radiation-tolerant ASIC technologies. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 47, no. 6, p. 2334–2341, Dec. 2000.

[27] LEE M. S.; LEE, H. C. Dummy Gate-Assisted n-MOSFET Layout for a Radiation-Tolerant Integrated. **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, vol. 60, no. 4, p. 3084–3091, Aug. 2013.

[28] GIRALDO, A.; PACCAGNELLA, A.; MINZONI, A.; Aspect ratio calculation in n-channel MOSFET's with a gate-enclosed layout. **Solid state electron.**, vol. 44, p. 981–989, Jun. 2000.

[29] FACCIO, F. Design hardening methodologies for ASICs. **Radiation effects on embedded systems**, R. Velazco, P. Fouillat, and R. Reis, Eds. New York: Springer-Verlag, p. 143–160, 2007.

[30] NOWLIN, N. et al. A total-dose hardening-by-design approach for high-speed mixed-signal CMOS integrated circuits. **Int. J. high-speed electron. syst.**, vol. 14, no. 2, p. 367–378, 2004.

[31] GIMENEZ, S. P. Diamond MOSFET: An innovative layout to improve performance of ICs. **Solid-State Electronics**, v.54, p.1690-1696, 2010.

[32] FINO, L.N.S. et al. Boosting the total ionizing dose tolerance of digital switches by using OCTO SOI MOSFET. **Semiconductor science and technology**, v.30, no.10, p. 1-12, Sep. 2015.

[33] GIMENEZ, S. P. et al. An innovative Ellipsoidal layout style to further boost the electrical performance of MOSFETs. **IEEE electron device letters**, v.36, no.7, p. 705-707, Jul. 2015.

[34] GIMENEZ, S. P. The *Wave* SOI MOSFET: A new accuracy transistor layout to improve drain current and reduce die area for current drivers applications. **ECS trans.**, v. 19. p. 153-158, San Francisco, 2009.

[35] DA SILVA, A. L. **Electrical behavior study of the *Wave* SOI nMosfet and conventional counterpart**. M.S thesis - FEI, São Bernardo do Campo, 2010.

[36] NAVARENHO DE SOUZA, R.; GIMENEZ, S. P. Experimental comparative study between the *Wave* layout style and its conventional counterpart for implementation of analog integrated circuits. **ECS Trans.**, v.49, p. 519-526, 2012.

[37] NAVARENHO DE SOUZA, R.; GIMENEZ, S. P. **Estudado comparativo experimental entre o estilo de leiaute *Wave* e o convencional equivalente para implementação de circuitos integrados analógicos e Digitais**. Dissertação (Mestrado em Dispositivos Eletrônicos) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do campo, 2012.

[38] The MOSIS Service, http://www.mosis.com/, 2012.

[39] YOO, A. et al. High-performance low voltage power mosfets with hybrid waffle layout structure in a 0.25 µm standard CMOS process. **Proc. 20th Int. symp. power semicond. devices & IC's**, Orlando, p. 95–98, May 2008.

[40] WU, W.; LAM, S.; CHAN, M. A wide-band T/R switch using enhanced compact Waffle MOSFETs. **IEEE Microwave and wireless components letters**, v. 16, n. 5, 2006.

[41] MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONK, P. B. **Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS**: Thomson, 2003.

[42] ZHU W. et al. Mobility measurement and degradation mechanisms of MOSFETs made with ultrathin high-k dielectrics. **IEEE transactions on electron devices**, v. 51, n. 1, p. 8-105, Jan. 2004.

[43] TROUTMAN, R.R. **Latchup in CMOS technology: The problem and its cure**. MA, USA: Kluwer Academic Norwell, 1986.

[44] SCHWANK, J R et al. Radiation effects in SOI technologies. **IEEE transactions on nuclear Science**. v. 50, n. 3, p. 522-538. Jun.2003

[45] LIM, H. K.; FOSSUM, J. G. Threshold voltage of thin-film Silicon-on-insulator (SOI) MOSFET's. **IEEE transactions on electron devices**, v. 30, n. 10, p. 1244-1451, 1983.

[46] COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of semiconductor devices**. New York: Kluwer Academic Publishers, capítulo 7.7 p. 201-206, 2003.

[47] GROESENEKEN, G. et al. Temperature dependence of threshold voltage in thin- film SOI MOSFETs. **IEEE electron device letters**. vol.11, n. 8, p. 329-331, 1990.

[48] WESTE, N.; ESHRAGHIAN. **Principles of CMOS VLSI design.** A systems Perspective, Addison- Wesley, 1985.

[49] ORTIZ, C. A. et al. A review of recent MOSFET threshold voltage extraction methods. **Microelectronics reliability**, v. 42, p. 583-596, Dec. 2001.

[50] TERAO, A. et al. Measurement of threshold voltages of thin-film accumulation-mode PMOS/SOI transistors. **Electron device letters, IEEE**, v. 12, p. 682 - 684, 1991.

[51] NEAMEN, D. A. **Semiconductor physics and devices: basic principles**. 3. ed. Boston: McGraw-Hill Higher- Education, p. 498-499, 2003.

[52] S. M. SZE. **Physics of semiconductor devices**. 2nd Edition. Wiley Interscience Publications.

[53] GENDA J. H.; CHI, C.; YU, T. C. Gate voltage dependent effective channel length and series resistance of LDD MOSFET´s. **IEEE transaction on electron devices**, n.12, p. 2469-2475, Dec. 1987.

[54] LIM K. Y.; ZHOU X. A Physically-based semi-empirical series resistance model for deep-submicron MOSFET *I–V* modeling. **IEEE transactions on electron devices**, v. 47, nº 6, p. 1300-1302, Jun. 2000.

[55] SAKAKIBARA, J.; URAKAMI, Y.; YAMAGUCHI, H. Ultra low on- resistance super 3D MOSFET Under 300V Breakdown Voltage. **16th International symposium on power semiconductor devices & ICs**, 2004, Kitakyushu.

[56] Datasheet FairChild Semiconductor, **Effects of on resistance (Ron) to an analog Switch**. Apr. 2002.

[57] SEDRA A. S.; SMITH C. K. **Microeletronic circuits**. ed. 5, Oxford University Press, p. 254-255, 2004.

[58] LI, Y.; CHOU, H. M. Comparative study of electrical characteristic on sub-10-nm double-gate MOSFETs. **IEEE transactions on nanotechnology electron**, v.4, n.5, p. 645-647, Sep. 2005.

[59] HAMMAD, M. Y.; SCHRODER D. K. Analytical modeling of the partially-depleted SOI MOSFET. **IEEE transactions on electron devices**, v. 48, n. 2, p. 252-258, Feb. 2001.

[60] SILVEIRA, F.; FLANDRE, D.; JESPER P. G. A. A $g_m/I_D$ 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, p.1314-1319, 1996.

[61] BINKLEY, D. M. **Tradeoffs and optimization in analog CMOS design**. England: John Wiley & Sons, 2008.

[62] VELAZCO, R.; FOUILLAT, P.; REIS, R. **Radiation effects on embedded systems**. Dordrecht: Springer, 2007.

[63] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. 10ª Edição. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2004.

[64] HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L. **Handbook of radiation effects**. 2nd. ed. New York: Oxford, 2003.

[65] BOUDENOT, J. C. Radiation space environment. In:VELAZCO, R.; FOUILLAT, P.; REIS, R. **Radiation effects on embedded systems.** Dordrecht: Springer, 2007.

[66] O'GORMAN, T. J. The effect of cosmic rays on the soft errors of a DRAM at ground level. **IEEE transactions on nuclear science.** [S.1.], V.41, n. 4, p. 533-557, Apr. 1994.

[67] PROFIO, A. E. **Radiation shielding and dosimetry.** New York: Wiley, 1979.

[68] CLAEYS, C. L.; SIMOEN, E. **Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices.** [S.l.]: Springer, 2002.

[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. et al. Radiation effects in MOS oxides. **IEEE transactions on nuclear science**, Snowmass Village, v.55, n.4, p. 1833-1853, Aug. 2008.

[73] POIVEY, C.;HOPKINSON, G. Displacement damage mechanism and effects. **EPFL space center**, 2009.

[74] SROUR, J. R,; MARSHALL, C. J.; MARSHALL, P. W. Review of displacement damage effects in silicon devices. **IEEE transactions on nuclear science**, vol. 50, no. 3, Jun. 2003.

[75] WANG, F.; AGRAWAL, V. D. Single event upset: an embedded tutorial. **IEEE international conference on VLSI design**, p.429-434, 2008.

[76] GUENZER. C. S.: WOLICKI, E. A.; ALLAS, R. G. Single event upset of dynamic RMs by neutrons and protons. **IEEE transactions on nuclear science**, Snowmass Village, v. 26, n.6, p.5048-5052, Dec. 1979.

[77] BAZE, M. P.; BUCHNER, S. P. Attenuation of single event induced pulses in CMOS combinational logic. **IEEE transactions on nuclear science,** Snowmass Village, v. 44, n. 6, p. 2217-2223, Dec. 1997.

[78] TURFLINGER, T. L. Single-event effects in analog and mixed-signal integrated circuits. **IEEE transactions on nuclear science**, [S. 1.], v. 43, n. 2, p. 594-602, Apr. 1996.

[79] BOLINDER, R. **Atmospheric radiation effects study on avionics – an analysis of NFF errors.** M.S thesis -Linköpings universitet - Institutionen för datavetenskap, Linköping, 2013.

[80] SEXTON, F. W. et al. Single event gate rupture in Thin Gate Oxides. **IEEE transactions on nuclear science**, Snowmass Village, v.44, n. 6, p. 2345-2352, Dec. 1997.

[81] SCHRIMPF, R. D. **Radiation effects in microelectronics**. Dordrecht, Springer, 2007.

[82] SCHWANK, J. R. Basic mechanisms of radiation effects in the natural space environment. **IEEE NSREC short course**, 1994.

[83] OLDHAM, T. R.; MCLEAN, F. B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices. **IEEE transactions on nuclear science**, 50, Jun. 2003. 483-499.

[84] MCLEAN, F. B.; OLDHAM, T. R. Basic Mechanisms of radiation effects in electronic materials and devices. **U.S. army laboratory command.** [S.l.]. 1986.

[85] SNOW, E. H.; GROVE, S.; FITZGERALD, D. J. Effects of ionizing radiation on oxidized silicon surfaces and planar devices. **Proceedings of the IEEE**, [S.1.], v.55, n.7, p. 1168-1184, Jul. 1967.

[86] SNOEYS, W. et al. Layout Techniques to enhance the radiation tolerance of standard CMOS technologies demonstrated on a pixel detector readout chip. **Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment**, [S. 1.], v.439, n. 2-3, p. 349-360, Jan. 2000

[87] MAVIS, D. G.; ALEXANDER, D. R. Employing radiation hardness by design techniques with commercial integrated circuit processes. **16th Digital avionics systems conference**, Oct. 1997.

[88] 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.

[89] http://www.mosis.com/cgi-bin/cgiwrap/umosis/swp/params/ami-c5/t99j-params.txt, 2012

[90] EURO PRACTICE. **Especificação da tecnologia On Semiconductor 0,5 µm C05 N/F.** Disponível em: <http://www.europracticeic.com/technologies_AMIS.php?tech_id=05um>. Acesso em: Novembro de 2011.

[91] MOSIS. **Regras de leiaute do processo de fabricação On Semiconductor 0,5µm**. Disponível em: <http://www.mosis.com/Technical/Layermaps/lmscmos_ scn3me.html>. Acesso em: Outubro de 2011.

[92] SCHWANK, J. R.; SHANEYFELT, M. R.; DODD, P.E. **Radiation hardness Assurance testing of microelectronic devices and integrated circuits: radiation environments, physical mechanisms, and foundations for hardness assurance**. Sandia Nat. Lab. Doc., Albuquerque, New Mexico, 2008.

[93] SEXTON, F. W.; SCHWANK, J. R. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. NS-32, no. 6, p. 3975–3981, Dec. 1985.

[94] LIU, Z. et al. Total ionizing dose enhanced DIBL Effect. **IEEE transactions on nuclear science**., v 58, no3, p 1324- 1331, 2011.

[95] FERLET-CAVROIS, V., et al. Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors. **IEEE transactions on nuclear science**, v. 47, no. 6, p. 2183–2188, Dec. 2000.

[96] SHANEYFELT, M. R. et al. Total ionizing dose and single event effects hardness assurance qualification issues for microelectronics. **IEEE trans. nuclear science**, vol. NS-55, no. 4, p.1926–1946, Aug. 2008.

[97] SHANEYFELT, M. R. et al. Effects of burn-in on radiation hardness. **IEEE trans. nucl. sci.**, vol. 41, no. 6, p. 2550–2559, Dec.1994.

[98] SHANEYFELT, M. R. et al. Wafer-level radiation testing for hardness assurance. IEEE **Trans. nucl. sci.**, vol. 38, no. 6, p. 1598–1605, Dec. 1991.

[99] SCHWANK, J. R. et al. Correlation between Co-60 and x-ray radiation-induced charge buildup in silicon-on-insulator buried oxides. **IEEE transactions on nuclear science**, v. 47, no. 6, p. 2175 2182, Dec. 2000.

[100] SCHWANK, J. R. et al. New insights into fully-depleted SOI transistor response after total-dose irradiation. **IEEE transaction on nuclear science**., v. 47, no. 3, p. 604–612, Jun. 2000.

**APÊNDICE A –** Artigos publicados

- **Mitigating MOSFET Radiation Effects by Using the Wave Layout in Analog ICs Applications**

JICS (Journal of Integrated Circuits and Systems) - ISSN 1807 -1953 – JUL 2015
http://www.sbmicro.org.br/jics/html/artigos/vol10no1/capa.pdf

- **Using the Wave Layout Style to Boost the Digital ICs Electrical Performance**

227th ECS in CHICAGO (Eletrochemical Society- The Society for Solid-State and Electrochemical science and Technology 2015 – May 2015
http://ecst.ecsdl.org/content/66/5/71.full.pdf+html

- **Reducing the Off-State Leakage Current for Applications in Radiation Environment by Using the Wave Layout for MOSFETs**

SEMINATEC APR 2015 (Semiconductors and Micro & Nano Technology)
http://fei.edu.br/seminatec2015/proceedings_seminatec_2015.pdf

- **Improving MOSFETs Radiation Robustness by using the Wave Layout to Boost Analog ICs Applications**

IEEE Proceedings. September 5th, 2014
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6940117&tag=1

- **Mitigation of the Total Ionizing Dose Radiation Effects using the Wave Layout Style for Digital IC Applications**

SEMINATEC - APR 2014

- **Total Ionizing Dose Radiation Effects between the Wave Layout Style and its Conventional Counterpart focusing on the Digital IC Applications**

RADECS 2013 – **OXFORD UNIVERSITY - ENGLAND** - Radiation Effects on Components and Systems
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6937374

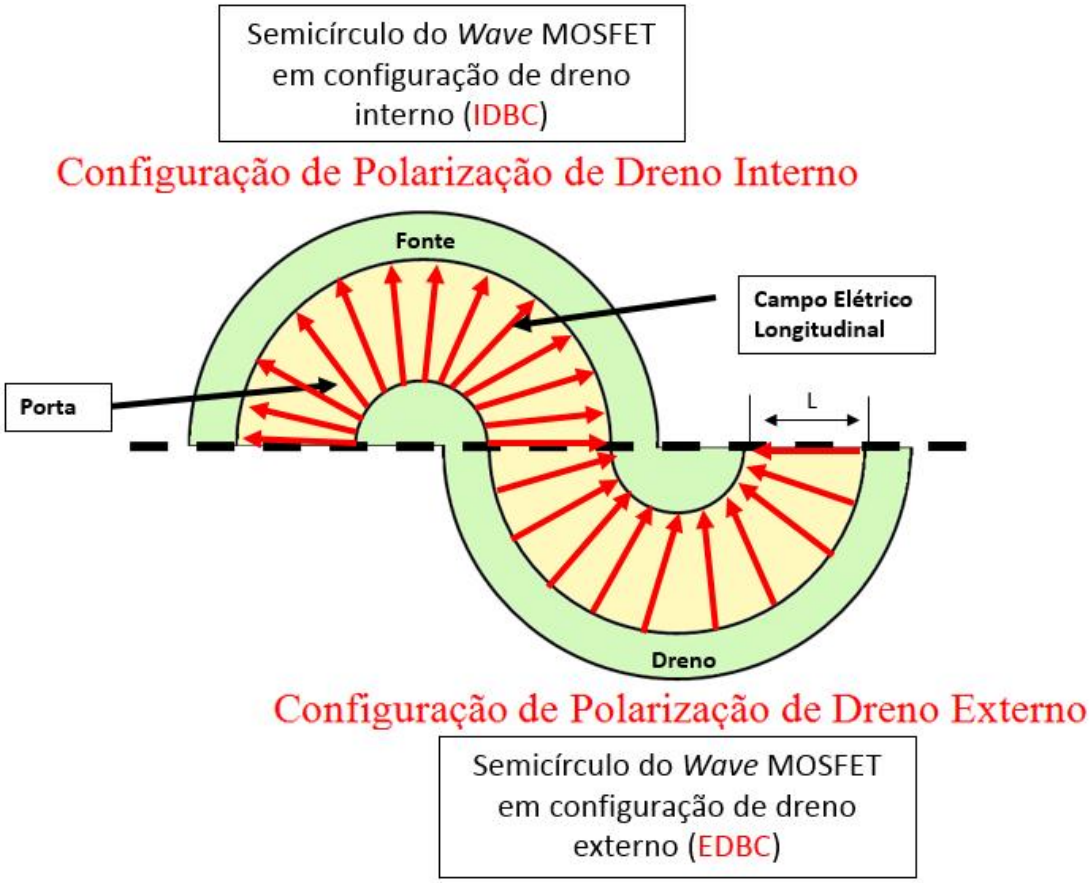
- **Como Atenuar Efeitos da Radiação em Circuitos Eletrônicos Integrados com Novos Layouts de Transistores e sem Custo para o Processo de Manufatura CMOS de Circuito Integrado**

SPGABC - Simpósio de Pesquisa do Grande ABC - October 2013

- **Experimental Comparative Study of the Treshold Voltage (VTH) between Wave nMOSFET and its Conventional Counterpart after X-ray Ionizing Irradiation**

SEMINATEC 2013 - May 2nd, 2013

**ANEXO A –** Detalhamento do estilo de leiaute *Wave*


Semicírculo do *Wave* MOSFET em configuração de dreno interno (IDBC)
Configuração de Polarização de Dreno Interno
Fonte
Campo Elétrico Longitudinal
Porta
L
Dreno
Configuração de Polarização de Dreno Externo
Semicírculo do *Wave* MOSFET em configuração de dreno externo (EDBC)