CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

VINICIUS VONO PERUZZI

ESTUDO COMPARATIVO EXPERIMENTAL ENTRE O CASAMENTO DO SOI nMOSFETs DO TIPO DIAMANTE E DOS SEUS RESPECTIVOS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

São Bernardo do Campo

2013

VINICIUS VONO PERUZZI

ESTUDO COMPARATIVO EXPERIMENTAL ENTRE O CASAMENTO DO SOI nMOSFETs DO TIPO DIAMANTE E DOS SEUS RESPECTIVOS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

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

São Bernardo do Campo

2013

Peruzzi, Vinicius Vonno
Estudo comparativo experimental entre o casamento do SOI nMOSFETs do tipo diamante e dos seus respectivos convencionais equivalentes / Vinicius Vonno Peruzzi. São Bernardo do Campo, 2013.
140 f. : il.

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

1. Casamento entre Dispositivos. 2. T-Student. 3. SOI nMOSFET. I. Gimenez, Salvador Pinillos, orient. II. Título.

CDU 621.381

Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

PGE-10

Programa de Mestrado de Engenharia Elétrica

Aluno: Vinicius Vono Peruzzi **Matrícula:** 110328-2

Título do Trabalho: Estudo comparativo experimental entre o casamento do SOI nMOSFETs do tipo diamante e dos seus respectivos convencionais equivalentes.

Área de Concentração: Dispositivos Eletrônicos Integrados

Orientador: Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Data da realização da defesa: 29/08/2013

ORIGINAL ASSINADA

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

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 29 de Agosto de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Ass.: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Ass.: _____

Prof. Dr. Antonio Luis Pacheco Rotondaro

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho ao meu amor que me fez enxergar a vida com uma óptica muito mais feliz e completa.

Lais Russo Carneiro.

Aos meus pais que sempre foram os grandes exemplos da minha vida.

Valdir Peruzzi e Mariza Vono Tancredi.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez por todas as oportunidades de trabalho que me foram ofertadas durante o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, pelo incentivo, pelas ideias que ajudaram enormemente a compor este trabalho e por toda a paciência no desenrolar deste trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Eduardo Thomaz e ao professor Dr. Marcello Bellodi por terem aceitado participar da minha banca de qualificação deste trabalho e por terem contribuído bastante, no intuito de melhorar este trabalho.

A todos os professores que compõem o corpo docente do mestrado da FEI, seja pelas disciplinas ministradas através das quais pude aprender muito, assim como no dia a dia, pela vivência e por sempre serem solícitos para tirar qualquer tipo de dúvida durante esse período.

Ao Ricardo, a Adriana e a Márcia da secretaria de mestrado, que sempre se mostraram solícitos em me ajudar em relação a questões administrativas.

Aos meus colegas de mestrado pela convivência salutar diária, através da qual pude aprender bastante com cada um deles.

Aos meus pais Mariza e Valdir e aos meus avós Walter, Marina, Maria e César, que sempre foram o grande exemplo de cada instante da minha vida e sempre me ajudaram a ser uma pessoa melhor, a querer buscar ainda mais conhecimentos e a não se contentar a ser somente mais um na sociedade. Além disso, gostaria de agradecê-los por toda a força e carinho em todos os momentos durante a realização deste trabalho.

À minha querida Lais, pela enorme força que sempre me deu em todos os momentos, inclusive nos mais difíceis deles.

Ao professor Dr. Denis Flandre e ao professor Dr. Christian Renaux pelo grande trabalho de cooperação desenvolvido e também por nos disponibilizar os circuitos integrados utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos que foram involuntariamente esquecidos, mas contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

"Quem aprende precisa sofrer. E mesmo em nosso sono a dor que não se pode esquecer cai, gota a gota, sobre o coração, e para nosso desespero, contra a nossa vontade, vem a nós a sabedoria pela sublime graça de Deus".

Ésquilo

RESUMO

O MOSFET de geometria de porta hexagonal (estilo de leiaute do tipo Diamante) foi especialmente projetado com o objetivo de melhorar o desempenho elétrico desses transistores, em comparação ao transistor de geometria de porta convencional (retangular). Havia sido proposto inicialmente um modelo analítico para a corrente de dreno do MOSFET do tipo Diamante, que levava em consideração apenas o efeito de canto longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE) e através deste trabalho de dissertação de mestrado foi desenvolvida uma nova versão para esse modelo, que é mais precisa, e que leva em consideração o efeito da associação paralela de SOI nMOSFETs com diferentes comprimentos de canais (*Parallel Association of SOI nMOSFETs with Different Channel Lenghts Effect*, PAMDLE). O efeito PAMDLE tem a capacidade de reduzir o comprimento efetivo de canal de um MOSFET do tipo Diamante em relação ao seu equivalente convencional, considerando que ambos apresentam a mesma área de porta. Além disso, este novo modelo analítico para a corrente de dreno tem a capacidade de predizer o comportamento elétrico do SOI MOSFET do tipo Diamante em relação ao comportamento do seu equivalente convencional, com um erro máximo inferior a 10% para a maioria dos parâmetros estudados nesse trabalho. Adicionalmente, como foco principal deste trabalho, foi realizado o estudo comparativo experimental do casamento entre os SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os Convencionais equivalentes, decorrente da variação do processo de fabricação CMOS de circuitos integrados (CIs), considerando-se a mesma área de porta e as mesmas condições de polarização. Observou-se que os SOI nMOSFET do tipo Diamante com ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚ conseguem produzir sempre os melhores casamentos entre dispositivos em relação aqueles observados nos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, em média um melhor casamento em torno de 30,1%, 31,5%, 14,9% e 16,9%, respectivamente. Um outro trabalho realizado foi o estudo da predição dos valores médios dos parâmetros dos SOI nMOSFET do tipo Diamante através do modelo analítico que foi desenvolvido para o transistor do tipo Diamante, utilizando-se os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, com o objetivo de fornecer informações sobre o comportamento do SOI nMOSFET do tipo Diamante aos projetistas de circuitos integrados, conhecendo-se somente os dados experimentais dos seus equivalentes convencionais. Pode-se verificar que, para todos os ângulos α da estrutura do tipo Diamante estudados, o modelo analítico da corrente de dreno é capaz de predizer os seus valores médios com um erro máximo de cerca de 9%. Neste trabalho também foi desenvolvida uma nova metodologia de validação para o modelo analítico proposto da corrente de dreno do MOSFET do tipo Diamante, que leva em consideração o LCE e o PAMDLE, através do uso dos testes estatísticos de Anderson - Darling e *t-Student*, respectivamente. Verificou-se que o modelo da corrente de dreno do SOI nMOSFET do tipo Diamante, que usa os dados experimentais dos SOI nMOSFETs do tipo Convencional, apresenta praticamente a mesma média que aquelas extraídas dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante para os ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚, em 100% dos casos analisados.

Palavras-chave: casamento entre dispositivos, *t-Student*, SOI nMOSFET.

ABSTRACT

The hexagonal gate geometry (Diamond layout style) was designed in order to improve the electrical performance of MOSFETs when compared to the conventional gate geometry transistor (rectangular). Initially an analytical model was proposed for the Diamond MOSFET drain current, that took into account only the longitudinal corner effect (LCE), and through this work a new version for this model was developed, which is more accurate and takes into account the MOSFETs parallel association with different channel lengths effect (PAMDLE). The PAMDLE effect is capable to reduce the effective channel length of a Diamond MOSFET in comparison to its conventional counterpart, considering that both present the same gate area. Besides, this new drain current analytical model has the capability to predict the Diamond MOSFET electrical behavior in relation to its conventional counterpart, with a maximum error below 10% for the most parameters studied on this work. Additionally, as a main focus of this work, an experimental comparative study of the device match was developed between the Diamond SOI nMOSFETs and its Conventional counterpart, due to the variations of the CMOS manufacturing process, considering the same gate area and the same bias conditions. It was observed that the Diamond SOI nMOSFET with angles α equal to 53.1˚, 90˚, 126.9˚ and 143,1˚ can always produce a better device match, when compared to those observed in the Conventional SOI nMOSFETs counterpart, on average a better device match around 30,1%, 31,5%, 14,9% and 16,9%, respectively. Besides that, the study of the average values prediction of the Diamond SOI nMOSFET parameters was developed, by the use of the experimental data of the Conventional SOI nMOSFETs counterparts, in order to provide information about the Diamond SOI nMOSFET behavior to the integrated circuits designers, knowing only the experimental data of theirs conventional counterparts. One can verify that for all α angles studied, the drain current analytical model of the Diamond SOI nMOSFET is capable to predict the average values of theirs parameters with a maximum error of around 9%. On this work a new methodology has also been proposed for the validation of the drain current analytical model of the Diamond SOI MOSFET, that takes into account the LCE and the PAMDLE, by using the statistical tests of the Anderson – Darling and the t-Student, respectively. It was found that the drain current model of the Diamond SOI nMOSFET that uses the experimental data of its Conventional counterparts, presents practically the same average of those extracted from the electrical parameters of the Diamond SOI nMOSFETs for the angles α equal to 53.1˚, 90˚, 126.9˚ and 143.1˚ in 100% of analyzed cases.

Key-Words: mismatch, *t-Student*, SOI nMOSFET.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Exemplo de leiaute do MOSFET do tipo Diamante.....22
Figura 1.2 - Exemplos de leiautes dos MOSFETs do tipo Convencional equivalente (a) e do tipo Diamante (b), respectivamente.....23
Figura 2.1- Seção transversal de um MOSFET implementado com tecnologia CMOS Convencional (*Bulk*) de canal do tipo n (nMOSFET) (a) e do tipo p (pMOSFET) (b).....29
Figura 2.2 -Exemplo de estruturas 3D de MOSFETs de canal n (a) e de canal p (b), implementados com tecnologia CMOS de fabricação de CI convencional (*bulk*).....30
Figura 2.3 - Seção transversal de um nMOSFET com cargas negativas induzidas na interface Si/SiO_2 (a) e com cargas positivas induzidas na interface Si/SiO_2 (b).....30
Figura 2.4 - Seção transversal de um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*bulk*) (a) e com tecnologia SOI (b).....31
Figura 2.5 - Diagramas de faixas de energia de um MOSFET convencional (*bulk*) (a), de um SOI MOSFET parcialmente depletado (b) e de um SOI MOSFET totalmente depletado (c).33
Figura 2.6 - Exemplo de extração da tensão de limiar (V_{TH}) através da derivada de segunda ordem da corrente de dreno em função da tensão de porta (I_{DS} em função de V_{GS}) para V_{DS} igual a 50 mV.....37
Figura 2.7 - Exemplo de uma curva da transcondutância em função de V_{GS} para V_{DS} igual a 4 V de um SOI nMOSFET convencional (geometria de porta retangular).....38
Figura 2.8 - Representação das regiões de triodo e de saturação existentes na curva de I_{DS} em função de V_{DS}. 39
Figura 2.9 – Curva I_{DS} em função de V_{DS} que indica a região triodo de operação do nMOSFET para a obtenção de R_{DSon} e que é determinada através da razão entre a variação de V_{DS} (ΔV_{DS}) pela variação de I_{DS} (ΔI_{DS}). 40
Figura 2.10 – Exemplo de curva de gm/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$, para um V_{DS} igual a 200 mV. 42
Figura 2.11 - Representação do estrangulamento do canal em função do aumento do valor da tensão V_{DS} acima do valor de V_{DSsat}. Este aumento do valor da tensão V_{DS} provoca uma redução no comprimento efetivo do canal. 44
Figura 2.12 - Exemplo de duas curvas de I_{DS} em função de V_{DS}, para dois diferentes valores de sobretensão de porta (V_{GT1} e V_{GT2}) utilizadas para a extração de V_{EA}.....45
Figura 2.13 - Representação da extração do parâmetro I_{DSon}.....46
Figura 2.14: Exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat}, cuja média é igual a 3,5 de

uma amostra de 20 SOI nMOSFET do tipo Diamante……..49

Figura 2.15: Exemplo de uma função densidade de probabilidade normal com o valor médio de I_{DSsat} ($\overline{I_{DSsat}}$) igual a 3,5 e com o valor do desvio padrão (s) igual a 0,7.....50

Figura 2.16: Apresentação dos intervalos de aceitação e de rejeição do teste *t-Student* para um teste bicaudal, para um nível de significância de 0,05 e para 20 graus de liberdade (g.l.).....54

Figura 2.17: Curva de distribuição do teste *t-Student* com o objetivo de ilustrar um exemplo de aceitação ou de rejeição da hipótese nula (H_0) através da utilização do valor p…….55

Figura 3.1: Exemplo de um SOI nMOSFET do tipo Diamante que pode ser particionado em N SOI nMOSFETs de formato de porta trapezoidal. 58

Figura 3.2 - SOI nMOSFET do tipo Diamante com razão de aspecto W/L_{ef} (a) e o seu circuito elétrico equivalente considerando-se que esse dispositivo possa ser particionado em N SOI nMOSFETs de porta em formato trapezoidal, com largura de canal W/N e diferentes comprimentos de canal (L_1, L_2, ..., L_N) (b). 59

Figura 3.3 - Exemplo de um SOI nMOSFET do tipo Diamante segmentado em 8 partes iguais, que representam 8 SOI nMOSFETs de geometria de porta trapezoidal com diferentes comprimentos de canal e com a mesma largura de canal (W/N).....60

Figura 3.4 - Curvas do fator L_{ef_CSnM}/L_{ef_DSnM} em função do ângulo α para diferentes valores de N. 66

Figura 3.5 - Exemplo de curvas experimentais de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante com um ângulo α igual a 126,9˚, do SOI nMOSFET Convencional equivalente. Nesta mesma figura também é ilustrada a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo novo modelo proposto IDSLCPAM, o qual usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente utilizando-se a equação (3.22) e também a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo modelo de primeira ordem (este modelo não considera o efeito PAMDLE e considera somente o efeito LCE), o qual também usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente. Para todas as curvas ilustradas, foi utilizada uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V…….....68

Figura 3.6 - Módulo do erro máximo entre as curvas de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS}, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V do SOI nMOSFET do tipo Diamante (para todos os ângulos α estudados) e a curva gerada de I_{DS} em função de V_{DS} do IDSLCPAM.....69

Figura 4.1 - Foto de um dos CIs estudados que contém os DSnM (SOI nMOSFETs de geometria de porta hexagonal) e os seus CSnM equivalentes (SOI nMOSFETs de geometria de porta retangular), que apresentam a mesma área de porta (A_G).....71
Figura 4.2 - Fotos dos DSnM de um dos chips utilizados neste trabalho para um valor de W igual a 24 μm e para todos os ângulos α estudados, isto é, os ângulos α iguais a 36,9˚(a), 53,1˚ (b), 90˚(c), 126,9˚(d) e 143,1˚(e)…….....……72
Figura 4.3 - Diagrama de blocos indicando os passos realizados desde a extração dos parâmetros elétricos experimentais da amostra dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos seus equivalentes convencionais até a comparação entre os erros relativos dos principais parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes. 75
Figura 4.4 - Gráfico dos erros relativos entre os $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes em função de α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....76
Figura 4.5 - Gráfico de ε_r de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 78
Figura 4.6 - Quatro fotos de DSnM variando-se os valores de W, de um dos chips utilizados neste trabalho, isto é, os valores de W igual a 12 μm (a), W igual a 24 μm (b), W igual a 30 μm (c) e W igual a 180 μm (d)……..79
Figura 4.7 - Exemplo de uma região de canto encontrada no SOI nMOSFET do tipo Diamante o qual foi ilustrado na Figura 4.6.c, com o intuito de exemplificar o arredondamento encontrado nos cantos das partes triangulares dos DSnM de ângulo α igual a 36,9˚.....80
Figura 4.8 - Gráfico dos erros relativos entre os $f_T/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_f_T/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{GS} igual a 0,4 V, V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação) e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....81
Figura 4.9 - Gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....82

Figura 4.10 - Gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 1 V e de V_{DS} igual a 50mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....83
Figura 4.11 - Gráfico dos erros relativos entre os gm/I_{DS} dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de gm/I_{DS} $\left[\varepsilon_{r_gm/I_{DS}}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....84
Figura 4.12 - Gráfico dos erros relativos entre os $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....85
Figura 4.13 - Gráfico dos erros relativos entre os $A_V/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $A_V/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_A_V/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....87
Figura 4.14 - Gráfico dos erros relativos entre os $SS/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de SS $\left[\varepsilon_{r_SS}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e de V_{DS} igual a 50 mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....88
Figura 4.15 - Gráfico dos erros relativos entre os $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V e para valores negativos de V_{DS} (aproximadamente -20 V), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 89
Figura 4.16 - Gráfico dos erros relativos entre os $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 90
Figura 5.1 - Exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat} extraídos experimentalmente dos DSnM (a), dos CSnM equivalentes (b) e dos resultados obtidos do IDSLCPAM (c), que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios

experimentais dos parâmetros dos DSnM, considerando-se um DSnM com α igual a 36,9°, um valor de polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1V com N igual a 10, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 96
Figura 5.2 - Diagrama de blocos mostrando os passos que devem ser realizados, para o desenvolvimento do estudo da predição dos valores médios dos principais parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante, através da utilização do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.....97
Figura 5.3 – Diagrama de blocos usado para realizar a validação do modelo proposto IDSCLPAM, por meio da utilização da ferramentas estatística denominada "Teste *t-Student*". 98
Figura 5.4 - Gráfico das médias de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM, em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação L_{ef} do SOI nMOSFET do tipo Diamante. 99
Figura 5.5 - Gráfico de ε_d de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_\, gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 100
Figura 5.6 - Gráfico das médias de $f_T/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_\, fT/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200mV (região de saturação), com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....102
Figura 5.7 - Gráfico das médias de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_\, I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....103
Figura 5.8 - Gráfico das médias de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_\, I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 1 V e

V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 105
Figura 5.9 - Gráfico das médias de gm/I_{DS} dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de gm/I_{DS} $\left[\varepsilon_{d_gm/I_{DS}}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 107
Figura 5.10 - Gráfico das médias de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 109
Figura 5.11 - Gráfico das médias de $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....111
Figura 5.12 - Gráfico das médias de $A_V/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $A_V/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_A_V/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 113
Figura 5.13 - Gráfico das médias de SS dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de SS $\left[\varepsilon_{d_SS}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. 115
Figura 5.14 - Gráfico das médias de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.....117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dimensão dos DSnM e os valores de L_{ef} usando o modelo analítico da referência [11] e o modelo de corrente da associação em paralelo de transistores para N igual a 10, 20, 30 e 50.....64

Tabela 3.2 - Valores do fator $\frac{L_{ef_CSnM}}{L_{ef_DSnM}}$, considerando-se vários valores de α e diferentes valores de N.....66

Tabela 4.1 - Relação dos ângulos α considerados para a produção dos DSnM, os ângulos α efetivamente medidos e o erro (em porcentagem) entre os ângulos α medidos em relação aos ângulos α considerados para a produção dos DSnM.....73

Tabela 4.2 - Dimensões dos 20 pares de SOI nMOSFETs (DSnM e CSnM equivalentes) desta amostra de dados.....73

Tabela 4.3- Resumo dos resultados dos ε_r 91

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados do valor de p do teste estatístico de Anderson - Darling dos parâmetros dos DSnM e do IDSLCPAM, que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios experimentais dos parâmetros dos DSnM. 95

Tabela 5.2 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos experimentalmente dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 101

Tabela 5.3 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 104

Tabela 5.4 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$, que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 106

Tabela 5.5 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de gm/I_{DS} que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 108

Tabela 5.6 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 110

Tabela 5.7 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 112
Tabela 5.8 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $A_V/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 114
Tabela 5.9 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de SS que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 116
Tabela 5.10 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 118
Tabela 5.11 - Resumo dos resultados dos ε_d dos diferentes parâmetros elétricos estudados (com a exceção dos parâmetros V_{EA}, g_D, A_V e SS pois que já era sabido que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não iria predizer o valor médio destes parâmetros dos DSnM) oriundos da diferença entre os valores médios extraídos experimentalmente dos DSnM e os valores médios extraídos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, assim como o valor de p obtido através da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios dos parâmetros de DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM. 119

LISTA DE SÍMBOLOS

ε_0	Permissividade do vácuo (F/cm)
ε_{Si}	Permissividade do silício (F/cm)
ε	Diferença percentual (adimensional)
λ	Fator de modulação do comprimento de canal [V^{-1}]
μ	Mobilidade dos portadores minoritários móveis na camada de inversão do MOSFET [$cm^2/V.s$]
μ_n	Mobilidade de elétrons na camada de inversão do MOSFET [$cm^2/V.s$]
φ_F	Potencial de Fermi (V)
φ_{MS}	Função trabalho entre metal e o semicondutor (V)
α	Ângulo entre as junções metalúrgicas do filme de silício (região do canal) e as regiões de dreno e fonte decorrente da geometria hexagonal de porta do MOSFET do tipo Diamante (°)
α'	Nível de significância (adimensional)
A_V	Ganho de tensão (adimensional)
C_{ox}	Capacitância do óxido de porta por unidade de área (F/cm^2)
D_n	Coeficiente de difusão dos elétrons (cm^2/s)
f_g	Fator geométrico (adimensional)
f_T	Frequência de ganho de tensão unitário (Hz)
g_D	Condutância de Dreno (S)
gm	Transcondutância (S)
$gm_{máx}$	Transcondutância máxima (S)
I_{BULK}	Corrente de fuga do substrato (A)
I_D	Corrente de dreno de um *MOSFET* (A)
I_{DS}	Corrente entre dreno e fonte de um *MOSFET* (A)
I_{DSsat}	Corrente de dreno na região de saturação de um *MOSFET* (A)
I_{DSon}	Corrente de dreno de estado ligado de um *MOSFET* (A)
L	Comprimento do canal do MOSFET (μm)
L_{ef}	Comprimento efetivo do canal do MOSFET (μm)
n	Fator de corpo (adimensional)
N	Quantidade de nMOSFETs de geometria de porta trapezoidal conectados em paralelo
N_A	Concentração de dopantes aceitadores (cm^{-3})

N_D	Concentração de dopantes doadores (cm^{-3})
q	Carga elementar do elétron ($q=1,6x10^{-19}$ C)
Q_{ox}	Densidade de cargas fixas no óxido (C/cm^2)
R_{DSon}	Resistência série entre dreno e fonte de estado ligado (Ω)
s^2	Variância
s	Desvio padrão
SS	Inclinação de sub-limiar (mV/década)
t_{ox}	Espessura do óxido de porta de um MOSFET (nm)
t_{oxf}	Espessura de óxido de porta de um SOI MOSFET (nm)
t_{oxb}	Espessura do óxido enterrado (nm)
t_{si}	Espessura da camada de silício (nm)
V_D	Tensão de dreno (V)
V_{DS}	Tensão entre os terminais de dreno e fonte (V)
V_{EA}	Tensão *Early* (V)
V_{FB}	Tensão de faixa plana (V)
V_G	Tensão de porta (V)
V_{GS}	Tensão entre os terminais de porta e fonte (V)
V_{GT}	Sobretensão de porta (V)
V_S	Tensão de fonte (V)
V_{TH}	Tensão de limiar (V)
W	Largura de canal (μm)
$\bar{x}$	Média de uma amostra
$x_{dmáx}$	Espessura máxima da camada de depleção (μm)

LISTA DE ABREVIATURAS

FET	(Field Effect Transistor) - Transistor de Efeito de Campo
MOS	(*Metal Oxide Semiconductor*) - Metal-Óxido-Semicondutor
MOSFET	(*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) - Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor
nMOSFET	*MOSFET* do tipo "N"
pMOSFET	*MOSFET* do tipo "P"
CSnM	*Conventional* SOI nMOSFET (geometria de porta retangular)
DSnM	*Diamond* SOI nMOSFET (geometria de porta hexagonal)
PAMDLE	(*Parallel Association of MOSFETs with Different Channel Lenghts*) - Efeito da associação paralela de MOSFETs com diferentes comprimentos de canais
IDSLCPAM	(I_{DS} *analytical model of the Fully Depleted DSnM*) - Novo Modelo analítico da corrente de dreno do MOSFET do tipo Diamante
SOI	(*Silicon-On-Insulator*) - Sílicio-Sobre-Isolante
FDSOI	(*Fully Depleted SOI*) - SOI totalmente depletado
PDSOI	(*Partially Depleted SOI*) - SOI parcialmente depletado
NFDSOI	(*Not Fully Depleted SOI*) - SOI quase totalmente depletado
TBJ	Transistor Bipolar de Junção

SUMÁRIO

1. Introdução 21

1.1 Objetivo 26

2 Conceitos Fundamentais 28

2.1 O MOSFET implementado com Tecnologia Convencional (*Bulk*) 28

2.2 O SOI MOSFET 31

2.3 Modos de funcionamento dos SOI MOSFETs 32

2.4 O estilo de leiaute do tipo Diamante (geometria de porta hexagonal) para MOSFETs 35

2.5 Parâmetros Elétricos dos SOI MOSFETs 36

2.5.1 Tensão de Limiar (V_{TH}) 36

2.5.2 Transcondutância (gm) 37

2.5.3 Corrente Elétrica entre Dreno e Fonte (I_{DS}) de um SOI nMOSFET 38

2.5.4 Resistência entre Dreno e Fonte de Estado Ligado (R_{DSon}) 40

2.5.5 Razão entre a transcondutância e a corrente de dreno (gm/I_{DS}). 41

2.5.6 Inclinação de Sub-limiar (SS) 42

2.5.7 Tensão Early (V_{EA}) 43

2.5.8 Corrente entre dreno e fonte de Estado Ligado (I_{DSon}) 46

2.5.9 Ganho de tensão intrínseco de um SOI MOSFET (A_V) 47

2.5.10 Frequência de Ganho de Tensão Unitário (f_T). 47

2.6 Conceitos Estatísticos 47

2.6.1 Variância (s^2) 47

2.6.2 Desvio Padrão (s) 48

2.6.3 Graus de Liberdade (g.l.) 48

2.6.4 Distribuição Normal 48

2.6.5 Testes Paramétricos e Não Paramétricos 50

2.6.6 Testes de Hipóteses 51

2.6.7 Nível de Significância (α') 51

2.6.8 Intervalo de Confiança 51

2.7 Testes Estatísticos Usados Neste Trabalho 52

2.7.1 Teste de normalidade de Anderson - Darling 52

2.7.2 Avaliação estatística dos parâmetros por meio do teste *t-Student*. 53

3 Modelagem do Comprimento Efetivo do Canal do SOI nMOSFET do tipo Diamante. 57

3.1 Desenvolvimento do modelo do comprimento efetivo de canal do SOI nMOSFET do tipo Diamante. 57

4 Estudo Experimental do Casamento entre os SOI nMOSFETs do Tipo Diamante e os seus Convencionais Equivalentes 70

4.1 Amostra de dados estudada 70

4.2 Resultados Experimentais 74

5 Estudo da Predição dos Parâmetros dos SOI nMOSFETs do Tipo Diamante em Função dos Dados Experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais Equivalentes por Meio do Modelo IDSLCPAM e Proposta de Validação Desse Modelo, Através da Utilização de Ferramentas Estatísticas 93

5.1 Amostra de dados estudada 93

5.2 Teste de normalidade das amostras estudadas 94

5.3 Resultados Experimentais 97

6 Conclusão e Trabalhos futuros 120

7 Referências 122

Apêndice A – Publicação no Simpósio de Pesquisa do Grande ABC 2011 128

Apêndice B – Publicação no SBMicro 2012 130

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de silício-sobre-isolante (*Silicon-On-Insulator*, SOI) metal-óxido-semicondutor complementar (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*, CMOS) é uma das mais recomendadas para a fabricação de circuitos integrados (CIs) digitais e analógicos de baixa potência e de baixa tensão (*Low-Power Low-Voltage*, LPLV) devido às inúmeras vantagens que são observadas nessa tecnologia, quando comparadas à tecnologia CMOS Convencional (*Bulk*) [1]. As principais vantagens do processo de fabricação SOI CMOS em relação ao Convencional (*Bulk*) são: menores capacitâncias parasitas, menor área utilizada de silício, menor efeito de canal curto (*Short Channel Effect*, SCE), menor estreitamento da barreira de potencial induzido pelo dreno (*Drain Induced Barrier Lowering*, DIBL) e maior frequência de operação [1].

Boa parte das indústrias de semicondutores utilizam a tecnologia SOI CMOS planar ou estão planejando incorporá-la aos seus processos de fabricação a fim de aumentar sua competitividade no mercado de dispositivos semicondutores e de CIs [1].

Para melhorar o desempenho dos CIs analógicos e digitais, altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento tem sido aplicados em transistores tridimensionais, como por exemplo os FinFETs, *Gate-All-Around (GAA), DELTA, Π-gate, Ω-gate, Pillar Surrounding Gate (PSG) e CYNTHIA* (transistor vertical com secção transversal circular), com base no processo de fabricação de CIs SOI CMOS [1].

Referente aos atuais SOI MOSFETs planares, novos estilos de leiaute também estão sendo projetados para aumentar o desempenho dos CIs analógicos e digitais [2]. Alguns exemplos dessas estruturas de leiaute inovadoras são: SOI MOSFETs de porta em formato de Anel Circular (CGSMs) [3, 4, 5], SOI MOSFETs do tipo *Wave* (formato de porta semelhante a letra "S") [6, 7, 8], SOI MOSFETs de geometria de porta circular sobrepostas entre si (*Overlapping Circular-Gate Transistor*, O-CGT) [9], etc.

Neste contexto, recentemente, um outro transistor, chamado de SOI nMOSFET do tipo Diamante (*Diamond SOI nMOSFET*, DSnM), foi patenteado no ano de 2008 com o intuito de apresentar melhorias nas figuras de mérito dos SOI MOSFETs [10]. A Figura 1.1 ilustra um exemplo do leiaute de um DSnM.

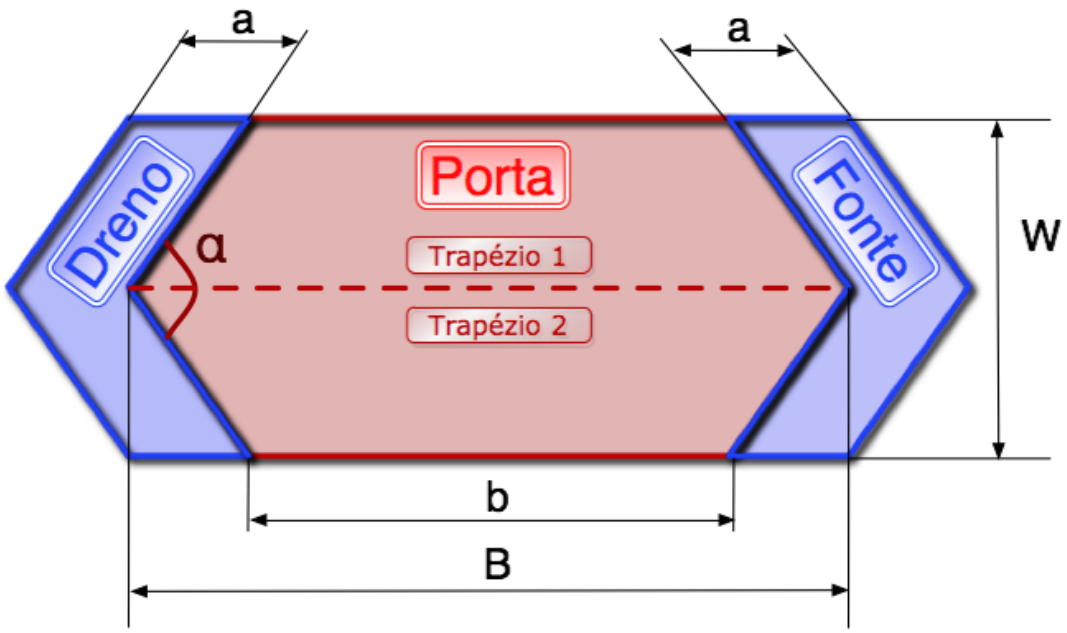


Figura 1.1- Exemplo de leiaute do MOSFET do tipo Diamante.

Na Figura 1.1, b e B são os comprimentos das bases menor e maior dos dois trapézios que compõem a região hexagonal da porta (trapézios 1 e 2), respectivamente, W é a largura do canal, α é o ângulo entre as junções metalúrgicas do filme de silício (região do canal) e as regiões de dreno e fonte decorrente da geometria de porta hexagonal do MOSFET do tipo Diamante e **a** é o comprimento das regiões de dreno e de fonte [11].

Por uma simples mudança da geometria da porta convencional (retangular) para uma geometria de porta hexagonal (Diamante), considerando-se a mesma área da porta (A_G) e largura de canal (W), o DSnM foi propositalmente concebido para ser usado em CIs analógicos, pois o seu comprimento efetivo do canal (L_{ef}) de CIs é sempre maior que a dimensão mínima permitida pelo processo de fabricação CMOS e pode limitar a sua utilização em aplicações CIs digitais [11, 12, 13]. Este dispositivo utiliza o "efeito de canto" na direção longitudinal do canal, denominado de efeito de canto longitudinal (*Longitudinal Corner Effect*, LCE), para aumentar o campo elétrico longitudinal ($\vec{\varepsilon}_{//}$) ao longo do comprimento do canal (L) e consequentemente aumentar a velocidade de deriva média das cargas móveis no canal ($<\vec{v}_x>$), que resulta na melhoria da corrente de dreno (I_{DS}), da transcondutância (gm), da razão entre a transcondutância e a corrente de dreno (gm/I_{DS}) e da resistência série de estado ligado (R_{DSon}) [11, 14, 15]. Como, por exemplo, pode-se atingir aumentos significativos em torno de 10%, 58% e 118%, em termos de I_{DS} e gm, para os SOI nMOSFET do tipo Diamante, com valores do ângulo α iguais a 110°, 90° e 55°, respectivamente, em relação aos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, considerando-

se a mesma A_G e também as mesmas condições de polarização, quando eles operam na região de saturação [11]. Devido aos resultados obtidos, os SOI nMOSFETs do tipo Diamante podem ser utilizados em aplicações de circuitos integrados analógicos em consequência de sua maior gm, gm/I_{DS} e tensão Early quando comparados aos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, que acarreta na melhoria do desempenho elétrico dos CIs analógicos (ganho de tensão e frequência de ganho de tensão unitário).

A Figura 1.2 ilustra um exemplo do leiaute de um SOI nMOSFET Convencional equivalente (*Conventional* SOI nMOSFET, CSnM) (Figura 1.2.a) e de um DSnM (Figura 1.2.b), considerando a mesma A_G, W e regras de projeto correspondente a um determinado processo CMOS de fabricação de CIs [11].

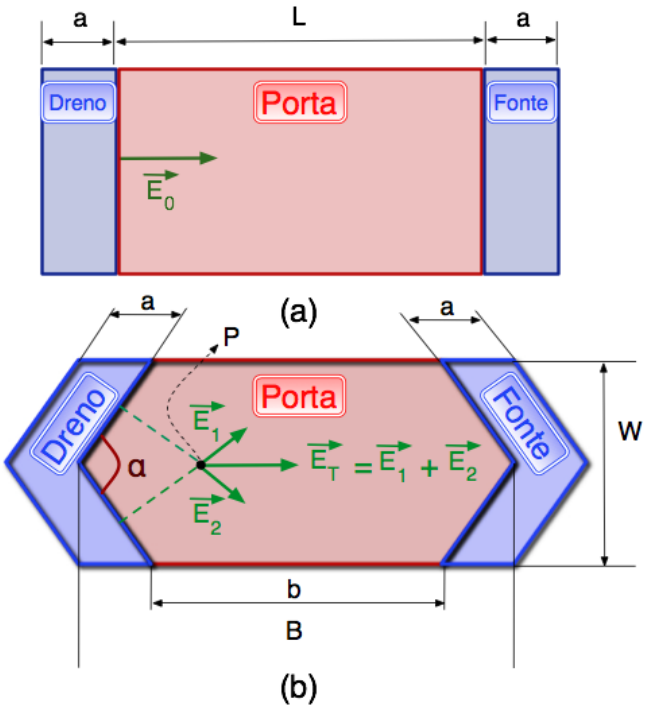


Figura 1.2 - Exemplos de leiautes dos MOSFETs do tipo Convencional equivalente (a) e do tipo Diamante (b), respectivamente.

Na Figura 1.2, $\overrightarrow{E_1}$ e $\overrightarrow{E_2}$ são as duas componentes do vetor do campo elétrico longitudinal no ponto P, que são geradas através da aplicação da tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) e também pelas interfaces formadas pelas regiões de dreno e o filme de silício da região de canal, $\overrightarrow{E_T}$ é o vetor da resultante (equivalente) do campo elétrico longitudinal, dada por $\overrightarrow{E_1}+\overrightarrow{E_2}$ no ponto P, que é maior do que aquela observada no CSnM equivalente,

conservando-se a mesma A_G, L é o comprimento do canal do MOSFET do tipo Convencional e $\overrightarrow{E_0}$ é o vetor do campo elétrico longitudinal existente no MOSFET do tipo Convencional.

Com a intenção de estudar o comportamento desta geometria de porta hexagonal, um estudo comparativo entre o SOI nMOSFET do tipo Diamante e Convencional equivalentes foi desenvolvido, utilizando-se o Simulador *Sentaurus Device* da *Synopsys*, onde foram encontradas vantagens do DSnM em comparação ao CSnM, em termos de I_{DS}, $gm_{máx}$ (cerca de 10%, 50% e 118% para os ângulos α iguais a 110˚, 90˚ e 55˚, respectivamente) [11, 12, 13].

O próximo trabalho para entender o comportamento desta geometria de porta hexagonal, foi o de desenvolver um estudo experimental referente ao seu comportamento elétrico em comparação com o CnM (*Conventional* nMOSFET) equivalente, considerando-se a mesma A_G e a mesma condição de polarização [14, 15]. Os dispositivos foram fabricados através do processo comercial de manufatura CMOS convencional (*bulk*) de 0,35 μm AMI (*On-Semiconductor*), o qual está disponível através do Programa Educacional do MOSIS (MOSIS *Educational Program*, MEP). Esses estudos mostram que o desempenho do estilo de leiaute do tipo Diamante é melhor do que aquele observado no MOSFET Convencional equivalente (*Conventional nMOSFET*, CSM) em termos de corrente de dreno (I_{DS}) (melhoria de 160% para um ângulo α igual a 36,9˚, por exemplo), transcondutância (gm) (melhoria de 181% para um ângulo α igual a 36,9˚, por exemplo), razão da transcondutância sobre a corrente de dreno (gm/I_{DS}) (melhoria de 7,11% para um ângulo α igual a 90,0˚, por exemplo) e da resistência série de estado ligado (R_{DSon}) (melhoria de 62,7% para um ângulo α igual a 36,9˚, por exemplo) [14, 15].

Para se analisar como esta nova geometria de porta para MOSFETs atua em diferentes situações de funcionamento, estudou-se também o comportamento da I_{DS} em altas temperaturas, onde conclui-se que a corrente de fuga é maior nos DSnM do que nos CSnM equivalentes para todas as temperaturas estudadas (de 27˚C até 300˚C). Por exemplo, para um ângulo α igual a 127˚, a corrente de fuga do nMOSFET do tipo Diamante é 20% maior em comparação com a corrente de fuga do nMOSFET Convencional equivalente, para uma polarização de porta igual a -0,5V [16]. Isto ocorre pois o campo elétrico longitudinal (paralelo) no canal do DSnM é maior do que o encontrado no CSnM equivalente. Foi observado também que há um aumento proporcional da I_{DS} em função do aumento da corrente de fuga para todos os MOSFETs do tipo Diamante estudados, por exemplo, para o ângulo α igual a 127˚, verifica-se um aumento de 20% da corrente de fuga do DSnM em comparação

com a corrente de fuga dos CSnM equivalentes (para uma polarização entre porta e fonte de -0,5 V), sendo que este dispositivo DSnM fornece uma corrente de dreno também 20% maior do que a fornecida pelos CSnM equivalentes (para uma polarização entre porta e fonte de 1,2 V) [16].

Foi realizada também uma análise comparativa experimental dos efeitos dos raios-X entre as tensões de limiar (V_{TH}) dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os Convencionais equivalentes [17]. Todos os dispositivos foram polarizados durante o processo de irradiação de raios-X para reproduzir as condições reais de operação [17]. Foram utilizados neste estudo seis MOSFETs que foram desenvolvidos através do processo comercial de manufatura CMOS convencional (*bulk*) de 0,35 μm AMI (*On-Semiconductor*). Ficou demonstrado por resultados experimentais que os dispositivos SOI nMOSFETs do tipo Diamante apresentam uma robustez maior aos raios-X em comparação aos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, considerando o mesmo fator geométrico (f_g), a mesma A_G e as mesmas condições de polarização [17]. Assim, a V_{TH} dos DSnM é menos afetada do que a V_{TH} dos CSnM equivalentes (em um ambiente com raios-X) devido ao fato dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante apresentarem uma menor região de bico de pássaro em comparação aos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, o que torna os dispositivos SOI nMOSFETs do tipo Diamante uma excelente alternativa para aplicações em circuitos integrados (CIs) em ambientes radioativos [17].

Outro estudo desenvolvido foi a análise comparativa experimental dos efeitos da radiação de prótons entre os nMOSFETs do tipo Diamante com diferentes ângulos α (36,9˚, 90,0˚ e 144,1˚) e os seus Convencionais equivalentes, considerando-se o mesmo f_g, da mesma A_G e das mesmas condições de polarização [18]. Todos os dispositivos foram polarizados durante o processo de radiação de prótons para reproduzir condições reais de operação [18]. Os dispositivos foram desenvolvidos através do processo comercial de manufatura CMOS convencional (*bulk*) de 0,35 μm AMI (*On-Semiconductor*) [18]. Observou-se que os nMOSFETs do tipo Diamante com um ângulo α igual a 90,0˚ apresentam maior robustez à radiação de prótons em comparação os nMOSFETs Convencionais equivalentes [18]. Como por exemplo, os nMOSFETs do tipo Diamante com um ângulo α igual a 90,0˚ apresentaram menores variações de V_{TH} (aproximadamente de 3 vezes menor), quando comparados aos nMOSFETs Convencionais equivalentes [18], pois apresentam uma estrutura de bico de pássaro menor do que aquela presente nos nMOSFETs Convencionais equivalentes.

Todos esses trabalhos foram desenvolvidos considerando-se um modelo de primeira ordem do L_{ef} do MOSFET do tipo Diamante e observou-se que esse modelo poderia ser melhorado e consequentemente motivou o desenvolvimento de uma nova proposta para alcançar valores de L_{ef} mais precisos.

1.1 Objetivo

Desta forma, o primeiro trabalho que foi realizado nesta dissertação de mestrado foi o desenvolvimento de uma nova proposta de modelagem para a corrente de dreno dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante que incorpora agora também o efeito da associação paralela de MOSFETs com diferentes comprimentos de canais, denominado de *Parallel Association of MOSFETs with Different Channel Lenghts Effect* (PAMDLE), que é o responsável por reduzir o comprimento efetivo de canal do MOSFET do tipo Diamante em relação ao comprimento efetivo de canal calculado pela equação (1.1), quando se compara com dispositivos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os seus equivalentes Convencionais com a mesma A_G [19].

$$L_{ef} = \frac{b + B}{2} \tag{1.1}$$

Este modelo analítico para a corrente de dreno do MOSFET do tipo Diamante, foi chamado de IDSLCPAM. Através desse modelo analítico é possível predizer o comportamento dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante utilizando-se os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes.

Além disso, face a importância da realização de um estudo do casamento entre SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os Convencionais equivalentes, visando a aplicação de CIs analógicos, este trabalho de dissertação de mestrado tem por objetivo realizar o estudo comparativo experimental do casamento entre os parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos Convencionais equivalentes, que é realizado através da análise comparativa entre os erros relativos dos parâmetros elétricos dos DSnM e dos CSnM equivalentes, o qual é definido como sendo a razão entre o desvio padrão (s) e a média ($\bar{x}$) de uma amostra de parâmetros de um determinado dispositivo, isto é, s/$\bar{x}$.

Outra análise que foi realizada por este trabalho de dissertação de mestrado foi o estudo comparativo experimental das médias dos parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos valores médios obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa

os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, com o objetivo de predizer os valores médios dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante.

Além disso, uma nova metodologia para realizar a validação do modelo IDSLCPAM também foi realizada através da utilização do teste *t-Student* (esta ferramenta estatística tem como objetivo verificar se a média de duas amostras de parâmetros são estatisticamente equivalentes) entre as médias dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e as médias geradas pelo modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, objetivando concluir se o modelo IDSLCPAM é capaz de predizer os valores médios dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante.

Este trabalho subdivide-se em mais cinco seções.

Na seção 2 são apresentados os conceitos fundamentais, isto é, os principais parâmetros físicos e elétricos e também os conceitos estatísticos necessários para o desenvolvimento e entendimento desta dissertação de mestrado.

Já a seção 3 descreve a modelagem do comprimento efetivo de canal do MOSFET do tipo Diamante, que considera também o efeito PAMDLE além do efeito LCE. Esse novo modelo é também comparado com o modelo de primeira ordem que foi proposto pela referência [11].

A seção 4 é reservado para a apresentação dos resultados comparativos experimentais da análise do casamento entre os parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os seus Convencionais equivalentes considerando-se a mesma A_G e as mesmas condições de polarização.

A seção 5 apresenta os resultados comparativos experimentais dos valores médios dos parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e advindos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes. Este capítulo também apresenta uma nova metodologia para a validação do modelo IDSLCPAM através da utilização de ferramentas estatísticas.

A seção 6 apresenta as principais conclusões deste trabalho e algumas propostas de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo apresenta diversos conceitos básicos e fundamentais que são necessários para o entendimento e o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Alguns detalhes técnicos dos MOSFETs que são implementados com tecnologia convencional (*bulk*) e com tecnologia SOI também são descritos neste capítulo.

Esse capítulo também apresenta os testes estatísticos que são utilizados neste trabalho (teste de Anderson-Darling e o teste *t-Student*) para a realização do estudo do casamento entre os MOSFETs do tipo Diamante e os seus respectivos equivalentes convencionais.

2.1 O MOSFET implementado com Tecnologia Convencional (*Bulk*)

No ano de 1926, Lilienfield patenteou o primeiro MOSFET [1], [20]. Esta patente reportou um primeiro estudo desse novo dispositivo que possuía três terminais físicos [1], onde a intensidade de corrente elétrica era controlada pelo campo elétrico gerado por um contato de porta [1]. Todavia, esta pesquisa precisou ser postergada, pois na época haviam dificuldades em se implementar os contatos ôhmicos desses transistores e também porque as técnicas de deposição de óxido de silício ainda não apresentavam bons resultados em laboratório, devido ao grande número de defeitos gerados na superfície dos semicondutores [1]. Desta forma, a partir do ano de 1947, as pesquisas e o desenvolvimento dos transistores bipolares de junção (TBJ) ocorreram numa maior velocidade, em função de possuírem um processo de fabricação muito mais estabelecido que aqueles dos MOSFETs [1].

Posteriormente, em função do avanço tecnológico nas técnicas de fabricação de óxidos finos, os MOSFETs começaram a ser produzidos em escala comercial [1]. Verificava-se que os MOSFETs além de ocuparem uma menor área na lâmina de silício, necessitavam também de valores de tensões de alimentação menores que aquelas utilizadas nos TBJs, e consequentemente puderam ser usados em larga escala na indústria de microeletrônica [21].

O MOSFET apresenta quatro terminais (dreno, porta, fonte e substrato), onde o fluxo de portadores minoritários móveis entre os terminais de fonte e dreno é controlado pelo campo elétrico vertical, em função da polarização na porta, que isola o canal do dispositivo por uma fina camada de óxido [21]. Adicionalmente, há um contato na parte inferior do MOSFET, chamado de contato de corpo (substrato), que normalmente é aterrado ou ligado a tensão de alimentação dependendo do tipo de MOSFET (canal n ou canal p) [21].

A Figura 2.1 apresenta a seção transversal de um MOSFET de canal do tipo n (nMOSFET) (Figura 2.1.a) e também a seção transversal de um MOSFET de canal do tipo p (pMOSFET) (Figura 2.1.b), que opera no modo enriquecimento e é implementado em tecnologia CMOS Convencional (*Bulk*).

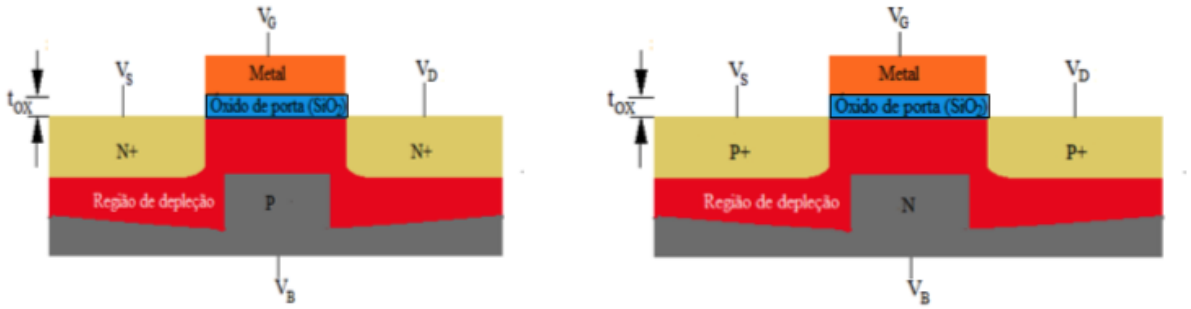


Figura 2.1-Seção transversal de um MOSFET implementado com tecnologia CMOS Convencional (*Bulk*) de canal do tipo n (nMOSFET) (a) e do tipo p (pMOSFET) (b).

Na Figura 2.1, t_{ox} é a espessura da camada de óxido de porta, V_G é a tensão elétrica do contato de porta, V_D é a tensão elétrica do contato de dreno, V_S é a tensão elétrica do contato de fonte e V_B é a tensão elétrica do contato de substrato, P e N representam os tipos de materiais dopantes (por exemplo boro e fósforo, respectivamente). O símbolo + representa um material fortemente dopado.

A Figura 2.2 apresenta um exemplo de estrutura 3D de 2 MOSFETs implementados com tecnologia CMOS de fabricação de CI convencional (*bulk*), sendo um de canal do tipo n (nMOSFET) (Figura 2.2.a) e outro do tipo p (pMOSFET) (Figura 2.2.b).

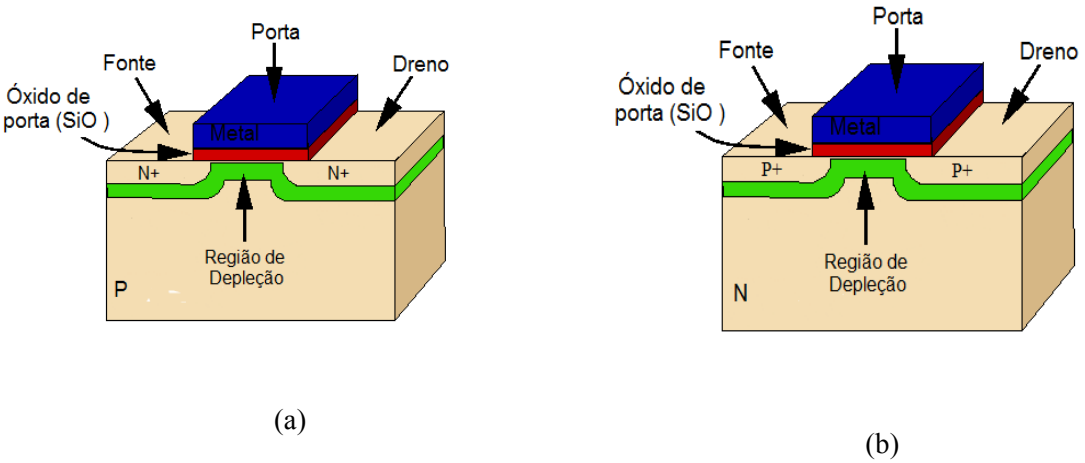


Figura 2.2-Exemplo de estruturas 3D de MOSFETs de canal n (a) e de canal p (b), implementados com tecnologia CMOS de fabricação de CI convencional (*bulk*).

Quando uma tensão positiva for maior que a tensão de limiar (V_{TH}) será gerado um campo elétrico vertical no óxido de porta [8], que será responsável por atrair as cargas negativas do substrato (corpo) do MOSFET em direção à interface Si/SiO_2 (regime de inversão) e também provocar a repulsão das cargas positivas do silício [8]. À medida que há o aumento da tensão aplicada à porta, mais cargas negativas são atraídas em direção à interface Si/SiO_2 [8]. Quando uma tensão negativa for aplicada no contato de porta de um MOSFET, mais cargas positivas serão atraídas (regime de acumulação) [8]. A Figura 2.3 apresenta a seção transversal de um nMOSFET com cargas negativas induzidas na região próxima à interface Si/SiO_2 (Figura 2.3.a) e cargas positivas acumuladas nessa mesma região (Figura 2.3.b).

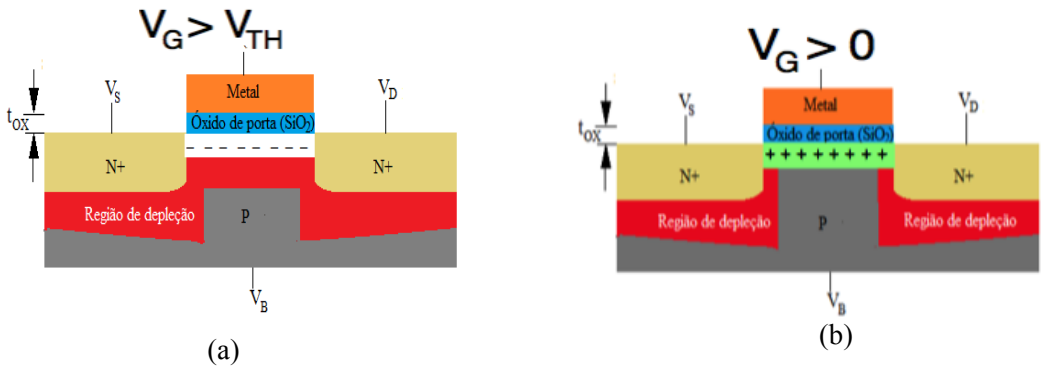


Figura 2.3 - Seção transversal de um nMOSFET com cargas negativas induzidas na interface Si/SiO_2 (a) e com cargas positivas induzidas na interface Si/SiO_2 (b).

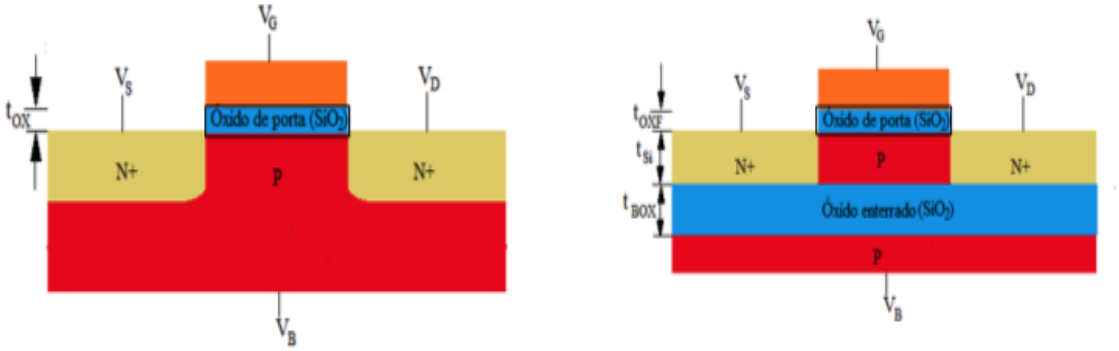
Com o aumento das dopagens na região de substrato e o escalamento dos dispositivos, capacitâncias de junção que não eram muito significativas, começam a apresentar forte

influência no funcionamento dos MOSFETs [1, 21, 22]. As cargas positivas que tendem a ficar aprisionadas no substrato durante o funcionamento do dispositivo causando o aparecimento de efeitos parasitários indesejados, como o disparo de um tiristor parasitário PNPN (*latch-up*) [1, 21, 22].

2.2 O SOI MOSFET

A partir do desenvolvimento dos MOSFETs, foram desenvolvidos os SOI MOSFETs, como uma evolução natural desses transistores [1]. A principal diferença referente à estrutura do SOI MOSFET em relação ao MOSFET Convencional (*Bulk*) é a inserção de uma camada de óxido enterrado abaixo da região ativa do transistor [1]. Esta camada de óxido enterrado tende a reduzir os efeitos parasitários dos MOSFETs implementados com tecnologia CMOS convencional (*bulk*) [1]. Além disso, ela é capaz de reduzir o efeito de canal curto em até 60% em relação aos transistores implementados com tecnologia CMOS Convencional (*bulk*) [1]. A estrutura SOI também é capaz de reduzir as capacitâncias parasitárias, podendo alcançar uma redução de até 80% [23, 24] em relação a dos dispositivos implementados com tecnologia CMOS convencional (*bulk*). Ela permite também reduzir a degradação da mobilidade dos portadores móveis no canal e o efeito do tiristor parasitário [1]. Adicionalmente, ela é capaz de reduzir significativamente a corrente de fuga de estado desligado (I_{OFF}), dependendo da dopagem na região de canal e do tipo de óxido de isolação [1, 23, 24].

Uma grande desvantagem da tecnologia SOI CMOS é o alto custo da lâmina SOI em comparação com a lâmina utilizada pelo processo de fabricação de CIs CMOS convencional (*bulk*) [24]. A Figura 2.4 apresenta as seções transversais de um nMOSFET implementado com tecnologia Convencional (*Bulk*) (Figura 2.4.a) e de um SOI nMOSFET (Figura 2.4.b).



(a) (b)

Figura 2.4 - Seção transversal de um nMOSFET implementado com tecnologia convencional (*bulk*) (a) e com tecnologia SOI (b).

Na Figura 2.4, t_{OX} e t_{OXF} representam as espessuras de óxido de porta, t_{si} é a espessura da camada de silício e t_{BOX} é a espessura do óxido enterrado do SOI nMOSFET [23, 24].

2.3 Modos de funcionamento dos SOI MOSFETs

O modo de funcionamento de um SOI MOSFET é fortemente dependente da espessura da camada de silício (t_{si}), da concentração de dopantes na região de canal (N_A ou N_D) e da sua temperatura de operação (T) [22].

Nos nMOSFETs implementados com tecnologia convencionais (*Bulk*), diferentemente do que ocorre com os SOI MOSFETs, não há a existência do óxido enterrado em sua estrutura [22, 23] e ao se aplicar uma tensão de porta superior ao valor da tensão de limiar (V_{TH}), tem-se a máxima espessura da região de depleção ($x_{dmáx}$), localizada logo abaixo da região de óxido de porta e que é definida de acordo com a equação (2.1) [1, 21]

$$x_{dmáx} = \sqrt{\frac{4 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot \phi_F}{q \cdot N_A}} \ , \tag{2.1}$$

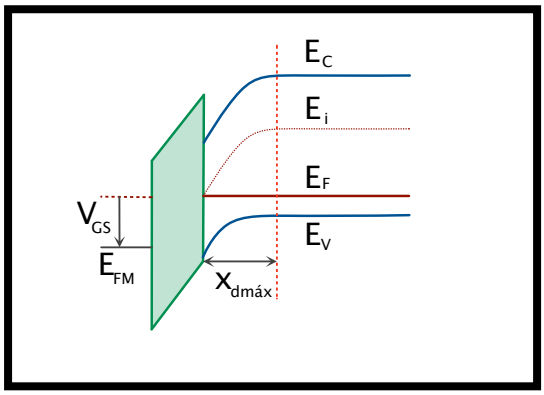
onde ε_{Si} é a permissividade do silício, ϕ_F é o potencial de Fermi, q é a carga elementar do elétron [1, 21], N_A é a concentração de dopantes aceitadores e ϕ é o potencial de Fermi, que é definido pela equação (2.2) [1, 21]

$$\phi_F = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right), \tag{2.2}$$

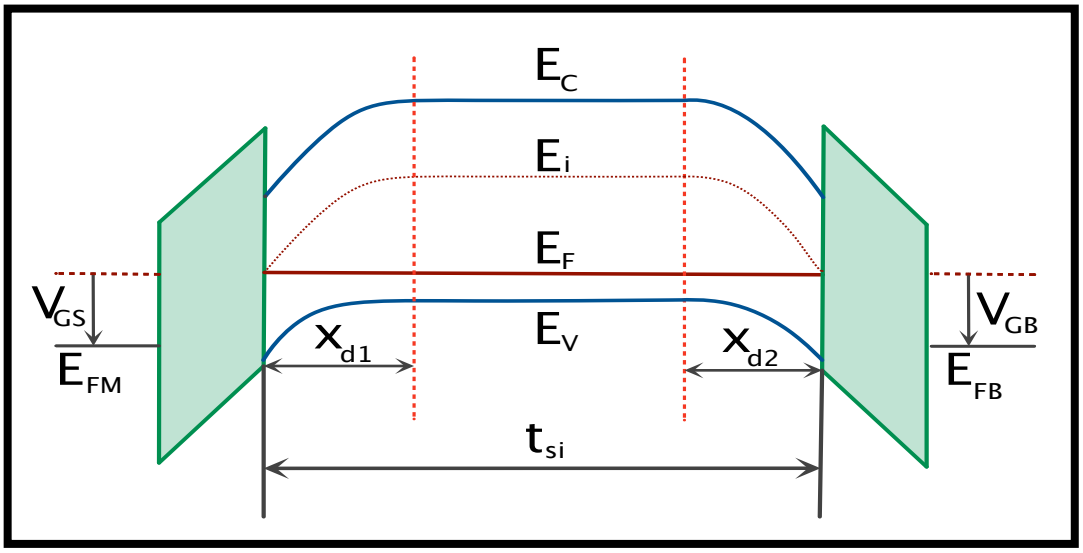
onde K é a constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura absoluta em Kelvin e n_i é a concentração intrínseca de portadores no semicondutor [1].

Existem três tipos diferentes de SOI MOSFETs: o parcialmente depletado (PDSOI), o quase totalmente depletado (NFDSOI) e o totalmente depletado (FDSOI) [1].

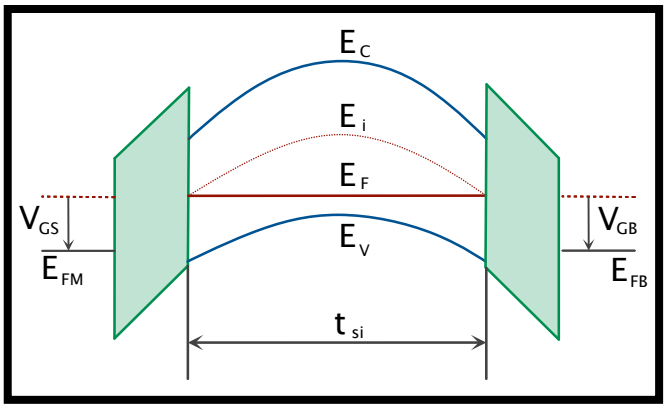
A Figura 2.5 apresenta o diagrama de faixas de energia de um MOSFET implementado com tecnologia convencional (*bulk*) (Figura 2.5.a), de um SOI MOSFET parcialmente depletado (Figura 2.5.b) e de um SOI MOSFET totalmente depletado (Figura 2.5.c) [1].



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 - Diagramas de faixas de energia de um MOSFET convencional (*bulk*) (a), de um SOI MOSFET parcialmente depletado (b) e de um SOI MOSFET totalmente depletado (c).

Na Figura 2.5, E_V representa o nível de energia da camada de valência, E_F representa o nível de energia de Fermi de um semicondutor, E_i é o nível de energia intrínseco do semicondutor, E_C representa o nível de energia da camada de condução e E_{FM} e E_{FB} representam os níveis de Fermi dos eletrodos da porta e do substrato, respectivamente x_{d1} e x_{d2} são as espessuras da região de depleção, causadas pela polarização do contato de porta (primeira porta) e substrato (segunda porta), respectivamente e $x_{dmáx}$ é a espessura da região de depleção máxima, as tensões V_{GF} e V_{GB}, são tensões elétricas aplicadas na porta e no substrato, respectivamente e V_{GS} é a tensão aplicada entre o contato de porta e fonte do MOSFET [1, 21].

Os SOI MOSFETs parcialmente depletados (PD-SOI MOSFETs) apresentam uma espessura do filme de silício (t_{Si}) cerca de duas vezes maior do que o valor da espessura máxima da região de depleção ($t_{Si} \geq 2x_{dmáx}$). Nesse tipo de estrutura não existe a interação entre as regiões de depleção geradas a partir das polarizações da primeira e da segunda interfaces (região denominada de neutra), independentemente das tensões aplicadas em ambas as portas [1, 21].

Caso esta região neutra, que se encontra entre as áreas de depleção, seja aterrada, as características deste tipo de transistor serão as mesmas que a de um MOSFET fabricado com a tecnologia Convencional (*Bulk*) [2]. Todavia, caso esta região não esteja aterrada, podem ocorrer os efeitos de corpo, da elevação abrupta da corrente de dreno e a ativação do transistor bipolar parasitário [24].

O SOI MOSFET totalmente depletado (FD SOI MOSFET) possui uma espessura do filme de silício (t_{Si}) menor do que o valor da espessura máxima da região de depleção ($t_{Si} \leq x_{dmáx}$). Dessa forma, para tensões maiores ou iguais do que a tensão de limiar, o dispositivo já se encontra totalmente depletado, caso a segunda interface não esteja acumulada [21]. Este dispositivo apresenta as melhores características elétricas, quando comparado aos outros tipos de SOI MOSFETs [21]. Estes tipos de dispositivos apresentam um menor efeito de canal curto [25], uma menor inclinação de sub-limiar (próxima ao valor ideal de 60 mV/dec.) [26] e uma maior mobilidade [27].

Os SOI MOSFET quase totalmente depletado (NFD SOI MOSFETs) são transistores que dependem das polarizações da porta e do substrato [21, 22]. Nesse caso, o filme de silício possui uma espessura maior do que uma vez a espessura máxima da região de depleção e menor do que duas vezes a espessura máxima da região de depleção ($x_{dmáx} < t_{Si} < 2x_{dmáx}$). Caso as regiões de depleção das duas interfaces venham a se sobrepor, o transistor irá

trabalhar como um dispositivo totalmente depletado e caso isto não ocorra, ele irá trabalhar como um SOI MOSFET parcialmente depletado [21, 22].

2.4 O estilo de leiaute do tipo Diamante (geometria de porta hexagonal) para MOSFETs

Atualmente, a tecnologia SOI CMOS é a mais utilizada para a fabricação de circuitos integrados comerciais mistos utilizados em aplicações de baixa potência e baixa tensão [11, 15]. Diversos outros dispositivos têm sido estudados, a fim de melhorar o desempenho dos dispositivos planares e tridimensionais (3D) e consequentemente melhorar o desempenho dos circuitos integrados analógicos e digitais [28].

Considerando os SOI MOSFETs planares, o leiaute do tipo Diamante é aquele que apresenta a geometria de porta hexagonal [11] e são dispositivos alternativos para aumentar o desempenho dos MOSFETs e consequentemente o desempenho dos circuitos integrados (CIs) analógicos e digitais, sem gerar qualquer custo adicional ao atual processo CMOS de fabricação de CIs [11, 15].

Este novo estilo de leiaute também poder ser usado em qualquer tipo de MOSFETs, seja ele um dispositivo planar ou tridimensional [11, 14, 15]. Ele foi desenvolvido, particularmente, com o intuito de aumentar o campo elétrico longitudinal (paralelo) ao longo do canal, usando o chamado "efeito de canto longitudinal" (LCE) ao longo do comprimento do canal e consequentemente melhorando a velocidade de deriva média das cargas móveis no canal ($\vec{v}_{//}$), que resulta na melhoria da corrente de dreno (I_{DS}) e da transcondutância (gm). O LCE contribui também para a redução da resistência de estado ligado (R_{DSon}) dos MOSFETs do tipo Diamante em comparação aquela observada no transistor convencional (geometria de porta retangular) equivalente [11, 14, 15].

A título de exemplo, pelos resultados de simulação tridimensionais (3D) apresentados, considerando-se a mesma área da porta (A_G) e as mesmas condições de polarização tanto para a tensão elétrica entre porta e fonte (V_{GS}) e como também para a tensão elétrica entre dreno e fonte (V_{DS}) (V_{GS} = 0,4 V e V_{DS} = 0,8 V), o SOI nMOSFET do tipo Diamante com ângulo α igual a 55 °, é capaz de gerar uma corrente de dreno significativamente maior na região de saturação (aproximadamente de 2,39 vezes) do que aquela encontrada no SOI nMOSFET Convencional (geometria de porta retangular) equivalente [11, 14, 15].

Diversos estudos sobre o comportamento de MOSFETs do tipo Diamante com diferentes tecnologias (SOI e *Bulk*) foram realizados por simulações numéricas 3D e resultados experimentais, indicando que este estilo de leiaute de porta inovador pode trazer

vários benefícios, principalmente para os CIs analógicos [29], tais como os espelhos de corrente, amplificadores operacionais e em aplicações de MOSFETs de potência planares (*Planar Power* MOSFETs) [16, 17, 18].

2.5 Parâmetros Elétricos dos SOI MOSFETs

A seguir são descritos os principais parâmetros elétricos que caracterizam os SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os seus Convencionais equivalentes e que são utilizados por este trabalho de dissertação de mestrado.

2.5.1 Tensão de Limiar (V_{TH})

A tensão de limiar (V_{TH}) pode ser definida como a tensão mínima que precisa ser aplicada à porta do MOSFET para que uma fina camada de inversão de portadores minoritários seja formada na interface entre o óxido de porta e o filme de silício, onde é formada a região de canal, para que ocorra a passagem de corrente elétrica entre os terminais de fonte e dreno [22, 30]. A tensão de limiar de um nMOSFET de tecnologia convencional, que é a mesma de um SOI nMOSFET parcialmente depletado com contato de substrato aterrado é dada pela equação (2.3) [22, 30]

$$V_{TH} = V_{FB} + 2 \cdot \phi_F + \frac{q \cdot N_A \cdot x_{dmáx}}{C_{OX}}, \tag{2.3}$$

onde V_{FB} é a tensão de faixa plana, que é definida pela equação (2.4), ϕ_F é o potencial de Fermi, q é o valor da carga elementar do elétron, N_A é a concentração de dopantes na região de canal por unidade de volume, $x_{dmáx}$ é a espessura máxima da região de depleção e C_{ox} é a capacitância do óxido de porta por unidade de área [21, 22, 30]

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}}, \tag{2.4}$$

onde Q_{ox} é a quantidade de cargas fixas no óxido de porta por unidade de área.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi escolhida a técnica de extração da tensão de limiar por meio do pico máximo da segunda derivada da curva da corrente de dreno em

função da tensão de porta (I_{DS} em função de V_{GS}) para uma tensão V_{DS} igual a 50 mV (região de triodo) [21, 22, 30].

Assim, aplicando a segunda derivada na curva de I_{DS} em função de V_{DS}, tem-se um pico máximo da corrente de dreno, onde o valor de V_{GS} correspondente a esse valor de pico de $I_{DS,}$ é a tensão de limiar, desde que sejam usados valores de tensão de dreno próxima de zero [8]. A Figura 2.6 apresenta um exemplo de um gráfico da derivada de segunda ordem de uma curva I_{DS} em função de V_{GS} para V_{DS} igual a 50 mV, utilizado para mostrar como é extraída a tensão de limiar (V_{TH}).

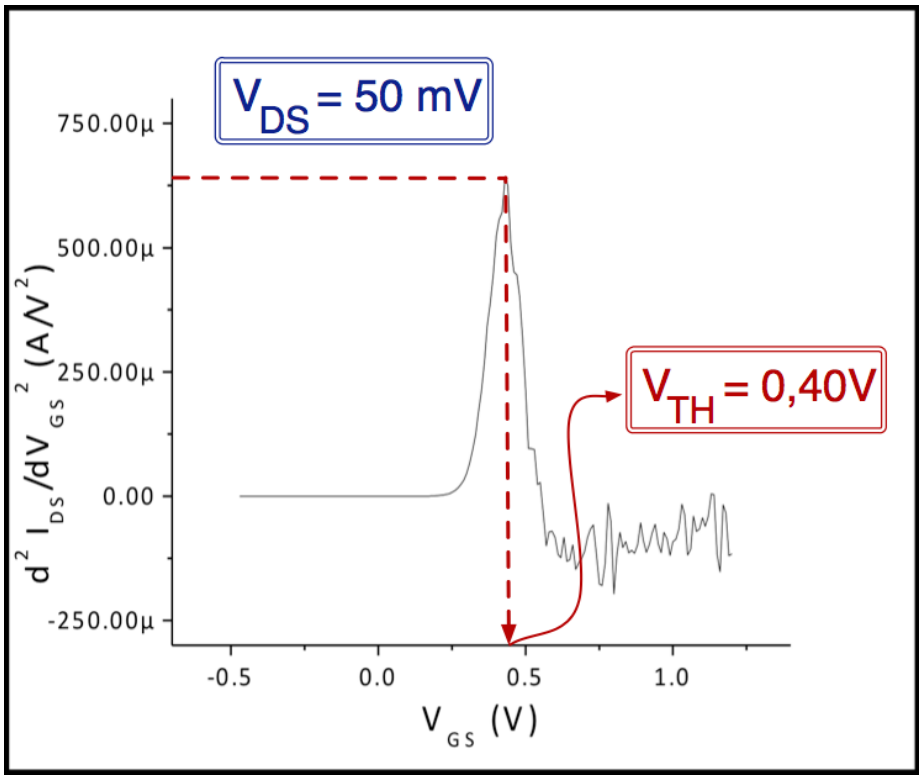


Figura 2.6 - Exemplo de extração da tensão de limiar (V_{TH}) através da derivada de segunda ordem da corrente de dreno em função da tensão de porta (I_{DS} em função de V_{GS}) para V_{DS} igual a 50 mV.

2.5.2 Transcondutância (gm)

A transcondutância (gm) de um SOI nMOSFET é a medida da efetividade do controle da corrente de dreno em função da tensão de porta (V_{GS}). A gm é determinada através da derivada da corrente de dreno (I_{DS}) em relação ao potencial de porta (V_{GS}), conforme a equação (2.5) [31, 32]

$$gm = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = \frac{\mu_n \cdot C_{OX} \cdot W}{n \cdot L} \cdot V_{DS}\,, \quad \text{(região de saturação)} \qquad (2.5)$$

onde I_{DS} é a corrente entre os terminais de fonte e dreno, μ_n é mobilidade dos portadores no canal de um transistor tipo n, W é a largura do canal, L é o comprimento do canal e C_{OX} é a capacitância do óxido de porta por unidade de área [22, 31, 32].

A Figura 2.7 apresenta um exemplo de uma curva experimental da transcondutância em função da tensão de porta para V_{DS} igual a 4 V de um SOI nMOSFET Convencional (geometria de porta retangular) de largura de canal W igual a 24 µm e de comprimento de canal L igual a 8 µm, que foi usada para extrair a transcondutância máxima (gm_{max}).

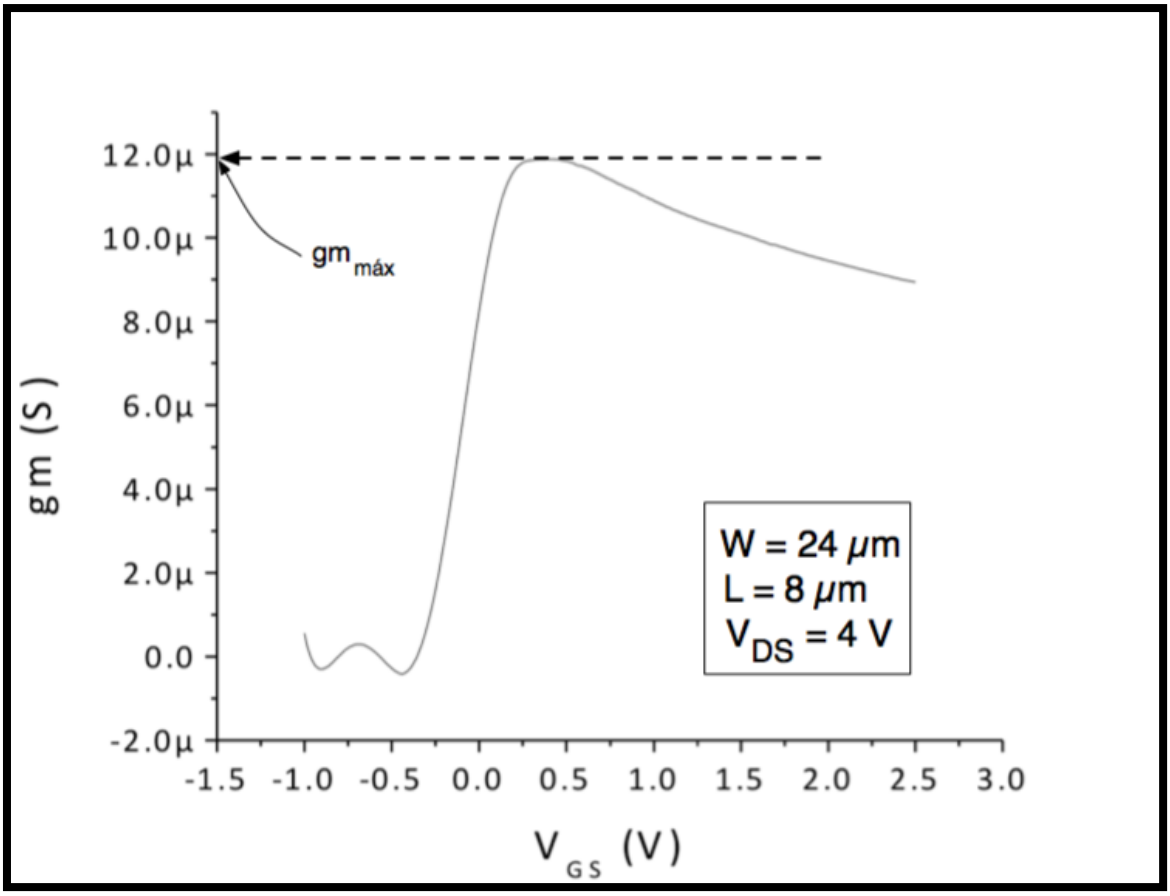


Figura 2.7 - Exemplo de uma curva da transcondutância em função de V_{GS} para V_{DS} igual a 4 V de um SOI nMOSFET convencional (geometria de porta retangular).

2.5.3 Corrente Elétrica entre Dreno e Fonte (I_{DS}) de um SOI nMOSFET

Define-se I_{DS} como a corrente elétrica que atravessa o canal de um SOI nMOSFET entre as regiões de fonte e de dreno [31, 32]. Esta corrente elétrica (I_{DS}) pode ser representada

através da equação (2.6), quando o SOI MOSFET opera na região triodo de uma curva da corrente de dreno (I_{DS}) em função da tensão de dreno (V_{DS}) [32, 33]

$$I_{DS} = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot n \cdot V_{DS}^2\right], \tag{2.6}$$

onde n é o fator de corpo.

Na região de saturação, a corrente de dreno (I_{DS}) de um SOI nMOSFET pode ser representada pela equação (2.7) [33, 34].

$$I_{DS} = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 \tag{2.7}$$

A Figura 2.8 exibe as regiões triodo e de saturação existentes no gráfico da corrente de dreno (I_{DS}) em função da tensão de dreno (V_{DS}).

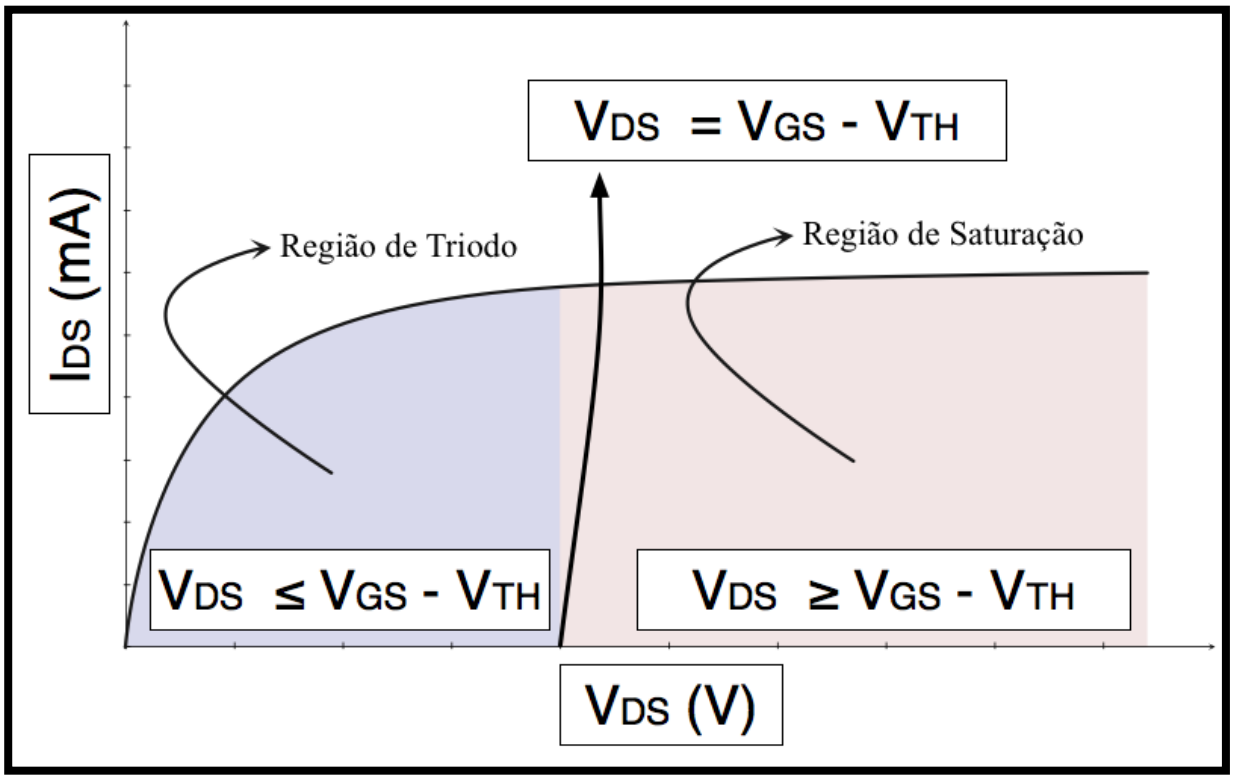


Figura 2.8 - Representação das regiões de triodo e de saturação existentes na curva de I_{DS} em função de V_{DS}.

2.5.4 Resistência entre Dreno e Fonte de Estado Ligado (R_{DSon})

A resistência série entre dreno e fonte de estado ligado (R_{DSon}) é determinada quando o nMOSFET opera na região triodo, ou seja, quando ele funciona como uma chave [31, 33, 34]. Em função disto, devemos avaliar a tensão de dreno (V_{DS}) como sendo inferior a sobre-tensão de porta ($V_{GT} = V_{GS} - V_{TH}$), de tal forma que pode-se desconsiderar o termo V_{DS}^2 da equação (2.6) [31, 33, 34]. A R_{DSon} é dada pela equação (2.8) [31, 33, 34].

$$R_{DSon} = \frac{1}{\mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot [(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS}]} \tag{2.8}$$

A Figura 2.9 ilustra a curva da I_{DS} em função de V_{DS}, que indica a região triodo de operação do nMOSFET para a obtenção de R_{DSon} e que é determinada através da razão entre a variação de V_{DS} (ΔV_{DS}) pela variação de I_{DS} (ΔI_{DS}) [33, 34, 35].

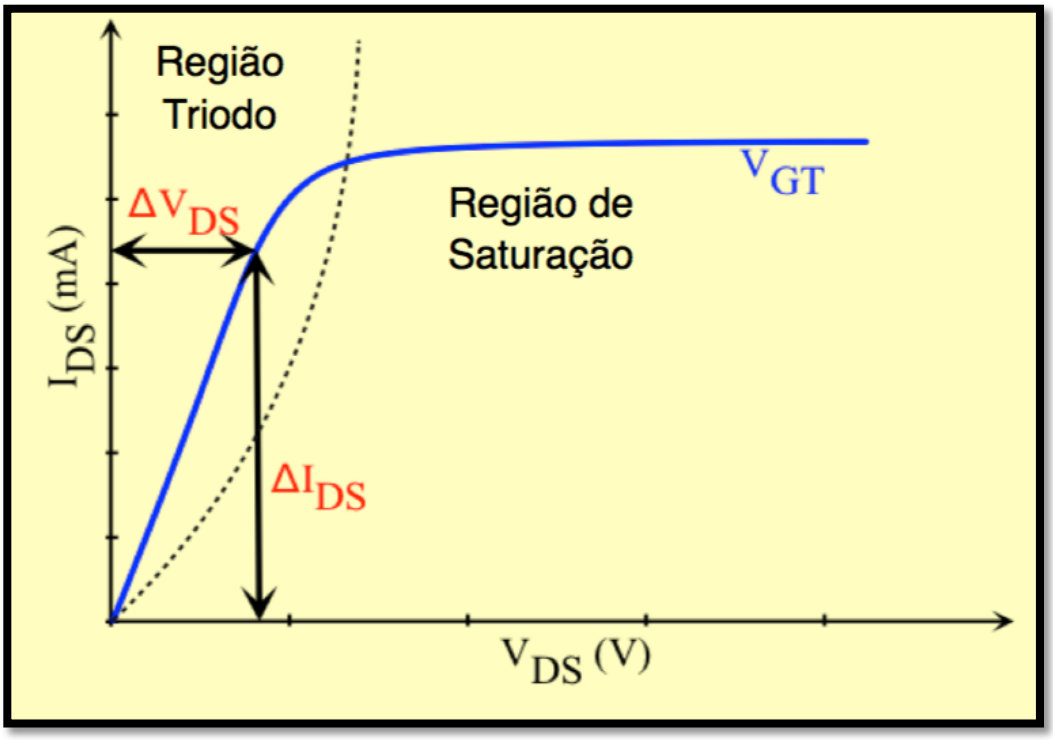


Figura 2.9 – Curva I_{DS} em função de V_{DS} que indica a região triodo de operação do nMOSFET para a obtenção de R_{DSon} e que é determinada através da razão entre a variação de V_{DS} (ΔV_{DS}) pela variação de I_{DS} (ΔI_{DS}).

2.5.5 Razão entre a transcondutância e a corrente de dreno (gm/I_{DS}).

A razão entre a transcondutância e a corrente de dreno (gm/I_{DS}) mede a eficiência de um MOSFET em converter uma dada corrente de polarização em transcondutância [31, 32].

O valor máximo do parâmetro gm/I_{DS} ocorre quando o SOI MOSFET está operando no regime de inversão fraca, podendo ser determinada através da equação (2.9) [31, 32, 35]

$$\frac{gm}{I_{DS}} = \frac{\ln(10)}{S} = \frac{q}{n \cdot K \cdot T}, \tag{2.9}$$

onde S é a inclinação de sub-limiar.

No regime de inversão forte, gm/I_{DS} é menor do aquele encontrado no regime de inversão fraca e é dada pela equação (2.10) [31, 32, 35].

$$\frac{gm}{I_{DS}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L}}{n \cdot I_{DS}}} \tag{2.10}$$

A Figura 2.10 apresenta um exemplo de curva gm/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$, para um V_{DS} igual a 200 mV.

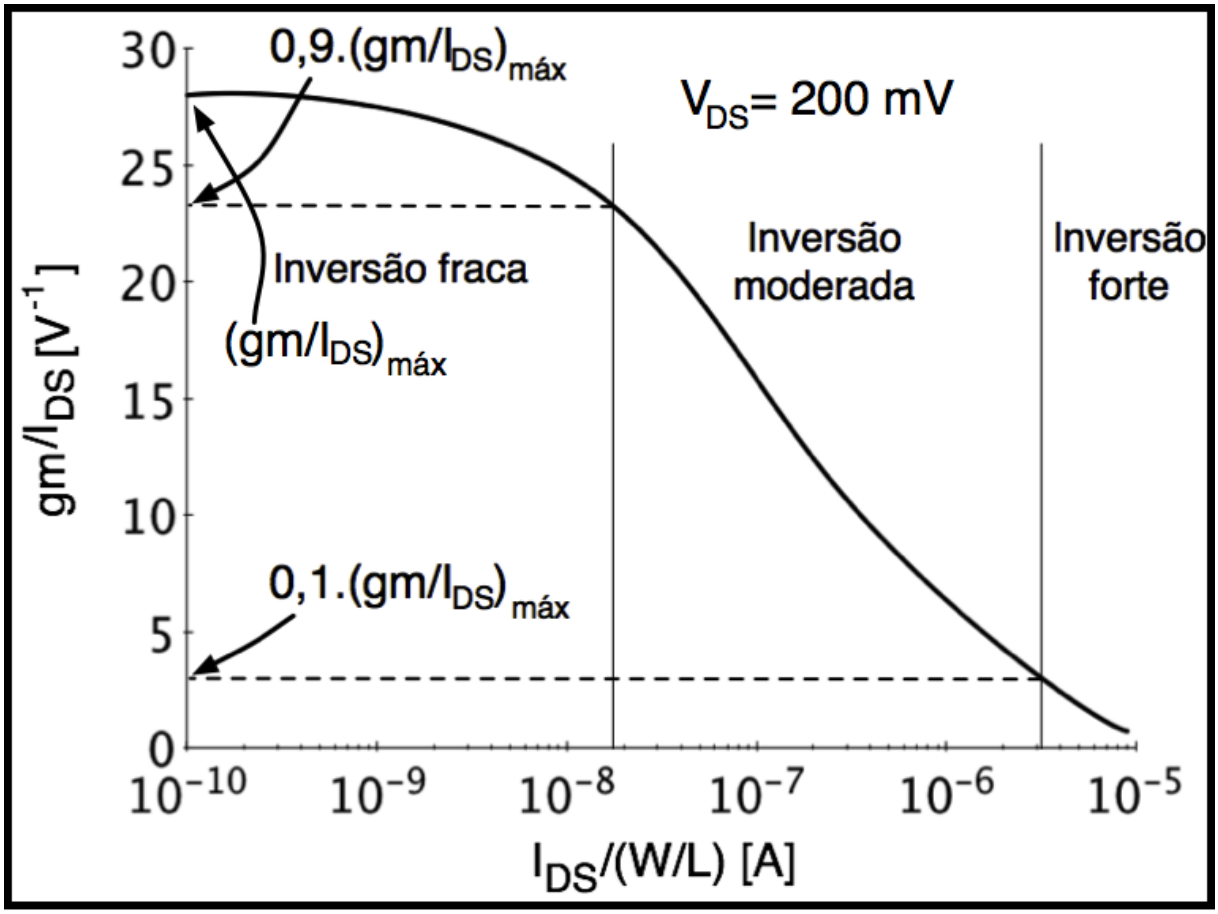


Figura 2.10 – Exemplo de curva de gm/I_{DS} em função de $I_{DS}/(W/L)$, para um V_{DS} igual a 200 mV.

2.5.6 Inclinação de Sub-limiar (SS)

O parâmetro denominado de inclinação de sub-limiar ou o inverso da inclinação de sub-limiar (SS) é um dos parâmetros mais importantes a ser caracterizado e estudado em transistores com tecnologia MOS, visto que ele fornece o valor da tensão que deve ser aplicada ao contato de porta, a fim de que exista um aumento de uma década na corrente de dreno do dispositivo [31, 32]. Este parâmetro pode ser observado nas curvas do logaritmo de I_{DS} em função de V_{GS} para valores de tensão de porta menores do que V_{TH} [31, 32, 33].

Na região de sub-limiar, a corrente entre dreno e fonte (I_{DS}) é basicamente formada pela corrente de difusão, pois a tensão aplicada ao dreno é muito baixa e o campo elétrico longitudinal não é forte o suficiente para afetar a velocidade dos portadores, como é apresentado na equação (2.11) [31, 32, 33]

$$I_{DS} = -q \cdot A \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dy} = q \cdot A \cdot D_n \cdot \frac{n(0) - n(L)}{L}, \tag{2.11}$$

onde na equação (2.11), q é a carga elementar do elétron, A é a área da seção transversal da região de canal, D_n é o coeficiente de difusão dos elétrons, $\frac{\partial n}{\partial y}$ é a variação infinitesimal da concentração de elétrons ao longo do comprimento de canal e n(0) e n(L) são as concentrações de elétrons nos limites das regiões de fonte e dreno, respectivamente e L é o comprimento do canal do transistor [31, 32, 33].

A inclinação de sub-limiar é definida como o inverso da derivada do logarítmico da corrente de dreno em função da tensão aplicada à porta [31, 32, 33]. A equação (2.12) apresenta a expressão da inclinação de sub-limiar de um MOSFET [31, 32, 33]

$$SS = \frac{1}{\frac{\partial\left[\log\left(I_{DS}\right)\right]}{\partial V_{GS}}}, \tag{2.12}$$

onde $\frac{\partial}{\partial V_{GS}}$ é o operador derivada em relação a V_{GS}.

Em MOSFETs implementados com tecnologia CMOS convencional (*bulk*), a inclinação de sub-limiar normalmente varia de 80 mV/dec. a 120 mV/dec., em temperatura ambiente, sendo que para os MOSFETs com tecnologia SOI CMOS totalmente depletados, o limite teórico é de 60 mV/dec. [21, 33, 35].

2.5.7 Tensão Early (V_{EA})

Observa-se que uma vez estrangulado o canal na interface entre a região de canal e a região de dreno, um aumento gradual de V_{DS} provocará uma redução do comprimento efetivo de canal. Isso significa dizer que este aumento no valor de V_{DS}, acima da tensão de dreno de saturação (V_{DSsat}), acarretará no deslocamento do ponto de estrangulamento da região do dreno em direção à região da fonte [31, 32, 33]. A Figura 2.11 representa o quanto se deslocou o ponto de estrangulamento do canal deslocamento da canal.

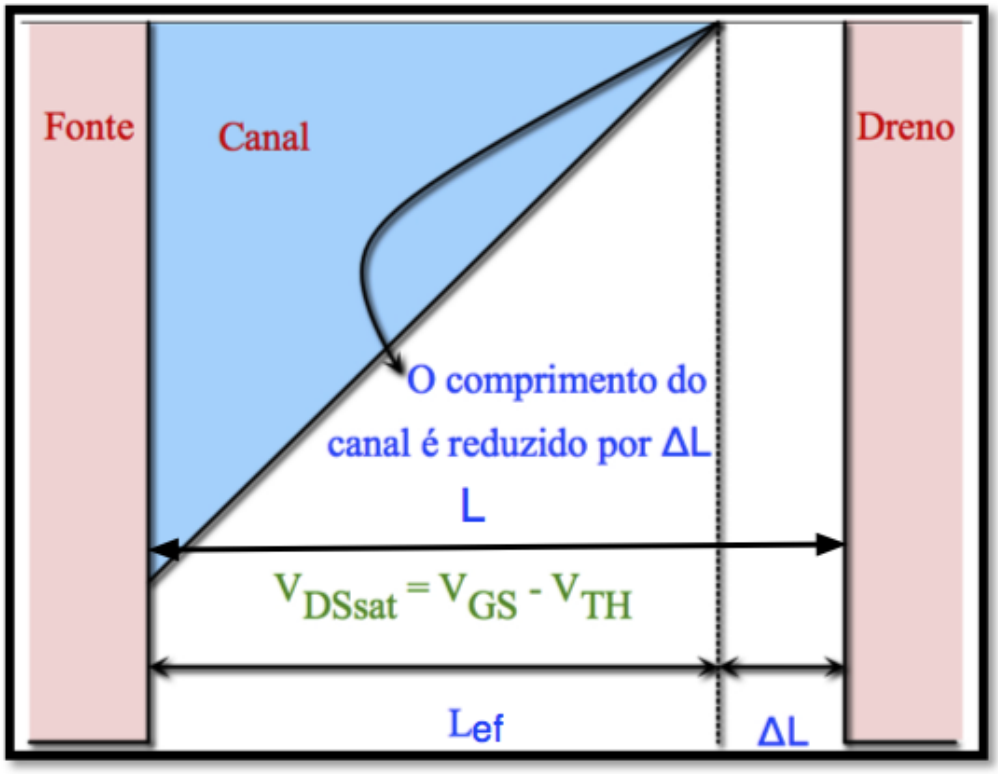


Figura 2.11 - Representação do estrangulamento do canal em função do aumento do valor da tensão V_{DS} acima do valor de V_{DSsat}. Este aumento do valor da tensão V_{DS} provoca uma redução no comprimento efetivo do canal.

Na Figura 2.11, ΔL é a redução do comprimento do canal em função do deslocamento do ponto de estrangulamento para dentro da região do canal na direção da região de fonte devido ao incremento da polarizaçã de dreno V_{DS} e L_{ef} é o comprimento efetivo de canal [31, 32, 33].

Esta variação no comprimento efetivo do canal é conhecida como modulação do comprimento do canal [31, 32, 33]. Desta forma, observa-se que o valor de I_{DS} passa a aumentar com o aumento gradativo de V_{DS}, visto que I_{DS} é inversamente proporcional ao comprimento efetivo do canal ($L_{ef} = L - \Delta L$) [31, 32, 33].

A Figura 2.12 mostra as particularidades típicas que ocorrem na curva de I_{DS} em função da tensão V_{DS}, quando há a ocorrência do efeito de modulação do comprimento do canal.

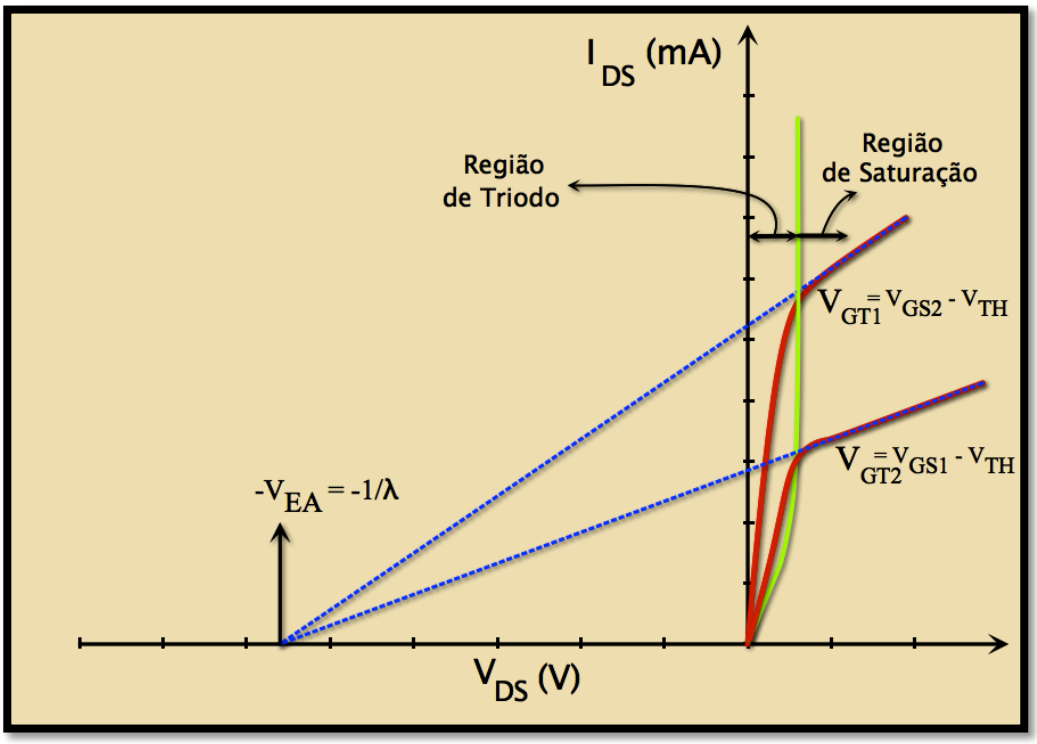


Figura 2.12 - Exemplo de duas curvas de I_{DS} em função de V_{DS}, para dois diferentes valores de sobretensão de porta (V_{GT1} e V_{GT2}) utilizadas para a extração de V_{EA}.

Na Figura 2.12, λ é o fator de modulação do comprimento de canal, V_{EA} é a tensão Early, V_{GS1} e V_{GS2} são as tensões elétricas aplicadas entre a porta e a fonte (V_{GS2} é maior que V_{GS1}).

Analisando-se a Figura 2.12, observa-se que a extrapolação da curva de I_{DS} na região de saturação interceptam o eixo de V_{DS} no ponto o qual V_{DS} é igual a -1/ λ. Este valor de tensão é considerado a tensão Early (V_{EA}) [31, 32, 33]. A representação matemática da dependência linear da corrente I_{DS} em função do aumento da tensão V_{DS} na região de saturação é concebida pelo acréscimo do fator ($1+\lambda.V_{DS}$) na equação (2.7). A equação (2.13) representa I_{DS} levando-se em conta o efeito da modulação do comprimento de canal [31, 32, 33], quando o SOI nMOSFET opera na região de saturação,

$$I_{DS} = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot [(V_{GS} - V_{TH})^2] \cdot (1 + \lambda \cdot V_{DS}), \qquad (2.13)$$

onde λ é dado por $-1/V_{EA}$.

2.5.8 Corrente entre dreno e fonte de Estado Ligado (I_{DSon})

Define-se a corrente de estado ligado (I_{DSon}) como a corrente de dreno que é medida na situação em que o MOSFET está operando com valores da tensão de porta (V_{GS}) superiores ao valor da tensão de limiar (V_{TH}) [31, 32, 36]. I_{DSon} é comumente extraída a partir da curva do logaritmo da corrente de dreno [(Log(I_{DS}))] em função da tensão de porta (V_{GS}), realizando o prolongamento da região praticamente paralela ao eixo de V_{GS}, na situação do MOSFET estar operando na região de triodo [31, 32, 36].

A Figura 2.13 representa um exemplo de uma curva de [Log (I_{DS})] em função da tensão V_{GS} de um nMOSFET, onde está indicado a forma de se extrair da corrente de dreno de estado ligado (I_{DSon}).

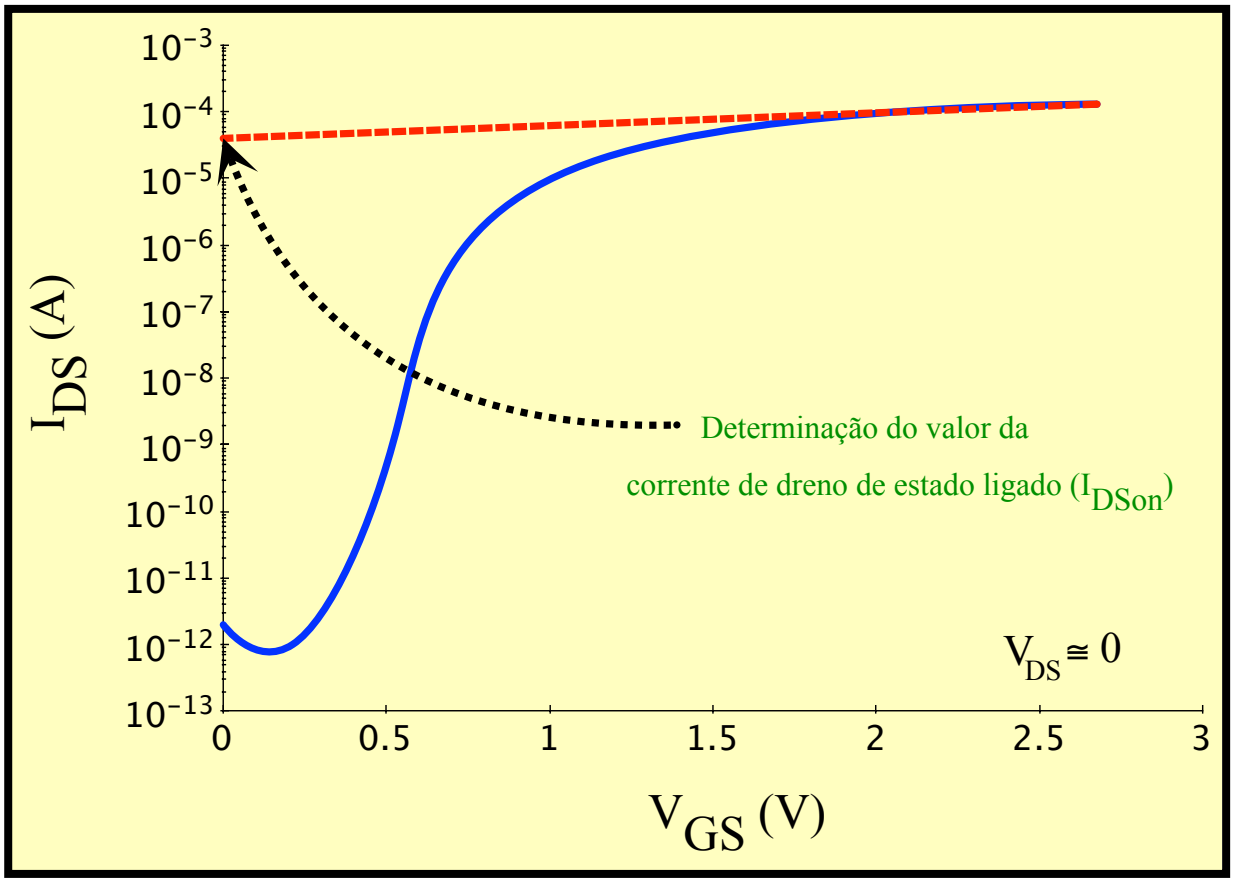


Figura 2.13 - Representação da extração do parâmetro I_{DSon}.

2.5.9 Ganho de tensão intrínseco de um SOI MOSFET (A_V)

A equação (2.14) define o valor do ganho de tensão intrínseco (A_V) de um SOI nMOSFET operando na região de saturação

$$A_V = \frac{gm}{g_D} = \frac{gm}{I_{DS}} \cdot V_{EA}, \tag{2.14}$$

onde I_{DS} é a corrente elétrica quiescente entre os terminais de fonte e dreno, gm é a transcondutância, V_{EA} é a tensão Early e g_D é a condutância de dreno [31, 32, 33].

2.5.10 Frequência de Ganho de Tensão Unitário (f_T).

A frequência de ganho de tensão unitário (f_T) é definida como a frequência em que o ganho de tensão é igual a 1. A equação (2.15) representa a expressão matemática utilizada para a determinação do parâmetro f_T para um SOI MOSFET [31, 32, 33]

$$f_T = \frac{gm}{2 \cdot \pi \cdot C_L}, \tag{2.15}$$

onde C_L é a capacitância de carga.

2.6 Conceitos Estatísticos

2.6.1 Variância (s^2)

Define-se a variância de um determinado parâmetro de um dispositivo pertencente a uma amostra de n' dispositivos como sendo a razão entre os quadrados do quanto um determinado parâmetro de um dispositivo pertencente a essa amostra se afasta do valor médio (desvio) e o total de parâmetros analisados dos transistores que compõem a amostra de dispositivos (n') subtraído de 1 [37] [equação (2.16)]

$$s^2 = \frac{(x_1-\bar{x})^2+(x_2-\bar{x})^2+\cdots+(x_{n\prime}-\bar{x})^2}{n'-1}, \quad (2.16)$$

onde x_1, x_2 e $x_{n'}$ representam os valores de um determinado parâmetro de um único dispositivo pertencente a uma amostra de n' dispositivos, $\bar{x}$ representa a média do parâmetro levando-se em conta todos os dispositivos pertencentes à amostra estudada e a parcela n'-1 é utilizada para eliminar os possíveis erros encontrados (bias) ao se utilizar uma amostra de dispositivos ao invés da utilização de uma população inteira de dispositivos [37].

2.6.2 Desvio Padrão (s)

O desvio padrão (s) tem como objetivo medir o quanto um determinado parâmetro de uma amostra de dispositivos está distante do valor médio desse parâmetro da amostra de dispositivos considerada. A equação (2.17) mostra a representação matemática do s [37]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n'-1}\cdot\sum\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\ , \quad (2.17)$$

onde x_i representa cada parâmetro de um único dispositivo da amostra considerada, i é um índice que vai de um a n', n' representa a quantidade de dados que compõem a amostra de dispositivos em análise e $\bar{x}$ representa a média dos parâmetros dos dispositivos da amostra considerada [37, 38].

2.6.3 Graus de Liberdade (g.l.)

Os graus de liberdade (g.l.) de uma amostra de dados é definido através da equação (2.18) [38, 40].

$$\text{g.l.} = n'-1 \quad (2.18)$$

2.6.4 Distribuição Normal

Uma função é dita para ter uma distribuição normal, quando ela apresenta um aspecto em formato de sino [37, 38]. Esta distribuição normal de dados é, por definição, simétrica em

relação à média dos parâmetros que leva em conta todos os dispositivos da amostra de dados [37, 38]. A Figura 2.14 ilustra um exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat}, cuja média é igual a 3,5 de uma amostra de 20 SOI nMOSFETs do tipo Diamante [37, 38].

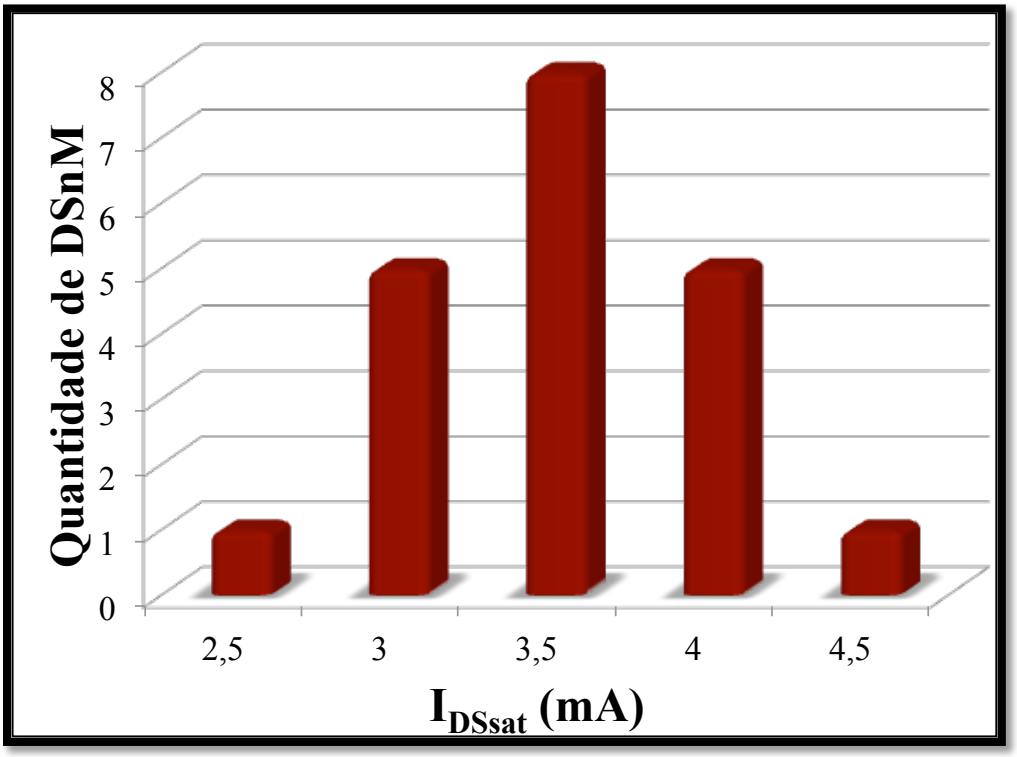


Figura 2.14: Exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat}, cuja média é igual a 3,5 de uma amostra de 20 SOI nMOSFETs do tipo Diamante.

Analisando a Figura 2.14, observa-se que esta amostra apresenta: 8 SOI nMOSFETs onde o valor médio, levando-se em conta todas as I_{DSsat} de todos os dispositivos da amostra, é igual a 3,5 µA, 5 SOI nMOSFETs com valor médio para I_{DSsat} igual a 3,0 µA e mais outros 5 SOI nMOSFETs com valor médio para I_{DSsat} igual a 4,0 µA e por fim apresenta 2 SOI nMOSFETs do tipo Diamante, sendo que um deles apresenta valor médio para I_{DSsat} igual a 2,45 µA e o outro tem um valor médio para I_{DSsat} igual a 4,5 µA.

A equação (2.19) representa a função densidade de probabilidade normal [f(x)] que é uma função que depende, por definição, do valor da média ($\overline{x}$) e do desvio padrão (s) dos parâmetros de todos os dispositivos que compõem a amostra e que tem a mesma forma de uma curva de distribuição normal [37, 38, 39, 40].

$$f(x) = \frac{1}{s.\sqrt{2.\pi}} . e^{\frac{-(x-\overline{x})^2}{2.s^2}} \qquad (2.19)$$

A Figura 2.15 apresenta um exemplo de uma função densidade de probabilidade normal do parâmetro I_{DSsat} de SOI nMOSFETs que pertencem a uma amostra contendo 20 dispositivos com um valor médio ($\overline{I_{DSsat}}$) igual a 3,5 e um desvio padrão (s) de 0,7.

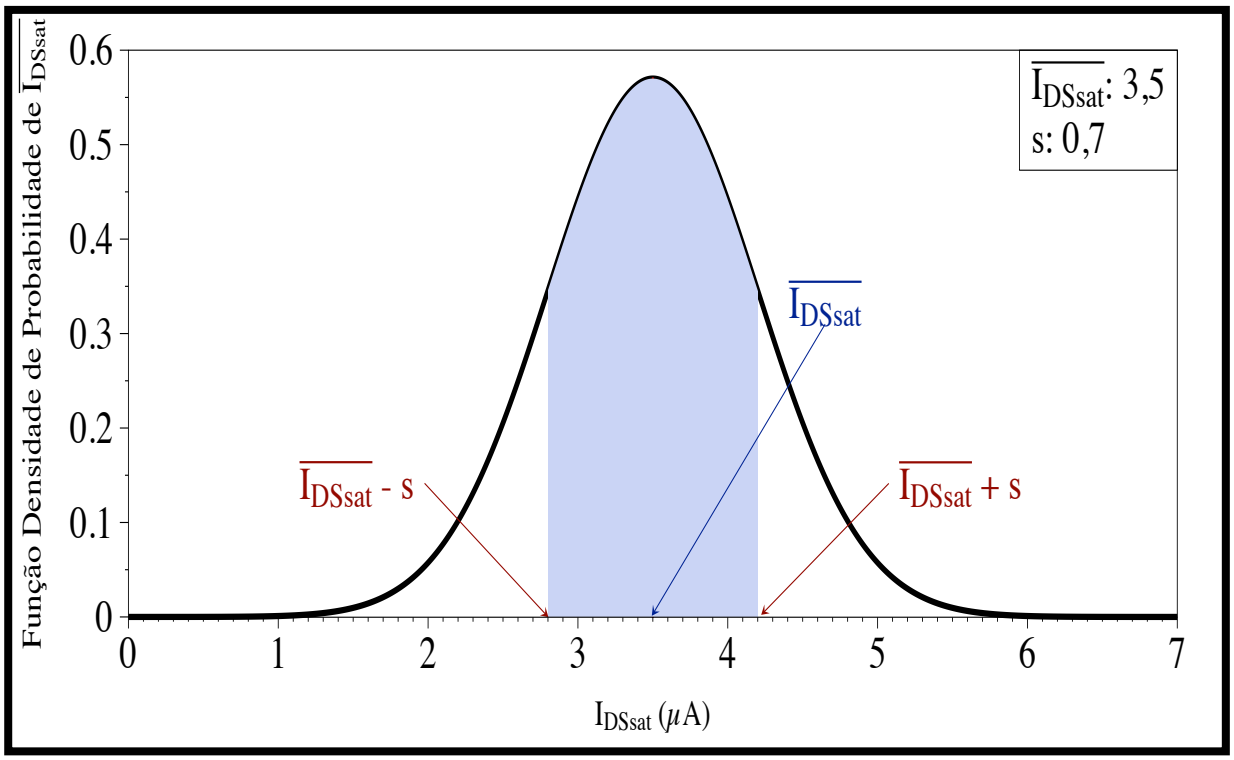


Figura 2.15: Exemplo de uma função densidade de probabilidade normal com o valor médio de I_{DSsat} ($\overline{I_{DSsat}}$) igual a 3,5 e com o valor do desvio padrão (s) igual a 0,7.

2.6.5 Testes Paramétricos e Não Paramétricos

Os testes paramétricos utilizam os parâmetros que compõem uma amostra de dados para a aplicação dos testes estatísticos, sem que exista a necessidade de ordenar estes parâmetros (do menor valor para o maior valor, como por exemplo) [37, 38]. Estes testes exigem que a amostra de dados apresente uma distribuição normal ou conhecida [37, 38, 39].

Os testes não paramétricos utilizam amostras numeradas para a aplicação dos testes estatísticos [37, 38]. Estas amostras numeradas são determinados através da ordenação dos parâmetros que compõem a amostra de dados (como por exemplo, do menor valor para o maior valor) [37, 38]. Estes testes não exigem que a amostra em estudo apresente uma distribuição normal [37, 38, 39].

2.6.6 Testes de Hipóteses

Um teste de hipótese é um processo estatístico que verifica se uma afirmação a respeito de um parâmetro populacional (por exemplo a média, o desvio padrão, a variância, etc) é verdadeira ou falsa [37, 38]. Um exemplo de afirmação seria que o desvio padrão de determinada amostra de dados é menor que 0,5. Desta forma, uma afirmação sobre um parâmetro populacional (de uma população de dispositivos pertencente a uma amostra) é chamada de hipótese estatística [37, 38, 39].

Sempre devem existir um par de hipóteses para realizar um teste de hipóteses para verificar qual delas é estatisticamente verdadeira [37, 38, 39]. Geralmente as hipóteses são denominadas de duas formas diferentes: a) hipótese nula, representada por (H_0) e b) hipótese alternativa, representada por (H_A). H_0 geralmente significa uma determinada afirmação entre parâmetros populacionais, como por exemplo, se a média de duas amostras distintas são estatisticamente semelhantes, enquanto que H_A significa a negação de H_0 [37, 38, 39].

2.6.7 Nível de Significância (α')

O nível de significância (α') é definido como um limite máximo aceitável de um parâmetro em questão (definido pelo pesquisador) para rejeitar a hipótese afirmativa (H_0) [37, 38]. Normalmente os níveis de significância utilizados são iguais a 0,5%, 1%, 5% e 10% para a aplicação de testes estatísticos [37, 38, 39].

Desta forma, pode-se dizer que o nível de significância (α') indica a porcentagem de certeza no qual o teste estatístico é realizado, ou seja, se o nível de significância for igual a 5 %, significa que o teste será realizado com uma precisão de acerto aproximado de 95 % [37, 38, 39].

2.6.8 Intervalo de Confiança

O intervalo de confiança é definido como um intervalo de valores usado para estimar a média, a variância ou o desvio padrão de um parâmetro estudado de uma determinada amostra [37, 38, 39].

O nível de confiança ou grau de confiança define a probabilidade em porcentagem de que este intervalo de confiança contenha a média, a variância ou o desvio padrão de um parâmetro e é calculado de acordo com a equação (2.20) [37, 38, 39].

$$\text{grau de confiança} = \text{nível de confiança} = 1 - \alpha' \tag{2.20}$$

Assim, utiliza-se este intervalo de confiança para estimar um determinado parâmetro populacional [37, 38, 39], ou seja, se a população de um parâmetro qualquer apresenta um valor médio igual a 20, o intervalo de confiança de uma amostra desta população deverá conter este valor médio, que no caso foi especificado como 20.

2.7 Testes Estatísticos Usados Neste Trabalho

2.7.1 Teste de normalidade de Anderson - Darling

Existem alguns procedimentos estatísticos que podem somente ser aplicados a uma população de parâmetros que apresente distribuição normal, por tratarem-se de testes paramétricos [38, 39]. Para realizar isto, foi utilizado o teste estatístico de Anderson-Darling.

O teste estatístico de Anderson - Darling é um dos mais utilizados quando o tamanho da amostra não é superior a 25 [38, 39]. Este teste mede o quão bem uma amostra de parâmetros seguem uma distribuição específica, como por exemplo, uma distribuição normal ou exponencial [38, 39]. Desta forma, quanto melhor uma amostra de parâmetros se ajusta a uma distribuição específica, menor é o resultado deste teste estatístico [38, 39].

Para a aplicação do teste de Anderson-Darling, deve-se criar um teste de hipóteses. A primeira delas diz que a amostra de parâmetros tem uma distribuição normal [38, 39]. A outra hipótese é a negação da primeira, ou seja, a amostra não segue uma distribuição normal [38, 39, 40, 41, 42]. Este teste é aplicado através da equação (2.21) [40, 41, 42] descrita por

$$A^2 = -n' - \sum_{i}^{m} \frac{(2 \cdot i - 1)}{n'} \cdot \ln\left[F(x_i) + \ln\left(1 - F(x_{m+1})\right)\right], \tag{2.21}$$

onde m e i representam os limites superior e inferior da somatória, respectivamente, $F(x_i)$ é a função matemática que representa a distribuição da amostra de parâmetros de tamanho n' (esta função é calculada pelo *software* estatístico (MINITAB 16) [43] que foi utilizado no

desenvolvimento desta dissertação de mestrado), $F(x_{m+1})$ é a função matemática que apresenta uma distribuição conhecida [neste caso, esta função $F(x_{m+1})$ apresenta uma distribuição normal)] [40, 41, 42].

Assim, quanto mais a distribuição de $F(x_i)$ se aproximar da distribuição de $F(x_{m+1})$, menor é o resultado deste teste estatístico [38, 39, 41, 42].

Quando o *software* MINITAB 16 aplica este teste estatístico, ele cria duas regiões denominadas de: a) região de aceitação da hipótese afirmativa e b) região de rejeição da hipótese afirmativa. Este mesmo *software* também calcula a área desta região de rejeição e fornece o valor de p. Caso este valor de p apresente valor superior à área de rejeição da hipótese afirmativa, deve-se concluir que a amostra de parâmetros em estudo apresenta uma distribuição normal [38, 39, 41, 42].

2.7.2 Avaliação estatística dos parâmetros por meio do teste *t-Student*.

O objetivo da utilização do teste *t-Student*, que é um teste paramétrico, é o de analisar se as médias de duas amostras apresentam ou não diferenças relevantes dentro de um intervalo de confiança [38, 39, 44]. Estas amostras em análise podem ser dependentes (são aquelas afetadas mutuamente por um mesmo fator externo) ou independentes (não são necessariamente afetadas mutuamente por um mesmo fator externo) [38, 39, 40, 44].

Para a aplicação deste teste é necessário criarmos um teste de hipóteses [38, 39]. A hipótese afirmativa (H_0) diz que as médias dos parâmetros estudados em questão das duas amostras são estatisticamente equivalentes [38, 39]. A outra hipótese, que é a negativa da hipótese afirmativa, diz que há diferença estatística entre as médias dos parâmetros estudados em questão das duas amostras, dentro de um intervalo de confiança.

A avaliação do teste *t-Student* consiste na determinação do valor de t, dado pela equação (2.22) [37, 38, 39].

$$t = \frac{\bar{x} - x}{\frac{s}{\sqrt{n'}}}, \tag{2.22}$$

onde $\bar{x}$ é a média geral dos diferentes valores medidos de um determinado parâmetro a ser estudado das diferentes amostras, x é um valor individual medido de um parâmetro de uma das amostras e s é o desvio padrão da amostra.

Para aceitarmos ou rejeitarmos a hipótese afirmativa (H_0), pode-se proceder de duas formas diferentes: a) escolha de um "t crítico" através de uma tabela utilizada para a aplicação do teste *t-Student* e b) através da comparação do valor p com o nível de significância escolhido.

A escolha do "t crítico" permite criar os intervalos de aceitação e de rejeição das hipóteses escolhidas para o teste *t-Student*, ou seja, se o valor de t calculado através da equação (2.22) está dentro do intervalo de aceitação, deve-se considerar a hipótese afirmativa como verdadeira, caso contrário, a hipótese afirmativa será considerada falsa [37, 38, 39, 44]. Este valor do "t crítico" é escolhido através da utilização de uma tabela do teste *t-Student*, que é definido em função do número de graus de liberdade (g.l.) e também pelo nível de significância (α'), que neste estudo é adotado para ser igual a 0,05 [37, 38, 39, 44].

A Figura 2.16 mostra os intervalos de aceitação e de rejeição do teste *t-Student* para um teste bicaudal [considera graficamente os dois extremos da curva de distribuição do teste *t-Student* para a determinação dos intervalos de rejeição da hipótese afirmativa (H_0)], que é de -1,725 e de +1,725 considerando-se um nível de significância (α') de 0,05 (95% de precisão de acerto da aplicação do teste *t-Student*) e para 20 graus de liberdade (g.l.) (os graus de liberdade são definidos através da equação (2.18)) [37, 38, 39].

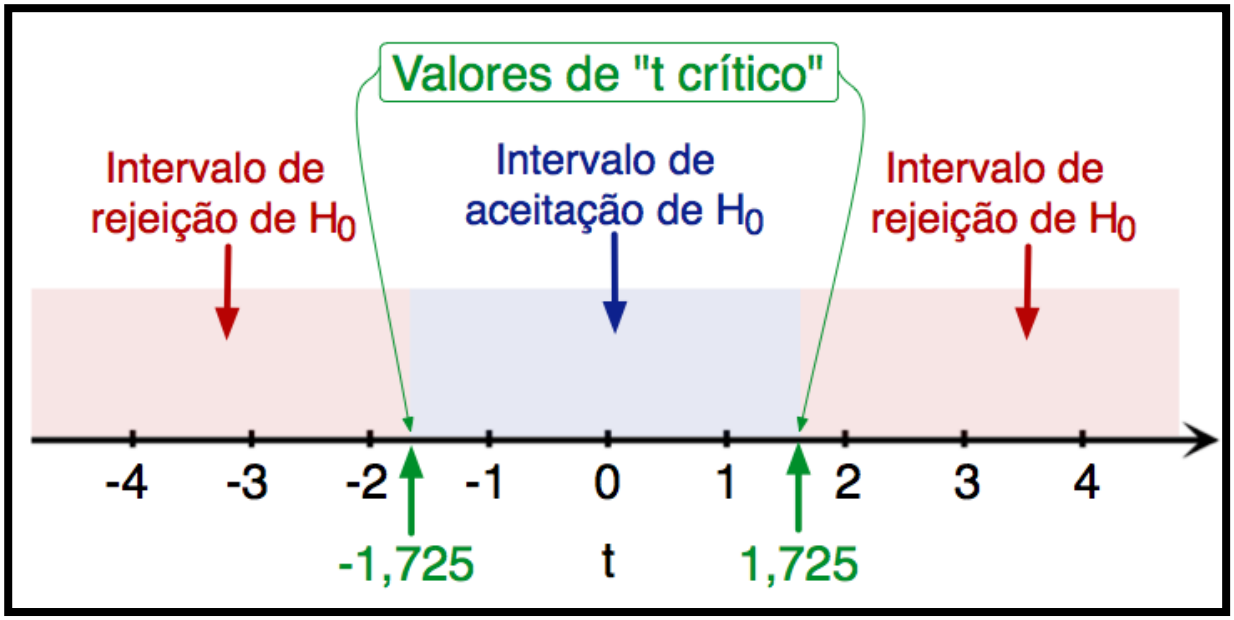


Figura 2.16: Apresentação dos intervalos de aceitação e de rejeição do teste *t-Student* para um teste bicaudal, para um nível de significância de 0,05 e para 20 graus de liberdade (g.l.).

Para a aceitação da hipótese afirmativa (H_0) do teste *t-Student*, o valor de t calculado através da equação (2.22) deve estar inserido no intervalo de aceitação de H_0.

A outra maneira de aceitarmos ou rejeitarmos a hipótese afirmativa (H_0) é através da comparação do valor p do teste *t-Student* com o nível de significância [37, 38, 39]. O valor de p é calculado como sendo a área sob a curva de distribuição do teste *t-Student* em função do valor de t, onde este t está inserido no intervalo $0 < t < \infty$ [37, 38, 39]. Assim, se o valor de p for superior ao valor do nível de significância (α') escolhido, deve-se considerar H_0 verdadeira, caso o valor de p seja inferior ao valor do nível de significância (α'), deve-se considerar H_0 como falsa.

A Figura 2.17 mostra uma curva de distribuição do teste *t-Student* com o objetivo de ilustrar um exemplo de aceitação ou de rejeição da hipótese nula (H_0), através da utilização do valor p [37, 38, 39].

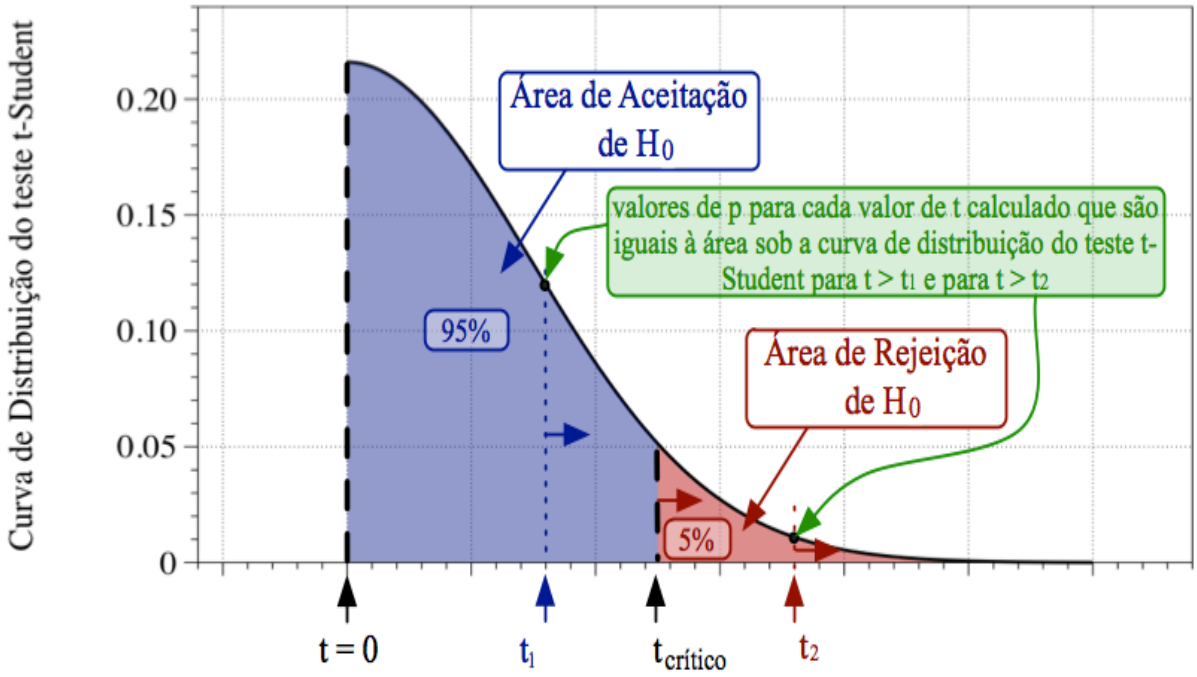


Figura 2.17: Curva de distribuição do teste *t-Student* com o objetivo de ilustrar um exemplo de aceitação ou de rejeição da hipótese nula (H_0) através da utilização do valor p.

De acordo com a Figura 2.17, observa-se que para a determinação do valor de p, deve-se utilizar somente os valores positivos do eixo das abscissas, isto é, a metade positiva da curva de distribuição do teste *t-Student* [37,38,39]. A área sob a curva de distribuição do teste *t-Student* (para um intervalo considerado de $0 < t < \infty$) é sempre igual a 1. Ao se escolher um nível de significância igual a 5%, obtêm-se as regiões de aceitação e de rejeição de H_0. Verifica-se que a área sob a curva de distribuição do teste *t-Student*, que consiste da área de aceitação de H_0 é igual a 95% da área total e a área sob a curva de distribuição do teste *t-*

Student que consiste da área de rejeição de H_0 é igual a 5% da área total [37, 38, 39]. Neste exemplo da Figura 2.17, de acordo com o valor calculado pela equação (2.22) de uma amostra t_1, verifica-se que o valor de p é superior a 5% e assim deve-se aceitar a hipótese H_0. Por outro lado, de acordo com o valor também calculado pela equação (2.22) de uma amostra t_2, pode-se observar que o valor de p é inferior a 5% e assim deve-se rejeitar a hipótese H_0.

Assim, se os resultados do teste *t-Student* indicarem que a hipótese afirmativa é verdadeira, isso significa que há evidências estatísticas para se concluir que as amostras apresentam estatisticamente a mesma média [37, 38, 39].

A ideia principal da utilização do teste *t-Student* para o estudo do casamento entre dispositivos é o de verificar se a média dos parâmetros que extraídos dos DSnM são estatisticamente semelhantes às médias encontradas dos parâmetros advindos do novo modelo para a I_{DS} do DSnM (IDSLCPAM). Desta forma, pode-se analisar se o IDSLCPAM é capaz de predizer, com certa precisão, o comportamento dos SOI MOSFETs do tipo Diamante.

3 MODELAGEM DO COMPRIMENTO EFETIVO DO CANAL DO SOI nMOSFET DO TIPO DIAMANTE.

O objetivo deste capítulo é desenvolver e qualificar uma modelagem para o cálculo do comprimento efetivo de canal do SOI nMOSFET do tipo Diamante, levando-se em conta o efeito da associação paralela de SOI nMOSFETs com a mesma largura de canal e diferentes comprimentos de canal (*Parallel Association of MOSFETs with Different Channel Lenghts Effect*, PAMDLE), que é intitulado de IDSLCPAM.

Além disso, o novo modelo para a corrente de dreno (I_{DS}) do SOI nMOSFET do tipo Diamante é também comparado com o modelo de 1ª ordem proposto inicialmente pela referência [11].

3.1 Desenvolvimento do modelo do comprimento efetivo de canal do SOI nMOSFET do tipo Diamante.

Pode-se representar eletricamente a estrutura de um SOI nMOSFET do tipo Diamante de largura de canal (W) e de comprimento efetivo de canal (L_{ef}) como sendo a associação paralela de N SOI nMOSFETs de formato de porta trapezoidal interligados em paralelo, apresentando uma mesma largura de canal, dada por W/N e com diferentes comprimentos de canal (L_1, L_2, ..., L_N), que variam aproximadamente de b a B (bases menor e maior dos dois trapézios que formam a geometria hexagonal de porta, respectivamente). A Figura 3.1 mostra como um SOI nMOSFET de geometria de porta hexagonal pode ser particionado em N diferentes SOI nMOSFETs de geometrias de porta trapezoidais.

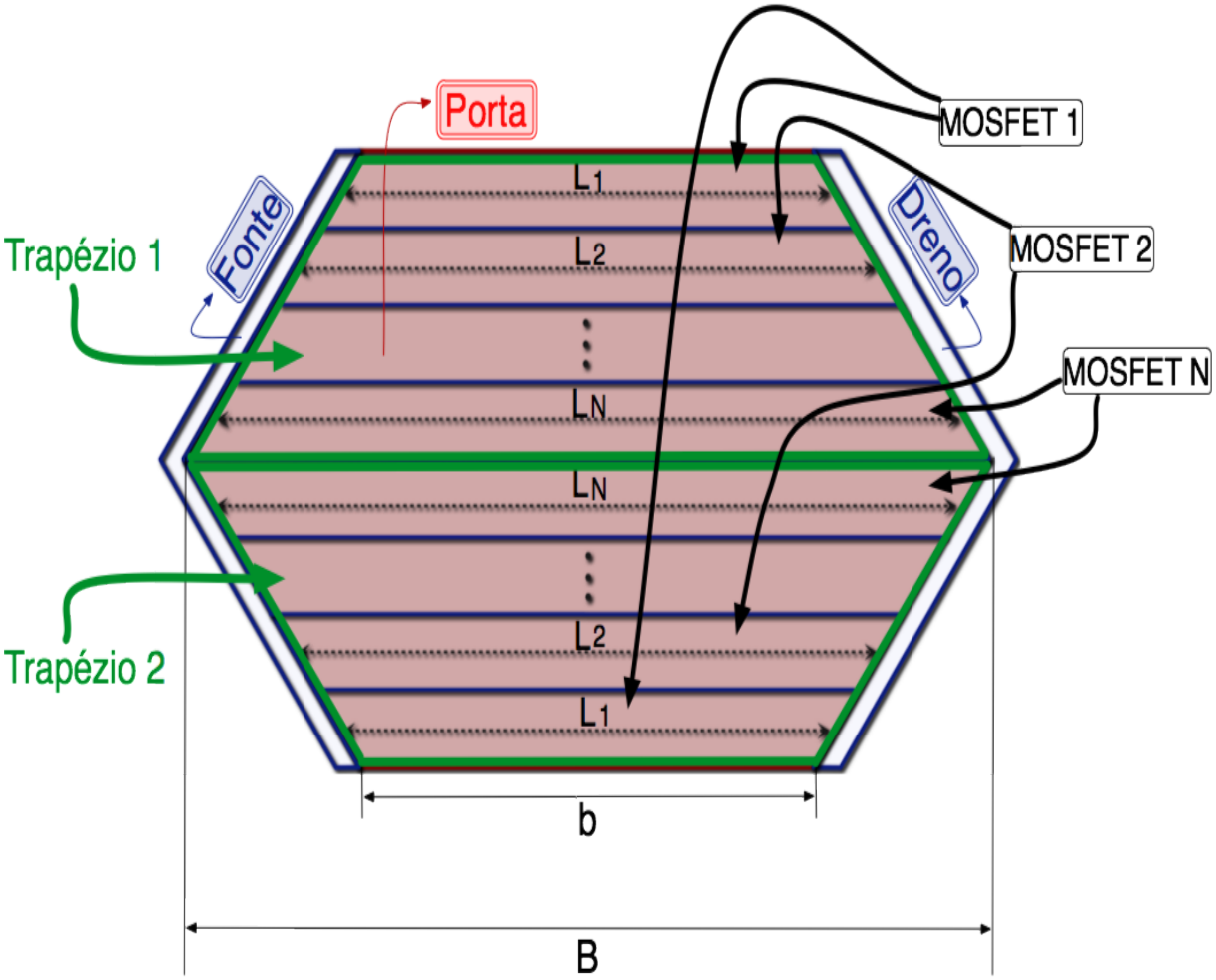


Figura 3.1: Exemplo de um SOI nMOSFET do tipo Diamante que pode ser particionado em N SOI nMOSFETs de formato de porta trapezoidal.

A Figura 3.2 apresenta um SOI nMOSFET do tipo Diamante com razão de aspecto W/L_{ef} (Figura 3.2.a) e o seu circuito elétrico equivalente, considerando-se que esse dispositivo é particionado em N SOI nMOSFETs de porta em formato trapezoidal, com largura de canal W/N e diferentes comprimentos de canal (L_1, L_2, ..., L_N) (Figura 3.2.b).

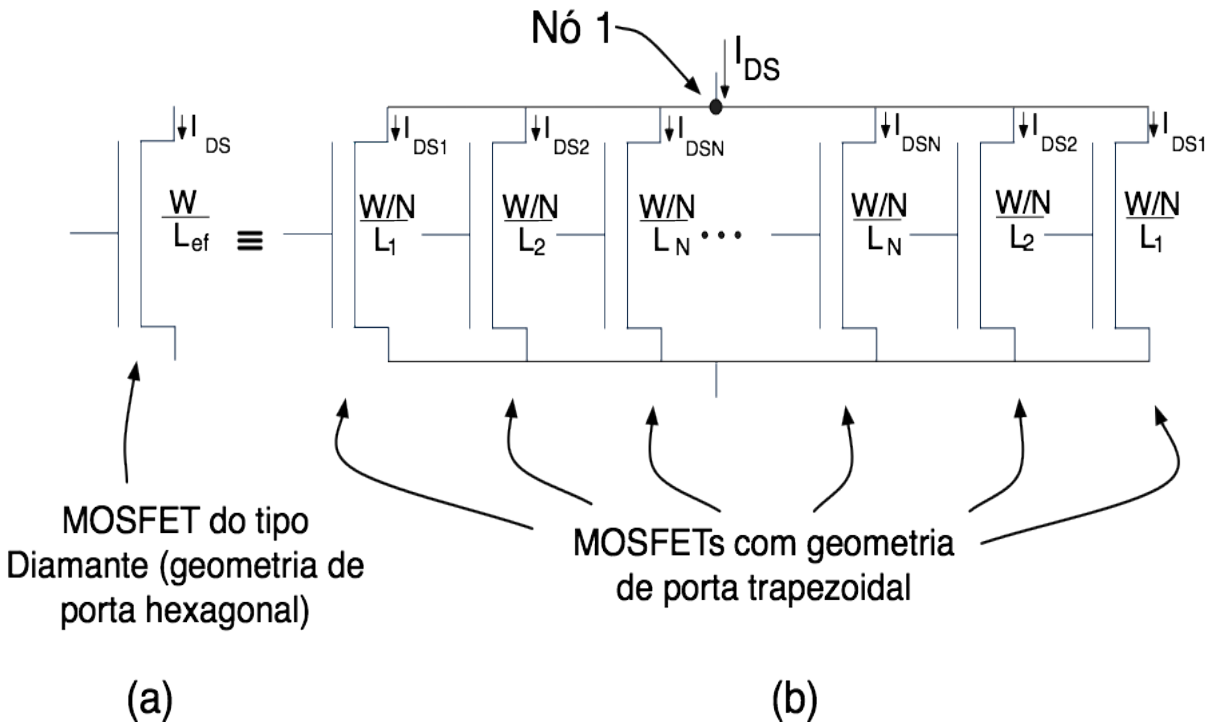


Figura 3.2 - SOI nMOSFET do tipo Diamante com razão de aspecto W/L_{ef} (a) e o seu circuito elétrico equivalente considerando-se que esse dispositivo possa ser particionado em N SOI nMOSFETs de porta em formato trapezoidal, com largura de canal W/N e diferentes comprimentos de canal (L_1, L_2, ..., L_N) (b).

Na Figura 3.2, I_{DS} é a corrente de dreno do SOI nMOSFET do tipo Diamante e também a corrente elétrica que entra (flui) no nó 1, I_{DS1}, I_{DS2} e I_{DSN} são as correntes de dreno de cada SOI nMOSFET com geometria de porta trapezoidal em função da razão de aspecto ($\frac{W/N}{L_1}, \frac{W/N}{L_2}, \frac{W/N}{L_N}$ respectivamente).

Para o desenvolvimento da modelagem do comprimento efetivo de canal do SOI nMOSFET do tipo Diamante, considere a geometria de porta que está ilustrada na Figura 3.3, que ilustra um SOI nMOSFET do tipo Diamante particionado em 8 partes iguais (N = 8).

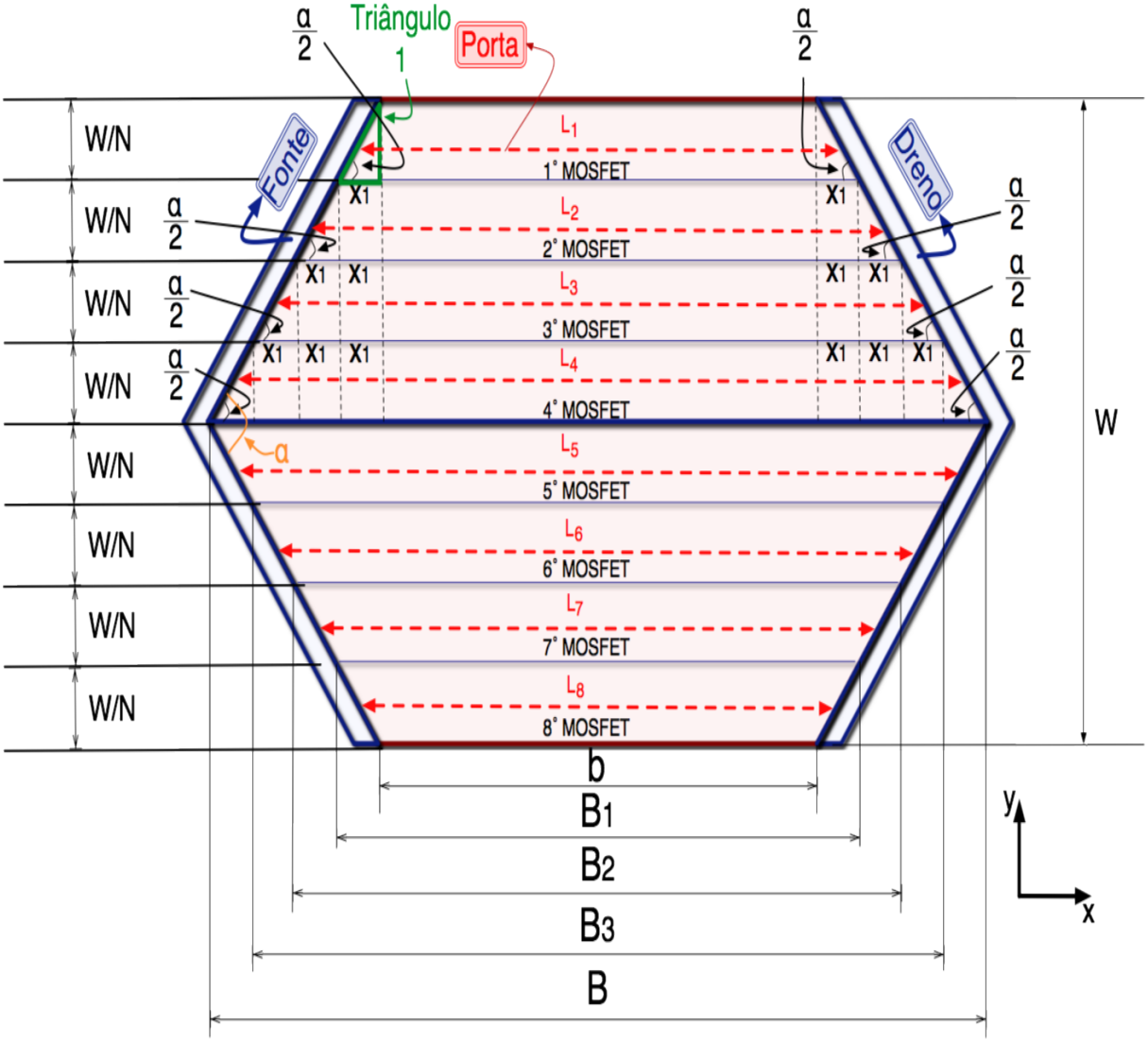


Figura 3.3 - Exemplo de um SOI nMOSFET do tipo Diamante segmentado em 8 partes iguais, que representam 8 SOI nMOSFETs de geometria de porta trapezoidal com diferentes comprimentos de canal e com a mesma largura de canal (W/N).

Na Figura 3.3, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7 e L_8 são os comprimentos de canal médio dos 8 SOI nMOSFETs que estão interligados em paralelo respectivamente, x_1 é a projeção na direção x da base do triângulo 1 do trapézio que forma a região de porta de cada um dos SOI nMOSFETs que compõem o SOI nMOSFET do tipo Diamante, α é o ângulo entre as junções metalúrgicas do filme de silício (região do canal) e as regiões de dreno e fonte decorrente da geometria hexagonal de porta do SOI nMOSFET do tipo Diamante e b, B_1, B_2, B_3 e B são as dimensões das bases dos trapézios dos SOI nMOSFETs que estão conectados em paralelo.

Os comprimentos de canal médio de cada SOI nMOSFET de geometria de porta trapezoidal apresentado (L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7 e L_8) são determinados através das equações de (3.1) a (3.4):

$$L_1 = L_8 = \frac{b + B_1}{2} \tag{3.1}$$

$$L_2 = L_7 = \frac{B_1 + B_2}{2} \tag{3.2}$$

$$L_3 = L_6 = \frac{B_2 + B_3}{2} \tag{3.3}$$

$$L_4 = L_5 = \frac{B_3 + B}{2} \tag{3.4}$$

Analisando-se a Figura 3.3, pode-se extrair o valor de x_1, em função de α e W conforme equação (3.5).

$$x_1 = \frac{W/N}{tg\left(\alpha/2\right)} \tag{3.5}$$

Dessa forma, os valores das bases dos trapézios são dadas pelas equações de (3.6) a (3.9), quando substitui-se a equação (3.5) nas equações de (3.1) a (3.4).

$$B_1 = b + 2 \cdot x_1 = b + \frac{2.W/N}{tg(\alpha/2)} \tag{3.6}$$

$$B_2 = B_1 + 2 \cdot x_1 = b + 4 \cdot x_1 = b + \frac{4.W/N}{tg(\alpha/2)} \tag{3.7}$$

$$B_3 = B_2 + 2 \cdot x_1 = b + 6 \cdot x_1 = b + \frac{6.W/N}{tg(\alpha/2)} \tag{3.8}$$

$$B = B_3 + 2 \cdot x_1 = b + 8 \cdot x_1 = b + \frac{8.W/N}{tg(\alpha/2)} \tag{3.9}$$

Os comprimentos de canal médios desses 8 SOI nMOSFETs dispostos em paralelo são dados pelas equações de (3.10) a (3.13).

$$L_1 = L_8 = \frac{b + B_1}{2} = b + \frac{W/N}{tg\left(\alpha/2\right)} \tag{3.10}$$

$$L_2 = L_7 = \frac{B_1 + B_2}{2} = b + \frac{3 \cdot W/N}{tg\left(\alpha/2\right)} \tag{3.11}$$

$$L_3 = L_6 = \frac{B_2 + B_3}{2} = b + \frac{5 \cdot W/N}{tg\left(\alpha/2\right)} \tag{3.12}$$

$$L_4 = L_5 = \frac{B_3 + B}{2} = b + \frac{7 \cdot W/N}{tg\left(\alpha/2\right)} \tag{3.13}$$

Analisando-se o circuito elétrico equivalente da Figura (3.2), a corrente de dreno do SOI nMOSFET do tipo Diamante (I_{DS}) é dada pela soma das correntes de dreno de cada SOI nMOSFET com geometria de porta trapezoidal (Lei dos Nós de Kirchhoff) de acordo com a equação (3.14) para N igual a 8.

$$I_{DS} = I_{DS1} + I_{DS2} + I_{DS3} + I_{DS4} + I_{DS5} + I_{DS6} + I_{DS7} + I_{DS8} \tag{3.14}$$

A I_{DS} do DSnM (Figura 3.2.a) é dada pela equação 3.15 e as I_{DS} de cada SOI nMOSFET com geometria de porta trapezoidal (Figura 3.2.b) é dada pela equação (3.16).

$$I_{DS} = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L_{ef}} \cdot \left[\left(V_{GS} - V_{TH}\right) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot n \cdot \frac{V_{DS}^2}{2}\right] \text{(região triodo)} \tag{3.15}$$

$$I_{DSj} = \mu_n \cdot C_{OX} \cdot \frac{W/N}{L_j} \cdot \left[(V_{GS} - V_{TH}) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} \cdot n \cdot \frac{V_{DS}^2}{2}\right] \text{(região triodo)} \tag{3.16}$$

onde j na equação (3.16) é um índice que vai de 1 até 8.

Substituindo-se as equações (3.15) e (3.16) na equação (3.14), resulta na equação (3.17).

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4} + \frac{1}{L_5} + \frac{1}{L_6} + \frac{1}{L_7} + \frac{1}{L_8} \right] \tag{3.17}$$

Substituindo-se as equações (3.10) a (3.13) na equação (3.17), tem-se a equação (3.18).

$$\frac{1}{L_{ef}} = \frac{2}{N} \cdot \left[\frac{1}{b + \frac{W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{3 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{5 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{7 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} \right] \tag{3.18}$$

Dessa forma, o comprimento efetivo de canal de um SOI nMOSFET do tipo Diamante considerando-se 8 SOI nMOSFETs trapezoidais em paralelo é dado através da equação (3.19).

$$L_{ef} = \frac{8}{2 \cdot \left[\frac{1}{b + \frac{W/8}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{3 \cdot W/8}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{5 \cdot W/8}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{7 \cdot W/8}{tg(\alpha/2)}} \right]} \tag{3.19}$$

A equação (3.19) pode ser generalizada de acordo com a equação (3.20), considerando-se N ≥ 6.

$$L_{ef} = \frac{N}{\left[\frac{1}{b + \frac{W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{3 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{5 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \cdots + \frac{1}{b + \frac{(N-1) \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{(N-1) \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \cdots + \frac{1}{b + \frac{5 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{3 \cdot W/N}{tg(\alpha/2)}} + \frac{1}{b + \frac{W/N}{tg(\alpha/2)}} \right]} \tag{3.20}$$

A Tabela 3.1 apresenta as dimensões e os valores de L_{ef} dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante do novo modelo desenvolvido, que considera N SOI nMOSFETs em paralelo com a mesma largura de canal e diferentes comprimentos de canal com quatro valores diferentes de N (10, 20, 30 e 50) e os valores do L_{ef} dos DSnM que são determinados através do modelo de primeira ordem descrito na referência [11].

Tabela 3.1 - Dimensão dos transistores DSnM e os valores de L_{ef} usando o modelo analítico da referência [11] e o modelo de corrente da associação em paralelo de transistores para N igual a 10, 20, 30 e 50.

Dimensões dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante				Modelo de I_{DS} do DSnM que leva em conta o LCE e o PAMDLE (IDSLCPAM)								Modelo de 1ª ordem
												µm
W (µm)	b (µm)	B (µm)	α (°)	L_{ef} (N=10) (µm)	ε (%)	L_{ef} (N=20) (µm)	ε (%)	L_{ef} (N=30) (µm)	ε (%)	L_{ef} (N=50) (µm)	ε (%)	L_{ef} = (b+B)/2
12	2.0	38.0	36,9	13.4	-33.0	12.6	-37.0	12.4	-38.0	12.3	-38.5	20
12	2.0	26.0	53,1	9.95	-28.9	9.55	-31.8	9.45	-32.5	9.39	-32.9	14
12	2.0	14.0	90,0	6.33	-20.9	6.21	-22.4	6.19	-22.6	6.17	-22.9	8
12	2.0	8.0	126,9	4.37	-12.6	4.34	-13.2	4.33	-13.4	4.33	-13.4	5
12	2.0	6.0	143,1	3.66	-8.5	3.65	-8.8	3.64	-9.0	3.64	-9.0	4
24	4.0	76.0	36,9	26.8	-33.0	25.3	-36.8	24.9	-37.8	24.6	-38.5	40
24	4.0	52.0	53,1	19.9	-28.9	19.1	-31.8	18.9	-32.5	18.8	-32.9	28
24	4.0	28.0	90,0	12.7	-20.6	12.4	-22.5	12.4	-22.5	12.3	-23.1	16
24	4.0	16.0	126,9	8.74	-12.6	8.68	-13.2	8.66	-13.4	8.66	-13.4	10
24	4.0	12.0	143,1	7.32	-8.5	7.29	-8.9	7.29	-8.9	7.29	-8.9	8
30	5.0	95.0	36,9	33.5	-33.0	31.6	-36.8	31.1	-37.8	30.8	-38.4	50
30	5.0	65.0	53,1	24.9	-28.9	23.9	-31.7	23.6	-32.6	23.5	-32.9	35
30	5.0	35.0	90,0	15.8	-21.0	15.5	-22.5	15.5	-22.5	15.4	-23.0	20
30	5.0	20.0	126,9	10.9	-12.8	10.8	-13.6	10.8	-13.6	10.8	-13.6	12.5
30	5.0	15.0	143,1	9.15	-8.5	9.12	-8.8	9.11	-8.9	9.11	-8.9	10
180	30.0	570.0	36,9	201.2	-32.9	189.6	-36.8	186.5	-37.8	184.5	-38.5	300
180	30.0	390.0	53,1	149.2	-29.0	143.2	-31.8	141.7	-32.5	140.9	-32.9	210
180	30.0	210.0	90,0	94.9	-20.9	93.2	-22.3	92.8	-22.7	92.6	-22.8	120
180	30.0	120.0	126,9	65.5	-12.7	65.1	-13.2	65	-13.3	64.9	-13.5	75
180	30.0	90.0	143,1	54.9	-8.5	54.7	-8.8	54.7	-8.8	54.6	-9.0	60

Analisando-se a Tabela 3.1, verifica-se que os L_{ef} determinados pelo novo modelo são menores que os calculados pelo modelo de 1ª ordem (por exemplo, para α igual a 36,9° e W igual a 12 µm, o valor de L_{ef} para N igual a 20 vale 12,6 µm e o valor de L_{ef} do modelo de 1ª ordem vale 20 µm). Isso pode ser justificado pois numa associação paralela de SOI nMOSFETs com diferentes L_{ef} e com a mesma largura de canal, a corrente de dreno flui mais pelos SOI nMOSFETs que apresentam menores L_{ef} (transistores que estão mais nas bordas do dispositivo). Além disso, a medida que N aumenta, L_{ef} determinado por esse novo modelo reduz e observe que a partir de N igual a 20, o valor de L_{ef} tende a não variar mais.

Dentro desse contexto, pode-se concluir que a estrutura de porta hexagonal faz com que o L_{ef} do SOI nMOSFET do tipo Diamante seja menor que o L_{ef} dos SOI nMOSFETs

Convencionais equivalentes (geometria de porta retangular) considerando-se a mesma área de porta e condição de polarização. Dessa forma, definiu-se o efeito da redução do L_{ef} devido à associação paralela de N transistores em paralelo com a mesma largura de canal e diferentes comprimentos de canal como *Parallel Association of Different Channel Lenghts Effect* (PAMDLE).

Observa-se também que os erros relativos entre os L_{ef} do novo modelo proposto e do modelo de 1ª ordem são maiores para os ângulos α iguais e inferiores ao ângulo de 90°. Para os ângulos α superiores a 90°, observa-se que os erros relativos entre os L_{ef} obtidos pelo IDSLCPAM e pelo modelo de 1ª ordem tendem a se tornar cada vez menores. Isto ocorre pois a medida que o valor do ângulo α aumenta, a geometria de porta do SOI nMOSFET do tipo Diamante vai se aproximando da geometria de porta de um SOI nMOSFET Convencional.

Dessa forma, a equação que descreve o comportamento de I_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante em relação ao Convencional equivalente (mesma área de porta) e que leva em consideração os efeitos LCE e do PAMDLE são dadas pelas equações (3.21) e (3.22), respectivamente, para ambas as regiões de operação (triodo e saturação).

$$I_{DS_DSnM} = \sqrt{2\cdot(1+\cos\alpha)}\cdot\frac{L_{ef_CSnM}}{L_{ef_DSnM}}\cdot I_{DS_CSnM}\ \text{, para } 0^\circ \le \alpha \le 90^\circ \qquad (3.21)$$

LCE PAMDLE

$$I_{DS_DSnM} = \sqrt{2+\cos\alpha}\cdot\frac{L_{ef_CSnM}}{L_{ef_DSnM}}\cdot I_{DS_CSnM}\ \text{, para } 90^\circ \le \alpha \le 180^\circ \qquad (3.22)$$

A razão entre os L_{ef} dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes estão apresentados na Tabela 3.2 para N sendo igual a 10, 20, 30 e 50.

Tabela 3.2 - Valores do fator $\frac{L_{ef_CSnM}}{L_{ef_DSnM}}$, considerando-se vários valores de α e diferentes valores de N.

α (˚)	N=10	N=20	N=30	N=50
36,9	1,49	1,58	1,61	1,63
53,1	1,41	1,47	1,48	1,49
90	1,26	1,29	1,29	1,3
126,9	1,14	1,15	1,15	1,16
143,1	1,09	1,1	1,1	1,1

Analisando-se a Tabela 3.2, observa-se que ao reduzir os valores de α, maiores serão os ganhos de I_{DS} dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante em relação aos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes (por exemplo, aproximadamente 60% para o ângulo α igual a 36,9˚ com os valores de N iguais a 20, 30 e 50).

A Figura 3.4 apresenta a razão entre os L_{ef} dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes (L_{ef_CSnM}/L_{ef_DSnM}) para diferentes valores de N em função do ângulo α.

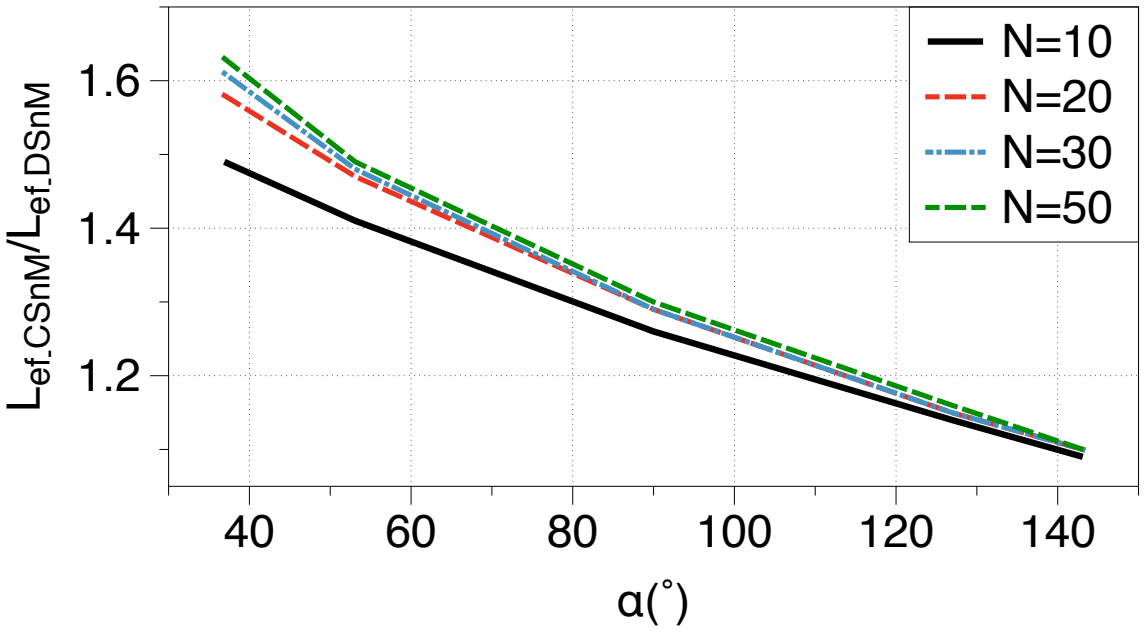


Figura 3.4 - Curvas do fator L_{ef_CSnM}/L_{ef_DSnM} em função do ângulo α para diferentes valores de N.

Analisando-se a Figura 3.4, observa-se que à medida que N aumenta, o efeito PAMDLE tende a aumentar, independente do valor do ângulo α, todavia comparando-se o

efeito PAMDLE para os casos de N iguais a 30 e 50, observa-se que não existe uma diferença significativa entre as razões de $\frac{L_{ef_CSnM}}{L_{ef_DSnM}}$.

Com o objetivo de validar o novo modelo IDSLCPAM, a Figura 3.5 mostra um exemplo de curvas experimentais de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante com um ângulo α igual a 126,9˚ e do seu Convencional equivalente. Nesta mesma figura também é ilustrada a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo novo modelo proposto IDSLCPAM, o qual usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente [equação (3.22)] e também a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo modelo de primeira ordem (este modelo não considera o efeito PAMDLE e considera somente o efeito LCE), o qual também usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente. Para todas as curvas ilustradas, foi utilizada uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V.

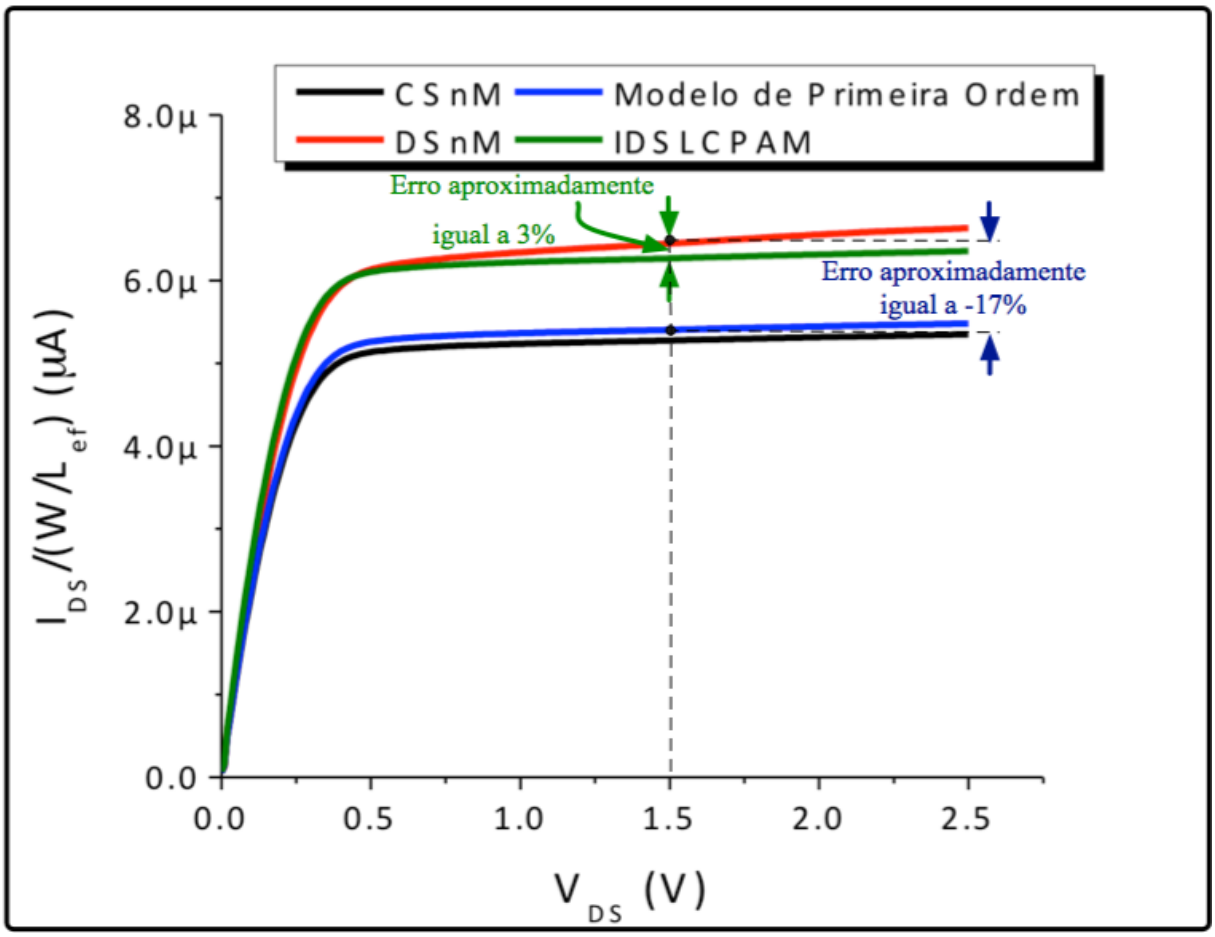


Figura 3.5 - Exemplo de curvas experimentais de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante com um ângulo α igual a 126,9˚, do SOI nMOSFET Convencional equivalente. Nesta mesma figura também é ilustrada a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo novo modelo proposto IDSLCPAM, o qual usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente utilizando-se a equação (3.22) e também a curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} gerada pelo modelo de primeira ordem (este modelo não considera o efeito PAMDLE e considera somente o efeito LCE), o qual também usa os dados experimentais do SOI nMOSFET do tipo Convencional equivalente. Para todas as curvas ilustradas, foi utilizada uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V.

Analisando-se a Figura 3.5, observa-se que para um valor de V_{DS} igual a 1,5 V, o erro percentual máximo obtido entre as curvas experimentais de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante (α igual a 126,9˚) e a curva gerada usando-se o IDSLCPAM é aproximadamente de -3%. Esse mesmo comportamento foi verificado para os demais dispositivos estudados. Verifica-se também que, sem considerar o efeito PAMDLE na obtenção da curva de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} e para um valor de V_{DS} igual a 1,5 V, o erro percentual máximo obtido entre as curvas de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS} do SOI nMOSFET do tipo Diamante (α igual a 126,9˚) e a curva gerada usando-se o modelo de primeira ordem é aproximadamente igual a -17%. Isto ilustra, portanto, que o modelo o qual

leva em consideração os efeitos LCE e PAMDLE é mais preciso do que o modelo de primeira ordem.

A Figura 3.6 ilustra o módulo do erro máximo ($|\varepsilon|$ em porcentagem) entre as curvas de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS}, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V do SOI nMOSFET do tipo Diamante em função de α estudados) e o novo modelo proposto.

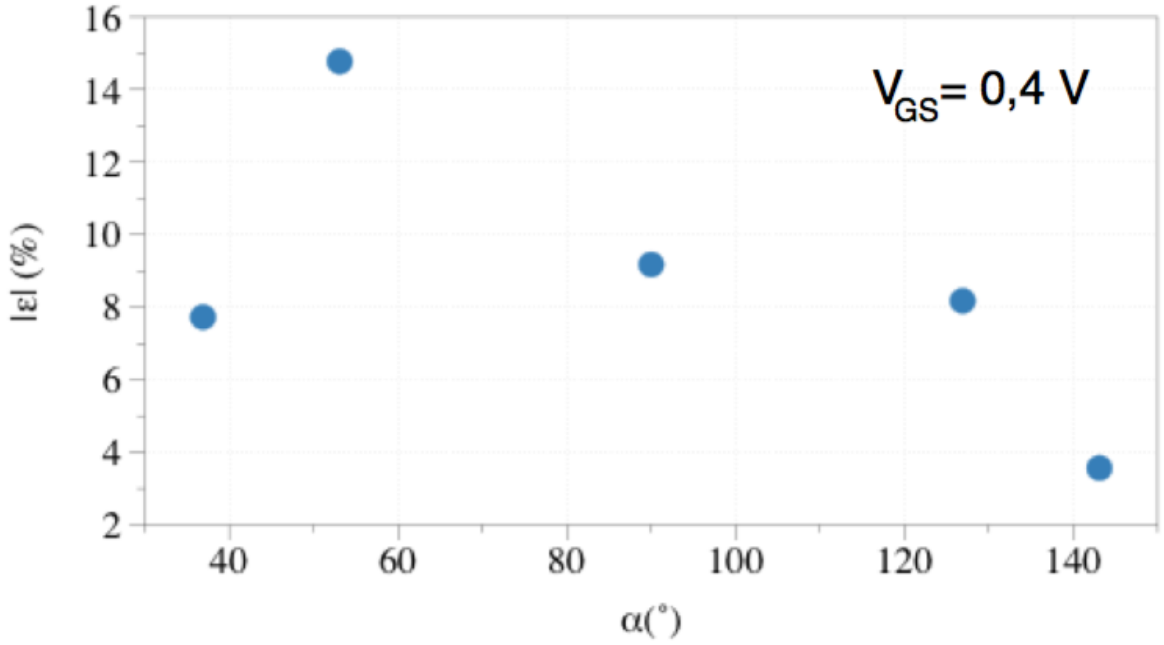


Figura 3.6 - Módulo do erro máximo entre as curvas de $I_{DS}/(W/L_{ef})$ em função de V_{DS}, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V do SOI nMOSFET do tipo Diamante (para todos os ângulos α estudados) e a curva gerada pelo modelo IDSLCPAM.

Analisando-se a Figura 3.6, observa-se que o maior erro encontrado ocorre para o ângulo α igual a 53,1˚ (14,78%). Para todos os outros ângulos α estudados (36,9˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚), o erro encontrado nunca é superior a 10%. Assim, em função destes resultados obtidos, pode-se afirmar que o modelo IDSLCPAM, para uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V é validado para todos os ângulos α analisados dentro de uma faixa de erro máximo de 15%.

4 ESTUDO EXPERIMENTAL DO CASAMENTO ENTRE OS SOI nMOSFETS DO TIPO DIAMANTE E OS SEUS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES

Este capítulo é dedicado a apresentação do estudo experimental do casamento entre os SOI nMOSFETs do tipo Diamante e os seus equivalentes Convencionais, através da análise comparativa experimental do comportamento dos erros relativos entre os principais parâmetros analógicos e digitais desses dispositivos, considerando-se as mesmas áreas de porta (A_G) e as mesmas condições de polarização.

4.1 Amostra de dados estudada

Os DSnM e os respectivos CSnM equivalentes foram manufaturados no Laboratório de Microeletrônica da *Université Catholique de Louvain (*UCL), Bélgica, utilizando-se a tecnologia de fabricação de CIs SOI CMOS de 1 μm. Os principais parâmetros dos SOI nMOSFETs totalmente depletados são: a espessura do óxido de porta (t_{ox}) é de 30 nm, a espessura do filme de silício (t_{Si}) é de 80 nm, a espessura do óxido enterrado (t_{BOX}) é igual a 390 nm e as concentrações de dopantes do dreno/fonte e do canal são iguais a $4x10^{20}$ cm^{-3} e $6x10^{16}$ cm^{-3}, respectivamente.

A Figura 4.1 apresenta a foto de um dos CIs utilizados neste trabalho, que contém os DSnM e os seus respectivos CSnM equivalentes, que apresentam a mesma área de porta (A_G).

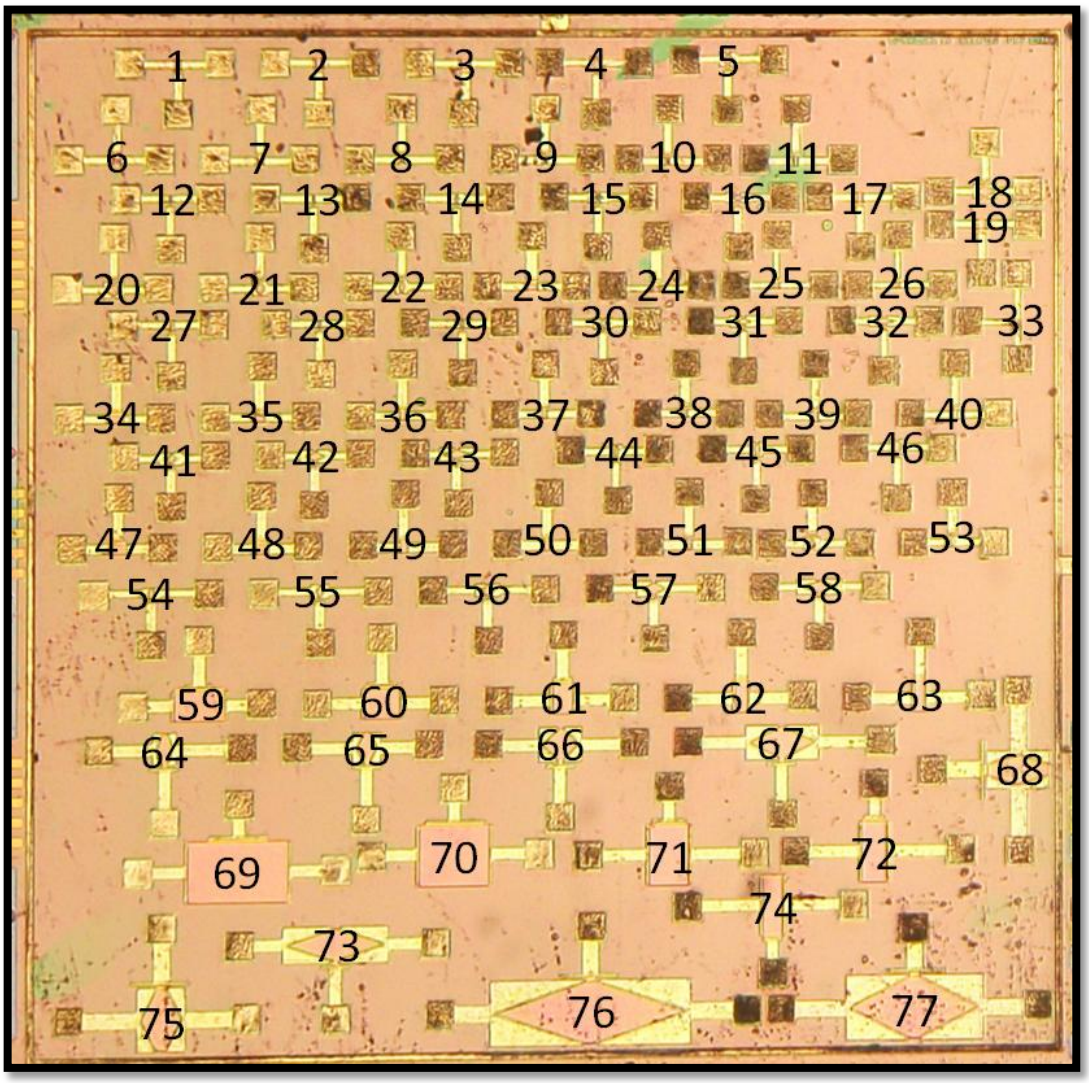
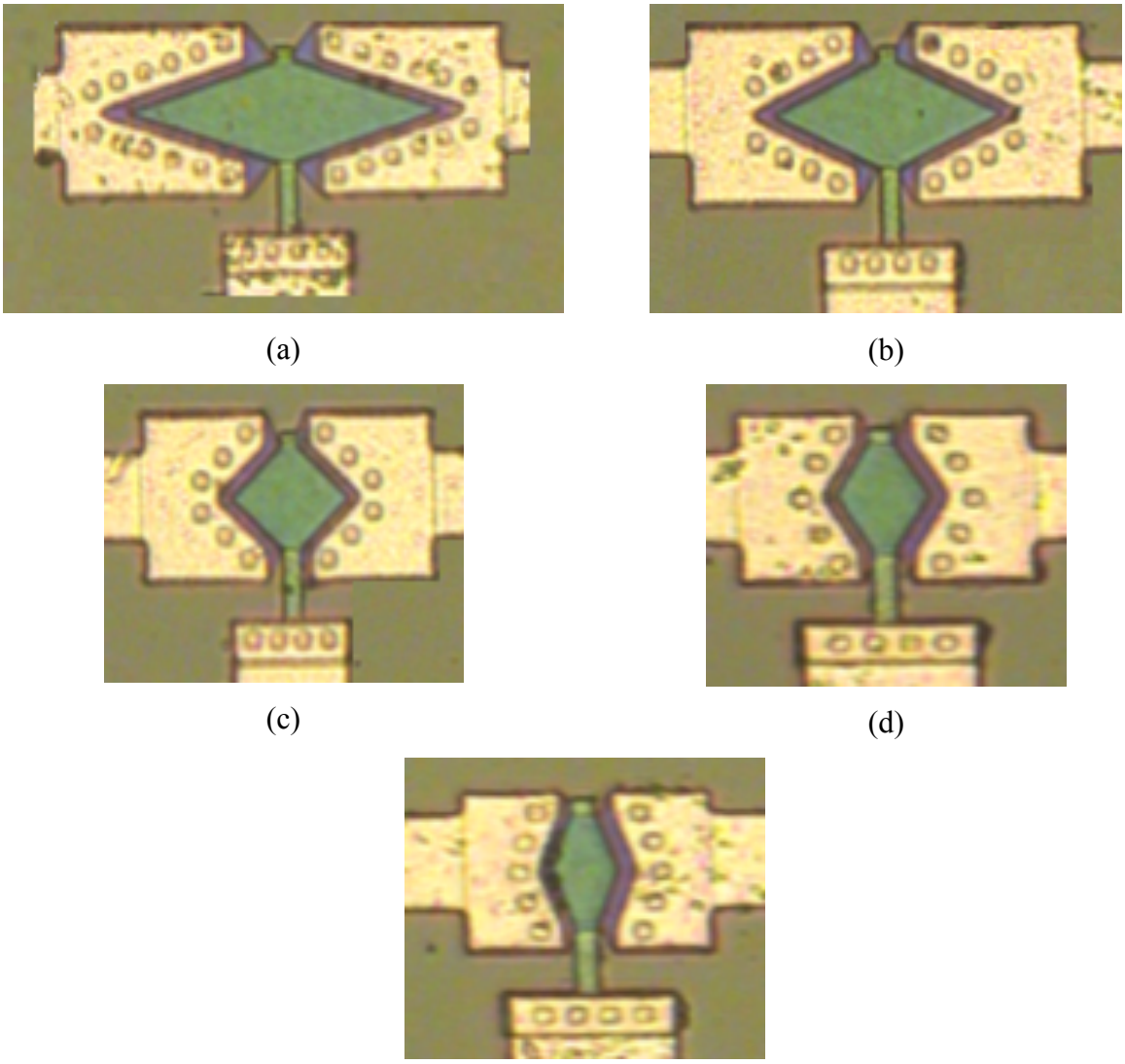


Figura 4.1 - Foto de um dos CIs estudados que contém os DSnM (SOI nMOSFETs de geometria de porta hexagonal) e os seus CSnM equivalentes (SOI nMOSFETs de geometria de porta retangular), que apresentam a mesma área de porta (A_G).

A amostra de dados estudada foi fabricada no ano de 2012 e consiste de 9 CIs (Figura 4.1). Estudou-se 40 transistores para cada CI da amostra em análise, ou seja, 20 pares de SOI nMOSFETs com a mesma A_G, sendo 20 DSnM e 20 CSnM equivalentes. Dos 40 SOI nMOSFETs estudados, existem 4 conjuntos de 5 pares de SOI nMOSFETs, que apresentam a mesma largura de canal (12 µm, 24 µm, 30 µm e 180 µm, respectivamente) com diferentes valores do ângulo α (36,9˚, 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚, respectivamente). Isto contabiliza 360 transistores que compõem esta amostra de dados.

A Figura 4.2 apresenta um exemplo de um conjunto de imagens fotográficas dos DSnM de um dos circuitos integrados utilizados neste trabalho, para um valor de W igual a 24 µm e para todos os ângulos α estudados, isto é, os ângulos α iguais a 36,9˚ (Figura 4.2.a), 53,1˚ (Figura 4.2.b), 90˚ (Figura 4.2.c), 126,9˚ (Figura 4.2.d) e 143,1˚ (Figura 4.2.e).



(a) (b)

(c) (d)

(e)

Figura 4.2 - Fotos dos DSnM de um dos CIs utilizados neste trabalho para um valor de W igual a 24 µm e para todos os ângulos α estudados, isto é, os ângulos α iguais a 36,9˚ (a), 53,1˚ (b), 90˚ (c), 126,9˚ (d) e 143,1˚ (e).

Analisando-se a Figura 4.2, verificou-se que os ângulos α medidos diretamente nas figuras sempre foram muito próximos daqueles considerados para a produção dos CIs. A Tabela 4.1 apresenta valores dos ângulos α de máscaras dos DSnM, os ângulos α efetivamente medidos das imagens fotográficas dos dispositivos depois de fabricados e o erro (em porcentagem) entre eles. Utilizou-se o *software "Onde Rulers"* para medir os ângulos α dos DSnM das imagens fotográficas [45].

Tabela 4.1 - Valores dos ângulos α de máscaras dos DSnM, os ângulos α efetivamente medidos das imagens fotográficas dos dispositivos depois de fabricados e o erro (em porcentagem) entre eles.

Ângulos α (˚) considerados para a produção dos DSnM	**Ângulos α (˚) medidos**	**ε (%)**
36,9˚	36,63˚	-0.73
53,1˚	53,71˚	1.15
90˚	90,06˚	0.07
126,9˚	126,91˚	0.01
143,1˚	143,31˚	0.15

Ao analisar a Tabela 4.1, verifica-se que para todos os ângulos α considerados para este estudo, não há uma diferença percentual significativa entre os ângulos α medidos, em relação aos ângulos α de máscara de projeto dos DSnM.

A Tabela 4.2 apresenta as dimensões dos 20 pares de DSnM e seus respectivos CSnM equivalentes, referente à esta amostra de dados estudada.

Tabela 4.2 - Dimensões dos 20 pares de SOI nMOSFETs (DSnM e CSnM equivalentes) desta amostra de dados.

Pares de	**CSnM**				**DSnM**					
MOSFETs	**Transistor**	**W (µm)**	**L (µm)**	**A_G (µm)^2**	**Transistor**	**W (µm)**	**b (µm)**	**B (µm)**	**A_G (µm)^2**	**α (˚)**
1	6	12	20	240	16	12	2	38	240	36,9
2	7	12	14	168	15	12	2	26	168	53,1
3	8	12	8	96	14	12	2	14	96	90
4	9	12	5	60	13	12	2	8	60	126,9
5	10	12	4	48	12	12	2	6	48	143,1
6	34	24	40	960	43	24	4	76	960	36,9
7	35	24	28	672	42	24	4	52	672	53,1
8	36	24	16	384	41	24	4	28	384	90
9	37	24	10	240	52	24	4	16	240	126,9
10	38	24	8	192	53	24	4	12	192	143,1
11	47	30	50	1500	58	30	5	95	1500	36,9
12	48	30	35	1050	57	30	5	65	1050	53,1
13	49	30	20	600	56	30	5	35	600	90
14	50	30	12,5	375	55	30	5	20	375	126,9
15	51	30	10	300	54	30	5	15	300	143,1
16	69	180	300	54000	76	180	30	570	54000	36,9
17	70	180	210	37800	77	180	30	390	37800	53,1
18	71	180	120	21600	-	180	30	210	21600	90
19	72	180	75	13500	75	180	30	120	13500	126,9
20	74	180	60	10800	68	180	30	90	10800	143,1

Para esta amostra de CIs, foram extraídas as curvas da corrente de dreno em função da polarização da tensão de porta (I_{DS} em função de V_{GS}) e da corrente de dreno em função da

polarização de dreno (I_{DS} em função de V_{DS}) dos DSnM e os CSnM equivalentes, com os SOI nMOSFETs operando em ambas as regiões de operação (triodo e saturação), com o objetivo de se realizar a análise do casamento levando-se em conta os seguintes parâmetros elétricos, que foram extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos Convencionais equivalentes: $gm_{max}/(W/L_{ef})$, $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$, $I_{DSon}/(W/L_{ef})$, gm/I_{DS}, $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$, SS, $g_D/(L_{ef}/W)$, $A_V/(W/L_{ef})$, $f_T/(W/L_{ef})$, $V_{EA}/(W/L_{ef})$ considerando-se diferentes ângulos α (36,9˚, 53,1˚, 90,0˚, 126,9˚ e 143,1˚, respectivamente).

4.2 Resultados Experimentais

A análise do casamento entre os parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos Convencionais equivalentes (mesma área de porta) é realizada através da análise comparativa experimental entre o comportamento dos erros relativos dos parâmetros elétricos dos DSnM e dos CSnM equivalentes, que é definido como a razão entre o desvio padrão (s) e a média ($\bar{x}$) das amostras estudadas, isto é, $s/\bar{x}$. A Figura 4.3 apresenta o procedimento para a realização do estudo do casamento entre os parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos Convencionais equivalentes.

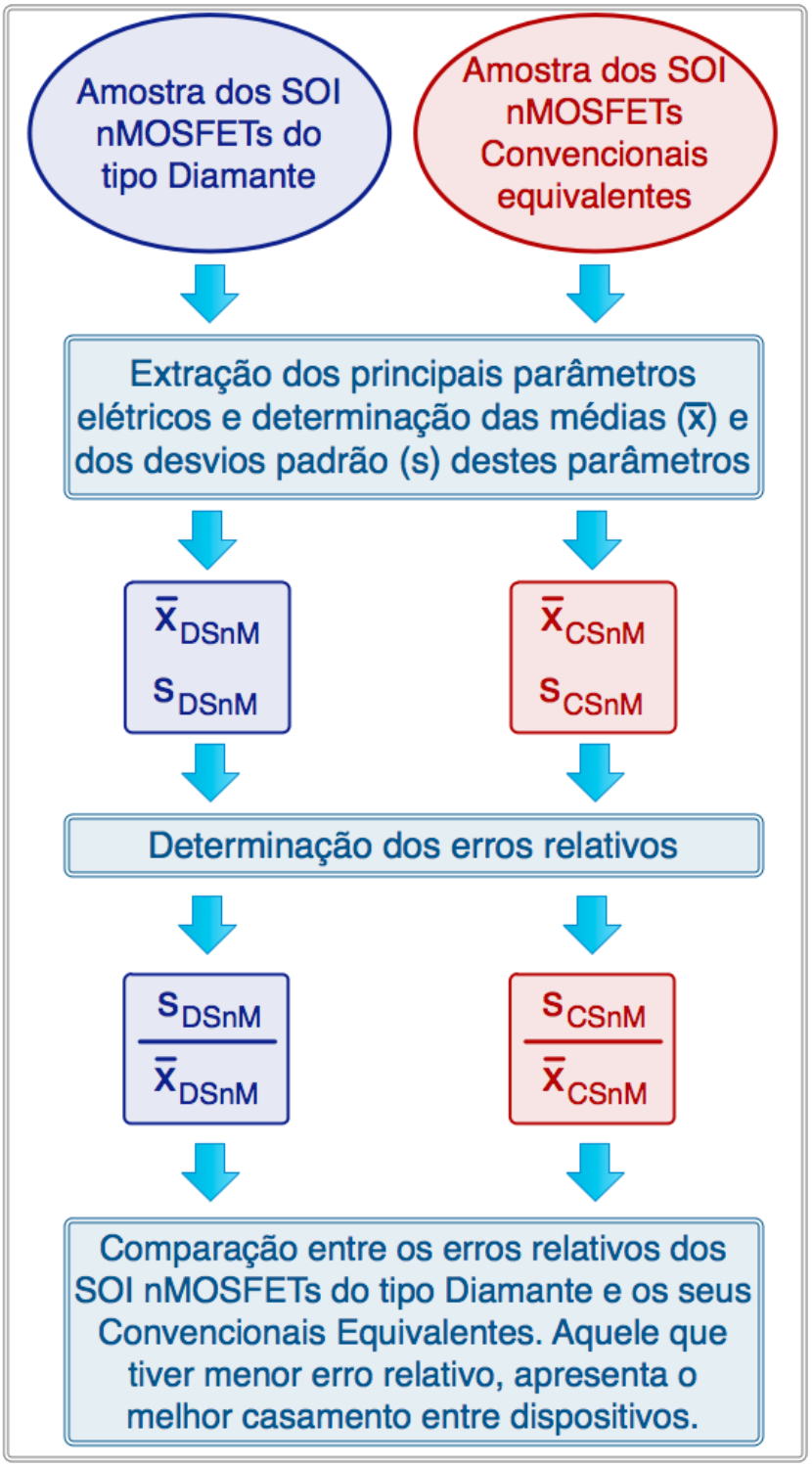


Figura 4.3 - Diagrama de blocos indicando os passos realizados desde a extração dos parâmetros elétricos experimentais da amostra dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos seus equivalentes convencionais até a comparação entre os erros relativos dos principais parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes.

Na Figura 4.3, s_{DSnM} representa os desvios padrão dos parâmetros elétricos, que são extraídos da amostra de SOI nMOSFETs do tipo Diamante, $\bar{x}_{DSnM}$ representa as médias dos

parâmetros elétricos, que são extraídas da amostra de SOI nMOSFETs do tipo Diamante, s_{CSnM} representa os desvios padrão dos parâmetros elétricos, que são extraídos da amostra de SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes e $\bar{x}_{CSnM}$ representa as médias dos parâmetros elétricos, que são extraídas da amostra de SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes.

A Figura 4.4 ilustra o gráfico dos erros relativos entre os $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[s_{gm_{max}/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{gm_{max}/\left(W/L_{ef}\right)} \right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} do SOI nMOSFET do tipo Diamante.

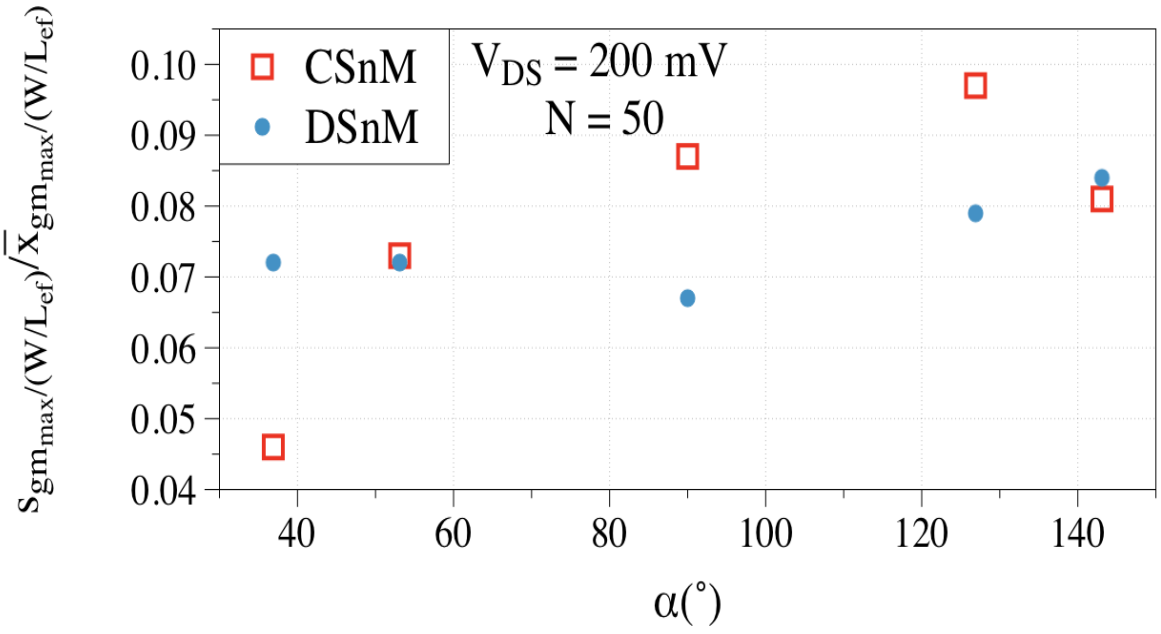


Figura 4.4 - Gráfico dos erros relativos entre os $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes em função de α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se a Figura 4.4, observa-se que os erros relativos entre os $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante são menores que os erros relativos dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes para os ângulos α iguais a 90° e 126,9°. Para os ângulos α iguais a 53,1° e 143,1° verifica-se que os erros relativos entre os $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM são praticamente os mesmos que os erros relativos medidos nos CSnM equivalentes. Portanto, pode-se concluir que os SOI nMOSFETs do tipo Diamante apresentam um

casamento entre dispositivos melhor ou praticamente similar quando comparados com aqueles observados entre dispositivos convencionais equivalentes, para uma faixa de valores de ângulos α que está entre 53,1˚ e 143,1˚. Isso pode ser justificado principalmente pelo fato que os valores médios dos $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante são maiores que aqueles observados nos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes para esse intervalo de ângulos α analisados, devido à presença dos efeitos LCE e PAMDLE nos SOI nMOSFETs do tipo Diamante. Adicionalmente, para esse intervalo de ângulos α foi observado que as variâncias dos $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante tendem a serem superiores às variâncias dos $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, porém os erros relativos dos DSnM tendem a ficar menores que os observados nos CSnM equivalentes, devido às médias de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM serem maiores que as médias que foram medidas nos CSnM equivalentes, devido aos efeitos LCE e PAMDLE presentes nos DSnM.

Além disso, para o ângulo α igual a 36,9˚, uma possível justificativa encontrada para o erro relativo entre os SOI nMOSFETs do tipo Diamante ser superior ao erro relativo entre os SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, está no fato que as partes triangulares que formam bicos da geometria de porta hexagonal tendem a ser mais afetadas pelo processo de fabricação de CIs, como por exemplo, os cantos da parte triangular da geometria hexagonal dos transistores tendem a ficar arredondados durante a fase de processo de corrosão do material de porta do DSnM em relação aos seus equivalentes convencionais [46].

A diferença entre os erros relativos dos parâmetros dos DSnM e dos CSnM equivalentes em relação aos erros relativos dos CSnM equivalentes em porcentagem (ε_r), é dada pela equação (4.1).

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\left(\frac{s_{DSnM}}{\bar{x}_{DSnM}}\right) - \left(\frac{s_{CSnM}}{\bar{x}_{CSnM}}\right)}{\left(\frac{s_{CSnM}}{\bar{x}_{CSnM}}\right)} \right) \cdot 100 \qquad (4.1)$$

Ou seja, ε_r define o quanto os DSnM são capazes de apresentar um melhor ($\varepsilon_r < 0$) ou um pior ($\varepsilon_r > 0$) casamento entre dispositivos em comparação aqueles verificados para os CSnM equivalentes. Desta forma, quando ε_r é menor que zero, significa que o estilo de leiaute do tipo Diamante é capaz de apresentar um melhor casamento entre dispositivos em comparação aqueles observados com os CSnM equivalentes e quando ε_r é maior que zero,

significa que o estilo de leiaute do tipo Diamante apresenta um pior casamento entre dispositivos em comparação aqueles observados com os CSnM equivalentes.

A Figura 4.5 ilustra o gráfico de ε_r de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

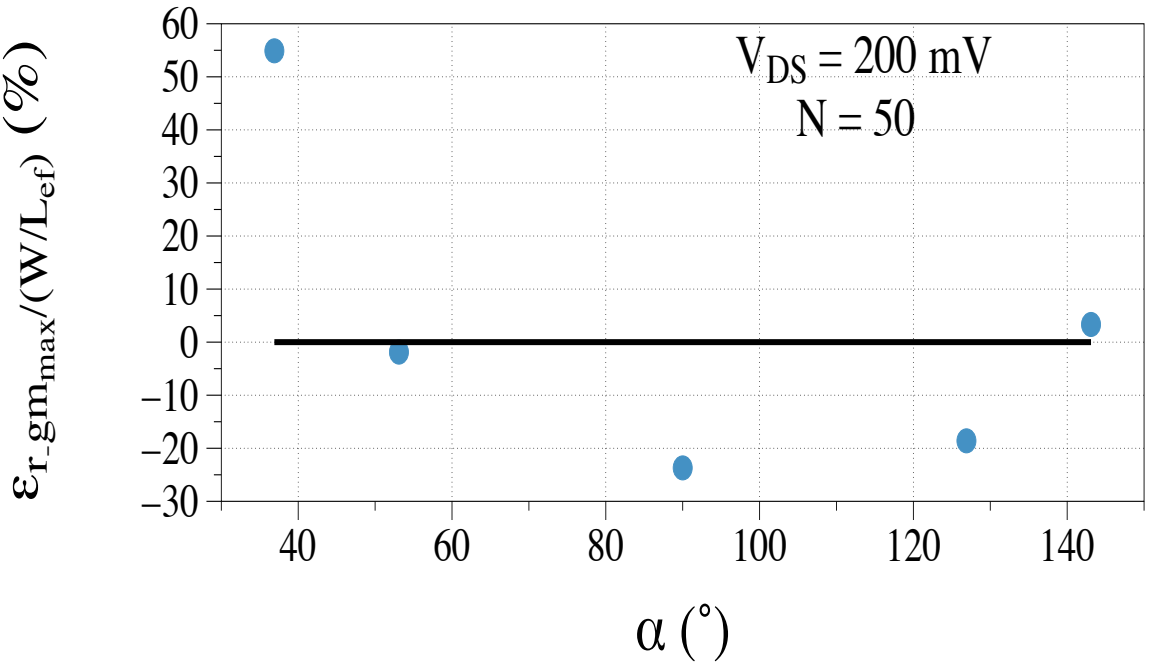
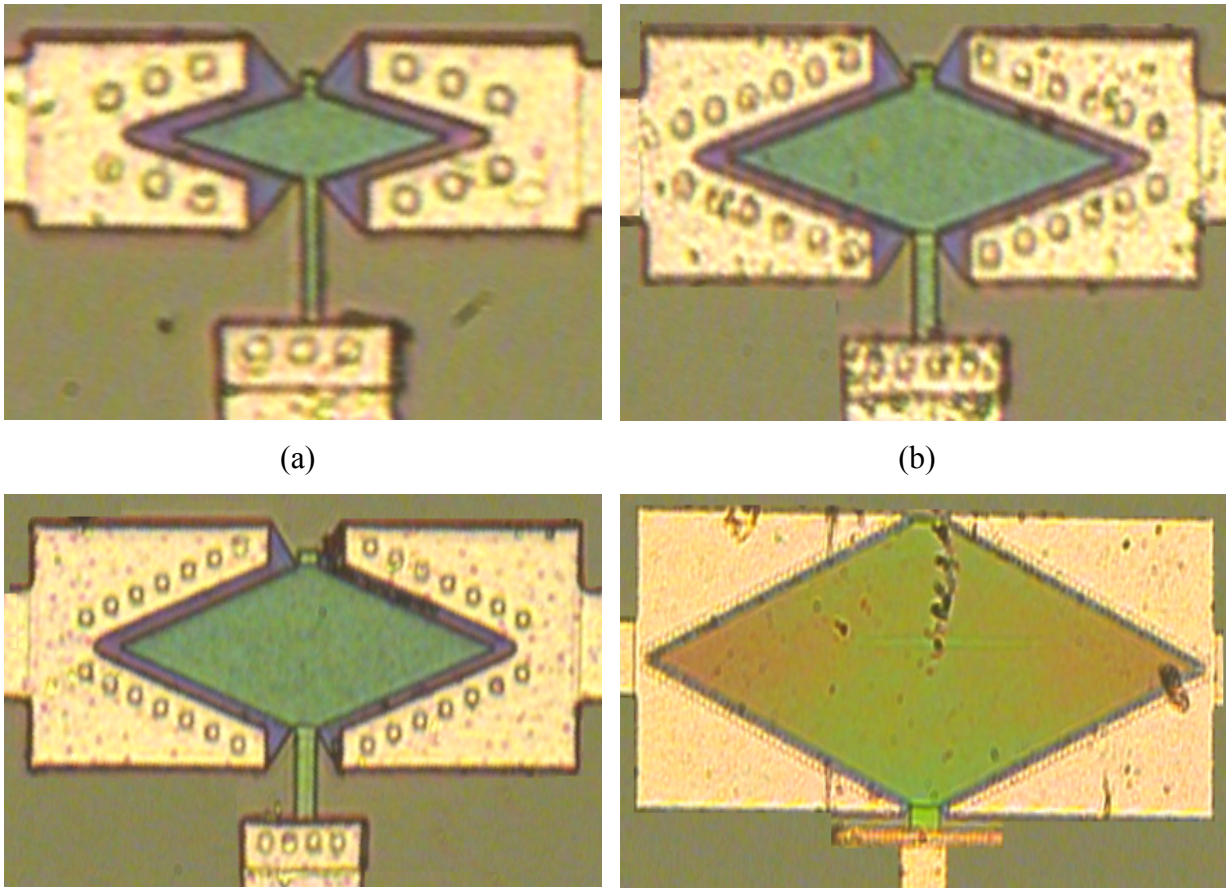


Figura 4.5 - Gráfico de ε_r de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Quando se analisa a Figura 4.5, pode-se observar que os DSnM com os ângulos α iguais a 90˚ são capazes de produzir um melhor casamento entre dispositivos (-23,7%) quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes. Para o ângulo α igual 126,9˚, também constata-se que os DSnM apresentam um melhor casamento entre dispositivos (-18,6%) em relação aos dos CSnM equivalentes. Pode-se verificar também que, para os ângulos α iguais a 53,1˚ e 143,1˚, há um comportamento praticamente similar do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (-1,88% para o ângulo α igual a 53,1˚ e +3,33% para o ângulo α igual a 143,1˚). Por fim, para o ângulo α igual a 36,9˚, pode-se observar um caso bastante diferente em comparação aos outros ângulos α estudados, isto é, os DSnM apresentam um pior casamento entre dispositivos (+54,9%) em

relação aqueles medidos dos CSnM equivalentes, devido à forte influência do processo de fabricação sobre a geometria hexagonal de porta com α igual a 36,9˚ de um DSnM.

Com o objeitvo de ilustrarmos o efeito no processo de fabricação sobre os SOI nMOSFETs do tipo Diamante com α igual a 36,9˚, a Figura 4.6 apresenta quatro fotos de DSnM variando-se os valores de W, de um dos chips utilizados nesta dissertação de mestrado, isto é, os valores de W igual a 12 µm (Figura 4.6.a), W igual a 24 µm (Figura 4.6.b), W igual a 30 µm (Figura 4.6.c) e W igual a 180 µm (Figura 4.6.d).



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.6 - Quatro fotos de DSnM variando-se os valores de W, de um dos chips utilizados neste trabalho, isto é, os valores de W igual a 12 µm (a), W igual a 24 µm (b), W igual a 30 µm (c) e W igual a 180 µm (d).

Ao analisar a Figura 4.6, verifica-se que mesmo com a variação dos valores de W efetivamente os cantos das partes triangulares tendem a ficar arredondados durante a etapa de corrosão do material de porta dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante em relação aos seus convencionais equivalentes [46].

A Figura 4.7 apresenta um exemplo de uma região de canto encontrada no SOI nMOSFET do tipo Diamante o qual foi ilustrado na Figura 4.6.c, com o intuito de

exemplificar o arredondamento encontrado nos cantos das partes triangulares dos DSnM de ângulo α igual a 36,9˚.

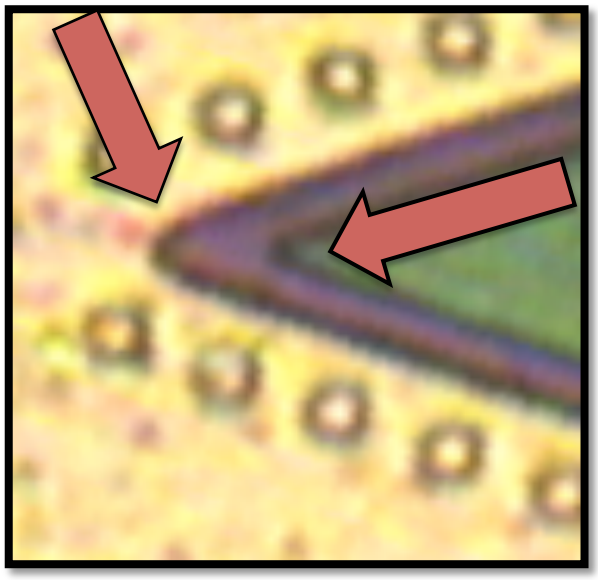


Figura 4.7 - Exemplo de uma região de canto encontrada no SOI nMOSFET do tipo Diamante o qual foi ilustrado na Figura 4.6.c, com o intuito de exemplificar o arredondamento encontrado nos cantos das partes triangulares dos DSnM de ângulo α igual a 36,9˚.

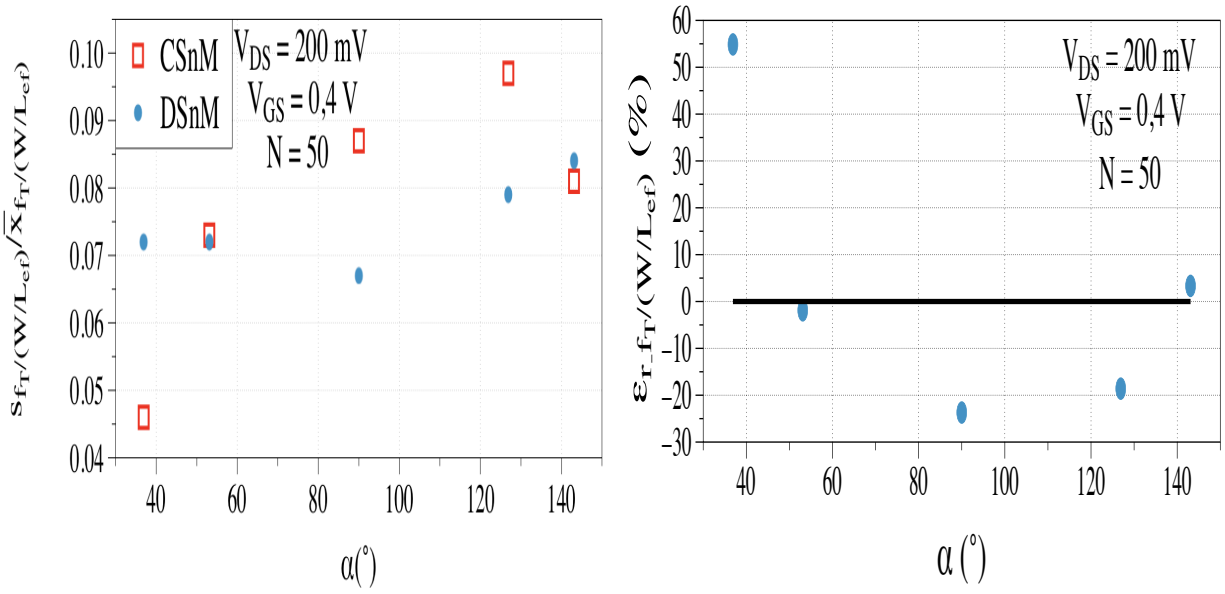
Desta forma, ao se analisar a Figura 4.7 fica evidente o arredondamento principalmente nas partes triangulares decorrente ao processo de corrosão do material de porta dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante [46].

A mesma análise dos erros relativos e de ε_r de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ foi realizada para uma polarização de V_{DS} igual a 50 mV e observou-se praticamente os mesmos comportamentos (os mesmos valores de ε_r) que foram observados para uma polarização de V_{DS} de 200 mV, conforme foram ilustrados pelas Figuras 4.4 e 4.5.

Portanto, utilizando-se a amostra de 360 SOI nMOSFETs estudada, verifica-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 90˚ a 126,9˚ para SOI nMOSFETs é uma alternativa bastante interessante para melhorar em torno de aproximadamente 20%, o casamento de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ entre dispositivos, focando-se na implementação de CIs analógicos de alta precisão elétrica.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico dos erros relativos entre os $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[s_{f_T/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{f_T/\left(W/L_{ef}\right)} \right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes, (Figura 4.8.a) e o gráfico de

ε_r de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_f_T/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 4.8.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{GS} igual a 0,4 V, V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação) e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

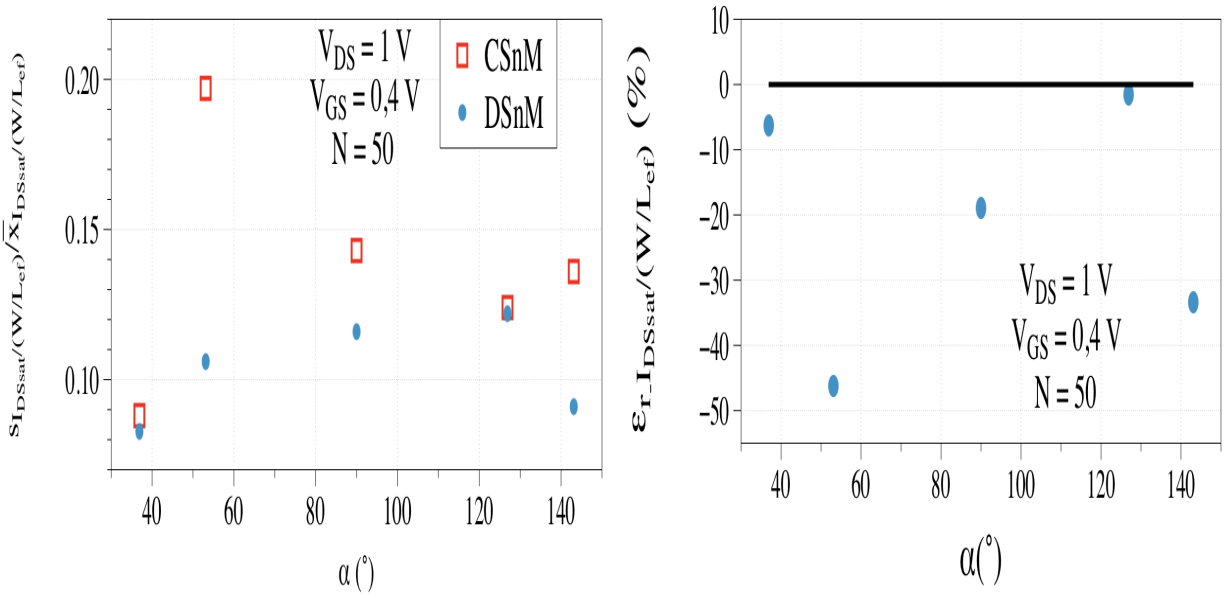


(a) (b)

Figura 4.8 - Gráfico dos erros relativos entre os $f_T/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_f_T/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{GS} igual a 0,4 V, V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação) e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se as Figuras 4.8.a e 4.8.b, observa-se que os erros relativos dos $f_T/(W/L_{ef})$ e consequentemente o ε_r dos $f_T/(W/L_{ef})$ deram iguais aqueles obtidos dos $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e CSnM e portanto, as mesmas considerações feitas anteriormente para o $gm_{max}/(W/L_{ef})$ valem para o caso deste parâmetro em questão.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[s_{I_{DSsat}/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{I_{DSsat}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.9.a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 4.9.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

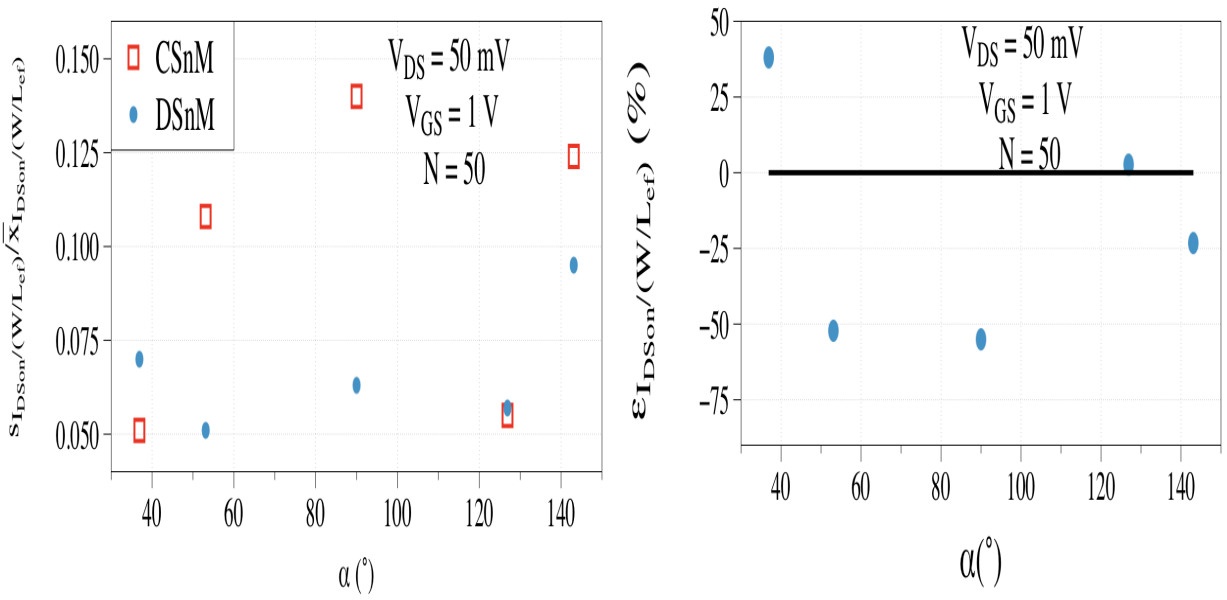
Figura 4.9 - Gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Ao analisar as Figuras 4.9.a e 4.9.b, observa-se que os DSnM com os ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚ e 143,1˚ conseguem produzir um melhor casamento entre dispositivos (-46,2% para o ângulo α igual a 53,1˚, -18,9% para o ângulo α igual a 90˚ e -33,4% para o ângulo α igual a 143,1˚) quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes. Para os ângulos α iguais a 36,9˚ e 126,9˚, observa-se que há um comportamento praticamente análogo do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (-6,3% para o ângulo α igual a 36,9˚ e -1,5% α igual a 126,9˚).

Por conseguinte, novamente o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 53,1˚ a 90˚, assim como para o α igual a 143,1˚ é uma boa opção para melhorar o casamento de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ entre dispositivos, em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Figura 4.10 apresenta o gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[s_{I_{DSon}/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{I_{DSon}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.10.a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 4.10.b), ambos em função do ângulo

α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 1 V e de V_{DS} igual a 50mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

Figura 4.10 - Gráfico dos erros relativos entre os $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{r_I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 1 V e de V_{DS} igual a 50mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se a Figuras 4.10.a e 4.10.b, observa-se que os SOI nMOSFETs do tipo Diamante com ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚ e 143,1˚ são capazes de produzir um melhor casamento entre dispositivos quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes (-52,2% para o ângulo α igual a 53,1˚, -55,1% para o ângulo α igual a 90˚ e -23,3% para o ângulo α igual a 143,1˚). Para o ângulo α igual a 126,9˚, verifica-se que há um comportamento praticamente similar do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (+2,6%). Para o ângulo α igual a 36,9˚, verifica-se que os DSnM apresentam um pior casamento entre dispositivos em relação aqueles medidos dos CSnM equivalentes (+38%). Isto pode ser justificado da mesma maneira que foi justificado na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

Desta forma, observa-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 53,1˚ a 90˚ e também para o ângulo α igual a 143,1˚ também é uma boa opção para melhorar o casamento de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ entre dispositivos, em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de gerar.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico dos erros relativos entre os gm/I_{DS} $\left[{}^{S_{gm/I_{DS}}}/_{\bar{x}_{gm/I_{DS}}}\right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.11.a) e o gráfico de ε_r de gm/I_{DS} $[\varepsilon_{r_gm/I_{DS}}]$ (Figura 4.11.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

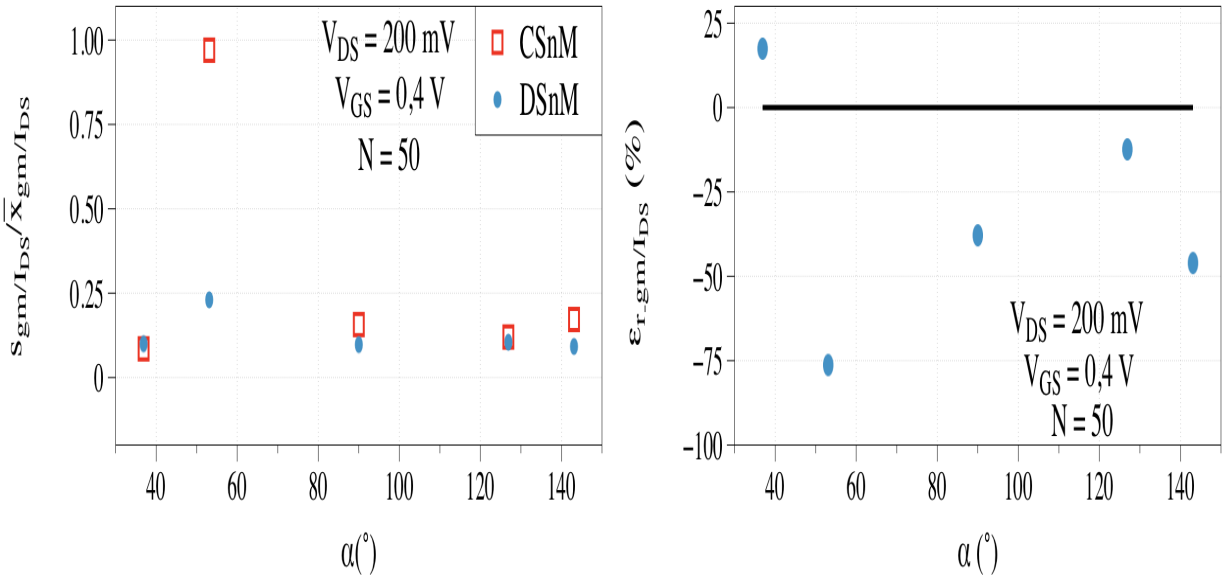


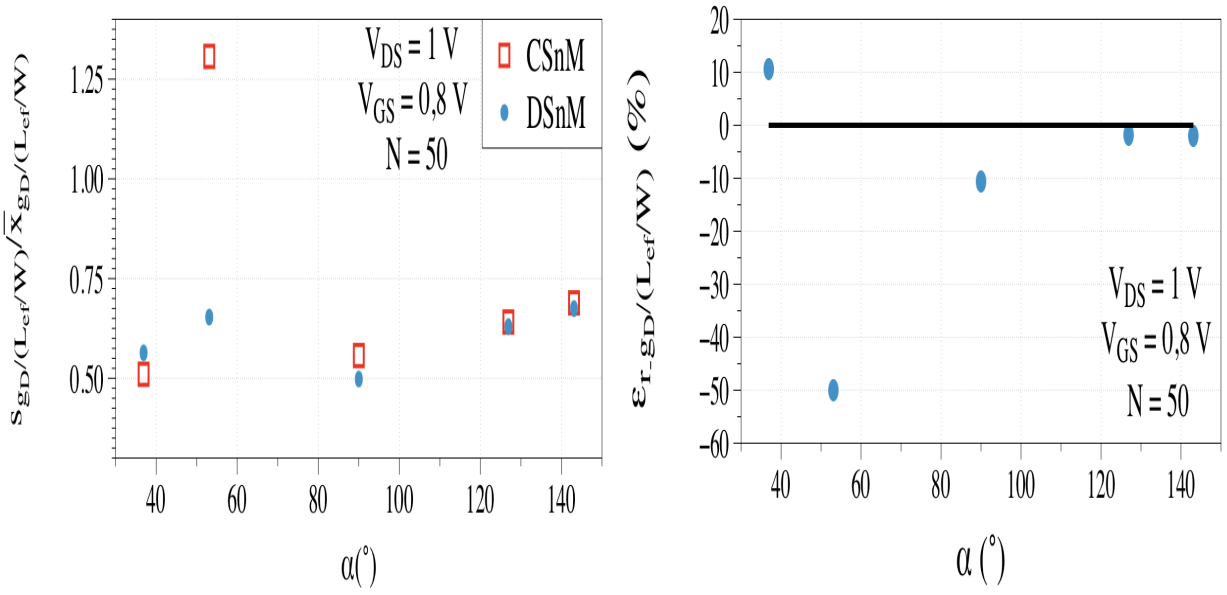
Figura 4.11 - Gráfico dos erros relativos entre os gm/I_{DS} dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de gm/I_{DS} $[\varepsilon_{r_gm/I_{DS}}]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Ao analisar as Figuras 4.11.a e 4.11.b, observa-se que os DSnM com ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚ produzem um melhor casamento entre dispositivos quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes (-76,3% para o ângulo α igual a 53,1˚, -37,9% para o ângulo α igual a 90˚, -12,4% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -46,1% para o ângulo α igual a 143,1˚). Para os DSnM com o ângulo α igual a 36,9˚, os DSnM apresentam um pior casamento entre dispositivos em relação aqueles medidos dos CSnM equivalentes (+17,4%). Para o ângulo α igual a 36,9˚ justifica-se da mesma maneira que foi justificado na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

Por conseguinte, verifica-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 53,1˚ a 143,1˚ é uma boa opção para melhorar o casamento de gm/I_{DS} entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de fazer.

A mesma análise dos erros relativos e de ε_r de gm/I_{DS} foi realizada para uma polarização de V_{DS} igual a 50 mV e observou-se praticamente os mesmos comportamentos (os mesmos valores de ε_r) que foram observados para uma polarização de V_{DS} de 200 mV, conforme foram ilustrados pelas Figuras 4.10.a e 4.10.b.

A Figura 4.12 ilustra o gráfico dos erros relativos entre os $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[S_{g_D/\left(L_{ef}/W\right)} \Big/ \bar{x}_{g_D/\left(L_{ef}/W\right)} \right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.12.a) e o gráfico de ε_r de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (Figura 4.12.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



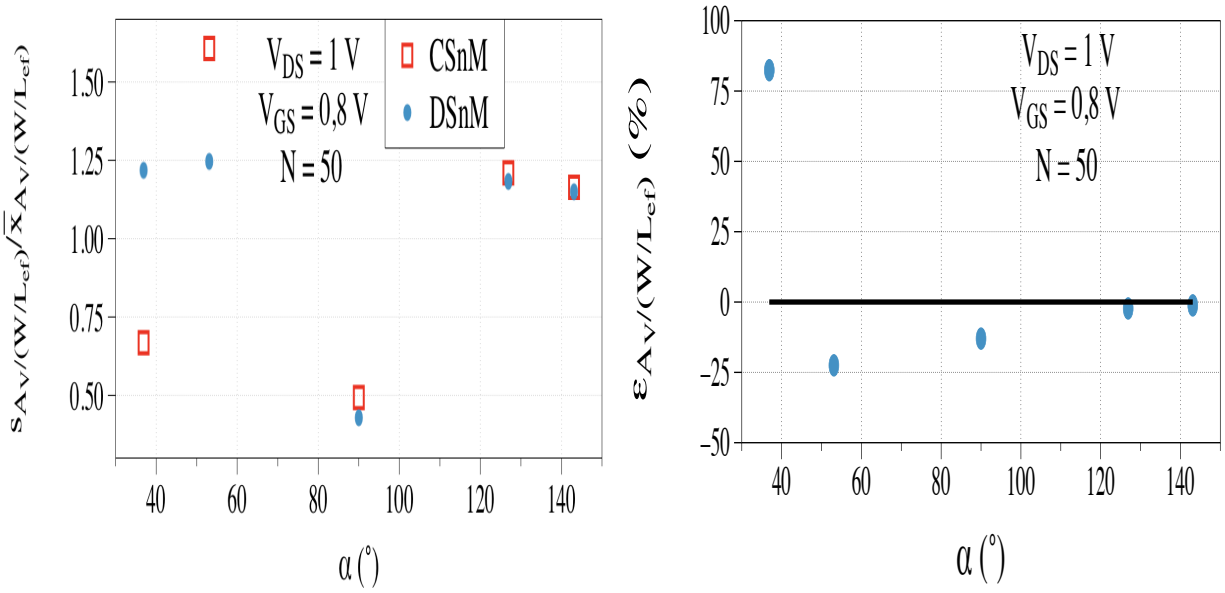
(a) (b)

Figura 4.12 - Gráfico dos erros relativos entre os $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

De acordo com as Figuras 4.12.a e 4.12.b, observa-se que para os DSnM com ângulos α iguais a 53,1˚ e 90˚ conseguem produzir um melhor casamento entre dispositivos quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes (cerca de -50% para α igual a 53,1˚ e -11% para α igual a 90˚). Verifica-se também que, para os ângulos α iguais a 126,9˚ e 143,1˚ há um comportamento praticamente similar do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (-1,8% para α igual a 126,9˚ e -2% para α igual a 143,1˚). Por fim, para o ângulo α igual a 36,9˚, os DSnM apresentam um pior casamento entre dispositivos em relação aqueles medidos dos CSnM equivalentes (+10,6%). Isto pode ser explicado da mesma maneira que foi feito na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

Logo, constata-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 53,1˚ a 90˚, novamente é uma boa opção para melhorar o casamento de $g_D/(W/L_{ef})$ entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Figura 4.13 ilustra o gráfico dos erros relativos entre os $A_V/(L_{ef}/W)$ $\left[s_{A_V/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{A_V/\left(W/L_{ef}\right)} \right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.13.a) e o gráfico de ε_r de $A_V/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_A_V/(L_{ef}/W)}\right]$ (Figura 4.13.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

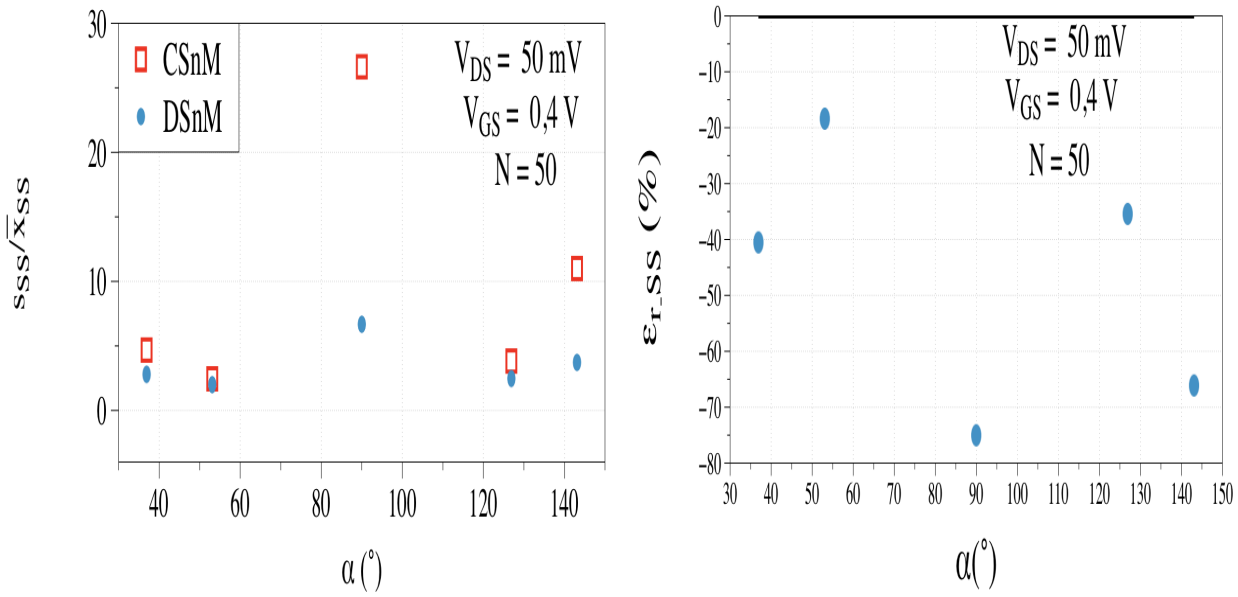
Figura 4.13 - Gráfico dos erros relativos entre os $A_V/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $A_V/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{r_A_V/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,8 V e de V_{DS} igual a 1 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Ao analisar as Figuras 4.13.a e 4.13.b, observa-se que os DSnM com ângulos α iguais a 53,1° e 90° são capazes de produzir um melhor casamento entre dispositivos quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes (-22,5% para α igual a 53,1° e -13% para α igual a 90°). Verifica-se que para os ângulos α iguais a 126,9° e 143,1°, há um comportamento praticamente similar do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos CSnM equivalentes (-2,28% para α igual a 126,9° e -1,19% para α igual a 143,1°). Para o ângulo α igual a 36,9°, os DSnM apresentam um pior casamento enre dispositivos (+82,4%) em comparação aqueles medidos dos CSnM equivalentes. Isto pode ser explicado da mesma maneira que foi realizado na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

Portanto, observa-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α na faixa de 53,1° a 90° também é uma boa opção para melhorar o casamento de $A_V/(W/L_{ef})$ entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Figura 4.14 mostra o gráfico dos erros relativos entre os $SS/(W/L_{ef})$ $\left[s_{SS}/\bar{x}_{SS}\right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.14.a) e o gráfico de ε_r de SS $\left[\varepsilon_{r_SS}\right]$ (Figura 4.14.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V

e de V_{DS} igual a 50 mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

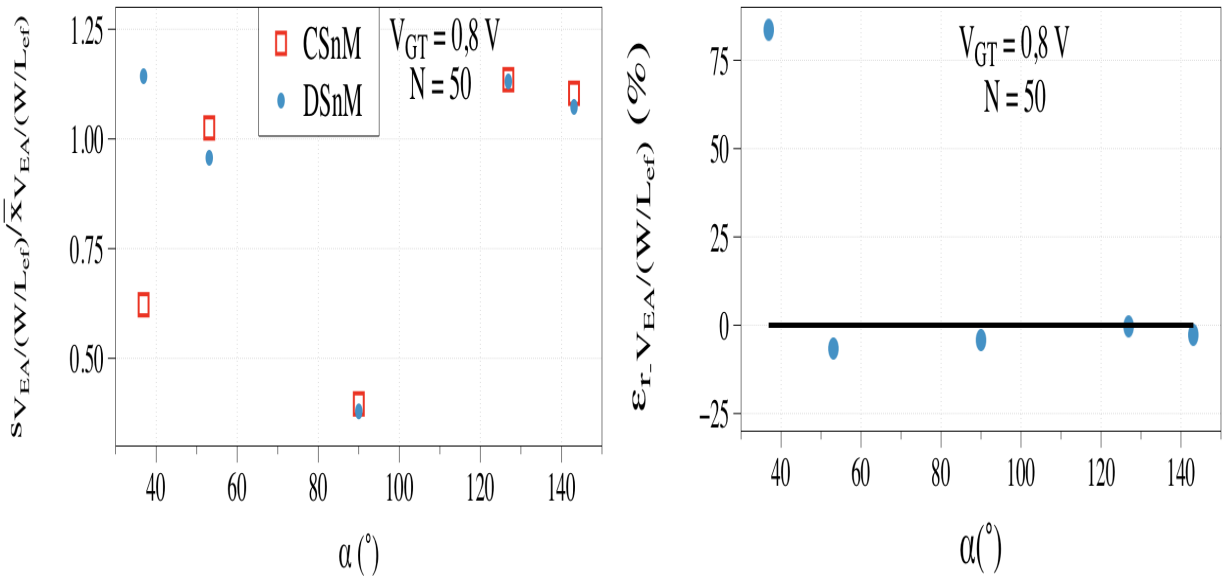
Figura 4.14 - Gráfico dos erros relativos entre os SS/(W/L_{ef}) dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de SS $[\varepsilon_{r_SS}]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e de V_{DS} igual a 50 mV, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se a Figura 4.14.a e 4.14.b, verifica-se que os DSnM, para todos os ângulos α analisados, são capazes de produzir um melhor casamento entre dispositivos (-40,5% para o ângulo α igual a 36,9˚, -18,4% para o ângulo α igual a 53,1˚, -75% para o ângulo α igual a 90˚, -35,4% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -66,1% para o ângulo α igual a 143,1˚) quando comparados com aqueles medidos dos CSnM equivalentes. Este comportamento pode ser justificado pois os valores médios de I_{DS} dos DSnM são superiores aos valores médios encontrados para as I_{DS} dos CSnM equivalentes.

Assim, observa-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com todos os ângulos α estudados também é uma boa opção para melhorar o casamento de SS entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Figura 4.15 apresenta o gráfico dos erros relativos entre os V_{EA}/(W/L_{ef}) $\left[S_{V_{EA}/\left(W/L_{ef}\right)} \Big/ \bar{x}_{V_{EA}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.15.a) e o gráfico de ε_r de V_{EA}/(W/L_{ef}) $\left[\varepsilon_{V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 4.15.b), em função do ângulo α dos DSnM, com

uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V e para valores negativos de V_{DS} (aproximadamente -20 V), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. Neste caso, os valores médios de V_{TH} extraídos dos dispositivos foram da ordem de 0,3 V.



(a) (b)

Figura 4.15 - Gráfico dos erros relativos entre os $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V e para valores negativos de V_{DS} (aproximadamente -20 V), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

De acordo com as Figuras 4.15.a e 4.15.b, observa-se para os ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚, verifica-se que existe um comportamento analógo do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (-6,6% para o ângulo α igual a 53,1˚, -4,16% para o ângulo α igual a 90˚, -0,37% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -2,79% para o ângulo α igual a 143,1˚). Finalmente, para o ângulo α igual a 36,9˚, constata-se que os DSnM apresentam um pior casamento entre dispositivos em relação aqueles medidos dos CSnM equivalentes (+83,6%). Isto pode ser justificado pelo fato que para os DSnM com ângulos α mais agudos (36,9˚), os efeitos LCE e PAMDLE provocam uma inclinação maior na curva de I_{DS} em função de V_{DS} na região de saturação, o que acarreta em um pior casamento entre dispositivos para V_{EA} dos DSnM em comparação aos dos CSnM equivalentes.

Dessa forma, verifica-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com α igual a 90˚ também é uma boa opção para melhorar o casamento de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Figura 4.16 ilustra o gráfico dos erros relativos entre os $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left(s_{R_{DSon}/\left(L_{ef}/W\right)} \Big/ \bar{x}_{R_{DSon}/\left(L_{ef}/W\right)}\right)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (Figura 4.16.a) e o gráfico de ε_r de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (Figura 4.16.b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

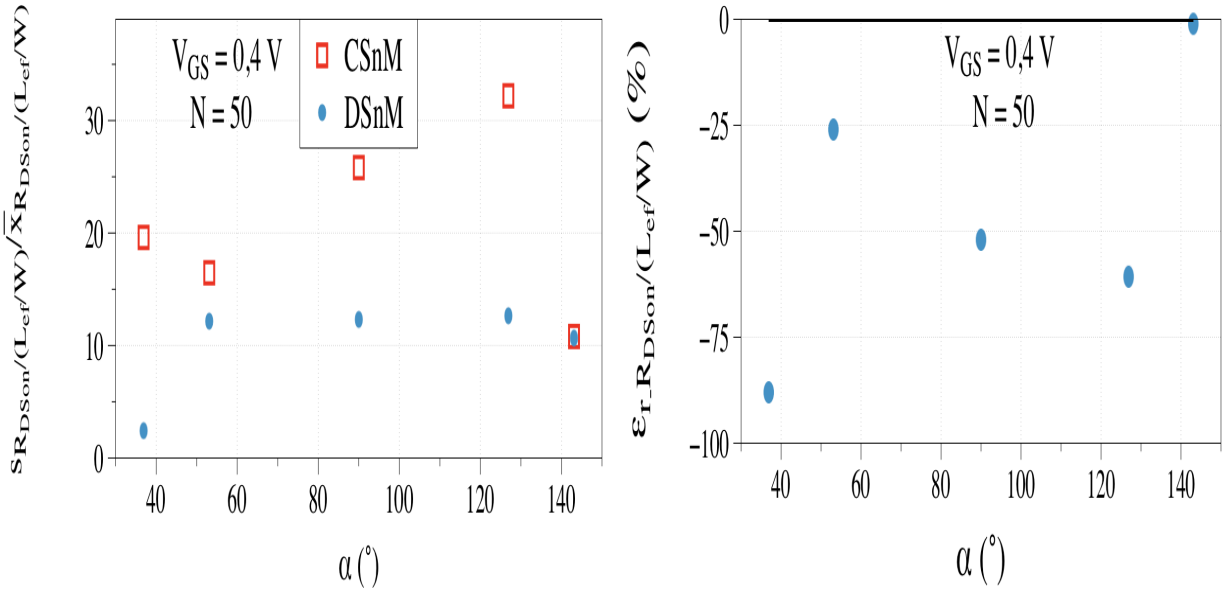


Figura 4.16 - Gráfico dos erros relativos entre os $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e dos CSnM equivalentes (a) e o gráfico de ε_r de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GS} igual a 0,4 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se as Figuras 4.16.a e 4.16.b, observa-se que os DSnM para todos os ângulos α estudados são capazes de produzir um melhor casamento entre dispositivos quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes (-88% para o ângulo α igual a 36,9˚, -26% para o ângulo α igual a 53,1˚, -52% para o ângulo α igual a 90˚ e -60,7% para o ângulo α igual a 126,9˚). Para o ângulo α igual a 143,1˚ há um comportamento praticamente similar do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes (-1,1%). Isto já era esperado pois sabe-se que os valores médios de I_{DS} dos DSnM são superior em relação aos dos CSnM equivalentes, em função dos efeitos LCE e PAMDLE estarem

presentes nos DSnM, visto que o parâmetro $R_{DSon}/(W/L_{ef})$ é inversamente proporcional à I_{DS}, isto acarreta na redução do valor de $R_{DSon}/(W/L_{ef})$ e também em um melhor casamento entre dispositivos nos DSnM em relação aqueles obtidos nos CSnM equivalentes.

Desta forma, observa-se que o estilo de leiaute do tipo Diamante com todos os ângulos α estudados também é uma boa opção para melhorar o casamento de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ entre dispositivos em relação ao casamento entre dispositivos que os CSnM são capazes de produzir.

A Tabela 4.3 apresenta o resumo dos resultados dos ε_r dos diferentes parâmetros elétricos estudados oriundos do estudo do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aos dos CSnM equivalentes, onde o sinal "+" indica que o SOI nMOSFET do tipo Diamante apresenta um melhor casamento em relação aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes, o sinal "-" indica que o DSnM apresenta um pior casamento entre dispostivos, em relação aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes e "0" indica que o DSnM apresenta um casamento entre dispositivos praticamente similar aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes.

Tabela 4.3- Resumo dos resultados dos ε_r .

	α	α - [ε_r (%)]	α - [ε_r (%)]	α - [ε_r (%)]	α - [ε_r (%)]
	36,9°	53,1°	90°	126,9°	143,1°
$(gm_{max})/(W/L_{ef})$	- (+54.9)	+ (-1.9)	+ (-23.7)	+ (-18.6)	- (+3.3)
$(I_{DSsat})/(W/Lef)$	+ (-6.3)	+ (-46.2)	+ (-18.9)	+ (-1.51)	+ (-33.4)
$(I_{DSon})/(W/Lef)$	- (+38)	+ (-52.2)	+ (-55.1)	- (+2.6)	+ (-23.3)
gm/I_{DS}	- (+17.4)	+ (-76)	+ (-38)	+ (-12)	+ (-46)
SS	+ (-40,5%)	+ (-18,4%)	+ (-75%)	+ (-35.4%)	+ (-66.1%)
$(g_D)/(Lef/W)$	- (+10.6)	+ (-50)	+ (-11)	+ (-1.8)	+ (-2)
$(A_V)/(W/Lef)$	- (+82.4)	+ (-22)	+ (-13)	+ (-2.3)	+ (-1.2)
$(f_T)/(W/Lef)$	- (+54.9)	+ (-1.9)	+ (-24)	+ (-19)	- (+3.3)
$(V_{EA})/(W/Lef)$	- (+83.6)	+ (-6.6)	+ (-4.2)	+ (-0.37)	+ (-2.8)
$(R_{DSon})/(Lef/W)$	+ (-88)	+ (-26%)	+ (-52)	+ (-60,7%)	+ (-1.1)
Média	-	+ (-30.1)	+ (-31.5)	+ (-14.9)	+ (-16.9)

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4.3, observa-se que os DSnM com ângulo α iguais a 53,1° e 90° conseguem produzir sempre os melhores casamentos entre dispositivos, quando comparados com aqueles obtidos dos CSnM equivalentes, para todos os principais parâmetros elétricos estudados (em média ε_r é aproximadamente igual a -30,1%

para o ângulo α igual a 53,1˚ e -31,5% para o ângulo α igual a 90˚). Os DSnM com ângulos α iguais a 126,9˚ e 143,1˚ também apresentaram excelentes resultados quanto ao casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes. Verifica-se que para o ângulo α igual a 126,9˚, o valor de ε_r é aproximadamente igual a -14,9% e para o ângulo α igual a 143,1˚, o valor de ε_r é aproximadamente igual a -16,9%. Pode-se observar também que os DSnM com ângulos α iguais a 126,9˚ e 143,1˚ apresentaram desempenho semelhante entre eles no estudo do casamento entre dispositivos dos DSnM em relação aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes, pois com exceção de apenas um único parâmetro elétrico para α igual a 126,9˚ ($I_{DSon}/(W/L_{ef})$) e dois parâmetros elétricos para α igual a 143,1˚ ($gm_{máx}/(W/L_{ef})$ e $f_T/(W/L_{ef})$), os DSnM apresentam um casamento entre dispositivos praticamente similar em relação aqueles obtidos para os CSnM equivalentes (ε_r < 5%). Os DSnM com o ângulo α igual a 36,9˚ apresentaram os piores resultados da análise experimental do casamento entre os SOI nMOSFETs do tipo Diamante em relação aqueles obtidos aos dos Convencionais equivalentes, pois somente para dois parâmetros elétricos (SS e o R_{DSon}), os DSnM apresentaram um melhor casamento entre dispositivos em relação aqueles observados para os CSnM equivalentes, devido a forte influência do processo de fabricação CMOS de CI sobre a geometria hexagonal de porta para ângulos α iguais a 36,9˚, que é capaz de arredondar de forma aleatória a parte triangular da geometria de porta hexagonal.

5 ESTUDO DA PREDIÇÃO DOS PARÂMETROS DOS SOI nMOSFETS DO TIPO DIAMANTE EM FUNÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS DOS SOI NMOSFETS CONVENCIONAIS EQUIVALENTES POR MEIO DO MODELO IDSLCPAM E PROPOSTA DE VALIDAÇÃO DESSE MODELO, ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados comparativos experimentais das médias dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e das médias geradas pelo modelo IDSLCPAM, que utiliza os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, para predizer os valores médios dos parâmetros elétricos dos DSnM.

Adicionalmente, uma nova metodologia para a validação do modelo IDSLCPAM é proposta, através do uso de ferramentas estatísticas (teste de Anderson - Darling e teste *t-Student*).

5.1 Amostra de dados estudada

Foi utilizada a mesma amostra de dados descrita no ítem 4.1 do capítulo 4 para a realização do estudo comparativo experimental entre as médias dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e do IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, para verificar se o IDSLCPAM é capaz de predizer os valores médios dos principais parâmetros elétricos dos DSnM.

Além disso, esta amostra descrita no ítem 4.1 do capítulo 4, também foi utilizada para a realização da validação do modelo IDSLCPAM através de ferramentas estatísticas (teste de Anderson - Darling e teste *t-Student*).

Para esta amostra de CIs, foram extraídas as curvas da corrente de dreno em função da polarização da tensão de porta (I_{DS} em função de V_{GS}) e da corrente de dreno em função da polarização de dreno (I_{DS} em função de V_{DS}) dos DSnM e de IDSLCPAM, que usou os valores das I_{DS} experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, para predizer os valores dos parâmetros dos DSnM, com os SOI nMOSFETs operando em ambas as regiões de operação (triodo e saturação). Portanto, para se realizar a análise da predição da média dos parâmetros elétricos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante em função dos dados experimentais dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, foram analisados os seguintes parâmetros elétricos: $gm_{max}/(W/L_{ef})$, $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$, $I_{DSon}/(W/L_{ef})$, gm/I_{DS},

$R_{DSon}/(L_{ef}/W)$, SS, $g_D/(L_{ef}/W)$, $A_V/(W/L_{ef})$, $f_T/(W/L_{ef})$ e $V_{EA}/(W/L_{ef})$, considerando-se diferentes ângulos α (36,9˚, 53,1˚, 90,0˚, 126,9˚ e 143,1˚).

5.2 Teste de normalidade das amostras estudadas

Para a aplicação do teste *t-Student* entre os principais parâmetros elétricos extraídos experimentalmente dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos obtidos do IDSLCPAM, que usa os dados experimentais da I_{DS} dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes, para predizer os valores médios dos parâmetros dos DSnM, é necessário verificar se as duas amostras de dados utilizadas apresentam uma distribuição normal. O teste utilizado para verificar se as amostras de dados apresentam uma distribuição normal é o de Anderson - Darling. O nível de significância escolhido para a aplicação deste teste foi de 0,005 (o que significa dizer que este teste estatístico será realizado com uma precisão de acerto igual a 99,5 %).

A Tabela 5.1 resume os resultados do valor de p do teste estatístico de Anderson - Darling dos parâmetros extraídos experimentalmente dos DSnM e dos resultados do modelo IDSLCPAM, que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios experimentais dos parâmetros dos DSnM. Se o valor de p for igual ou superior a 0,005, conclui-se que a amostra em análise apresenta uma distribuição normal, caso contrário, deve-se concluir que a amostra não apresenta uma distribuição normal.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados do valor de p do teste estatístico de Anderson - Darling dos parâmetros dos DSnM e do IDSLCPAM, que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios experimentais dos parâmetros dos DSnM.

α	SS		$(I_{DSsat})/(W/L_{ef})$		$(I_{DSon})/(W/Lef)$		$(R_{DSon})/(Lef/W)$		$(g_D)//(Lef/W)$	
	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM
36,9°	0.209	0.513	0.348	0.011	0.005	0.217	0.082	0.279	0.203	0.061
53,1°	0.066	0.738	0.117	0.933	0.005	0.041	0.005	0.005	0.844	0.005
90,0°	0.51	0.653	0.485	0.555	0.009	0.799	0.43	0.39	0.132	0.199
126,9°	0.85	0.317	0.032	0.062	0.05	0.005	0.317	0.01	0.135	0.055
143,1°	0.049	0.629	0.619	0.19	0.005	0.05	0.132	0.209	0.378	0.253
α	gm/I_{DS}		$(A_V)/(W/Lef)$		$(f_T)//(W/Lef)$		$(V_{EA})//(W/Lef)$		$(gm_{max})//(W/Lef)$	
	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM	DSnM	IDSLCPAM
36,9°	0.416	0.005	0.005	0.005	0.14	0.37	0.005	0.005	0.14	0.37
53,1°	0.022	0.035	0.005	0.044	0.005	0.005	0.005	0.05	0.005	0.005
90,0°	0.564	0.237	0.168	0.192	0.556	0.19	0.124	0.173	0.556	0.19
126,9°	0.129	0.218	0.005	0.021	0.391	0.005	0.005	0.018	0.391	0.005
143,1°	0.58	0.187	0.005	0.032	0.387	0.11	0.005	0.041	0.387	0.11

Analisando-se os resultados do valor p apresentados na Tabela 5.1, pode-se observar que para todas as amostras de dados em estudo nesta dissertação de mestrado, o valor de p encontra-se sempre igual ou superior a 0,005, e consequentemente, conclui-se que todas as amostras de dados apresentam uma distribuição normal, o que possibilita a aplicação do teste estatístico *t-Student* para a amostra que está sendo considerada por esse trabalho.

A Figura 5.1 apresenta um exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat} extraídos experimentalmente dos DSnM (5.1.a), dos CSnM equivalentes (5.1.b) e dos resultados obtidos do IDSLCPAM (5.1.c), que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios experimentais dos parâmetros dos DSnM, considerando-se um DSnM com α igual a 36,9°, um valor de polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1V com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. A variável N representa a quantidade de SOI nMOSFETs do tipo Diamante e Convencionais equivalentes que foram utilizados para a obtenção do parâmetro I_{DSsat}.

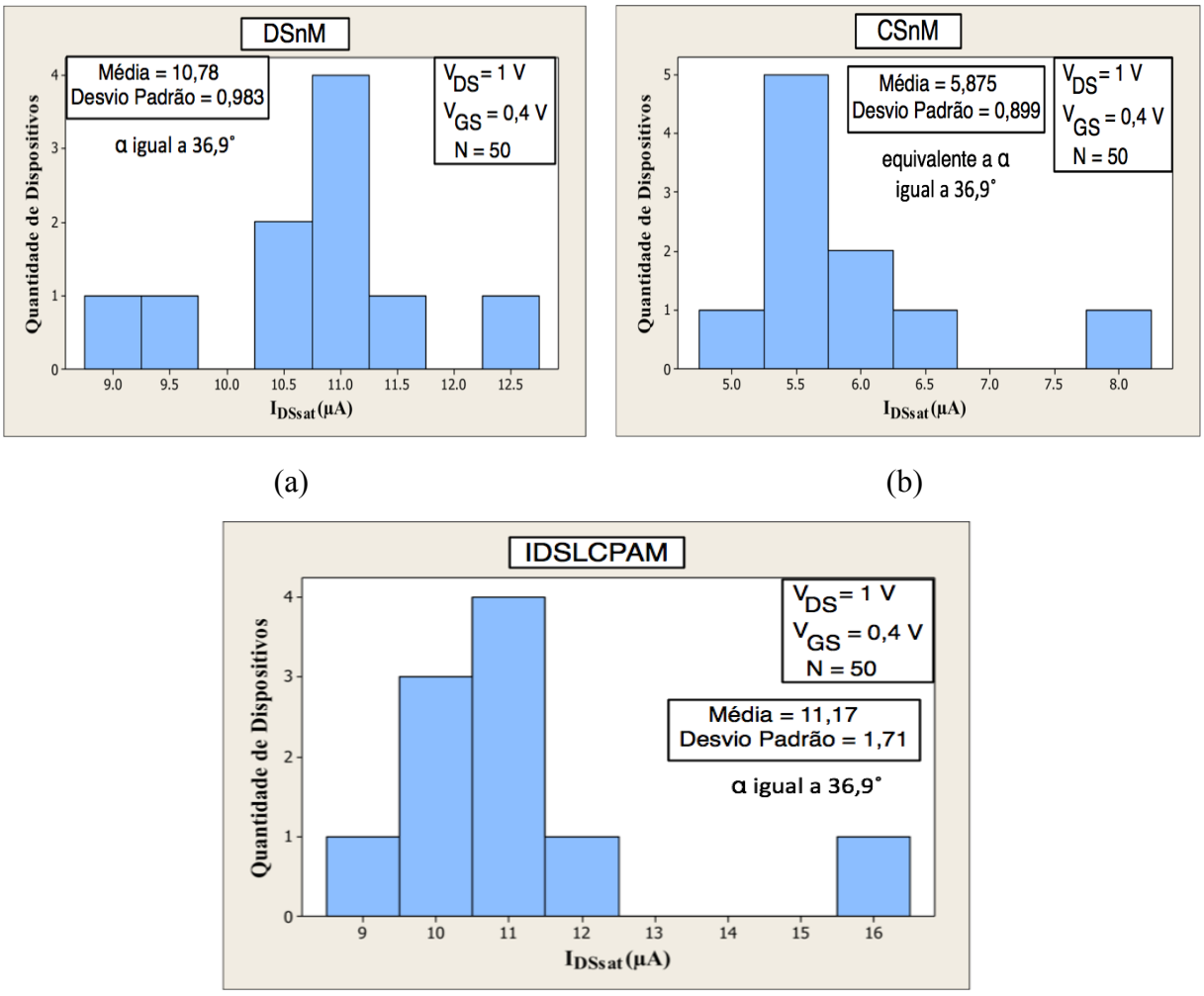


Figura 5.1 - Exemplo de um histograma do parâmetro I_{DSsat} extraídos experimentalmente dos DSnM (a), dos CSnM equivalentes (b) e dos resultados obtidos do IDSLCPAM (c), que usa os valores experimentais dos parâmetros dos CSnM, para predizer os valores médios experimentais dos parâmetros dos DSnM, considerando-se um DSnM com α igual a 36,9°, um valor de polarização de V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1V com N igual a 10, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se a Figura 5.1, observa-se que a média e o desvio padrão do parâmetro I_{DSsat} dos DSnM e dos CSnM equivalentes são diferentes entre si, pois os DSnM apresentam os efeitos LCE e PAMDLE, considerando-se as mesmas condições de polarização [tensão de porta (V_{GS}) e tensão de dreno (V_{DS})] e A_G. Além disso, observando a distribuição normal do parâmetro I_{DSsat} referente aos resultados obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer os valores médios dos parâmetros dos DSnM, é possível verificar que o IDSLCPAM é capaz de prever o comportamento da média de I_{DSsat} dos DSnM (erro máximo em torno de 5% para todas as amostras estudadas).

Esse mesmo tipo de análise foi feita para todos os parâmetros estudados neste trabalho e mostraram um comportamento similar ao ilustrado na Figura 5.1.

5.3 Resultados Experimentais

A Figura 5.2 ilustra um diagrama de blocos que mostra os passos que são realizados para o desenvolvimento do estudo da predição dos valores médios dos principais parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante, utilizando-se o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

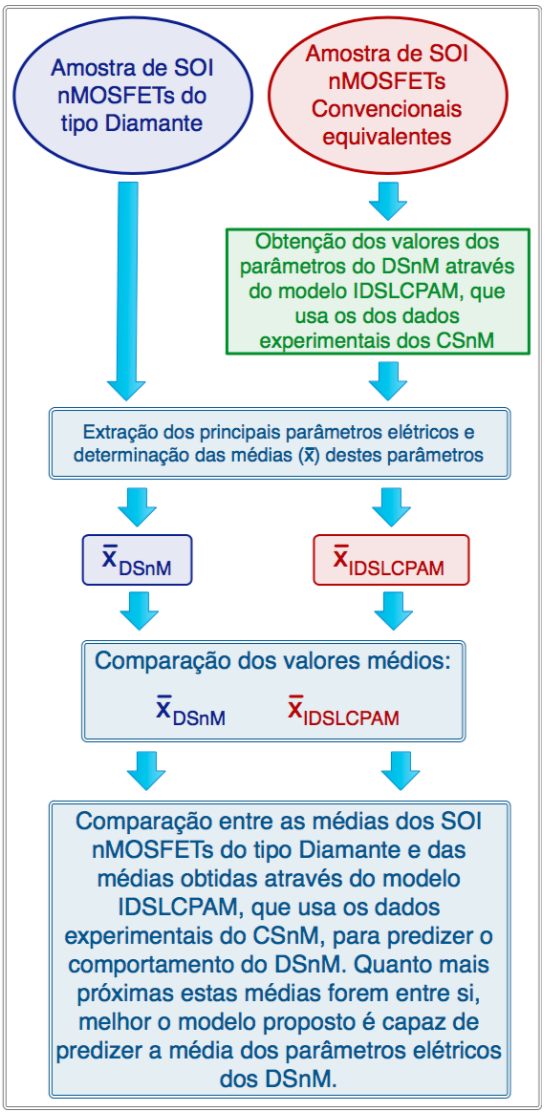


Figura 5.2 - Diagrama de blocos mostrando os passos que devem ser realizados, para o desenvolvimento do estudo da predição dos valores médios dos principais parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante, através da utilização do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Na Figura 5.2, $\bar{x}_{IDSLCPAM}$ representa os valores médios dos parâmetros elétricos obtidos através do modelo IDSLCPAM, que utiliza os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento do DSnM.

A Figura 5.3 apresenta o diagrama de blocos usado para realizar a validação do modelo proposto IDSCLPAM, por meio da utilização da ferramentas estatística denominada "Teste *t-Student*".

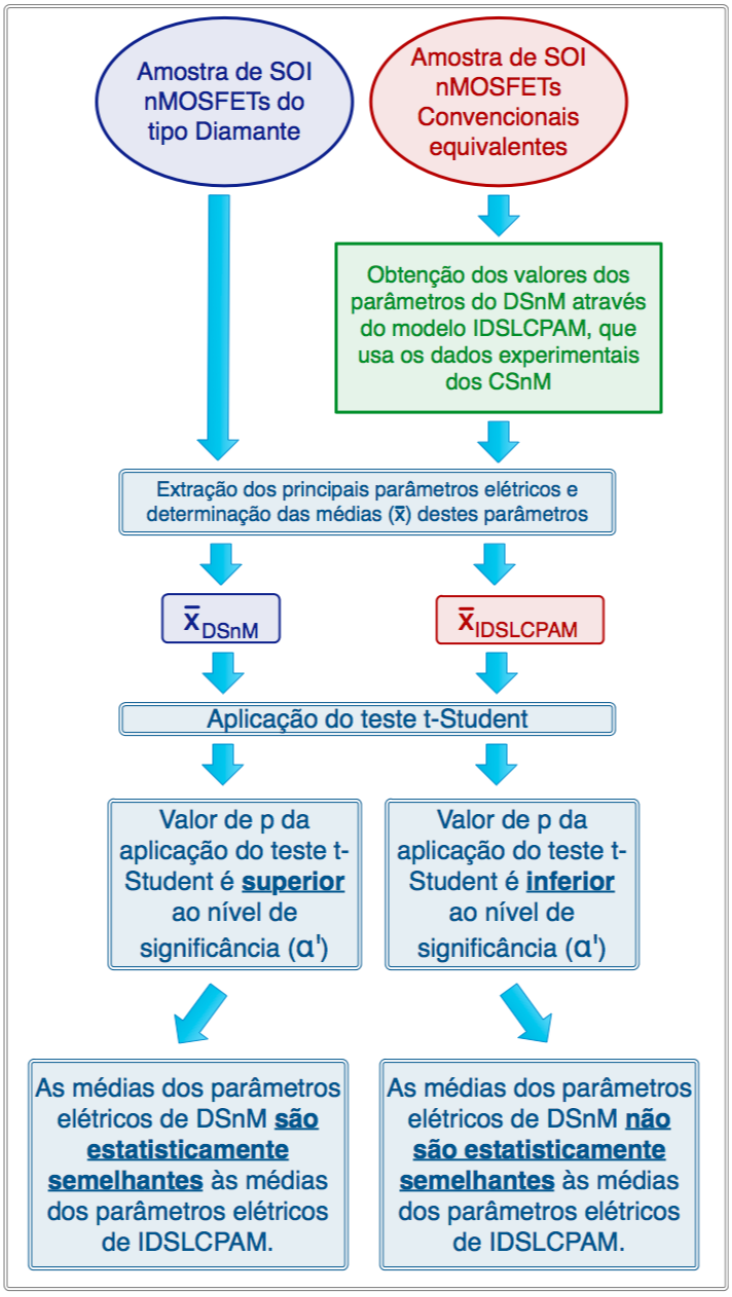


Figura 5.3 – Diagrama de blocos usado para realizar a validação do modelo proposto IDSCLPAM, por meio da utilização da ferramentas estatística denominada "Teste *t-Student*".

O nível de significância considerado para esse estudo é de 0,05 para a aplicação do teste *t-Student*, porém para o caso de uma gaussina simétrica em relação a média (Figura 5.3), deve-se considerá-la como uma gaussiana bicaudal e o valor de p deve ser comparado com a metade de 0,05 para cada lado, ou seja, 0,025.

As hipóteses H_0 e H_A são descritas através das equações (5.1) e (5.2).

$$H_0: \bar{x}_{DSnM} = \bar{x}_{IDSLCPAM} \tag{5.1}$$

$$H_A: \bar{x}_{DSnM} \neq \bar{x}_{IDSLCPAM} \tag{5.2}$$

A Figura 5.4 ilustra o gráfico das médias de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{gm_{max}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM, em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação L_{ef} do SOI nMOSFET do tipo Diamante.

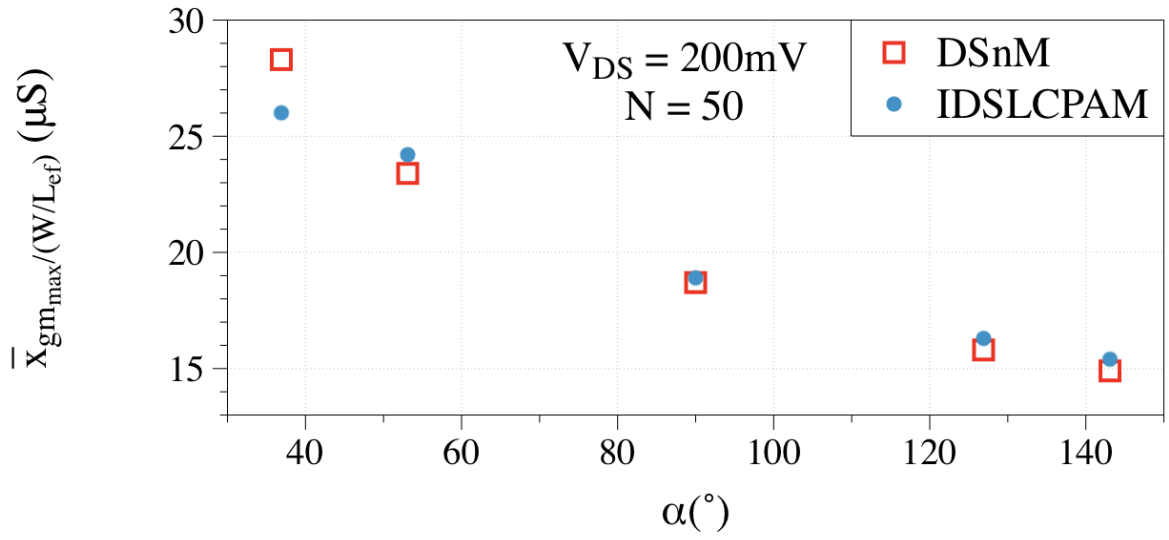


Figura 5.4 - Gráfico das médias de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM, em função do ângulo α dos DSnM, para um valor de V_{DS} igual a 200 mV (região de saturação), considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação L_{ef} do SOI nMOSFET do tipo Diamante.

Ao analisar a Figura 5.4, observa-se que para os ângulos α na faixa de 53,1° a 143,1°, os valores médios obtidos através do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, são praticamente idênticos aos valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraídos

experimentalmente dos DSnM (erro máximo de +3,77% para o ângulo α igual a 126,9˚) e portanto, conclui-se que o modelo IDSLCPAM é capaz de predizer o valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante para uma faixa de valores do ângulo α que vai de 53,1˚ a 143,1˚.

Além disso, para o ângulo α igual a 36,9˚, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, também é capaz de predizer com erro de -8,42% os valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraídos experimentalmente dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante.

A diferença entre os valores médios extraídos experimentalmente dos DSnM e os valores médios extraídos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM para predizer o comportamento dos DSnM, em relação aos valores médios extraídos dos DSnM (ε_d) é dada pela equação (5.3)

$$\varepsilon_d = \left(\frac{\bar{x}_{IDSLCPAM} - \bar{x}_{DSnM}}{x_{DSnM}} \right) \cdot 100 \,, \tag{5.3}$$

ou seja, ε_d define o quanto o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer os valores médios dos parâmetros elétricos extraídos dos DSnM.

A Figura 5.5 ilustra o gráfico de ε_d de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

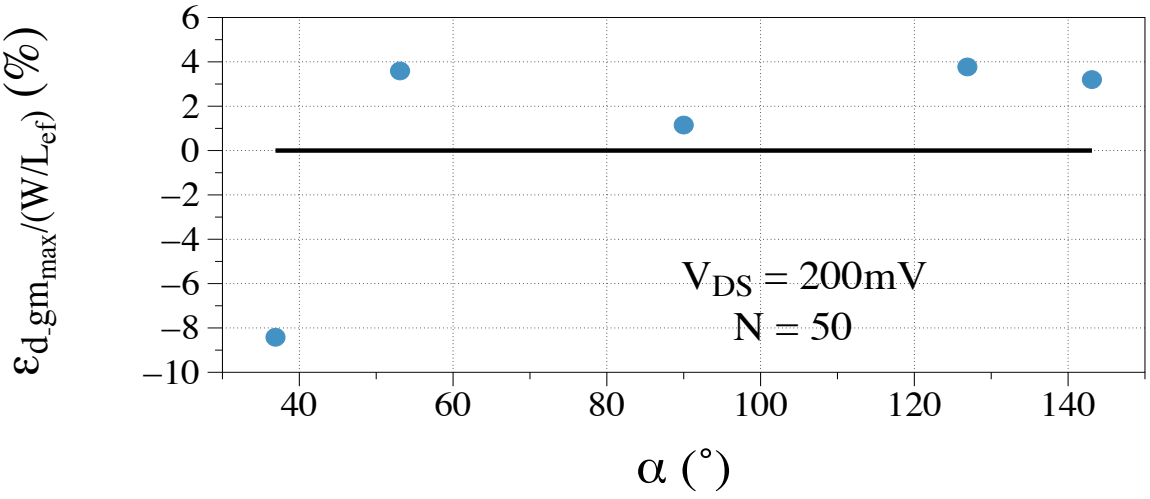


Figura 5.5 - Gráfico de ε_d de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_gm_{max}/(W/L_{ef})}\right]$ em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se V_{DS} igual a 200 mV e N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se a Figura 5.5, pode-se observar que para os ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (+3,59% para o ângulo α igual a 53,1˚, +1,15% para o ângulo α igual a 90˚, +3,77% para o ângulo α igual a 126,9˚ e +3,2% para o ângulo α igual a 143,1˚). Para o ângulo α igual a 36,9˚, observa-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, também consegue predizer o comportamento do valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraído dos DSnM com um valor de ε_d igual a -8,42%.

Assim, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados, com erro menor que 10%.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$, que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.2 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos experimentalmente dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9˚	0
53,1˚	0.065
90˚	0.627
126,9˚	0.118
143,1˚	0.131

Analisando-se a Tabela 5.2, verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM em 80% dos dispositivos estudados.

Além disso, verifica-se que para o ângulo α igual a 36,9˚, o valor de p não é superior ao nível de significância considerado. Isto pode ser justificado porque o teste *t-Student* utiliza o desvio padrão para calcular o valor de p e o desvio padrão utilizado para o modelo IDSLCPAM é o dos CSnM e não o dos DSnM. Todavia, o modelo IDSLCPAM, que usa os

dados experimentais dos CSnM, foi desenvolvido com o intuito de apenas predizer as médias dos parâmetros dos DSnM. Isto pode ser confirmado verificando-se os resultados que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, é capaz de predizer do comportamento das médias de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraídas dos DSnM, para um ângulo α igual a 36,9˚, com um valor de ε_d igual a -8,42%.

A mesma análise do comportamento dos valores médios e de ε_d de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ foi realizada para uma polarização de V_{DS} igual a 50 mV e observou-se praticamente os mesmos comportamentos (valores), que foram observados para uma polarização de V_{DS} de 200 mV, conforme foram ilustrados pelas Figuras 5.4 e 5.5.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico das médias de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{f_T/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.6.a) e o gráfico de ε_d de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_f_T/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 5.6.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200mV (região de saturação), com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

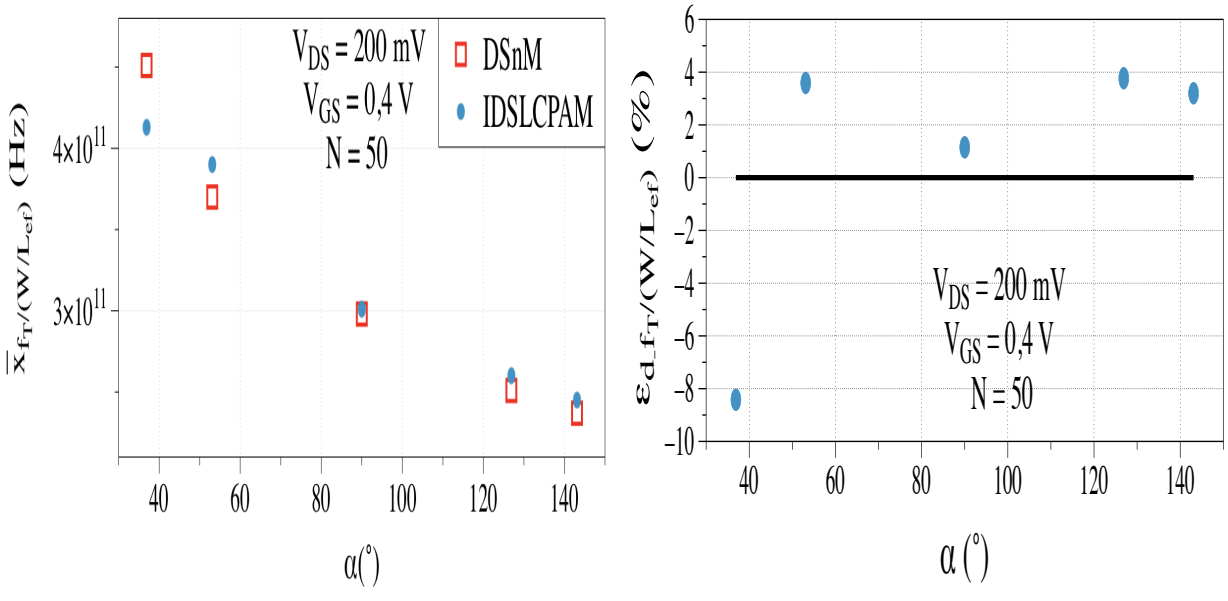


Figura 5.6 - Gráfico das médias de $f_T/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $f_T/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_f_T/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200mV (região de saturação), com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se as Figuras 5.6.a e 5.6.b, observa-se que as médias dos $f_T/(W/L_{ef})$ e consequentemente o ε_d dos $f_T/(W/L_{ef})$ deram iguais aqueles obtidos dos $gm_{max}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM e portanto, as mesmas considerações feitas anteriormente para o $gm_{max}/(W/L_{ef})$ valem para o caso deste parâmetro em questão. Em função disto, verificou-se que a aplicação do teste *t-Student* para o parâmetro $f_T/(W/L_{ef})$ resultou também igual a apresentada para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$ e assim novamente as mesmas considerações feitas anteriormente para os resultados apresentados na Tabela 5.2 para o $gm_{max}/(W/L_{ef})$, valem para o caso deste parâmetro em questão.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico das médias de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{I_{DSsat}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.7.a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 5.7.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

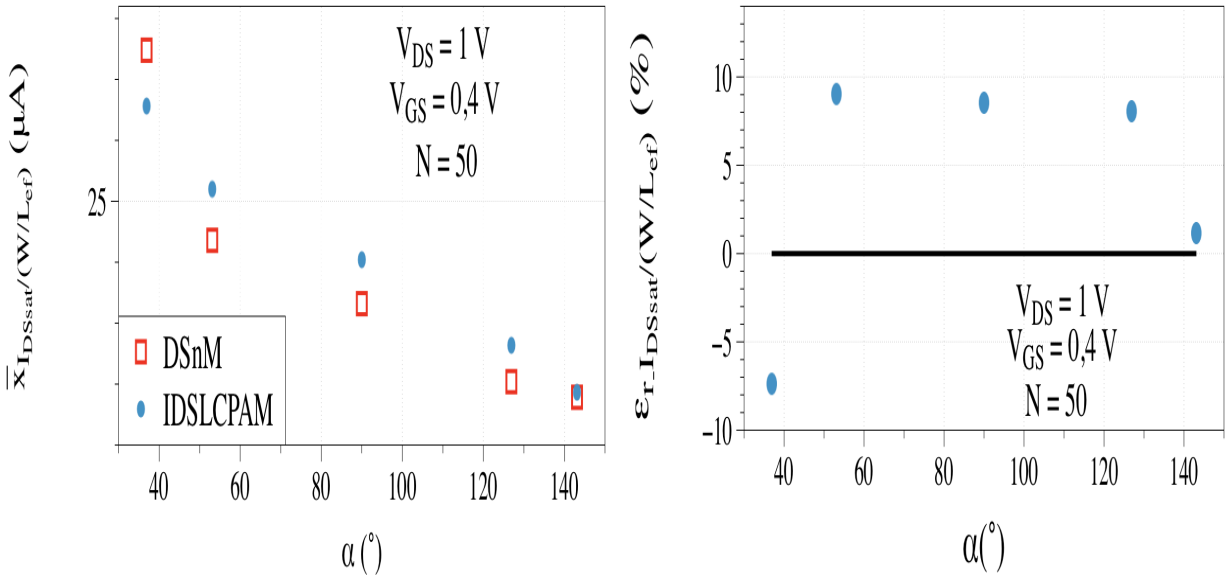


Figura 5.7 - Gráfico das médias de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_I_{DSsat}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Observando-se as Figuras 5.7.a e 5.7.b, observa-se que para o ângulo α igual a 143,1˚ o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (+1,15%). Para os ângulos α iguais a 36,9˚, 53,1˚, 90˚ e 126,9˚ verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, também consegue predizer o comportamento do valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraído dos DSnM (-7,38% para o ângulo α igual a 36,9˚, +9,04% para o ângulo α igual a 53,1˚, +8,54% para o ângulo α igual a 90˚ e +8,05% para o ângulo α igual a 126,9˚).

Dessa forma, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados.

A Tabela 5.3 fornece os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$, que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.3 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	p
36,9˚	0.007
53,1˚	0.077
90˚	0.056
126,9˚	0.029
143,1˚	0.713

Analizando-se a Tabela 5.3, verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em até 80%, o comportamento dos valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ dos DSnM. Somente para o ângulo α igual a 36,9˚, o modelo que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer estatisticamente o valor médio dos DSnM e pode ser justificado da mesma maneira que foi realizado na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

A Figura 5.8 apresenta o gráfico das médias de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{I_{DSon}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.8.a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 5.8.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 1 V e V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

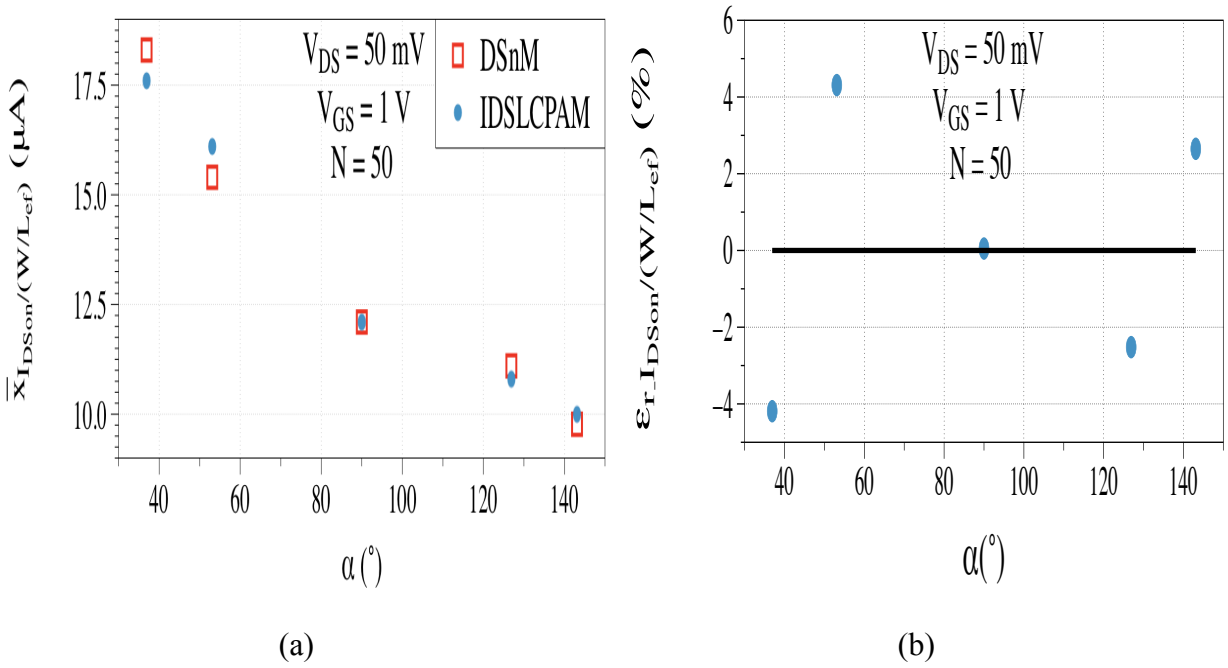


Figura 5.8 - Gráfico das médias de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_I_{DSon}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 1 V e V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Observando-se as Figuras 5.8.a e 5.8.b, observa-se que para todos os ângulos α estudados, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (-4,19% para o ângulo α igual a 36,9˚, +4,31% para o ângulo α igual a 53,1˚, +0,05% para o ângulo α igual a 90˚, -2,52% para o ângulo α igual a 126,9˚ e +2,65% para o ângulo α igual a 143,1˚).

Portanto, pode-se concluir que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados.

A Tabela 5.4 mostra os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$, que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.4 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$, que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0.011
53,1°	0.067
90°	0.988
126,9°	0.063
143,1°	0.359

Observando-se a Tabela 5.4, constata-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $I_{DSon}/(W/L_{ef})$ dos DSnM novamente em 80% dos dispositivos estudados. Somente para o ângulo α igual a 36,9°, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer estatisticamente o valor médio dos DSnM e pode ser justificado da mesma maneira que foi justificado na análise feita para o parâmetro $gm_{max}/(W/L_{ef})$.

A Figura 5.9 apresenta o gráfico das médias de gm/I_{DS} $\left[\bar{x}_{gm/I_{DS}}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.9.a) e o gráfico de ε_d de gm/I_{DS} $\left[\varepsilon_{d_gm/I_{DS}}\right]$ (Figura 5.9.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

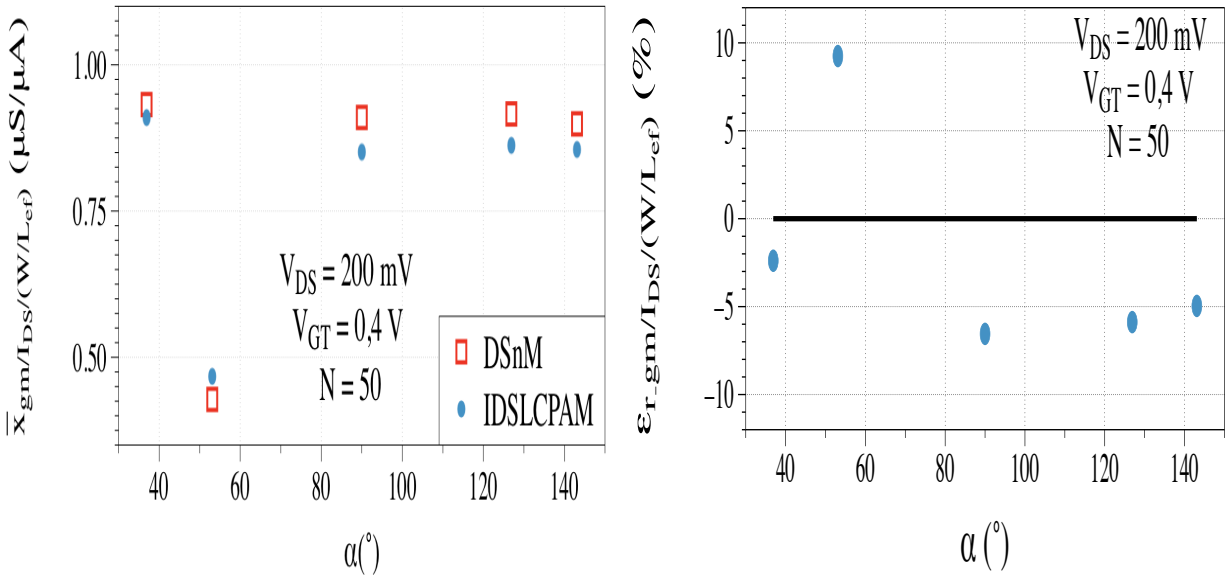


Figura 5.9 - Gráfico das médias de gm/I_{DS} dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de gm/I_{DS} $[\varepsilon_{d_gm/I_{DS}}]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 200 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se as Figuras 5.9.a e 5.9.b, verifica-se que para o ângulo α igual a 36,9˚ o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de gm/I_{DS} extraídos dos DSnM (-2,39%). Para os ângulos α iguais a 53,1˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚ verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, também consegue predizer o comportamento do valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraído dos DSnM (+9,25% para o ângulo α igual a 53,1˚, -6,55% para o ângulo α igual a 90˚ e -5,88% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -4,96% para o ângulo α igual a 143,1˚).

Por conseguinte, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de gm/I_{DS} dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados.

A Tabela 5.5 apresenta os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de gm/I_{DS} que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.5 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de gm/I_{DS} que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0.368
53,1°	0.613
90°	0.099
126,9°	0.059
143,1°	0.114

Ao examinar a Tabela 5.5, observa-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em 100%, o comportamento dos valores médios de gm/I_{DS} dos DSnM.

A Figura 5.10 apresenta o gráfico das médias de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{V_{EA}/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.10.a) e o gráfico de ε_d de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 5.10.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM. Neste caso, os valores médios de V_{TH} extraídos dos dispositivos foram da ordem de 0,3 V.

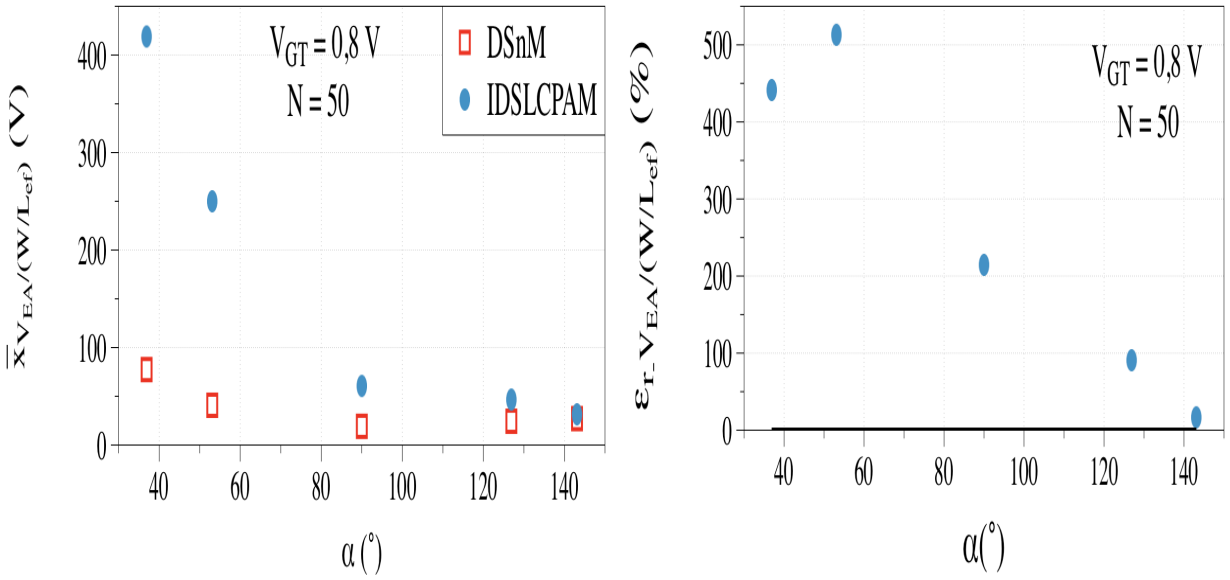


Figura 5.10 - Gráfico das médias de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_V_{EA}/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, com uma polarização de V_{GT} igual a 0,8 V, considerando-se um N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Ao analisar as Figuras 5.10.a e 5.10.b, pode-se observar que para todos os ângulos α estudados, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não consegue predizer o comportamento dos valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (+441,2% para o ângulo α igual a 36,9˚, +513,19% para o ângulo α igual a 53,1˚, +214,42% para o ângulo α igual a 90˚, +90,95% para o ângulo α igual a 126,9˚ e +16,83% para o ângulo α igual a 143,1˚). Isto pode ser justificado pois o modelo IDSLCPAM, não leva em consideração os efeitos do alto campo elétrico longitudinal (ionização por impacto, etc). A modelagem desses efeitos do campo elétrico longitudinal serão levados em consideração em trabalhos futuros.

Portanto, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer o comportamento dos valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados.

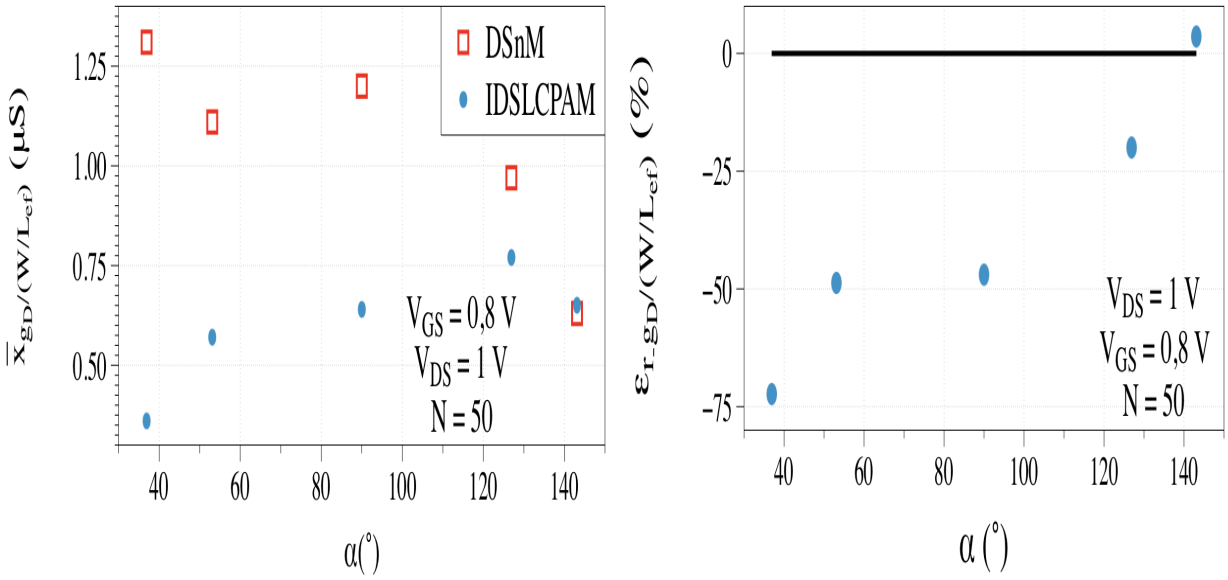
A Tabela 5.6 mostra os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $I_{DSsat}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.6 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0
53,1°	0
90°	0
126,9°	0.640
143,1°	0.389

Ao examinar a Tabela 5.6, verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em até 20% o comportamento dos valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM. Isto pode ser justificado porque o modelo IDSLCPAM, não considera os efeitos do alto campo elétrico longitudinal (ionização por impacto, etc).

A Figura 5.11 apresenta o gráfico das médias de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\bar{x}_{g_D/\left(L_{ef}/W\right)}\right]$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.11.a) e o gráfico de ε_d de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (Figura 5.11.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

Figura 5.11 - Gráfico das médias de $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $g_D/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_g_D/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Observando-se as Figuras 5.11.a e 5.11.b, verifica-se que para o ângulo α igual a 143,1˚ o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ extraídos dos DSnM (+3,59%). Por outro lado, constata-se que para a faixa de ângulos α que vai de 36,9˚ a 126,9˚, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não consegue predizer o comportamento dos valores médios de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (-72,3% para o ângulo α igual a 36,9˚, -48,7% para o ângulo α igual a 53,1˚, -47% para o ângulo α igual a 90˚ e -20% para o ângulo α igual a 126,9˚). Isto pode ser justificado da mesma forma que foi justificado na análise feita para o parâmetro $V_{EA}/(W/L_{ef})$ e assim, o modelamento dos efeitos do campo elétrico longitudinal serão também levados em consideração em trabalhos futuros.

Assim, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM, somente para o ângulo α igual a 143,1˚.

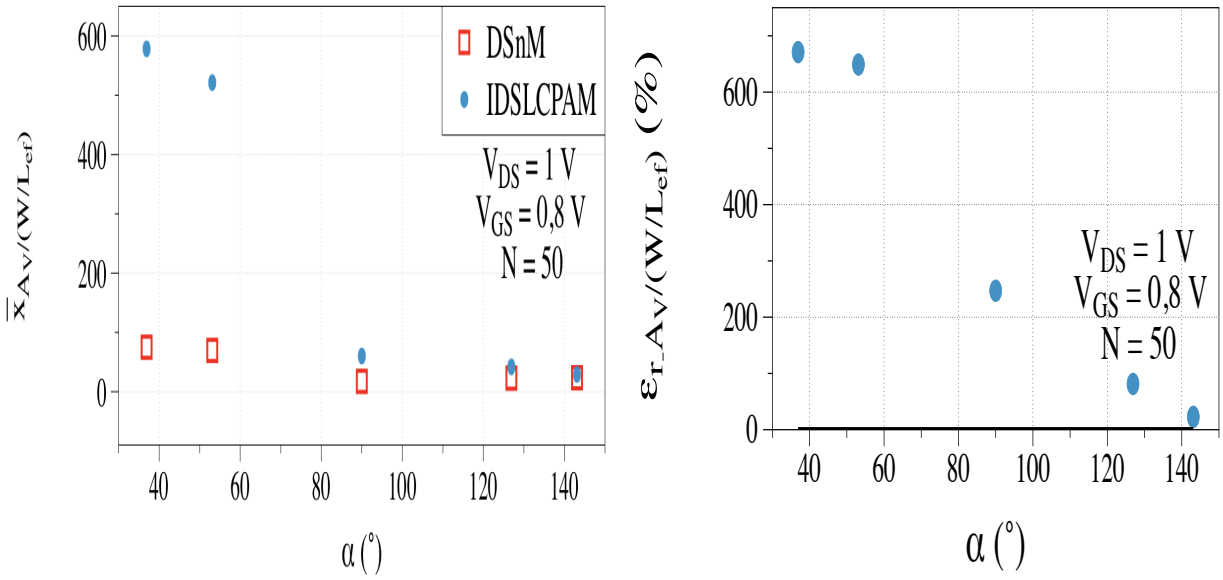
A Tabela 5.7 apresenta os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.7 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0
53,1°	0.014
90°	0.001
126,9°	0.233
143,1°	0.882

Ao examinar a Tabela 5.7, verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em até 20% o comportamento dos valores médios de $g_D/(L_{ef}/W)$ dos DSnM. Isto pode ser justificado da mesma maneira que foi justificado na análise feita para o parâmetro $V_{EA}/(W/L_{ef})$.

A Figura 5.12 apresenta o gráfico das médias de $A_V/(W/L_{ef})$ $\left[\bar{x}_{A_V/\left(W/L_{ef}\right)}\right]$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.12.a) e o gráfico de ε_d de $A_V/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_A_V/(W/L_{ef})}\right]$ (Figura 5.12.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

Figura 5.12 - Gráfico das médias de $A_V/(W/L_{ef})$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $A_V/(W/L_{ef})$ $\left[\varepsilon_{d_A_V/(W/L_{ef})}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,8 V e V_{DS} igual a 1 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Ao analisar as Figuras 5.12.a e 5.12.b, pode-se verificar que para todos os ângulos α estudados, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer o comportamento dos valores médios de $A_V/(W/L_{ef})$ extraídos dos DSnM (+671% para o ângulo α igual a 36,9˚, +649% para o ângulo α igual a 53,1˚, +247% para o ângulo α igual a 90˚, +81,3% para o ângulo α igual a 126,9˚ e +22,8% para o ângulo α igual a 143,1˚). Isto pode ser justificado da mesma forma que foi apresentado para o caso do parâmetro V_{EA}, pois A_V é diretamente proporcional a V_{EA}. Desta forma, o modelamento dos efeitos do campo elétrico longitudinal serão também levados em consideração em trabalhos futuros.

Por conseguinte, pode-se concluir que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer o comportamento dos valores médios de $A_V/(W/L_{ef})$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados.

A Tabela 5.8 apresenta os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $A_V/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.8 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $A_V/(W/L_{ef})$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0
53,1°	0.014
90°	0
126,9°	0.118
143,1°	0.554

Ao analisar a Tabela 5.8, observa-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em até 20% o comportamento dos valores médios de $V_{EA}/(W/L_{ef})$ dos DSnM. Isto pode ser justificado da mesma maneira que foi realizado para a análise do parâmetro $V_{EA}/(W/L_{ef})$.

A Figura 5.13 apresenta o gráfico das médias de SS $[\bar{x}_{SS}]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.13.a) e o gráfico de ε_d de SS $[\varepsilon_{d_SS}]$ (Figura 5.13.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

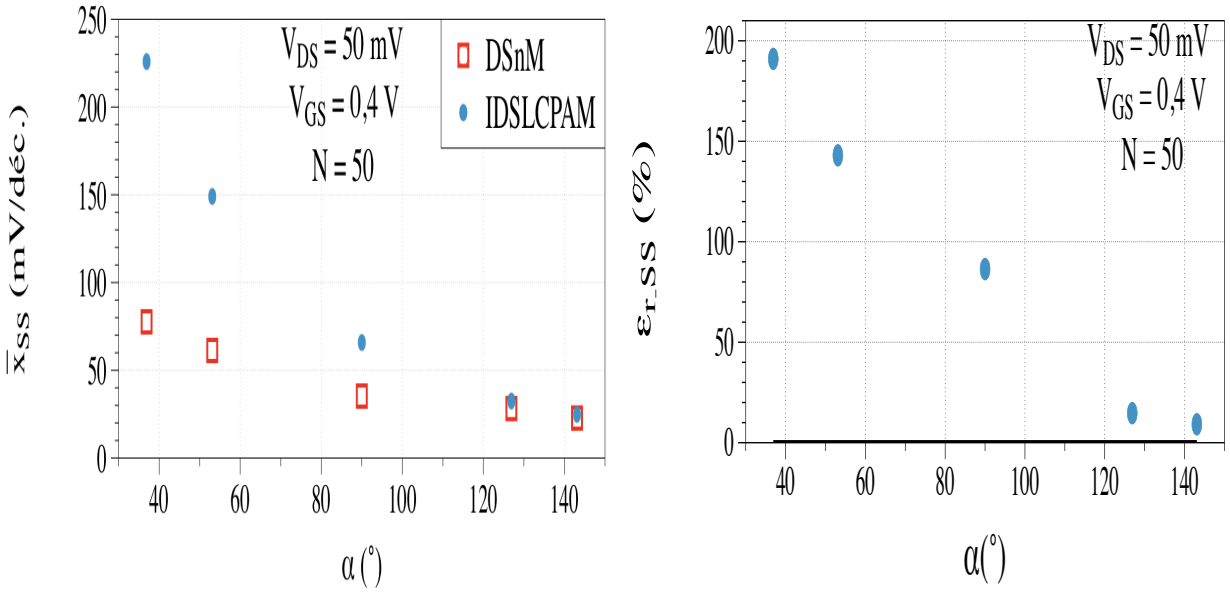


Figura 5.13- Gráfico das médias de SS dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de SS $[\varepsilon_{d_SS}]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V e V_{DS} igual a 50 mV, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Observando-se as Figuras 5.13.a e 5.13.b, observa-se que para o ângulo α igual a 143,1˚ o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer os valores médios de SS extraídos dos DSnM (+9,17%). Para os ângulos α iguais a 36,9˚, 53,1˚, 90˚ e 126,9˚ verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não é capaz de predizer o comportamento do valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraído dos DSnM (+191% para o ângulo α igual a 36,9˚, +143% para o ângulo α igual a 53,1˚, +86,4% para o ângulo α igual a 90˚ e +14,7% para o ângulo α igual a 126,9˚).

Dessa forma, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, é capaz de predizer somente o comportamento dos valores médios de SS dos DSnM, para o ângulo α igual a 143,1˚. Isso pode ser justificado, pois nessa região de operação do SOI nMOSFET, o comportamento da corrente de dreno é fundamentalmente por difusão e não por deriva [1]. A modelagem dessa região de operação será levada em conta em trabalhos futuros.

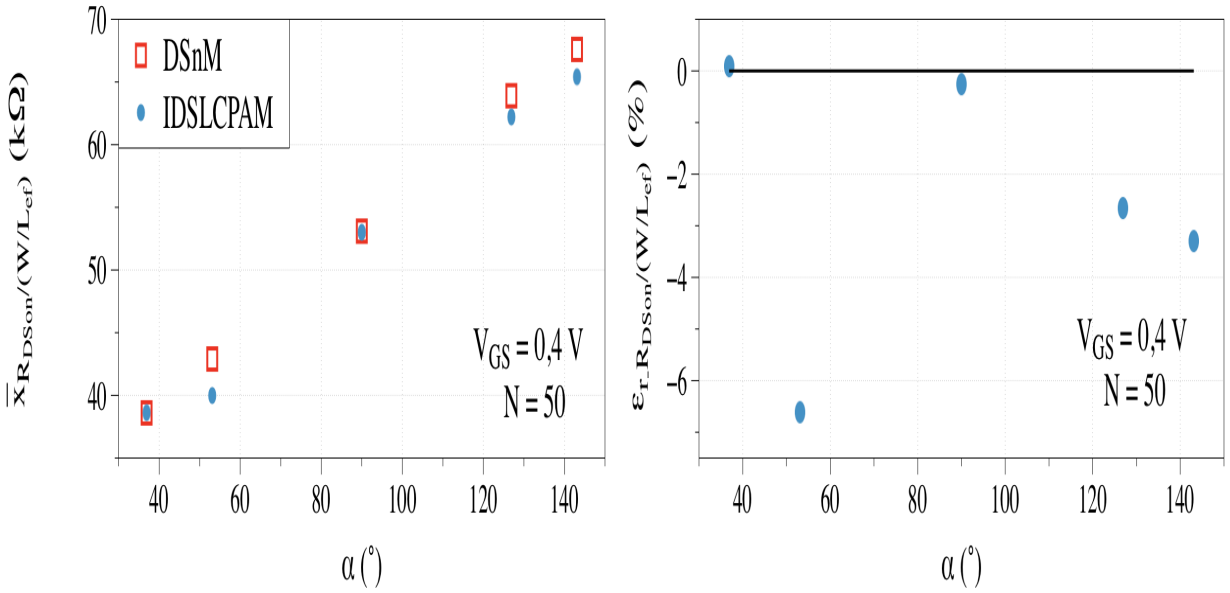
A Tabela 5.9 mostra os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de SS que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.9 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de SS que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	**p**
36,9°	0
53,1°	0
90°	0
126,9°	0.146
143,1°	0.097

Observando-se a Tabela 5.9, verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em até 20% o comportamento dos valores médios de SS dos DSnM. Isto pode ser justificado pois nessa região de operação do SOI nMOSFET, o comportamento da corrente de dreno é fundamentalmente por difusão e não por deriva [1].

A Figura 5.14 apresenta o gráfico das médias de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\bar{x}_{R_{DSon}/\left(L_{ef}/W\right)}\right]$ dos DSnM e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (Figura 5.14.a) e o gráfico de ε_d de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (Figura 5.14.b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.



(a) (b)

Figura 5.14 - Gráfico das médias de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM e e dos valores obtidos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, para predizer o comportamento dos DSnM (a) e o gráfico de ε_d de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ $\left[\varepsilon_{d_R_{DSon}/(L_{ef}/W)}\right]$ (b), ambos em função do ângulo α dos DSnM, considerando-se uma polarização V_{GS} igual a 0,4 V, com N igual a 50, que foi usado para a determinação do L_{ef} dos DSnM.

Analisando-se as Figuras 5.14.a e 5.14.b, verifica-se que para os ângulos α iguais a 36,9˚, 90˚, 126,9˚ e 143,1˚, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue apresentar um comportamento praticamente similar aos valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ extraídos dos DSnM (+0,09% para o ângulo α igual a 36,9˚, -0,26% para o ângulo α igual a 90˚, -2,66% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -3,3% para o ângulo α igual a 143,1˚). Para o ângulo α igual a 53,1˚ verifica-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, também é capaz de predizer o comportamento do valor médio de $gm_{max}/(W/L_{ef})$ extraído dos DSnM (-6,61%).

Assim, conclui-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer o comportamento dos valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM, para toda a faixa de valores de ângulos α estudados, com erro máximo inferior a 10%.

A Tabela 5.10 apresenta os valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student*, entre os valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.10 - Valores de p resultante da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ que foram extraídos dos DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

α	p
36,9°	0.991
53,1°	0.234
90°	0.229
126,9°	0.644
143,1°	0.5

Ao examinar a Tabela 5.10, observa-se que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, consegue predizer em 100% o comportamento dos valores médios de $R_{DSon}/(L_{ef}/W)$ dos DSnM.

A Tabela 5.11 apresenta um resumo dos resultados dos ε_d dos diferentes parâmetros elétricos estudados (com a exceção dos parâmetros V_{EA}, g_D, A_V e SS, pois que já era sabido que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não iria predizer o valor médio destes parâmetros dos DSnM) oriundos da diferença entre os valores médios extraídos experimentalmente dos DSnM e os valores médios extraídos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, assim como o valor de p obtido através da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios dos parâmetros de DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

Tabela 5.11 - Resumo dos resultados dos ε_d dos diferentes parâmetros elétricos estudados (com a exceção dos parâmetros V_{EA}, g_D, A_V e SS pois que já era sabido que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, não iria predizer o valor médio destes parâmetros dos DSnM) oriundos da diferença entre os valores médios extraídos experimentalmente dos DSnM e os valores médios extraídos do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, assim como o valor de p obtido através da aplicação do teste *t-Student* entre os valores médios dos parâmetros de DSnM e do modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM.

	α									
	36,9°		53,1°		90°		126,9°		143,1°	
	[ε_d (%)]	p	[ε_d (%)]	p	[ε_d (%)]	p	[ε_d (%)]	p	[ε_d (%)]	p
$(gm_{max})/(W/L_{ef})$	(-8.42)	0	(+3.59%)	0.065	(+1.15%)	0.627	(+3.77%)	0.118	(+3.2%)	0.131
$(I_{DSsat})/(W/Lef)$	(-7.38%)	0.007	(+9.04%)	0.077	(+8.54%)	0.056	(+8.05%)	0.029	(+1.15%)	0.713
$(I_{DSon})/(W/Lef)$	(-4.19%)	0.011	(+4.31%)	0.067	(+0.05%)	0.988	(-2.52%)	0.063	(+2.65%)	0.359
gm/I_{DS}	(-2.39%)	0.368	(+9.25%)	0.613	(-6.55%)	0.099	(-5.88%)	0.059	(-4.96%)	0.114
$(f_T)/(W/Lef)$	(-8.42)	0	(+3.59%)	0.065	(+1.15%)	0.627	(+3.77)	0.118	(+3.2%)	0.131
$(R_{DSon})/(Lef/W)$	(+0.09)	0.991	(-6.61%)	0.234	(-0.26%)	0.229	(-2.66%)	0.644	(-3.3%)	0.5
Erro Máximo	(-8.42)	-	(+9.25%)	-	(+8.54%)	-	(+8.05%)	-	(-4.96%)	-

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 5.11, observa-se que os para todos os ângulos α estudados, o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais de CSnM, são capazes de predizer os valores médios dos parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante (o máximo valor de ε_d é igual a -8,42% para o ângulo α igual a 36,9°, +9,25% para o ângulo α igual a 53,1°, +8,54% para o ângulo α igual a 90°, +8,05% para o ângulo α igual a 126,9° e -4,96% para o ângulo α igual a 143,1°).

Verifica-se também que para uma faixa de ângulos α que vai de 53,1° a até 143,1°, através da aplicação do teste *t-Student*, é possível afirmar que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, apresenta estatisticamente a mesma média apresentada dos parâmetros elétricos extraídos dos DSnM. Todavia, para o ângulo α igual a 36,9°, somente para 2 parâmetros elétricos (gm/I_{DS} e R_{DSon}), os valores de p foram superiores ao valor do nível de significância considerado.

Dessa forma, o modelo proposto, IDSLCPAM, é uma possível ferramenta para predizer o comportamento da média dos parâmetros dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante, através dos dados experimentais extraídos dos SOI nMOSFETs Convencionais equivalentes.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Inicialmente foi desenvolvido e qualificado um novo modelo para a determinação do comprimento efetivo de canal dos DSnM, levando-se em conta que esse dispositivo pode ser representado através da associação paralela de SOI nMOSFETs com a mesma largura de canal, porém com diferentes comprimentos de canal (PAMDLE). Adicionalmente, o novo modelo para a corrente de dreno (I_{DS}) do SOI nMOSFET do tipo Diamante (que foi denominado de IDSLCPAM) foi também comparado com o modelo de 1ª ordem proposto inicialmente pela referência [11]. Em função dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o modelo IDSLCPAM é validado para todos os ângulos α analisados com um erro máximo inferior a 10% para a maioria dos parâmetros e somente um único caso com erro máximo inferior a 15% (maior erro encontrado ocorre para o ângulo α igual a 53,1˚).

Posteriormente foi elaborado o estudo do casamento entre dispositivos dos parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos Convencionais equivalentes. Este estudo foi realizado através da análise comparativa experimental dos erros relativos existentes entre os parâmetros elétricos dos DSnM e dos CSnM equivalentes (com mesma A_G e mesma condições de polarização). Observou-se que os DSnM com ângulo α igual a 90˚ são capazes de produzir sempre os melhores casamentos entre dispositivos (em média ε_r é aproximadamente igual a -31,5%) em relação aos CSnM equivalentes. Além disso, pode-se observar que os DSnM com ângulos α iguais a 53,1˚, 126,9˚ e 143,1˚ também apresentaram excelentes resultados quanto ao casamento entre dispositivos em relação aqueles obtidos aos dos CSnM equivalentes. Verifica-se que os DSnM, com ângulos α igual a 53,1˚, são capazes de produzir um casamento entre dispositivos 30,1% melhor que aqueles estudados dos CSnM equivalentes. Para os DSnM, com ângulos α igual a 126,9˚, foi observado um melhor casamento entre dispositivos da ordem de 14,9% em relação aos CSnM equivalentes. Para os DSnM com ângulos α igual a 143,1˚, foi observado um melhor casamento entre dispositivos da ordem de 16,9% em relação aos CSnM equivalentes. Portanto, pode-se concluir que embora a geometria de porta hexagonal apresente regiões triangulares, verifica-se que isto não prejudica o casamento entre dispositivos dos DSnM, para ângulos α maiores que 53,1˚.

Através do estudo da predição dos valores médios dos DSnM, utilizando-se o novo modelo da corrente de dreno (IDSLCPAM), foi observado para todos os ângulos α estudados, que o modelo IDSLCPAM, que usa os dados experimentais dos CSnM, são capazes de predizer os valores médios dos parâmetros elétricos extraídos dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante (com um erro máximo de aproximadamente igual a -8,42% para o ângulo α igual a

36,9˚, +9,25% para o ângulo α igual a 53,1˚, +8,54% para o ângulo α igual a 90˚, +8,05% para o ângulo α igual a 126,9˚ e -4,96% para o ângulo α igual a 143,1˚).

Uma nova metodologia de qualificação do modelo IDSLCPAM foi proposta utilizando-se ferramentas estatísticas (teste *t-Student*) e verificou-se que essa inovadora metodologia é capaz de validar o modelo IDSLCPAM (para valores médios) em 100% dos casos dos DSnM com ângulos α iguais a 53,1˚ a até 143,1˚.

Como trabalhos futuros decorrentes desse trabalho de dissertação de mestrado, pode-se sugerir:

1. Melhoria do modelo IDSLCPAM para que seja possível predizer o comportamento dos parâmetros SS, V_{EA}, g_D e A_V dos SOI nMOFETs do tipo Diamante.
2. Repetir o mesmo estudo do casamento entre dispositivos, fixando-se a mesma corrente de dreno dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante e dos seus equivalentes Convencionais.
3. Estudo quantitativo da separação dos efeitos LCE e PAMDLE em função dos ângulos α dos SOI nMOSFETs do tipo Diamante.

7 REFERÊNCIAS

[1] COLINGE, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI**. 3º ed. Boston:Kluwer Academic Publishers, 2004.

[2] COLINGE, J. P. **FinFETs and Other MOSFET Multi-Gate Transistors**, Springer (2008).

[3] CIRNE, K. H.; GIMENEZ, S. P. **Estudo da Tensão Early em Função do Comprimento de Canal de Transistores de Porta em Anel Circular**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2007, São Paulo. Simpósio de Iniciação Científica da FATEC, 1518-9082. São Paulo: FATEC, 2007. v. 1. p. 86.

[4] SAPAGE, L. S.; GIMENEZ, S. P. **Estudo da Tensão Early em Função da Largura de Canal de Transistores de Porta em Anel Circular**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2007, São Paulo. Simpósio de Iniciação Científica da FATEC. São Paulo, ISSN 1518-9082: FATEC, 2007. v. 1. p. 87.

[5] GIMENEZ, S. P. ; NOGUEIRA, S. T. **Caracterização Elétrica do Transistor Circular SOI MOSFET**. 13˚ SIICUSP, 2005, São Carlos, SP. 13˚ SIICUSP, 2005. v. 1.

[6] GIMENEZ, S. P. **Wave Transistor (S geometric shape): Novo Estrutrura de Leiaute que visa obter alta integracao, casamento entre dispositivos e reduzir os efeitos dos Efeitos das Descargas Eletrostáticas (ESD)**. Data de Depósito: 07/08/2008; PI0802634-3 A2; Data da Publicação: 30/03/2010; (RPI 2047). 2008, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: PI08026343, data de depósito: 07/08/2008, título: "Wave Transistor (S geometric shape): Novo Estrutrura de Leiaute que visa obter alta integracao, casamento entre dispositivos e reduzir os efeitos dos Efeitos das Descargas Eletrostáticas (ESD). Data de Depósito: 07/08/2008; PI0802634-3 A2; Data da Publicação: 30/03/2010; (RPI 2047)." , Instituição de registro:INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Instituição(ões) financiadora(s): Centro Universitário da FEI.

[7] GIMENEZ, S. P. **The Wave SOI MOSFET: A New Accuracy Transistor Layout to Improve Drain Current and Reduce Die Area for Current Drivers Applications**. 215th ECS Meeting, ECS Transactions, 2009, San Francisco, CA. ECS Transactions. Washington: Electrochemical Society, ECS Transactions, 2009. v. 19. p. 153-158.

[8] SOUZA, R. N. ; GIMENEZ, S. P. **Experimental Comparative Study Between the Wave Layout Style and its Conventional Counterpart for Implementation of Analog Integrated Circuits**. SBMicro 2012 - 27th SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES, 2012, Brasília. SBMicro 2012 - 27th SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES. Brasília: SBC, 2012. v. 1. p. 1-1.

[9] FILHO, J. A. L. ; GIMENEZ, S. P. **A Novel Overlapping Circular-Gate Transistor (O-CGT) and Its Application to Analog Design**. EAMTA 09, 2009, Barilochi. EAMTA 09, 2009. v. 1.

[10] GIMENEZ, S. P. ; BELLODI, M. **MOSFET do tipo Diamante**. Data do Depósito: 07/08/2008; PI0802745-5 A2; Data da Publicação: 23/03/2010; (RPI 2046).. 2008, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: PI08027455, data de depósito: 07/08/2008, título: "MOSFET do tipo Diamante. Data do Depósito: 07/08/2008; PI0802745-5 A2; Data da Publicação: 23/03/2010; (RPI 2046)." . Instituição(ões) financiadora(s): Centro Universitário da FEI.

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

[12] CLASER, R.; GIMENEZ, S. P. **Implementação de Leiautes de MOSFETs Convencional e Diamante Utilizando o Software IC Station da Mentor Graphics**. 17º. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP), 2009, São Carlos. 17º. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP), 2009. v. 1.

[13] ALATI, D. M. ; GIMENEZ, S. P. **Estudo Comparativo entre o SOI nMOSFET Diamante e Convencional, Utilizando-se o Simulador Sentaurus Device da Synopsys**. 17º. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP), 2009, São Carlos. 17º. Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo (SIICUSP), 2009. v. 11.

[14] ALATI, D. M. ; GIMENEZ, S. P. **Comparative Experimental Study Between Diamond And Conventional MOSFET**. 218th ECS Meeting, 2010, Las Vegas, NV. E14 ~ E22 - SiGe, Ge, and Related Compounds: Materials, Processing, and Devices 4.

[15] GIMENEZ, S. P. ; BELLODI, M. **Diamond SOI MOSFET: A New Drain and Source/Channel Interface Layout to Improve Drain Current**. EURO SOI 2009, 2009,

Gotemburgo. Fifth WorkShop of the Tematic Network on Silicon on Insulator Technology Devices and Circuits. Gotemburo, Suecia: NanoSIL Network of Excellence, 2009. v. 1. p. 87-88.

[16] BELLODI, M. ; GIMENEZ, S. P. **Drain Leakage Current Evaluation in the Diamond SOI nMOSFET at High Temperatures**. 216th ECS Meeting, ECS Transactions, 2009, Viena, Austria. E1 - Analytical Techniques for Semiconductor Materials and Process Characterization 6. Pennington, New Jersey: Electrochemical Society, ECS Transactions, ISSN 1938-5862 (print) 1938-6737 (online), 2009. v. 1. p. 1-1.

[17] ALATI, D. M. ; GIMENEZ, S. P. ; SILVEIRA, M. A. G. ; SEIXAS, L. E. ; MELO, W. **Experimental Comparative Study of the X-Ray Radiation Effects Between the Threshold Voltages of the Diamond and Conventional Layout Styles**. EURO SOI 2012, 2012, Montpellier, França. EUROSOI 2012. Montpellier: EUROSOI, 2012. v. 1. p. 53-54.

[18] GIMENEZ, S. P. ; ALATI, D. M. ; SILVEIRA, M. A. G. ; MELO, W. ; SEIXAS, L. E.; MEDINA, N. H.; ADDED, N. ; TABACNICKS, M. **Improving The Protons Radiation- − Robustness Of Integrated Circuits By Using The Diamond Layout Style**. RADECS 2012, 2012, Biarritz. RADECS 2012, 2012. v. 1.

[19] PERUZZI, V. V. ; RENAUX, C. ; FLANDRE, D. ; GIMENEZ, S. P. **Experimental Validation of the Drain Current Analytical Model of the Fully Depleted Diamond SOI nMOSFETs by Using T-test Statistical Evaluation**. SBMicro 2012 - 27th SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES, 2012, Brasília. SBMicro 2012 - 27th SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES. Brasília: SBC, 2012. v. 1. p. 1-8.

[20] LILIENFIELD, J.E., U.S. patents 1,745,175 (filed 1926, issued 1930), 1,877,140 (filed 1928, issued 1932), and 1,900,018 (filed 1928, issued 1933).

[21] MARTINO , J. A. ; PAVANELO , M. A. ; VERDONCK , P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**, Pioneira Thomson Learning, São Paulo - São Paulo, Brasil, 2003.

[22] COLINGE, J. P. **Physics of semiconductor devices**. *Kluwer Academic Publishers.*

[23].STANLEY, T. D. **The State-of-the-art in SOI Technology**. IEEE Trans. On Nuclear Science, 1988. v. 35, p. 1346 - 1349.

[24] KISTLER, N.; WOO, J. **Detailed characterization and analysis of the breakdown voltage in fully depleted SOI n-MOSFET's**, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, n. 7, p. 1217-1221, 1994.

[25] YOUNG, K. K. **Short-channel effect in fully depleted SOI MOSFETs**, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 36, n. 2, p. 399 - 402, 1989.

[26] COLINGE, J. P. **Subthreshold Slope of Thin-film SOI MOSFETs**. IEEE Electron Devices Letters, 1986. v. edl-7, n. 4.

[27] SHERONY, M. J., et al. **SOI MOSFET Effective Channel Mobility**. IEEE Transactions on Electron Devices, 1994. v. 41, n. 4.

[28] COLINGE, J. P. **Thin-Film SOI Technology: The Solution to Many Submicron CMOS Problems**. Electron Devices Meeting, 1989.

[29] COLINGE, J. P . **Multi-gate SOI MOSFET s. Microelectronic Engineering 84** (2007) 2071-2076.

[30] SZE, S.M. **Physics of Semiconductor Devices.** 2nd. Ed. NeW York: John Wiley, c1981.

[31] RAVAZI, B. **Design of Analog CMOS Integrated Circuits**, Mc Graw Hill, New York, 2001.

[32] JOHNS, D. ; MARTIN, K.W. ; **Analog Integrated Circuit Design**, Wiley, 1997.

[33] SEDRA, Adel S. ; SMITH, Kenneth C. **Microelectronic circuits**. 5th. ed. New York; Oxford: Oxford University, 2004.

[34] BOYLESTAD, R. L. ; NASHLSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2012.

[35] CIRNE, K. H. **Estudo e fabricação de MOSFETs robustos à radiação para aplicações espaciais de circuitos integrados.** 2011. 229 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2011.

[36] FINO, L. N. S. **Estudo Experimental do OCTO SOI MOSFET para a implementação de circuitos integrados analógicos e digitais.** 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrcia) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.

[37] MORETTIN, P. A. ; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2004.

[38] LARSON, R. ; FARBER, B. **Estatística Aplicada**, Pearson Prentice Hall, 4 ed, São Paulo, 2010.

[39] MAGALHAES, M. N. ; LIMA, A.C.P. **Noções de Probabilidade e Estatística**, EDUSP (Editora da Universidade de São Paulo), 6 ed., São Paulo, 2005.

[40] ESPINOSA, M. M. ; JÚNIOR, C. C. ; LAHR, F. A. R. **Métodos Paramétricos e não-paramétricos para determinar o valor característico em resultados de ensaio de madeira**, n.66, p. 76-83, Scientia Forestalis, 2004.

[41] STEPHENS, M. A. **Asymptotic results for goodness of fit statistics with unkown parameters**. Annals of statistics, v.4, p 357-369, 1976.

[42] ANDERSON, T. W. ; DARLING, D. A. **Asymptotic Theory of Certain " Goodness of Fit" Criteria Based on Stochastic Process**, 1952.

[43] *Software* MINITAB 16, versão: Minitab® 16.2.2, Minitab Inc. All rights reserved, 2010.

[44] MOORE, D. S. **The Basic Practice of Statistics**, Freeman and Company, 18 ed., New York, 1998.

[45] *Software* Onde Rulers, versão: Onde Rulers v1.11 Build 128, Ondesoft Computing Inc. All rights reserved, 2010.

[46] PELGROM, M. J. M. ; DUINMAIJER, C. J. ; WELBERS, A. P. G. **Matching Properties of MOS Transistors**, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 24, no. 5, october 1989.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÃO NO SIMPÓSIO DE PESQUISA DO GRANDE ABC 2011

Neste apêndice encontra-se o artigo aceito para apresentação no SPGABC 2011 – São Caetano do Sul, Brasil. 1˚ Simpósio de Pesquisa do Grande ABC 2011.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA VARIABILIDADE ELÉTRICA ENTRE MOSFETS DIAMANTE E CONVENCIONAL

Centro Universitário da FEI
www.fei.edu.br

Vinicius Vono Peruzzi – Engenharia Elétrica – vvperuzzi@gmail.com
Salvador Pinillos Gimenez – Engenharia Elétrica

SIMPÓSIO DE PESQUISA DO GRANDE ABC
Área do Conhecimento do Projeto

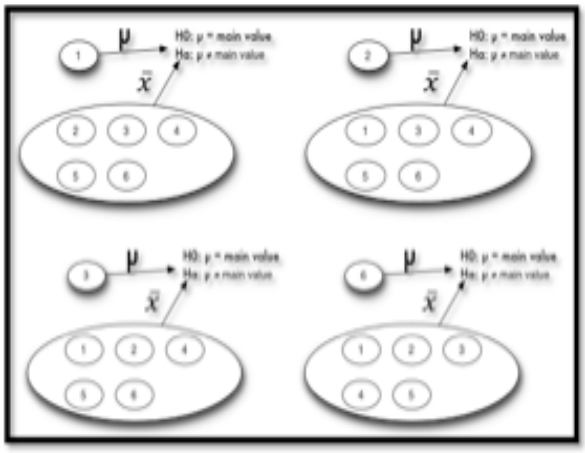
Introdução: O advento da topologia diamante proporcionou um grande aumento no que se refere ao desempenho em comparação aos transistores de topologia convencional, permitindo uma série de vantagens tais quais a redução de área efetiva usada.

Objetivo: Mensurar estatisticamente o quanto os transistores diamante apresentam repetibilidade quanto ao seu desempenho em comparação ao transistor convencional, assim como investigar qual deles apresentam melhores resultados.

Método: Grupo de seis chips todos manufaturados através da tecnologia SOI, valendo-se dos transistores que possuem ângulo α no dreno e na fonte para a formação dos transistores diamante respectivamente de 53,1° e 126,9°. Os parâmetros estudados foram: Tensão de limiar (V_{TH}), corrente de saturação (I_{DSat}) e transcondutância (g_m). A fim de reduzir ao máximo as disfunções de segunda ordem e manter uma padronização quanto ao funcionamento de cada transistor, manteve-se as mesmas características de polarização para a extração das curvas I_{DS} x V_{DS} (valor de V_{GT} variando de 400mV a 800mV) e I_{DS} x V_{GT} (valores de V_{DS} entre 50mV para a extração de V_{TH} e g_m e 200mV para a extração de g_m) Utilizou-se o modelo t-Student com intervalos de confiança de 95% e 99%.

Resultados: Dos três parâmetros analisados, a tensão de limiar foi o parâmetro que apresentou menores resultados quanto à repetibilidade; e apresentando a mesma tendência para os valores de α de 53,1° e 126,9°. Quanto à transcondutância e à corrente de saturação os resultados encontram-se entre 80% à 100% na faixa de repetibilidade. Os transistores convencionais apresentaram pequena vantagem quando comparados aos transistores de α igual a 53,1°, porém esta vantagem não se manteve quando estudados comparativamente aos transistores de α igual a 126,9°.

Diagrama de análise para tomada de decisão valendo-se do teste t-Student.



Dados concernentes aos transistores convencional e diamante para um intervalo de confiança de 95% para a tensão de limiar com V_{DS} valendo 50mV.

a) para α igual a 53,1° e (b) para α igual a 126,9°

Dados concernentes aos transistores convencional e diamante para um intervalo de confiança de 95% para a transcondutância com V_{DS} valendo 200mV.

a) para α igual a 53,1° e (b) para α igual a 126,9°

V_{TH} (tensão de limiar)

V_{TH} | -2.776<t<2.776	Yes	No	% of repeatability	V_{TH} | -4.604<t<4.604	Yes	No	% of repeatability
Conv. 53.1°	4	2	66.67%	Conv. 53.1°	5	1	83.33%
Dia. 53.1°	3	3	50.00%	Dia. 53.1°	6	0	100.00%
Conv. 126.9°	3	3	50.00%	Conv. 126.9°	5	1	83.33%
Dia. 126.9°	4	2	66.67%	Dia. 126.9°	5	1	83.33%

g_m (transcondutância) para V_{DS} igual a 50mV

V_{TH} | -2.776<t<2.776	Yes	No	% of repeatability	V_{TH} | -4.604<t<4.604	Yes	No	% of repeatability
Conv. 53.1°	6	0	100.00%	Conv. 53.1°	6	0	100.00%
Dia. 53.1°	5	1	83.33%	Dia. 53.1°	5	1	83.33%
Conv. 126.9°	5	1	83.33%	Conv. 126.9°	6	0	100.00%
Dia. 126.9°	5	1	83.33%	Dia. 126.9°	6	0	100.00%

g_m (transcondutância) para V_{DS} igual a 200mV

V_{TH} | -2.776<t<2.776	Yes	No	% of repeatability	V_{TH} | -4.604<t<4.604	Yes	No	% of repeatability
Conv. 53.1°	6	0	100.00%	Conv. 53.1°	6	0	100.00%
Dia. 53.1°	5	1	83.33%	Dia. 53.1°	5	1	83.33%
Conv. 126.9°	5	1	83.33%	Conv. 126.9°	6	0	100.00%
Dia. 126.9°	5	1	83.33%	Dia. 126.9°	5	1	83.33%

I_{DSat} (corrente de saturação) para V_{GT} igual a 400mV

V_{TH} | -2.776<t<2.776	Yes	No	% of repeatability	V_{TH} | -4.604<t<4.604	Yes	No	% of repeatability
Conv. 53.1°	6	0	100.00%	Conv. 53.1°	6	0	100.00%
Dia. 53.1°	5	1	83.33%	Dia. 53.1°	6	0	100.00%
Conv. 126.9°	6	0	100.00%	Conv. 126.9°	6	0	100.00%
Dia. 126.9°	6	0	100.00%	Dia. 126.9°	6	0	100.00%

I_{DSat} (corrente de saturação) para V_{GT} igual a 800mV

V_{TH} | -2.776<t<2.776	Yes	No	% of repeatability	V_{TH} | -4.604<t<4.604	Yes	No	% of repeatability
Conv. 53.1°	6	0	100.00%	Conv. 53.1°	6	0	100.00%
Dia. 53.1°	5	1	83.33%	Dia. 53.1°	6	0	100.00%
Conv. 126.9°	6	0	100.00%	Conv. 126.9°	6	0	100.00%
Dia. 126.9°	6	0	100.00%	Dia. 126.9°	6	0	100.00%

Conclusões: Os níveis de repetibilidade tanto para os transistores de topologia convencional quanto para os de topologia do diamante apresentaram-se em níveis elevados, sendo que os transistores convencionais apresentam vantagem quando o valor de α vale 53,1°; entretanto, quando este α possui valor igual à 126,9°, esta diferença entre os transistores convencional e diamante é mitigada.

APÊNDICE B – PUBLICAÇÃO NO SBMICRO 2012

Neste apêndice encontra-se o artigo aceito para apresentação no SBMicro 2012 – Brasília, Brasil. 27th Symposium on Microelectronics Technology and Devices.

Experimental Validation of the Drain Current Analytical Model of the Partially Depleted Diamond SOI nMOSFETs by Using T-test Statistical Evaluation

V.V. Peruzzi[a], C. Renaux[b], D. Flandre[b] and S. P. Gimenez[a]

[a] Department of Electrical Engineering, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brazil
[b] ICTEAM/ELEN, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium

The focus of this work is to validate the drain current analytical model of the Partially Depleted Diamond SOI nMOSFETs, by applying the t-test statistical evaluation with experimental data of the six different samples of integrated circuits containing different Diamond SOI MOSFETs and Conventional ones counterparts. Two parameters are considered in this work: maximum transconductance and saturation drain current. We observe that, for the most cases (worst case is around 87% of the repeatability for the saturation drain current), the Diamond drain current analytical model is capable to reproduce a similar statistical behavior than the one observed for the conventional SOI nMOSFET counterpart, considering the same bias conditions and SOI CMOS manufacturing process of the integrated circuits.

Introduction

Nowadays, the Silicon-On-Insulator (SOI) Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) technology is the most used to manufacture commercial mixed integrated circuits for low-power low-voltage applications and several devices have been studied in order to improve the planar and three-dimensional (3D) device performance and consequently enhance the performance of the analog and digital integrated circuits (1-2). Considering planar SOI CMOS, the Diamond innovative layout style (hexagonal gate geometry) is an excellent device alternative to increase the MOSFET performance and consequently enhance significantly the performance of the analog integrated circuits (ICs), only by the layout change without any burden to the current ICs manufacturing process (3-4). This innovative layout style approach can be used to any type of MOSFETs (planar and three-dimensional devices) (3-4). It was specially invented to improve the longitudinal (parallel) electric field along of the channel by using the "Longitudinal Corner Effect" (LCE) along of the channel length and consequently to improve the average drift velocity of the mobile carriers in the channel ($\vec{v}_{//}$), the drain current (I_{DS}) and the transconductance (g_m), and to reduce the on-state series source/drain resistance (R_{DS_on}) as compared to the conventional (rectangular gate geometry) (3-4). For example, by three-dimensional (3D) simulation results, if we consider the same gate area (A_G) and the same bias conditions (V_{GS}=0.4 V and V_{DS}=0.8

V), Diamond SOI nMOSFET with α angle equal to 55°, produces significantly higher drain current in the saturation region (around 2.39 times) than the one found in the conventional SOI nMOSFET counterpart (3-4).

Figure 1 presents a Diamond layout example.

In Figure 1, b and B are the lengths of the two bases of trapezes that compose the hexagonal region of the gate, respectively, W is the channel width, α is the angle between the metallurgical junctions of the source/silicon film (channel region) and silicon film/drain regions, $\vec{\varepsilon}_{//1}$ and $\vec{\varepsilon}_{//2}$ are two vector components of the longitudinal electric field in the P point, that are generated by applying V_{DS} and by each drain/silicon film (channel region) and silicon film/source metallurgical junctions of the gate hexagonal shape. $\vec{\varepsilon}_{//DSM}$ is the vector of the resultant (equivalent) longitudinal electric field, given by $\vec{\varepsilon}_{//1} + \vec{\varepsilon}_{//2}$, that is higher than one observed in the conventional layout counterpart (3-4).

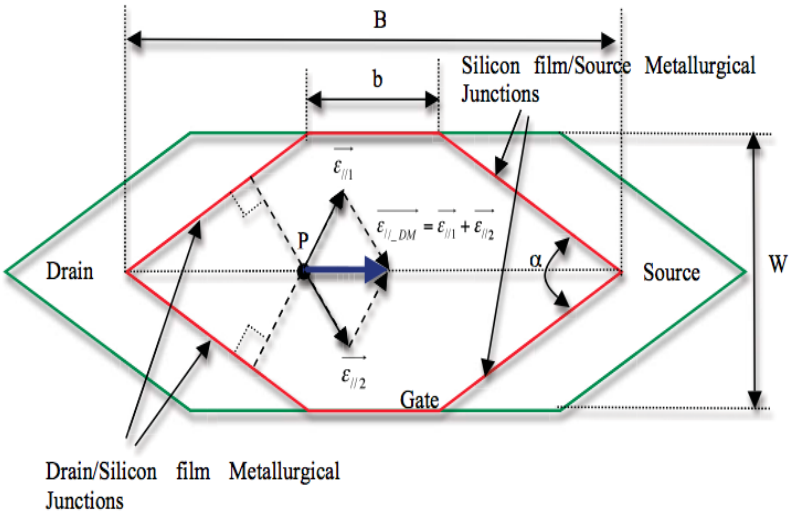


Figure 1: Example of diamond SOI nMOSFET layout (the hexagonal region enclosed by red line represents the gate region).

Several studies of the Diamond MOSFETs behavior with different technologies (SOI and Bulk) have been performed by 3D numerical simulations and experimental results, indicating that this innovative layout approach can bring several benefits mainly to the analog ICs, current drivers and power MOSFETs applications (5-8).

In reference (3-4), for the first time, it was proposed a simple drain current analytical model, which it takes into account the gate geometric shape (hexagonal) of the Diamond. So,

the objective of this paper is perform a variability study of the analytical model of the drain current based on experimental results of the Diamond and Conventional SOI nMOSFETs.

The Drain Current Analytical Model of the Diamond SOI MOSFET

The equivalent circuit that represent the Diamond SOI MOSFET can be considered as several transistors connected in parallel with different channel length (L_1, L_2, ..., L_n), where n is the amount of transistors connected in parallel and with the same channel width given by W/N. So, we can calculate accurately the effective channel length (L_{eff}) of the Diamond SOI MOSFET and it is given by $N/[(1/L_1)+(1/L_2)+...+(1/L_n)]$. This means that the Diamond I_{DS} flows more intensity by the channel region edges than by the center of the device, due to different channel lengths (L_1, L_2, ..., L_n) along of the Diamond channel region, although the longitudinal electric field is higher in the center of the channel region than that observed near of the channel regions edges (LCE) (3-4). The N value indicates how accurate the L_{eff} will be.

This accurate analytical model of the Diamond L_{eff} was compared to the proposed model [$L_{eff}=(b+B)/2$)] by the reference (1) and it was observed that this last model is valid because it presented a maximum error smaller than 5% in the worst case (when b is approximately equal to B).

So, the drain current equations proposed by the reference (1) to the Diamond SOI nMOSFETs (DSnM) can be adjusted to take into account the differences of the Diamond and Conventional SOI nMOSFETs L_{eff}, regarding the same A_G and the same channel width. Thus, the Diamond SOI nMOSFET drain current (I_{DS_DSnM}) in the Triode and Saturation regions, respectively, as a function of the Diamond (L_{eff_DSnM}) and Conventional (L_{eff_DSnM}) channel lengths and of the Conventional SOI nMOSFET (I_{DS_CSnM}) are given by equations [1] and [2] (3-4).

$$I_{DS_DSnM} = \sqrt{2\cdot(1+\cos\alpha)}\cdot\frac{L_{eff_CSnM}}{L_{eff_DSnM}}\cdot I_{DS_CSnM}\text{ , for } 0^o\leq\alpha\leq 90^o \qquad [1]$$

$$I_{DS_DSnM} = \sqrt{2+\cos\alpha}\cdot\frac{L_{eff_CSnM}}{L_{eff_DSnM}}\cdot I_{DS_CSnM}\text{ , for } 90^o\leq\alpha\leq 180^o \qquad [2]$$

T-test Statistical Evaluation

The main objective of the t-test statistical evaluation is to assess whether the means of different groups, containing randomized experimental data, are statistically different from each other (9-10).

Similar results can be obtained by using the t-test statistical evaluation, one-way Analysis of Variance (ANOVA) and regression analysis, because they are mathematically equivalent (9-10).

This statistical study considers six different chips, containing the same set of different Diamond SOI nMOSFETs (DSnMs) and Conventional SOI nMOSFETs (CSnMs) counterparts that were manufactured by using the same CMOS manufacturing process. The main idea of this work is to statistically evaluate the variability of the DSnM I_{DS} analytical model (equations [1] and [2]) by using the experimental data of CSnM of the six chips in relation to the variability of the experimental data of the DSnM I_{DS} of the different chips.

So, the t-test statistical evaluation is applied to verify whether the variability produced by the analytical model of the Diamond SOI nMOSFET (DSnM) drain current, obtained from the experimental data of the Conventional SOI nMOSFETs (CSnMs) counterparts of different chips, contained the same set of devices, given by the equations [1] and [2], is statistically different of the variability effectively measured of the DSnM drain current (I_{DS}) of the different chips.

Besides that, again by using equations [1] and [2] and once the curves of the DSnMs I_{DS} are obtained as a function of the experimental data of the CSnMs I_{DS} of the different chips, the V_{TH} and g_m parameters are extracted these curves in order to verify whether the DSnM I_{DS} analytical model, proposed in the reference (1), is able to produce a similar variability than those extracted of the experimental data of the curves DSnM I_{DS}. After that, these two parameters are also statistically tested by using t-test statistical evaluation, with the V_{TH} and g_m extracted of the experimental data of the curves measured from the DSnMs of the six chips considered in this study.

Thus, in this work, are analyzed three parameters, the saturation drain current (I_{DSsat}), V_{TH} and g_m of the DSnM, that are extracted of two sets of the curves: the first one uses the DSnM I_{DS} analytical model (equations [1] and [2]), by using the experimental data of the CSnM I_{DS} as a function of gate (V_{GS}), here defined as "group 1" and drain voltages (V_{DS}) of the six chips considered and the second one are the experimental curves of the DSnM I_{DS} as a function of gate (V_{GS}) and drain voltages (V_{DS}) of the different six chips analyzed, here defined as "group 2".

After that, regarding the t-test, it is possible to create two hypothesis tests (H0: null hypothesis and Ha: alternative hypothesis), needed to this statistical evaluation technique, that considers initially the averages of these three different parameters (I_{DS_sat}, V_{TH} and g_m) of a DSnM of the first chip, regarding these parameters extracted of the curves of the "group 1" (DSnM I_{DS} analytical model by using the experimental data of the CSnM I_{DS}) are equals to those general averages of these three parameters, considering the curves of the "group 2" (DSnM I_{DS} experimental data) of the all transistors of the six chips analyzed (HO). On the other hand, the t-test also allows to create another hypothesis test (Ha), where we can consider that the general averages of these parameters of the "group 1" and of the "group 2" are simply different. Thereby, the general average of these three parameters of these two groups can be statistical analyzed and compared in terms of variability (Figure 2).

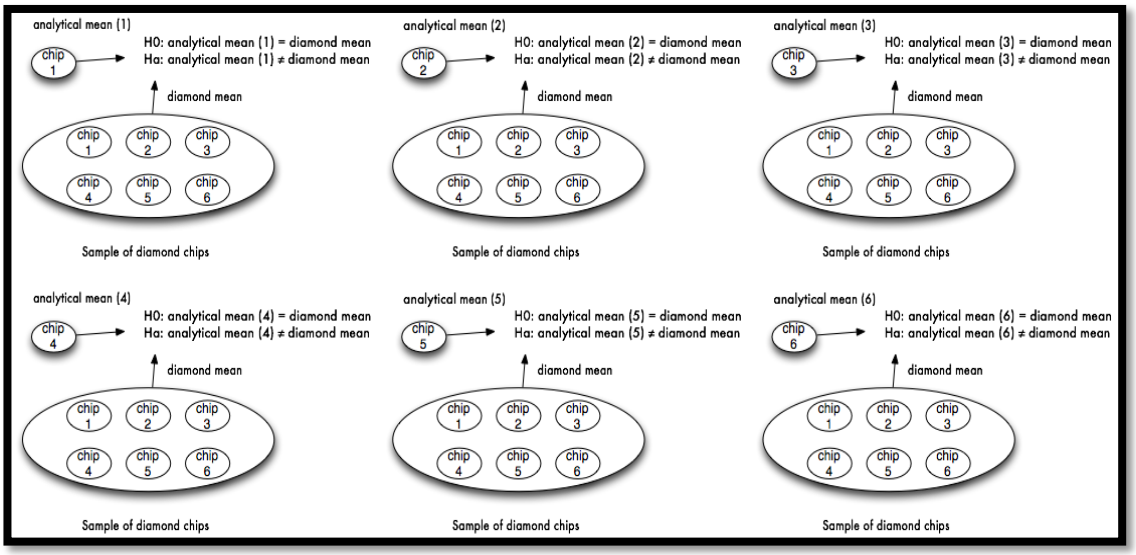


Figure 2: Block diagram showing how the t-test is applied regarding the six chips for g_{m_max} and I_{DSsat}, respectively.

Thus, if the t-test results indicate that the first hypothesis is true for all parameters considered, it means to say that there are statistical evidences to indicate that the DSnM I_{DS} analytical model by using the CSnM I_{DS} experimental data (group 1) presents similar statistic behavior in terms of variability as compared with the DSnM I_{DS} experimental data (group 2).

The t-test statistical evaluation consists in determination of the value of t, given by the equation [3].

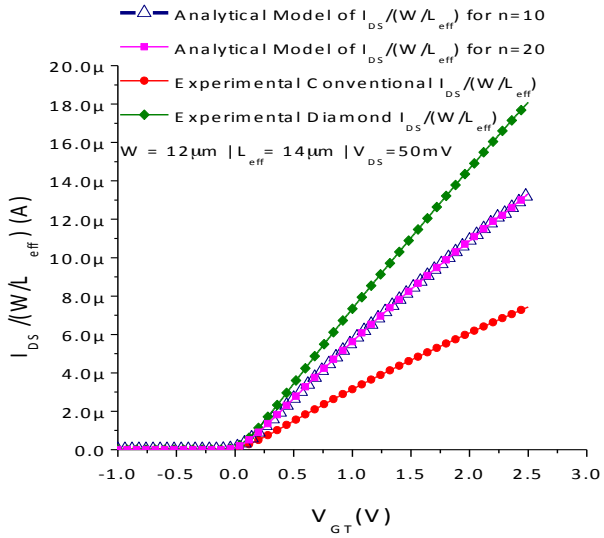
$$t = \frac{\bar{x}-\mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad [3]$$

where $\bar{x}$ is general average of the DSnM experimental data, μ are individual values obtained of the DSnM analytical model of each chips, s is a stander deviation and n is number of samples.

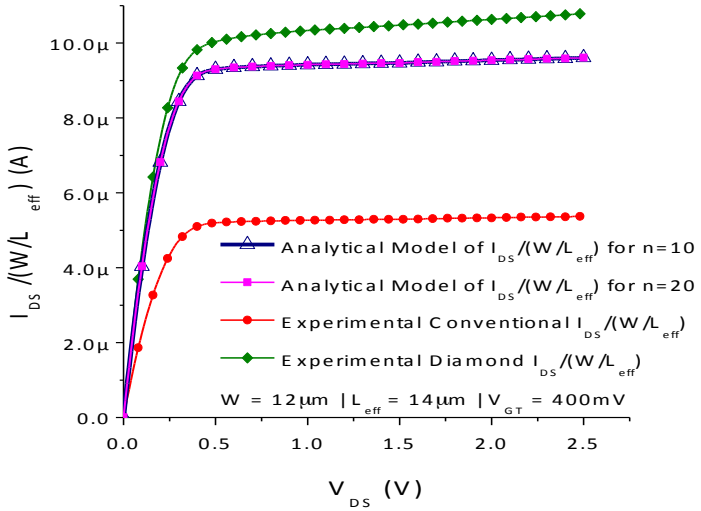
With the t value obtained by the equation [3], it is necessary to use a t-test tho-tailed distribution table in order to verify whether it is in the confidence interval defined by significant level, which in this case, it is adopted equal to 0.01 and of the liberty degree, which it is equal to 5 (equal to n-1). Based on this information, we can obtain the confidence interval, which in this case is from -4.032 to +4.032. If the t value obtained by the equation [3] is between the positive and negative threshold of the confidence interval, it means that the null hypothesis is confirmed and therefore we can say that the DSnM analytical model, obtained of the CSnM experimental data (group 1), presents the same statistical behavior in terms of variability of the DSnM experimental data (group 2), else the DSnM analytical model is not able to predict statistical behavior in terms of the variability of the SOI CMOS manufacturing process.

Experimental Results

Figure 3 illustrates an example of the I_{DS} as a function of V_{GS} graphic for V_{DS} equal to 50 mV (Fig. 3.a), used to extract g_{m_max} and I_{DS} as a function of V_{DS} graphic for V_{GT} equal to 400 mV and 800 mV used to extract I_{DS_sat} (Fig. 3.b), regarding the DSnM I_{DS} analytical model and DSnM and CSnM experimental data, used to perform the t-test statistical evaluation.



(a)



(b)

Figure 3: Example of the I_{DS} as a function of V_{GS} graphic for V_{DS} equal to 50 mV, used to extract g_{m_max} (a) and I_{DS} as a function of V_{DS} graphic for V_{GT} equal to 400 mV and 800 mV used to extract I_{DS_sat} (b).

Table I and II present the DSnM maximum transconductance (g_{m_max}) results, for α angle equal to 53.1° and 126.9°, respectively, considering the DSnM L_{eff} calculated with N (SOI nMOSFETs number of parallel association of the DSnM) equals to 10 and 20, respectively.

TABLE I - DSnM (α=53.1º) g_{m_max} (μS), for V_{DS}=50mV, confidence interval: **-4.032 < t < 4.032,** significant level: 0.01 and liberty degree: 5 (equal to n-1).

n (number of samples)	DSnM Analytical Model (N=10)	DSnM Analytical Model (N=20)	DSnM experimental data	t values (N=10)	t values (N=20)
1	7.42	7.73	6.93	-0.695	-1.893
2	7.15	7.45	6.87	-0.348	-0.811
3	7.34	7.65	7.28	-0.386	-1.584
4	7.49	7.81	8.35	-0.966	-2.202
5	7.59	7.92	7.47	-1.352	-2.627
6	7.26	7.57	6.54	-0.077	-1.275
Main Value ($\bar{x}$)	7.38	7.69	7.24	-	-
Standard Deviation (s)	0.16	0.17	0.63	-	-

TABLE II - DSnM (α=126.9º) g_{m_max} (μS), for V_{DS}=50mV, confidence interval: **-4.032 < t < 4.032,** significant level: 0.01 and liberty degree: 5 (equal to n-1).

n (number of samples)	DSnM Analytical Model (N=10)	DSnM Analytical Model (N=20)	DSnM experimental data	t values (N=10)	t values (N=20)
1	11.85	11.94	11.26	-1.316	-1.660
2	11.39	11.47	11.26	0.447	0.141
3	11.83	11.92	12.05	-1.239	-1.584
4	12.09	12.18	12.36	-2.235	-2.580
5	12.37	12.46	11.55	-3.308	-3.653
6	11.41	11.49	10.56	0.370	0.064
Main Value ($\bar{x}$)	11.82	11.91	11.51	-	-
Standard Deviation (s)	0.38	0.39	0.64	-	-

Notice that, the t values (last column of Table I and II), calculated by the equation [3] to the g_{m_max}, are between the positive and negative threshold of the confidence interval and therefore we can conclude that the null hypothesis (H0) are confirmed and the DSnM analytical model, obtained of the CSnM experimental data (group 1), can represent in 100% of the cases studied, the same statistical behavior in terms of variability of the DSnM experimental data (group 2), for both N values and different α angles of the DSnM (53.1º and 126.9º).

Analogously, it is analyzed if the DSnM analytical model is able to reproduce the same statistical behavior in terms of the DSnM I_{DS_sat} variability obtained with CSnM experimental data (Group 1) as compared to the one observed in the DSnM experimental data (Group 2). So, Table III and IV present the t-test for the I_{DS_sat} for both N values, for two different α angles (53.1° and 126.9°) and for two values of V_{GT} (0.4 V and 0.8 V).

TABLE III - DSnM (α=53.1°) I_{DS_sat} (μA), for V_{GT} equal to 0.4 V and 0.8 V, respectively, confidence interval: **-4.032 < t < 4.032,** significant level: 0.01 and liberty degree: 5 (equal to n-1).

	V_{GT}=0.4 V			V_{GT}=0.8 V			V_{GT}=0.4 V		V_{GT}=0.8 V	
n	DSnM Anal. Model (N=10)	DSnM Anal. Model (N=20)	DSnM exp. data	DSnM Anal. Model (N=10)	DSnM Anal. Model (N=20)	DSnM exp. data	t values (N=10)	t values (N=20)	t values (N=10)	t values (N=20)
1	10.1	10.5	10.93	41.57	43.2	41.75	1.858	0.721	0.017	-1.241
2	10.7	11.2	10.48	41.62	43.3	39.76	0.152	-1.270	-0.022	-1.328
3	10.1	10.5	10.71	41.32	42.8	41.56	1.858	0.721	0.210	-0.932
4	11.2	11.6	12.31	44.02	45.8	47.25	-1.270	-2.408	-1.874	-3.247
5	11.4	11.8	10.34	44.73	46.5	41.51	-1.839	-2.977	-2.421	-3.787
6	9.9	10.4	9.75	40.51	42.1	37.72	2.427	1.005	0.835	-0.392
$\bar{x}$	10.57	11	10.75	42.3	43.95	41.59	-	-	-	-
s	0.63	0.62	0.86	1.67	1.77	3.17	-	-	-	-

TABLE IV - DSnM (α=126.9°) I_{DS_sat} (μA), for V_{GT} equal to 0.4 V and 0.8 V, respectively, confidence interval: **-4.032 < t < 4.032,** significant level: 0.01 and liberty degree: 5 (equal to n-1).

	V_{GT}=0.4 V			V_{GT}=0.4 V			V_{GT}=0.4 V		V_{GT}=0.8 V	
n	DSnM Anal. Model (N=10)	DSnM Analytical Model (N=20)	DSnM exp. data	DSnM Anal. Model (N=10)	DSnM Anal. Model (N=20)	DSnM exp. data	t values (N=10)	t values (N=20)	t values (N=10)	t values (N=20)
1	17	17.2	18.01	67.6	68.1	67.39	3.700	3.138	0.517	0.127
2	16.4	16.5	18.56	640	64.4	67.03	5.384	5.103	3.323	3.011
3	19.4	19.6	17.45	71.8	72.4	68.37	-3.036	-3.597	-2.757	-3.224
4	18.9	19.1	19.84	71.7	72.4	73.55	-1.632	-2.194	-2.679	-3.224
5	19.1	19.3	18.48	73.1	73.8	69.24	-2.194	-2.755	-3.77	-4.316
6	16.2	16.3	17.57	63.9	64.5	64	5.945	5.664	3.401	2.933
$(\bar{x})$	17.83	18	18.32	68.68	69.27	68.26	-	-	-	-
s	1.46	1.5	0.87	4.11	4.19	3.14	-	-	-	-

By analyzing the t values of Table III and IV, we also can see that, in most cases (around 85%), the DSnM analytical model (Group 1) can also reproduce a similar statistical behavior in terms of variability of the DSnM I_{DS_sat} experimental data (Group 2), for both N values, for two different α angles (53.1^o and 126.9^o) and for two values of V_{GT} (0.4 V and 0.8 V).

Conclusion

This work is performed an statistical study to validate the drain current analytical model of the Partially Depleted Diamond SOI nMOSFETs, by applying the t-test statistical evaluation with experimental data of the six different samples of integrated circuits containing different Diamond SOI MOSFETs and Conventional ones counterparts. It was considered two parameters for this work, i.e., the maximum transconductance and the saturation drain current parameters. It is proved that the Diamond drain current analytical model is able to reproduce a similar statistical behavior than the one observed to the conventional SOI nMOSFET counterpart for the most cases and it was observed that the worst case reached around 85% of the repeatability for the saturation drain current), regarding the same bias conditions and SOI CMOS manufacturing process of the integrated circuits.

References

1. J. P. Colinge, FinFETs and Other MOSFET Multi-Gate Transistors, Springer (2008).
2. J. P. Colinge, Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI, Kluwer Academic Publishers (2004).
3. S. P. Gimenez and M. Bellodi, Patent Brazil: PI0802745-5 A2 (2008).
4. S. P. Gimenez, Solid-State Electronics, **54**, 1690-1696 (2010).
5. M. Bellodi and S. P. Gimenez, ECS Transactions, **25**(3), 243-253 (2009).
6. D. M. Alati and S. P. Gimenez, ECS Transaction, **33**(6), 121-132 (2010).
7. S. P. Gimenez, R. Claser and D. M. Alati, EUROSOI 2011, **1**, 109-110 (2011).
8. D. M. Alati, M. A. G. Silveira, L. Seixas, W. Melo and S. P. Gimenez, EURO SOI 2012, **1**, 53-54 (2012).
9. Ron Larson and Elizabeth Farber, Elementary Statistics, Pearson Education (2005).
10. Richard Johnson, Irwin Miller and John Freund, Probability and Statistics for Engineers, Pearson Education (2010).