

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS SÃO JOÃO DA BOA VISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA (MESTRADO)

GENILSON JULIÃO DO CARMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSISTORES MISHEMT COM
DIFERENTES DIELÉTRICOS DE PORTA

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2022

GENILSON JULIÃO DO CARMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE TRANSISTORES MISHEMT COM
DIFERENTES DIELÉTRICOS DE PORTA

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
como requisito para obtenção de título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Orientadora: Prof.^a. Dra. Paula Ghedini Der
Agopian

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

C287e	<p>Carmo, Genilson Julião do Estudo do comportamento de transistores MISHEMT com diferentes dielétricos de porta. / Genilson Julião do Carmo. -- São João da Boa Vista, 2022 82 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientadora: Paula Ghedini Der Agopian</p> <p>1. Transistores. 2. Semicondutores. 3. Microeletrônica. 4. Engenharia elétrica. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia. São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de São João da Boa Vista



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo do Comportamento de Transistores MISHEMT com diferentes dielétricos de porta.

AUTOR: GENILSON JULIÃO DO CARMO

ORIENTADORA: PAULA GHEDINI DER AGOPIAN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Profª Drª PAULA GHEDINI DER AGOPIAN (Participação Virtual)

Coordenadoria de Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações / Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista - UNESP

Prof. Dr. WILIAN MIRANDA DOS SANTOS (Participação Virtual)

Coordenadoria de Curso de Engenharia Aeronáutica / Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista - UNESP

Prof. Dr. VICTOR SONNENBERG (Participação Virtual)

Departamento de Sistemas Eletrônicos - DSE / FATEC-SP

São João da Boa Vista, 27 de maio de 2022

Maria Luiza Sarubi Barreto
Diretora Técnica Acadêmica

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais e toda minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof.^a Dra. Paula Ghedini der Agopian, pela orientação, conhecimento e conselhos extremamente necessários e oportunos. Pelo auxílio, incentivo e confiança para realização deste estudo.

Aos meus queridos pais e toda minha família.

Ao aluno de mestrado Bruno Godoy Canales que com o seu conhecimento e dedicação teve um papel importante para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Martino, pelas contribuições dadas para a realização deste trabalho.

Ao grupo LSI/PSI/USP por disponibilizar a estrutura e instrumentação para realização das medidas.

Ao Imec Bélgica por fornecer os dispositivos para testes.

À Unesp - Faculdade de Engenharia - Campus São João da Boa Vista

Aos membros do grupo de pesquisa sob a orientação da Prof.^a Dra. Paula Ghedini der Agopian pela ajuda prestada e informações fornecidas para a realização deste estudo.

Aos Profs. Drs. Wilian Miranda dos Santos, Victor Sonnenberg e Marcello Bellodi pelas orientações prestadas a este estudo.

À muitas outras pessoas, que de alguma forma colaboraram e tiveram alguma influência na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento elétrico do transistor MISHEMT (Isolante/AlGaIn/AlN/GaN) a partir dos parâmetros elétricos do mesmo. O comportamento do transistor foi estudado variando-se o tipo do material isolante de porta, as dimensões do dispositivo (comprimento da porta, distâncias porta/fonte e porta/dreno, profundidade dos contatos de fonte e dreno) e temperaturas de funcionamento do dispositivo. Como isolantes de porta, foram utilizados os materiais Si_3N_4 de 2nm de espessura e Al_2O_3 com 10nm de espessura. Em uma primeira análise, variou-se o comprimento do canal do transistor de 200nm até 600nm. Os dispositivos foram analisados operando em temperaturas variando de 25°C à 200°C. Nas análises seguintes, o comportamento do transistor foi estudado variando-se as distâncias de porta/fonte (L_{GS}) e porta/dreno (L_{GD}) e a profundidade dos contatos de fonte e dreno. As curvas de transferência para o dispositivo com isolante de Al_2O_3 apresentaram histerese, enquanto a histerese pode ser negligenciada para o dispositivo com isolante de porta Si_3N_4 . Quando analisada a tensão de limiar (V_T), o transistor com isolante de porta Si_3N_4 apresenta valores menos negativos de V_T , melhor comportamento aos efeitos de canal curto e melhores respostas ao DIBL (*Drain Induced Barrier Lowering*). No entanto, quando a análise de V_T inclui os efeitos da variação da temperatura, enquanto o transistor de Al_2O_3 apresentou um comportamento convencional (redução de V_T com o aumento da temperatura), um comportamento não esperado ocorreu para os transistores com Si_3N_4 . Este comportamento anômalo deve-se a uma dupla condução que foi observada mais facilmente na curva da transcondutância. Essa dupla condução parece estar relacionada às diferentes componentes de corrente do dispositivo estudado. Essa dupla condução da curva de g_m sugere que a corrente total do dispositivo parece ser influenciada pela condução MOS e pela condução 2DEG (*Two-dimensional electron gas*). Esses canais de condução de corrente acontecem nas interfaces das junções dos materiais. Apesar do transistor de Si_3N_4 apresentar maiores valores de corrente de fuga pela porta, o que parece estar relacionado com a espessura do isolante, o transistor Al_2O_3 apresenta um importante auto aquecimento do dispositivo, sendo inadequado para aplicações analógicas. O potencial do transistor com isolante de Si_3N_4 para aplicações analógicas foi avaliado e o mesmo apresentou bom desempenho do ganho intrínseco de tensão e mesmo com a variação da temperatura o dispositivo apresentou uma boa estabilidade térmica. Dispositivos com profundidade de contatos alcançando o topo do material AlGaIn apresentaram maior degradação de g_m e I_{DS} em comparação com os dispositivos com contatos alcançando o material AlN. Quanto menores as distâncias L_{GS} e L_{GD} , menor a degradação de I_{DS} e g_m . O

comportamento de I_{DS} e g_m pode ser explicado pelas resistências séries associadas as configurações estudadas. As curvas das bandas de condução e concentração de elétrons sugerem três prováveis canais de condução associados ao dispositivo estudado.

Palavras-chave: MISHEMT; MOSHEMT; HEMT; MOSFET; 2DEG; Si_3N_4 ; Al_2O_3 ; Isolante/AlGaIn/AlN/GaN.

ABSTRACT

This work aims to study the behavior of an (insulator/AlGaIn/AlN/GaN) MISHEMT transistor based on its electrical parameters. The behavior of the transistor was studied by varying the gate insulator, device dimensions and device operating temperatures. Two materials were used as gate insulators, Si₃N₄ with a thickness of 2nm and Al₂O₃ with a thickness of 10nm. The channel length of the transistor was also varied from 200nm to 600nm. The devices were analyzed at operating temperatures ranging from 25°C to 200°C. In the following analyses, the transistor's behavior was studied by varying the gate/source (L_{GS}) and gate/drain (L_{GD}) distances and the source and drain contacts depth. The transfer curves of the devices with Al₂O₃ insulator material showed hysteresis, while the hysteresis can be neglected for the devices with Si₃N₄ gate insulator material. In the threshold voltage analysis (V_T), the Si₃N₄ transistor shows less negative V_T values, better response to short channel effects and better response to DIBL. However, when the V_T analysis includes the effects of temperature variation, the Al₂O₃ transistor shows conventional behavior (V_T reduction with increasing temperature), while Si₃N₄ transistors show anomalous behavior. This anomalous behavior is due to double conduction, which was more easily observed in the transconductance curve. This double conduction seems to be related to the different current components of the device studied. This double conduction in the g_m curve indicates that the overall current of the device seems to be affected by the MOS conduction and the 2DEG conduction. These current conducting channels occur at the interfaces of the materials. Although the Si₃N₄ transistor exhibits higher leakage current values through the gate, which seems to be related to the insulator thickness, the Al₂O₃ transistor exhibits significant self-heating of the device, which is unsuitable for analog applications. The Si₃N₄ transistor was evaluated for analog applications and showed good intrinsic voltage gain performance and even under temperature variation, the thermal stability of the device was good. Devices with contact depth reaching the top of the AlGaIn material showed higher g_m and I_{DS} degradation compared to devices with contacts reaching the AlN material. The smaller the L_{GS} and L_{GD} distances, the smaller the I_{DS} and g_m degradation. The I_{DS} and g_m behavior is, most likely, explained by the series resistance associated with the studied configurations. The conduction bands and electron concentration curves suggest three probable conduction channels associated with the studied device.

Keywords: MISHEMT; MOSHEMT; HEMT; MOSFET; 2DEG; Si₃N₄; Al₂O₃; Isolante/AlGaIn/AlN/GaN.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico lei de moore	21
Figura 2 - Gráfico da área de atuação de tecnologias de transistores.....	21
Figura 3 - Categorias de Heterojunção	25
Figura 4 - Representação do diagrama de bandas da formação de descontinuidades causadas pela heterojunção.....	26
Figura 5 - Desempenho do material GaN comparado com Si e GaAs para algumas áreas de interesse.....	28
Figura 6 - Polarizações induzidas na estrutura cristalina GaN e no composto AlGaIn/GaN. ..	29
Figura 7 - Esboço, feito pelo pesquisador, das bandas de energia explicando o funcionamento do dispositivo HEMT.	30
Figura 8 - Dispositivo HEMT aplicado como amplificador de baixo ruído.....	30
Figura 9 - Estrutura de um dispositivo HEMT (A) e esquemático representando a formação do 2DEG (B).....	32
Figura 10 - Representação do processo de formação do 2DEG no dispositivo HEMT.....	34
Figura 11 - Operação do capacitor MOS.....	35
Figura 12 - Transistor MOSFET	36
Figura 13 - Transistor MOS trabalhando em: (a) acumulação. (b) depleção. (c) inversão. (d) Região de triodo. (e) Transição triodo/saturação. (f) região de saturação.....	37
Figura 14 - Curvas características MOSFET. (a) $I_{DS} \times V_{DS}$ (b) $I_{DS} \times V_{GS}$	38
Figura 15 - Curva $I_D \times V_G$ do dispositivo HEMT.....	39
Figura 16 - Estrutura simples MOSHEMT AlGaIn/GaN.	40
Figura 17 - Curva $I_D \times V_G$ dispositivo MISHEMT $Al_2O_3/AlGaIn/GaN$	40
Figura 18 - Representação da condição de banda plana no dispositivo MISHEMT.....	42
Figura 19 - Gráfico representando as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ para transistor MOSFET modo enriquecimento e modo depleção.	44
Figura 20 - Método da segunda derivada para extração de V_T	44
Figura 21 - Gráfico $I_D \times V_G$ representando a corrente do dreno em log e linear e a região da corrente de sublimiar e a inclinação de sublimiar.	47
Figura 22 - Regiões de depleção para dispositivos MOSFET de canal longo (A) e canal curto (B).....	48
Figura 23 - Obtenção do parâmetro VEA utilizando a extrapolação da curva $I_{DS} \times V_{DS}$	50
Figura 24 - Curvas $I_D \times V_G$ para várias temperaturas de operação e o ponto ZTC	51

Figura 25 - Representação dos dispositivos MOSHEMT (dielétrico de porta de Al_2O_3) e MISHEMT (dielétrico de porta de SiN_x).	54
Figura 26 - Exemplo de uma estrutura MOSHEMT criada para simulação.	55
Figura 27 - Curvas experimentais I_{DS} x V_{GS} para os dispositivos fabricados com diferentes dielétricos de porta para $T=25^\circ\text{C}$. Tabela inserida com os valores de histerese para duas diferentes tensões de dreno.	58
Figura 28 – Curvas experimentais de I_{DS} x V_{GS} com temperaturas variando de 25°C a 150°C para transistores com dielétrico de porta de Al_2O_3 (A) e Si_3N_4 (B).	59
Figura 29 – Curvas experimentais dos parâmetros de V_T e DIBL como função do comprimento do canal para os dispositivos MOSHEMT com dielétricos de porta de Al_2O_3 e MISHEMT com dielétrico de porta de Si_3N_4 (A). Comportamento do parâmetro V_T em diferentes temperaturas para ambos os dispositivos (B).	60
Figura 30 - Curva experimental da transcondutância do dispositivo MISHEMT com $W = 5\mu\text{m}$ e $L = 300\text{ nm}$ operando em temperatura ambiente e a 100°C . Gráfico inserido mostra as curvas de g_m e I_{DS} x V_{GS} relacionando a transcondutância com a corrente de dreno.	62
Figura 31 – Curvas simuladas da corrente de dreno e transcondutância como função da tensão de porta (A), e da concentração de elétrons no dispositivo (B).	64
Figura 32 – Curvas experimentais da corrente de dreno e corrente de porta como função da tensão de dreno para o dispositivo MOSHEMT (A) e dispositivo MISHEMT (B).	66
Figura 33 – Curvas experimentais da transcondutância (g_m), condutância de saída (g_D) e ganho intrínseco de tensão em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT. $T=25^\circ\text{C}$.	67
Figura 34 – Curvas experimentais das correntes I_D , I_G e I_S em função de V_{GS} (gráfico principal), eficiência do transistor em função de I_{DS} normalizada (gráfico inserido).	68
Figura 35 – Valores experimentais de V_{EA} em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT com temperaturas variando de 25°C a 150°C .	69
Figura 36 – Valores experimentais de AV em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT com temperaturas variando de 25°C a 150°C .	70
Figura 37 - Variação dos parâmetros L_{GS} e L_{GD} (A) e profundidade dos contatos de fonte e dreno (B) na estrutura MOSHEMT.	72
Figura 38 - Curva I_{DS} x V_{GS} para a estrutura MOSHEMT variando L_{GS} , L_{GD} e as profundidades dos contatos de dreno e fonte.	73
Figura 39 - Energia das Bandas de Condução (A) e Concentração de Elétrons (B) para diferentes valores de V_{GS} .	74

- Figura 40 - Curvas de $I_D \times V_G$ e g_m para os dispositivos com profundidade de contatos alcançando os materiais AlGaN (A) e AlN (B)..... 76
- Figura 41 - Curva da Concentração de Elétrons para o dispositivo MOSHEMT com profundidade de contatos alcançando o material AlGaN e o material AlN. 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre as características de alguns compostos semicondutores	27
Tabela 2 – Comparação dos transistores com diferentes dielétricos de porta em relação aos parâmetros elétricos estudados	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2DEG	Gás Eletrônico Bidimensional (<i>Two-dimensional Electron Gas</i>)
DIBL	Redução da Barreira Induzida pelo Dreno (<i>Drain-Induced Barrier Lowering</i>)
FET	Transistor de Efeito de Campo (<i>Field Effect Transistor</i>)
HEMT	Transistor de alta mobilidade eletrônica (High Electron Mobility Transistor)
MESFET	Transistor de efeito de campo de metal semicondutor (<i>Metal Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
MISHEMT	Transistor de Metal Isolante Semicondutor de Alta Mobilidade de Elétrons (<i>Metal Insulator Semiconductor High Electron Mobility Transistor</i>)
MOS	Metal Óxido Semicondutor (<i>Metal Oxide Semiconductor</i>)
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Metal Óxido Semicondutor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
MOSHEMT	Transistor de Metal Óxido Semicondutor de Alta Mobilidade de Elétrons (<i>Metal Oxide Semiconductor High Electron Mobility Transistor</i>)
ZTC	Ponto Invariante com a Temperatura (<i>Zero Temperature Coefficient</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_v	Ganho intrínseco [dB]
C_D	Capacitância de depleção [F/cm^2]
C_{it}	Capacitância devido aos estados de interface [F/cm^2]
C_{ox}	Capacitância de óxido de porta [F/cm^2]
d_{max}	Profundidade de depleção máxima [nm]
E_0	Nível neutro [eV]
E_C	Nível de energia da faixa de Condução [eV]
E_F	Nível de energia de Fermi [eV]
E_{FP}	Energia de Fermi para doadores tipo P [V]
g_D	Condutância de saída [S]
g_m	Transcondutância [S]
I_D	Corrente de dreno [A]
I_{Dsat}	Corrente de dreno em saturação [A]
I_{DS}	Corrente da fonte para o dreno [A]
I_S	Corrente de fonte [A]
I_G	Corrente de porta [A]
I_{ON}	Corrente de estado ligado [A]
I_{OFF}	Corrente de estado desligado [A]
k	Constante de Boltzmann [$m^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$]
L_{GS}	Distâncias entre os contatos de porta e fonte [nm]
L_{GD}	Distâncias entre os contatos de porta e dreno [nm]
L	Comprimento de canal [nm]
m^*	Massa de confinamento de portador na direção transversal [kg]
n	Fator de corpo
N	Concentração de impurezas [cm^{-3}]
N_A	Concentração de partículas aceitadoras de elétrons [cm^{-3}]
N_D	Concentração de impurezas doadoras [cm^{-3}]
n_i	Concentração intrínseca de portadores [cm^{-3}]
N_{it}	Densidade de armadilhas de interface [$cm^{-2} V^{-1}$]
q	Carga elementar do elétron [$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$]
Q_{it}	Cargas presentes na interface óxido/AlGaN [$cm^{-2} V^{-1}$]
Q_{it0}	Cargas na interface do óxido para $V_{GS} = 0V$ [$cm^{-2} V^{-1}$]

Q_{OX}	Densidade efetiva de cargas fixas no óxido [C/cm^2]
SS	Inverso da inclinação de sublimiar [mV/dec]
T	Temperatura [K]
t_{AlGaN}	Espessura da camada AlGaN [nm]
t_{OX}	Espessura do óxido de porta [nm]
v_{dn}	Velocidade de deriva [m/s]
V_D	Tensão de dreno [V]
V_{DS}	Tensão entre dreno e fonte [V]
$V_{DS\ triode}$	Tensão de dreno na região de tríodo [V]
$V_{DS\ sat}$	Tensão de dreno na região de saturação [V]
V_{EA}	Tensão Early [V]
V_{FB}	Tensão de faixa plana [V]
V_G	Tensão de porta [V]
V_{GS}	Tensão entre porta e fonte [V]
V_{GT}	Diferença entre a tensão de porta e tensão de limiar [V]
V_N	Queda de tensão no material de barreira na condição de banda plana [V]
V_T	Tensão de limiar [V]
$V_{TH\ triode}$	Tensão de limiar na região de tríodo [V]
$V_{TH\ sat}$	Tensão de limiar na região de saturação [V]
W	Largura do canal do transistor [nm]
ΔE_C	Descontinuidade na banda de condução [eV]
ϵ	Campo elétrico aplicado [V/m]
ϵ	Permissividade elétrica [F/cm]
ϵ_{AlGaN}	Permissividade elétrica do material AlGaN [F/cm]
ϵ_{Si}	Permissividade do silício [F/cm]
ϵ_{OX}	Permissividade elétrica do óxido [F/cm]
μ	Mobilidade dos portadores [$cm^2/V.s$]
σ_{pol}	Cargas devido as polarizações induzidas [$cm^{-2} V^{-1}$]
τ_n	Tempo de relaxação do elétron [s]
Φ_0	Diferença de potencial entre o nível neutro e a banda de condução [eV]
Φ_B	Energia da barreira da junção metal semiconductor [eV]
Φ_F	Potencial de Fermi do semiconductor [eV]
Φ_m	Função trabalho metal [eV]
Φ_{ms}	Função trabalho entre metal e silício [eV]

Φ_{MSub}	Função trabalho entre o metal e o substrato GaN [eV]
Φ_{sc}	Função trabalho semicondutor [eV]
χ_{AlGaN}	Afinidade eletrônica do material AlGaN [eV]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SEMICONDUTORES.....	25
2.1.1	<i>HETEROJUNÇÃO E POÇO QUÂNTICO.</i>	25
2.1.2	<i>MATERIAL NITRETO DE GÁLIO (GAN)</i>	26
2.1.3	<i>POLARIZAÇÕES INDUZIDAS</i>	28
2.2	DISPOSITIVO HEMT	29
2.2.1	<i>ESTRUTURA BÁSICA DO DISPOSITIVO HEMT</i>	31
2.2.2	<i>PRINCÍPIOS DE FORMAÇÃO DO 2DEG</i>	33
2.3	DISPOSITIVO MOSFET	34
2.4	DISPOSITIVO MISHEMT / MOSHEMT	38
2.4.1	<i>ESTRUTURA DO DISPOSITIVO</i>	39
2.5	PARÂMETROS ELÉTRICOS	40
2.5.1	<i>TENSÃO DE FAIXA PLANA (V_{FB}) (FLAT BAND VOLTAGE)</i>	41
2.5.2	<i>TENSÃO DE LIMIAR (V_T)</i>	43
2.5.3	<i>TRANSCONDUTÂNCIA (g_m)</i>	45
2.5.4	<i>INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR (SS)</i>	46
2.5.5	<i>CONDUTÂNCIA DE SAÍDA (g_D)</i>	47
2.5.6	<i>EFEITO DE CARNAL CURTO E O PARÂMETRO DIBL</i>	48
2.5.7	<i>PARÂMETRO GANHO INTRÍNSECO DE TENSÃO (A_V)</i>	49
2.5.8	<i>TENSÃO EARLY (V_{EA})</i>	49
2.5.9	<i>PONTO INVARIANTE COM A TEMPERATURA (ZTC)</i>	50
2.5.10	<i>MOBILIDADE</i>	51
2.5.11	<i>EFEITOS DA TEMPERATURA</i>	52

3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	ESTRUTURA DO DISPOSITIVO	54
3.2	SIMULAÇÃO.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DO DISPOSITIVO.....	57
	<i>4.1.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DISPOSITIVO VARIANDO A TEMPERATURA E O COMPRIMENTO DO CANAL. DADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS -----</i>	<i>57</i>
	<i>4.1.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DISPOSITIVO VARIANDO LGS, LGD E PROFUNDIDADE DE CONTATOS. DADOS SIMULADOS</i>	<i>71</i>
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	78
5.1	TRABALHOS FUTUROS	79
5.2	PUBLICAÇÕES GERADAS	80
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

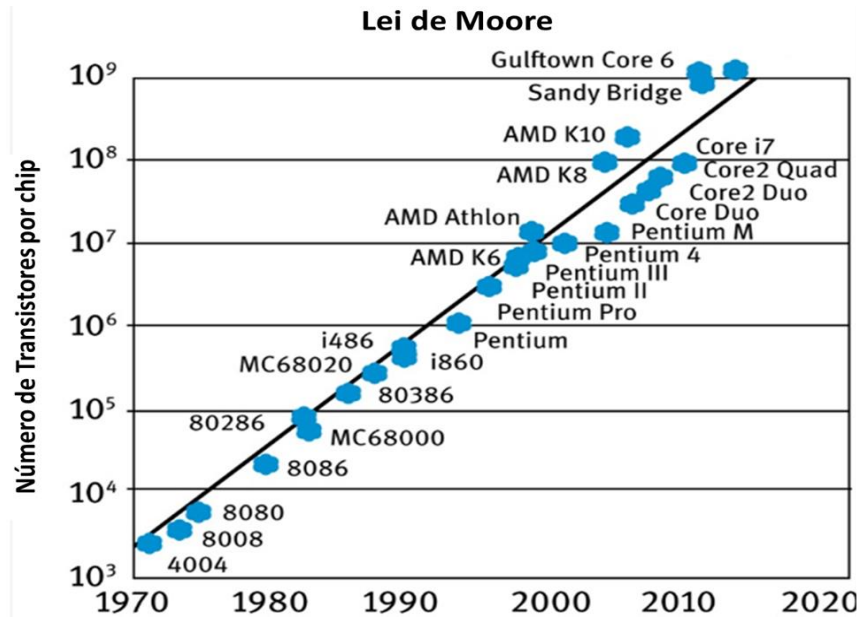
1 INTRODUÇÃO

Sendo uma das invenções mais importantes do mundo moderno, os transistores revolucionaram o campo da eletrônica e foram essenciais, possibilitando avanços tecnológicos em diversas áreas. Os transistores possibilitaram menores, mais baratos e mais rápidos dispositivos como computadores, rádios, smartphones, dentre outros. A eletrônica moderna exige dispositivos transistores mais rápidos, mais potentes, que tenham melhores desempenhos, para que possam manter os avanços tecnológicos em áreas como computação, comunicação, militar, automobilística e afins. Tecnologias atuais e futuras exigem maiores frequências de operação e menores tensões de alimentação dos transistores, bem como uma maior diminuição das dimensões dos transistores (BORDALLO, 2017).

A Lei de Moore sugere que a cada 18 a 24 meses uma nova tecnologia permite que os computadores dupliquem o desempenho. A Figura 1 mostra a evolução do número de transistores aplicados em processadores e como esse aumento segue a tendência da Lei de Moore. Como consequência de se manter a tendência da Lei de Moore, novas tecnologias de transistores têm sido estudadas, novos materiais aplicados e uma diminuição contínua das dimensões dos transistores é necessário. Ao passo que os transistores evoluem para suprir a demanda por avanços tecnológicos em diversas áreas, alguns problemas indesejados podem acontecer nos transistores. Efeitos de canal curto, menores tensões de alimentação e limitações dos materiais aplicados na fabricação dos transistores são alguns dos problemas que os pesquisadores procuram resolver (COELHO, 2021). Portanto, muitas tecnologias de transistores têm sido desenvolvidas ao longo dos anos para aplicação em diversas áreas.

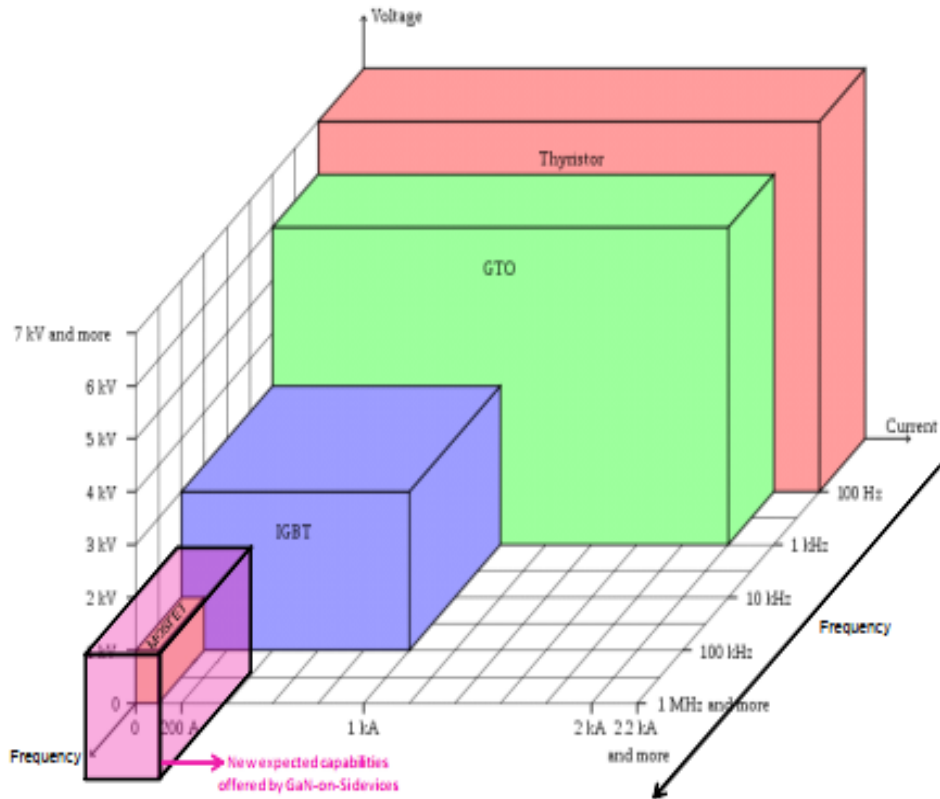
Field Effect Transistor, ou apenas FET, é uma tecnologia de transistores que tem um papel importante na eletrônica moderna. Desde sua primeira concepção em 1925, até sua criação em 1953, dispositivos transistores com a tecnologia FET tem se destacado na eletrônica moderna. Em 1959 foi a invenção dos transistores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), um dos transistores mais amplamente utilizado na eletrônica moderna (National Inventors Hall of Fame, 2021). O MOSFET é uma tecnologia de transistor muito empregada em áreas que requerem altas frequências de trabalho. Algumas tecnologias de dispositivos transistores e as áreas de atuações relacionadas a frequências, tensões e correntes de trabalho estão representadas na Figura 2.

Figura 1 - Gráfico lei de moore



Fonte: Adaptado de (OSTENDORF e KÖNIG, 2015)

Figura 2 - Gráfico da área de atuação de tecnologias de transistores



Fonte: (HAMADY, 2014)

Em 1979, buscando melhorar a tecnologia do transistor FET aplicado em altas frequências, o pesquisador Takashi Mimura inventou o conceito do primeiro transistor HEMT (*High Electron Mobility Transistor*) (MIMURA, 2018). O HEMT é um transistor de efeito de campo que se baseia em dispositivos de poços quânticos. Uma junção Schottky foi acoplada ao dispositivo de poço quântico para formar o transistor HEMT. Um canal de condução é criado (2DEG) em um material não dopado de alta mobilidade. Pelas suas características construtivas, o dispositivo HEMT pode ser aplicado onde altas frequências e altas tensões de trabalho são requeridas. Entretanto, apesar dos primeiros transistores HEMTs se mostrarem altamente viáveis para altas frequências, os dispositivos apresentaram alta corrente de fuga pela porta devido a junção Schottky. Foram desenvolvidas tecnologias para resolver o problema de colapso de corrente do dispositivo. Uma destas tecnologias que se mostrou muito promissora é o chamado *Metal Oxide Semiconductor High Electron Mobility Transistor*, ou simplesmente MOSHEMT, que emprega uma estrutura MOS para suprimir as correntes de fuga pela porta. Sabendo que, de forma geral, o isolante de porta não necessariamente é um óxido nestes dispositivos, este também tem sido chamado de MISHEMT (NIRMAL e AJAYAN, 2019). Este dispositivo tem sido amplamente estudado devido suas interessantes qualidades e ótimo desempenho em altas frequências e altas potências. Segundo pesquisadores do instituto Fraunhofer, Alemanha, foi reportado em janeiro de 2020 que o dispositivo MISHEMT alcançou frequências recordes de 640 GHz (iaf.fraunhofer.de, 2020). Desde então, melhorias têm sido aplicadas ao transistor MISHEMT para alcançar melhores desempenhos.

As boas características do dispositivo MISHEMT também se devem ao material empregado em sua construção. Em sua primeira versão, o dispositivo HEMT aplicava um sistema de materiais AlGaAs/GaAs. GaAs é um material de alta mobilidade, o que concede ao transistor ótimo desempenho em altas frequências. Mais recentemente, o material GaN tem sido aplicado na construção de dispositivos MISHEMT. Este material tem uma larga banda proibida que concede aos transistores um bom desempenho em aplicações onde altas tensões devem ser aplicadas, ou seja, nas áreas de potência. Portanto, tem-se um dispositivo MISHEMT Isolante/AlGaN/GaN que pode ser empregado onde altas frequências e altas tensões de trabalho são exigidas. É um dispositivo que apresenta bons desempenhos nestas áreas.

Devido as polarizações induzidas no material AlGaN, mesmo para tensões de polarizações de porta negativas o transistor apresenta um comportamento ligado. Este é um problema relacionado a tecnologia MISHEMT, o dispositivo apresenta uma tensão de limiar negativa, tornando o dispositivo *normally on*. Estudos são realizados para levar esse dispositivo

ao estado *normally off*, onde o transistor apresenta tensão de limiar positiva. Nota-se também que, o isolante de porta tem um papel importante nas características do transistor MISHEMT.

A fim de melhorar as características dos transistores MISHEMT e resolver alguns problemas relacionados a sua tecnologia, pesquisas têm sido amplamente realizadas para se ter uma melhor compreensão do funcionamento do dispositivo. Os materiais de construção do transistor MISHEMT tem sido objeto de pesquisa, bem como o material isolante de porta e suas dimensões tem sido estudado para se ter um melhor entendimento de como essas variáveis influenciam no comportamento dos transistores MISHEMT. Portanto, o presente estudo busca entender a influência que os materiais e suas dimensões tem sobre o funcionamento do transistor MISHEMT.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo o estudo do transistor MISHEMT (AlGaIn/AlN/GaN) e a análise dos principais parâmetros elétricos relacionados à esta tecnologia. Foram avaliados os efeitos que diferentes isolantes de porta com diferentes dimensões têm sobre o desempenho do transistor MISHEMT, bem como o comportamento do transistor para diferentes profundidades dos contatos de fonte e dreno e variando-se as distâncias L_{GS} (porta/fonte) e L_{GD} (porta/dreno). O desempenho do dispositivo variando a temperatura de 25°C a 200°C, variando o comprimento de porta, a profundidade dos contatos e as distâncias L_{GS} e L_{GD} serão discutidos com base nos parâmetros extraídos e simulados.

Os objetivos podem ser divididos em pontos específicos como relacionados abaixo:

- Extração e análise de parâmetros elétricos experimentais e simulados do transistor MISHEMT.
- Estudar o comportamento do transistor e seu mecanismo de condução.
- Avaliar os efeitos de diferentes isolantes de porta no comportamento do dispositivo:
 - transistor MISHEMT $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$.
 - transistor MOSHEMT $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$
- Avaliar a performance do dispositivo em função da temperatura (25°C a 200°C).
- Avaliar o desempenho do transistor com a variação do comprimento do canal (200nm a 600nm).

- Análise do comportamento do dispositivo MISHEMT com a variação da profundidade dos contatos de porta e de dreno.
- Análise do comportamento do dispositivo MISHEMT com a variação das distâncias L_{GS} (porta/fonte) e L_{GD} (porta/dreno).

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: apresenta uma visão geral sobre os avanços tecnológicos dos transistores MISHEMT bem como a motivação para o desenvolvimento do trabalho.
 - Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: apresenta uma revisão das tecnologias de transistores que fazem parte deste estudo bem como uma revisão dos parâmetros elétricos aplicados aos transistores estudados.
 - Capítulo 3 – Materiais e Métodos: descreve as estruturas utilizadas neste estudo, os softwares utilizados na simulação bem como os modelos físicos utilizados para a simulação.
 - Capítulo 4 – Resultados e Discussões: apresenta e discute os resultados obtidos nas medidas experimentais e nas simulações realizadas, bem como analisa os parâmetros elétricos extraídos dos transistores.
 - Capítulo 5 – Conclusão: sintetiza os resultados obtidos e propõe estudos futuros.
- Por fim, as referências bibliográficas são apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos sobre semicondutores, transistores HEMT, transistores MOSFET, transistores MISHEMT, bem como os principais parâmetros elétricos relevantes para este estudo.

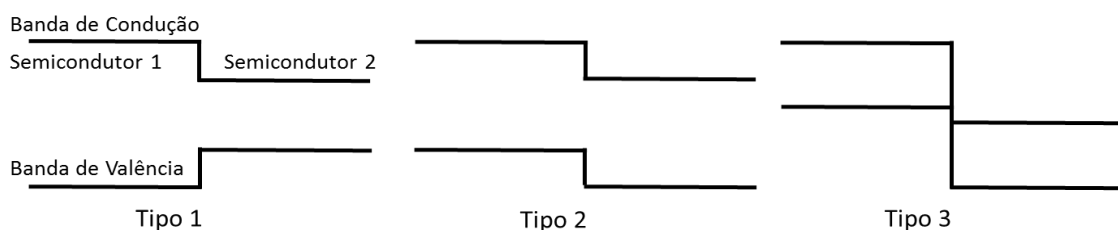
2.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SEMICONDUCTORES

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos fundamentais e relevantes para o entendimento dos dispositivos estudados.

2.1.1 HETEROJUNÇÃO E POÇO QUÂNTICO.

Uma heterojunção, usualmente, é a junção de dois diferentes semicondutores com diferentes larguras de banda proibida (*bandgaps*). A heterojunção pode ser classificada em 3 diferentes categorias dependendo da largura de banda de cada material. As 3 categorias de heterojunção estão representadas na Figura 3. Para o projeto do dispositivo HEMT, a heterojunção do tipo 1 é a mais adequada (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Figura 3 - Categorias de Heterojunção

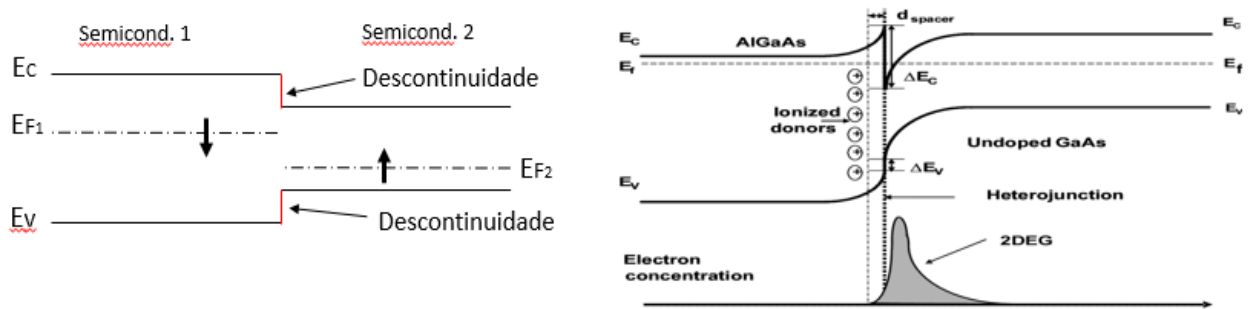


Fonte: Adaptada de (NIRMAL e AJAYAN, 2019)

Um entendimento do diagrama de bandas de uma heterojunção será importante para o entendimento do dispositivo HEMT e como este funciona. Tem-se que, quando dois semicondutores de *bandgaps* diferentes são colocados juntos, eles formam o que pode ser chamado de descontinuidade entre as bandas dos semicondutores, como mostra a Figura 4. Sabe-se que os níveis de Fermi de dois materiais colocados juntos tem a tendência de entrar em equilíbrio. Portanto, há um dobramento das bandas do semicondutor. No processo de dobramento das bandas a descontinuidade permanece. A descontinuidade junto com o processo

de dobramento das bandas é responsável pela criação do chamado poço quântico ou poço quase triangular (uma referência a sua geometria).

Figura 4 - Representação do diagrama de bandas da formação de descontinuidades causadas pela heterojunção.



Fonte: Adaptada de (LIU, 2008)

Um poço quântico é uma pequena região onde o elétron está confinado (COLINGE e COLINGE, 2002). O elétron perde energia ao “cair” no poço quântico e não tem energia suficiente para “escapar” do poço. Portanto, o elétron fica confinado em uma pequena região.

Quando uma heterojunção, representados pelos semicondutores 1 e 2 na Figura 4, cria um poço de energia, os elétrons do semicondutor 1 migram para este poço que está localizado no semicondutor 2, próximo a interface entre os semicondutores, ficando confinados em Z (não tem energia para sair do poço). No entanto, estes elétrons estão livres para moverem-se no plano xy. Esta fina camada de elétrons é o que chamamos de 2DEG (*Two Dimensional Electron Gas*) (VERNEK, 2007).

2.1.2 MATERIAL NITRETO DE GÁLIO (GAN)

O gálio forma interessantes compostos, tal qual o arseneto de gálio (GaAs) que tem sido utilizado como semicondutor por muito tempo e o nitreto de gálio (GaN) que tem interessantes características que fazem deste composto um promissor material para gerações futuras de semicondutores.

A maioria dos circuitos e dispositivos eletrônicos são baseados no silício (Si). Porém, dispositivos que incorporam componentes eletrônicos baseados no material nitreto de gálio estão sendo projetados e comercializados. Assim como o silício, o nitreto de gálio (GaN) é um semicondutor. A aplicação de uma certa quantidade de energia no semicondutor permite que os elétrons adquiram energia suficiente para se deslocarem da banda de valência para a banda de

condução, permitindo a condução de corrente elétrica. O GaN tem uma banda proibida larga se comparado com outros semicondutores, como por exemplo o silício. A Tabela 1 mostra o *bandgap* e algumas outras interessantes características do composto semicondutor GaN e do sistema de materiais AlGaN/GaN em comparação com outros importantes materiais e compostos semicondutores. A Figura 5 mostra o desempenho do GaN frente a outros semicondutores.

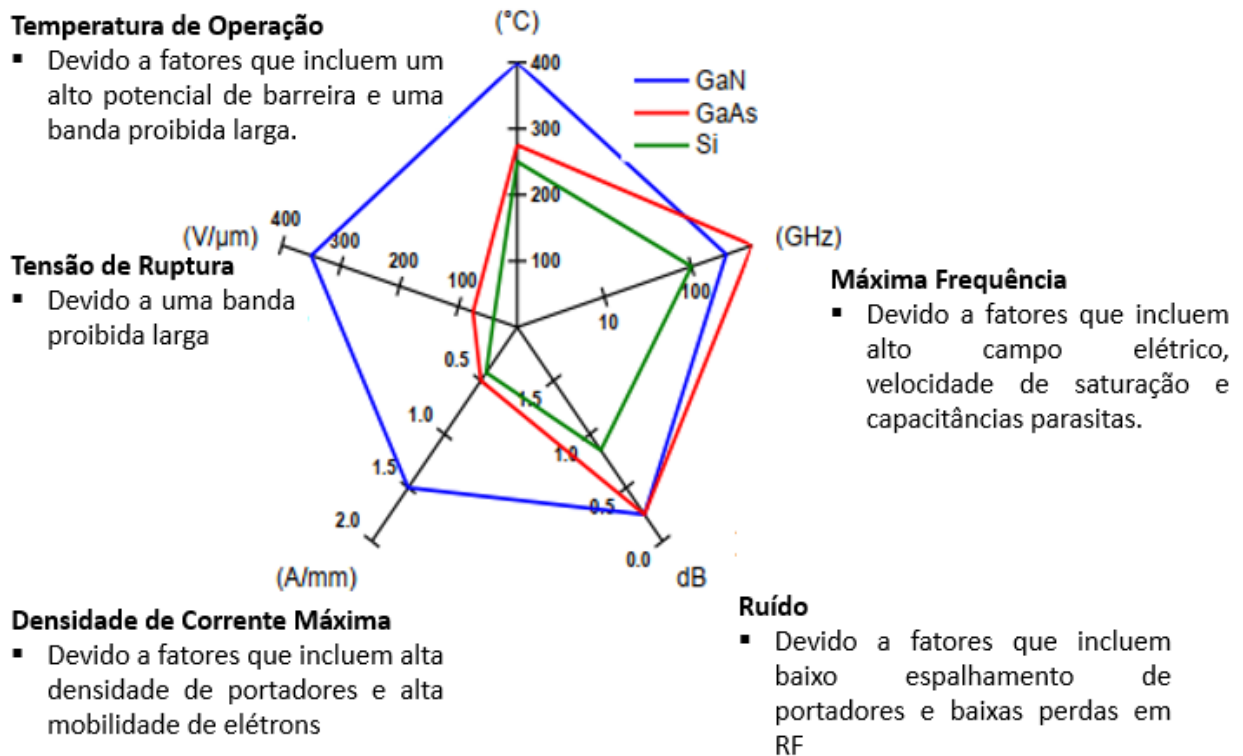
Devido a características como larga faixa proibida, boa condutividade térmica e a alta mobilidade eletrônica, dispositivos construídos com GaN podem apresentar um desempenho interessante onde se exige altas potências e altas frequências de trabalho. O GaN tem uma tensão de ruptura significativamente maior que a do Silício (Si) o que torna os dispositivos produzidos com GaN capazes de lidar com maiores tensões, sendo mais apropriados para a área da eletrônica de potência. GaN pode ser utilizado em dispositivos para comutação em altas velocidades e em altas potências.

Tabela 1 - Comparação entre as características de alguns compostos semicondutores

Característica	Silício	AlGaAs/ InGaAs	InAlAs/ InGaAs	SiC	AlGaN/ GaN	GaN
Banda Proibida	1,1	1,42	1,35	3,26	3,49	3,4
Mobilidade Eletrônica 300K (cm ² /V.s)	1500	8500	5400	700	1500-2200	1200
Velocidade (Pico) de Saturação do Elétron (x10 ⁷ cm/s)	1,0 (1,0)	1,3 (2,1)	1,0 (2,3)	2,0 (2,0)	1,3 (2,1)	2,5
Campo de Ruptura Crítico (MV/cm)	0,3	0,4	0,5	3,0	3,0	3,3
Condutividade Termica (W/cm.K)	1,5	0,5	0,7	4,5	>1,5	2,1

Fonte: Adaptado de (SUN, KANG, *et al.*, 2019) (XUE, HE, *et al.*, 2018)

Figura 5 - Desempenho do material GaN comparado com Si e GaAs para algumas áreas de interesse.



Fonte: Adaptado de (BENVEGNUM, 2016)

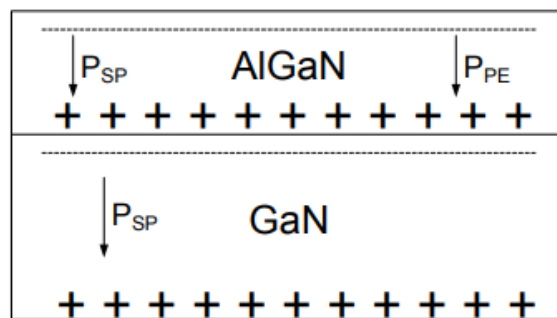
2.1.3 POLARIZAÇÕES INDUZIDAS

HEMTs baseados em GaN podem criar 2DEG sem mesmo serem dopados. Essa importante característica dos dispositivos baseados no material GaN pode também ser explicada devido aos efeitos que acontecem no material GaN. O GaN tem uma estrutura cristalina Wurtzita. Este material apresenta efeitos de polarizações induzidas que afetam o desempenho dos dispositivos baseados no material GaN. As polarizações induzidas geram campos elétricos no sistema de materiais AlGaIn/GaN que permite a formação do 2DEG no dispositivo sem a necessidade de dopagem (XIAO-GUANG, DE-GANG e DE-SHENG, 2015) (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Uma interessante característica dos compostos é a eletronegatividade. Eletronegatividade é a tendência de um átomo, de uma dada molécula, de atrair elétrons. Tem-se que, quanto maior for a eletronegatividade, maior a tendência do átomo de atrair elétrons para si. Com exceção dos gases inertes, quanto mais à direita e mais para cima um elemento está localizado na tabela periódica, maior será a sua eletronegatividade. Sendo assim, ligações do tipo AlN e GaN são altamente iônicas com um forte dipolo, sendo a eletronegatividade do

elemento N muito maior que dos elementos Ga e Al. Tendo o nitrogênio e o gálio diferentes eletronegatividades, o nitrogênio sendo mais eletronegativo que o gálio, forma-se polarizações espontâneas no material AlGaN ou GaN. As polarizações espontâneas criam um campo elétrico interno a estrutura do material. Os efeitos de polarizações no material AlGaN induz cargas de polarizações positivas na interface AlGaN/GaN e cargas de polarizações negativas no topo do AlGaN. A Figura 6 apresenta uma estrutura AlGaN/GaN com esquemático de polarizações espontâneas.

Figura 6 - Polarizações induzidas na estrutura cristalina GaN e no composto AlGaN/GaN.



Fonte: Adaptada de (HAMADY, 2014)

2.2 DISPOSITIVO HEMT

Desde a sua criação, o dispositivo HEMT tem sido amplamente utilizado no campo da comunicação e tem se mostrado uma promessa para áreas onde transistores de altas frequências e/ou altas potências são necessários. A sociedade moderna demanda cada vez mais por maiores velocidades de transmissão de dados, comunicação em altas velocidades e dispositivos que lidem com altas potências. Nesse cenário, o dispositivo HEMT tem se estabelecido como uma tecnologia que pode suprir a demanda por altas velocidades de transmissão de informação bem como altas potências requeridas. Foi por volta de 1979 que o pesquisador Takashi Mimura desenvolveu o dispositivo HEMT. Foi buscando melhorias para o dispositivo transistor de efeito de campo de metal semiconductor, MESFET, que o pesquisador desenvolveu um interesse por uma estrutura de super rede de modulação dopada onde uma camada de material não dopado é empilhada em uma camada de material dopado (MIMURA, 2018). Nesta estrutura, elétrons se acumulam na camada do material não dopado. Sua primeira abordagem foi feita com os materiais GaAs e AlGaAs. A ideia foi estabelecer uma heterojunção entre os materiais GaAs e AlGaAs e implementar uma barreira Schottky na superfície. Essa abordagem retira os elétrons

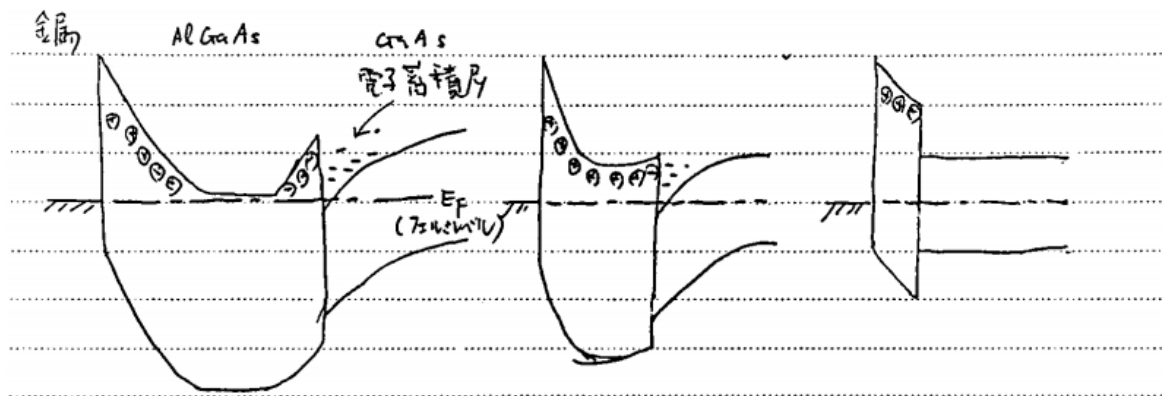
da camada AlGaAs e estabelece um efeito de campo que comanda, ou modula, o 2DEG (*two dimensional electron gas*), criado na camada GaAs.

A Figura 7 ilustra um esboço, desenvolvido por (MIMURA, 2002) , das bandas de energia do primeiro dispositivo HEMT estudado. Esse esboço foi submetido à divisão de patente da companhia que o pesquisador então fazia parte, Fujitsu laboratórios, em 1979.

Como primeira aplicação comercial do dispositivo HETM, tem-se o amplificador de baixo ruído para telescópio (

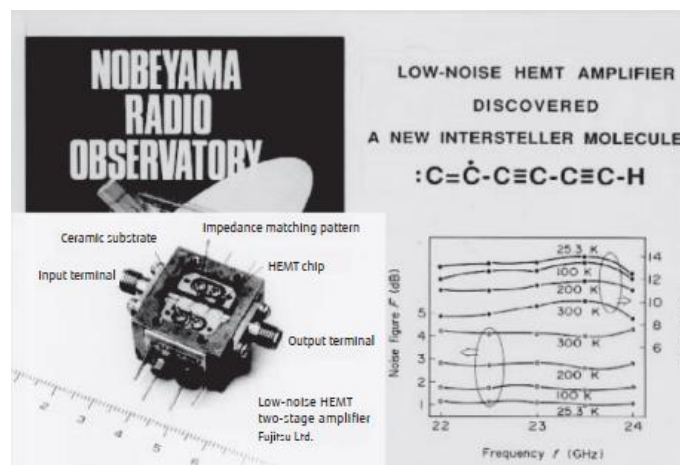
Figura 8). Isso se tornou possível pela característica de ruído do dispositivo em baixas temperaturas, tornando o dispositivo um interessante candidato para substituir o dispositivo amplificador MESFET GaAs utilizado (MIMURA, 2018).

Figura 7 - Esboço, feito pelo pesquisador, das bandas de energia explicando o funcionamento do dispositivo HEMT.



Fonte: (MIMURA, 2002)

Figura 8 - Dispositivo HEMT aplicado como amplificador de baixo ruído.



Fonte: (MIMURA, 2018)

Na década de 80 e nos anos seguintes a primeira utilização do HEMT comercialmente, o dispositivo começou a ser muito utilizado e se tornou o substituto do GaAs MESFET como amplificador de baixo ruído em sistemas de conversores para receptores de transmissão via satélite. O dispositivo HEMT contribuiu para a diminuição do tamanho físico das antenas parabólicas receptoras para menos que metade de seu tamanho (MIMURA, 2002). Uma característica interessante do dispositivo HEMT é a variedade de materiais que podem ser empregados na construção do dispositivo. Desde sua concepção onde se utilizava o material GaAs, diversas pesquisas têm sido feitas e outros materiais têm sido utilizados no dispositivo. Esses materiais mudam as características físicas do dispositivo, tornando o dispositivo mais adequado para serem aplicados em determinadas áreas. Como exemplo, tem-se o dispositivo construído de GaN, o que o torna muito interessante para aplicações em que altas potências e altas frequências são requeridas (HAMADY, 2014).

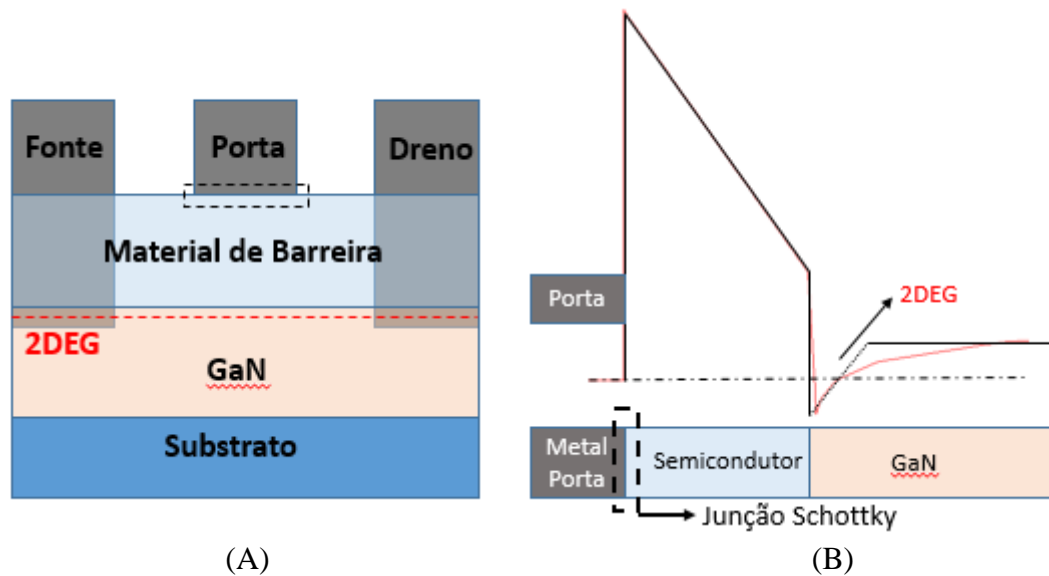
2.2.1 ESTRUTURA BÁSICA DO DISPOSITIVO HEMT

Apesar do primeiro HEMT ter sido desenvolvido utilizando a heterojunção AlGaAs/GaAs, nos dias atuais, tem-se uma gama de materiais sendo utilizados no projeto do dispositivo, por exemplo: GaN, AlGaN, InP, Si dentre outros. O importante no desenvolvimento do HEMT é ter uma heteroestrutura com materiais de diferentes *bandgaps* de modo que o 2DEG se forme. A Figura 9A mostra uma estrutura simples do dispositivo HEMT. Uma estrutura genérica que pode ser construída de diversos sistemas de materiais. O dispositivo é constituído por uma heterojunção que possibilita a formação do 2DEG (canal do transistor), contatos de fonte e dreno por onde se aplica uma diferença de potencial para a condução da corrente e um contato de porta que controla se o transistor corta ou conduz e que, através do potencial aplicado na mesma, modula a profundidade da região de depleção e pode desligar (depletar a região do 2DEG) o transistor. O 2DEG tem uma alta concentração de elétrons com uma alta mobilidade de elétrons o que favorece que se tenha uma alta densidade de corrente.

Nos primeiros dispositivos construídos com o sistema AlGaAs/GaAs, o material AlGaAs, o material de maior *bandgap*, era dopado tipo n, enquanto o material GaAs, de menor *bandgap*, era um material não dopado (MIMURA, 2018). Isso possibilitava a criação de um poço quântico, o confinamento dos elétrons (portadores de carga) no poço quântico e a formação do canal de condução do dispositivo. Com o avanço nas pesquisas e a utilização de outros materiais na construção dos dispositivos HEMTs, chegou-se à heterojunção formada por AlGaN/GaN que não necessita de dopagem, uma vez que o fenômeno de criação do canal de

condução acontece, principalmente, pelas polarizações induzidas e pelas discontinuidades das bandas de energia devido a heterojunção

Figura 9 - Estrutura de um dispositivo HEMT (A) e esquemático representando a formação do 2DEG (B).



Fonte: Adaptado de (HU, 2014)

Tanto o material de *bandgap* largo como o material de *bandgap* estreito não necessitam de dopagem externa para que se forme o 2DEG. Na junção entre estes materiais tem-se uma descontinuidade de banda o que, por sua vez, com o equilíbrio dos níveis de Fermi dos materiais, cria um poço de potencial com uma alta concentração de cargas. Essa região, onde há uma alta concentração de elétrons em uma região extremamente fina, da ordem de poucos nanômetros, é o 2DEG. A Figura 9B ilustra onde, em uma estrutura genérica do dispositivo HEMT, acontece a formação do 2DEG.

Existem transistores com dois modos de operação, normalmente *on* e normalmente *off*. Esses modos de operação são determinados no projeto do dispositivo, na escolha dos materiais e da espessura da camada de barreira. Por diminuir a espessura da camada de barreira, a tensão de limiar tende para valores menos negativos ou positivos (SWAIN, KANJALOCHAN e LENKA, 2017), o que por sua vez, leva o dispositivo a se aproximar, ou se tornar, um dispositivo *normally off*. Sendo o dispositivo um FET, a corrente de fonte e dreno é controlada pela aplicação de uma diferença de potencial entre a porta e a fonte. Quando da aplicação de uma tensão na porta, há uma redistribuição das cargas e uma alteração da densidade de portadores e, conseqüentemente, uma alteração da corrente associada ao canal 2DEG formado próximo a hetero interface.

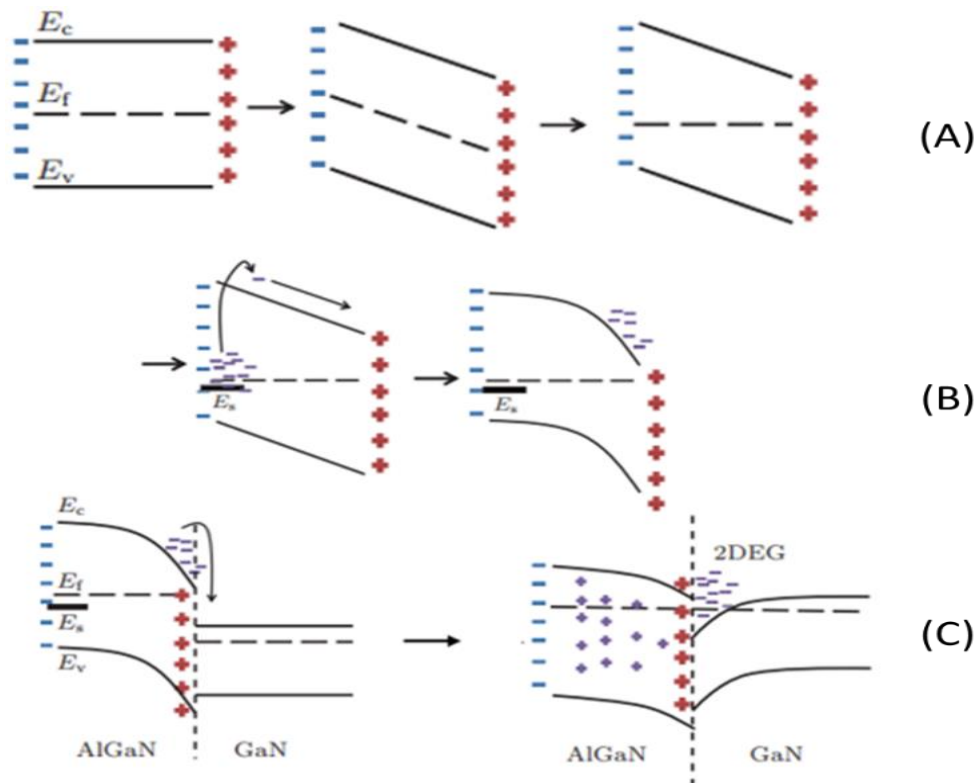
O transistor HEMT é ainda baseado no princípio de operação de um contato Schottky (junção metal/semicondutor) (Figura 9B). Problemas de confiabilidade e desempenho do dispositivo estão relacionados a junção Schottky. Correntes de fuga pela porta que levam ao colapso da corrente são reportados na literatura serem relacionados a junção Schottky (KARBOYAN, TARTARIN, *et al.*, 2013) (NIRMAL e AJAYAN, 2019). Algumas técnicas estão sendo desenvolvidas e estudadas para suprimir estes problemas.

2.2.2 PRINCÍPIOS DE FORMAÇÃO DO 2DEG

O princípio de operação do dispositivo HEMT está baseado principalmente na formação de um canal de condução 2DEG (gás de elétrons bi-dimensional). Segundo Xiao-Guang, De-Gang, & De-Sheng (2015), a formação do 2DEG para sistemas de materiais não dopados, como é o caso de AlGa_N/Ga_N, acontece devido a existência de estados de doadores no topo do material AlGa_N. Esses doadores serão estimulados, devido as forças do campo elétrico de polarizações induzidas, a se deslocarem para a interface AlGa_N/Ga_N. A Figura 10 ilustra o processo de formação do 2DEG no sistema AlGa_N/Ga_N.

Um campo elétrico é formado dentro do material AlGa_N (polarizações induzidas) que induz cargas positivas na interface AlGa_N/Ga_N e cargas negativas no topo do material AlGa_N. Este campo elétrico aponta da interface AlGa_N/Ga_N para o topo do material AlGa_N, o que faz as bandas de energia se inclinarem em direção a interface AlGa_N/Ga_N (XIAO-GUANG, DE-GANG e DE-SHENG, 2015) (Figura 10A). Assumindo uma camada do material AlGa_N espessa o suficiente, o nível de Fermi vai alcançar o nível de estado de doadores e vai estimular os elétrons para a banda de condução (Figura 10B) (XIAO-GUANG, DE-GANG e DE-SHENG, 2015). No entanto, uma vez que os materiais são colocados em contato, os elétrons se deslocarão para o material Ga_N onde o nível de Fermi e a banda de condução estão em menores níveis de energia. Os níveis de Fermi dos materiais tenderão a se equilibrar, o poço quântico começa a se formar, os elétrons vão se acumular e serão confinados no material Ga_N (na interface AlGa_N/Ga_N), formando assim o 2DEG (Figura 10C).

Figura 10 - Representação do processo de formação do 2DEG no dispositivo HEMT.



Fonte: (XIAO-GUANG, DE-GANG e DE-SHENG, 2015)

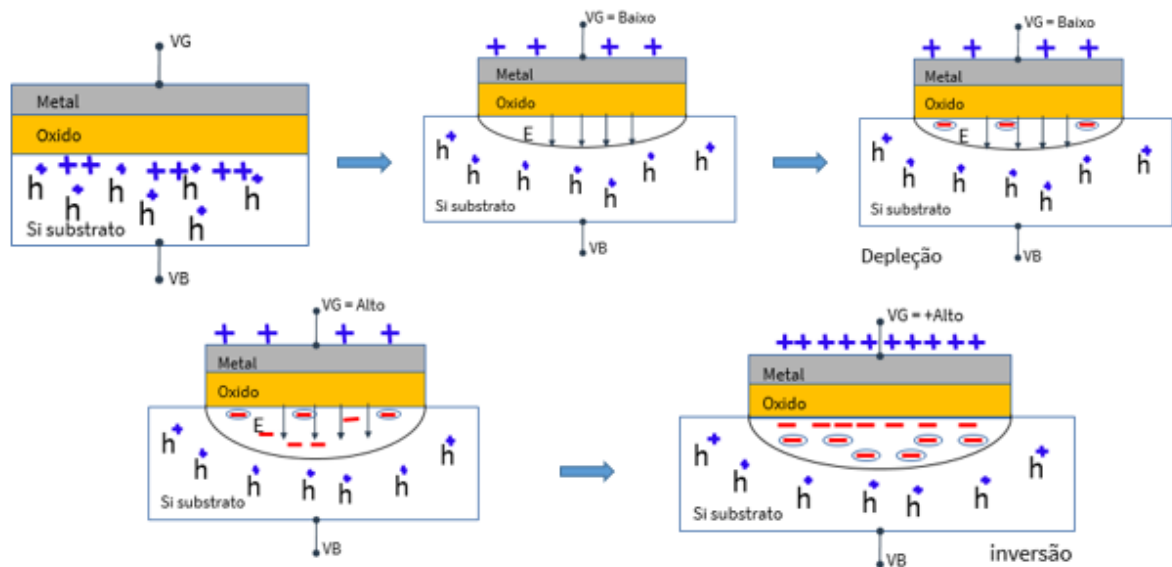
2.3 DISPOSITIVO MOSFET

O transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) é um importante componente da eletrônica moderna, sendo este um dos principais transistores da microeletrônica e empregado em uma ampla gama de aplicações e de dispositivos modernos. A alta capacidade de redução das dimensões destes transistores foi um dos fatores que levaram os dispositivos MOSFETs a terem um papel importante no desenvolvimento de novas tecnologias.

O coração desta tecnologia é o capacitor MOS (*Metal Oxide Semiconductor*), que através do potencial aplicado ao metal (futura porta do transistor) modula as cargas do lado do semiconductor (futuro canal do transistor). Considerando um substrato tipo P, a partir da Figura 11 é possível observar que, quando aplicado uma baixa tensão de porta (V_G) com valores positivos é criado um campo elétrico devido as cargas positivas na porta, o que leva a um afastamento das lacunas na interface entre oxido e o semiconductor (região de depleção). A medida que se aumenta a tensão V_G , aumenta a região de depleção na interface

óxido/semicondutor até que a máxima profundidade de depleção é atingida e uma camada de elétrons livres começa a se formar. O dispositivo começa a operar na região de inversão.

Figura 11 - Operação do capacitor MOS

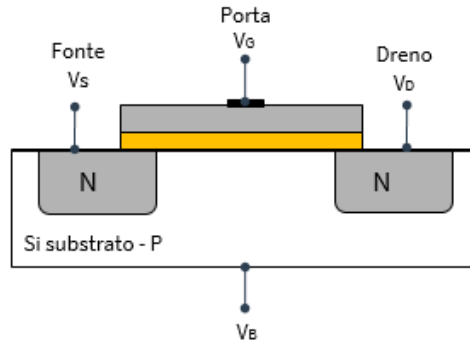


Fonte: Elaborado pelo autor

Incluindo os contatos de fonte e dreno, tem-se o transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). O princípio de funcionamento do transistor MOSFET está baseado no controle capacitivo de cargas no canal posicionadas logo abaixo do isolante de porta, ou óxido de porta (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003). Uma estrutura simples do transistor MOSFET está representada na Figura 12.

A partir da Figura 13 é possível observar que no caso em que nenhuma diferença de potencial é aplicada entre a fonte e o dreno do dispositivo e, uma tensão V_{GS} menor que a tensão de faixa plana é aplicada a porta, lacunas do substrato são atraídas para a região da superfície do substrato (Figura 13A). Neste caso, o transistor está trabalhando na região de corte com a superfície em acumulação. Aumentando a tensão V_{GS} para valores maiores que a tensão de faixa plana e menores que a tensão de limiar (Figura 13B) o transistor se encontra na região de depleção e quando se aplica uma tensão de porta maior ou igual a tensão de limiar (V_T) (Figura 13C), levando em consideração que não se tem nenhuma diferença de potencial entre fonte e dreno, elétrons livres em grandes quantidades são atraídos à superfície. Esses elétrons formam o caminho de condução de corrente entre a fonte e o dreno. Neste caso, o dispositivo está trabalhando na inversão, porém, não há passagem de corrente pelo mesmo.

Figura 12 - Transistor MOSFET



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando um canal de elétrons é criado abaixo da porta ($V_G > V_T$) e há uma diferença de potencial entre fonte e dreno, o dispositivo MOSFET conduz corrente. Neste caso, o transistor pode ainda operar na região de triodo ou saturação. Assim, é preciso avaliar a diferença de potencial entre fonte e dreno (V_{DS}) para entender o funcionamento do MOSFET. Para $0 < V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ temos que a camada de inversão vai se estender desde a fonte até dreno, porém como V_D é maior que V_S (para o caso do transistor NMOSFET), a camada de portadores de inversão no lado do dreno é menor que no lado da fonte (Figura 13d). Neste caso o transistor está operando na região de triodo, onde a corrente de dreno pode ser descrita como em (1).

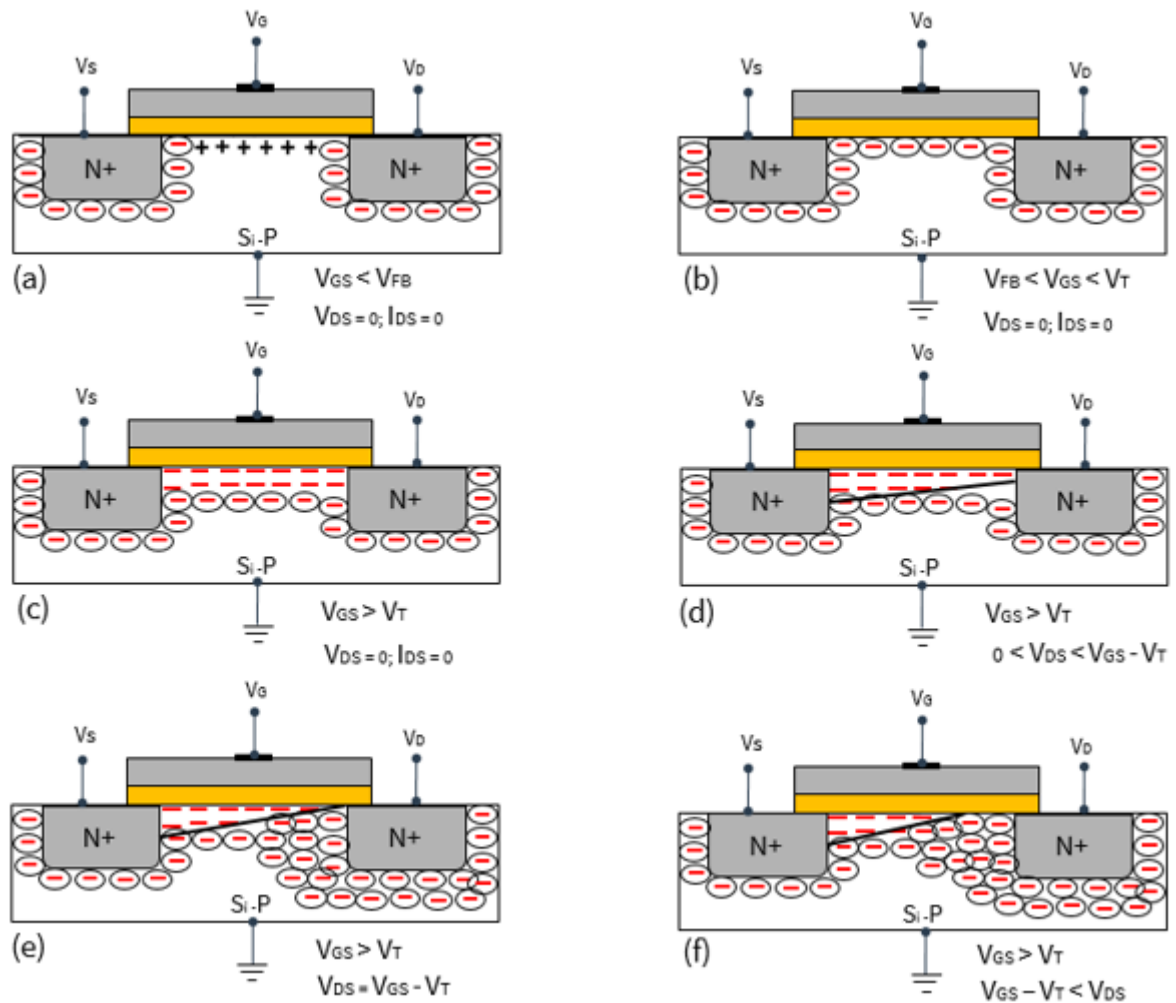
$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left[(V_G - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (1)$$

onde L é o comprimento do canal e W a largura do canal do transistor.

Ao aumentar V_{DS} a valores iguais a $V_{GS} - V_T$, ocorre um pinçamento da camada de inversão no lado do dreno. A tensão onde acontece o pinçamento do canal é denominada tensão de saturação ($V_{DS SAT}$). Esta é a tensão de transição entre a região de triodo e saturação (Figura 13e). Aumentando V_D para valores acima de $V_{DS SAT}$, faz com que o ponto de *pinch off* se desloque para o lado da fonte. Nesta condição a corrente entre a fonte e o dreno atinge o valor máximo. Para valores maiores de V_D , não há aumento significativo na corrente. Neste caso, o transistor está operando na saturação (Figura 13f) (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003) e a corrente pode ser descrita em (2).

$$I_{DSAT} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \frac{(V_G - V_T)^2}{2} \quad (2)$$

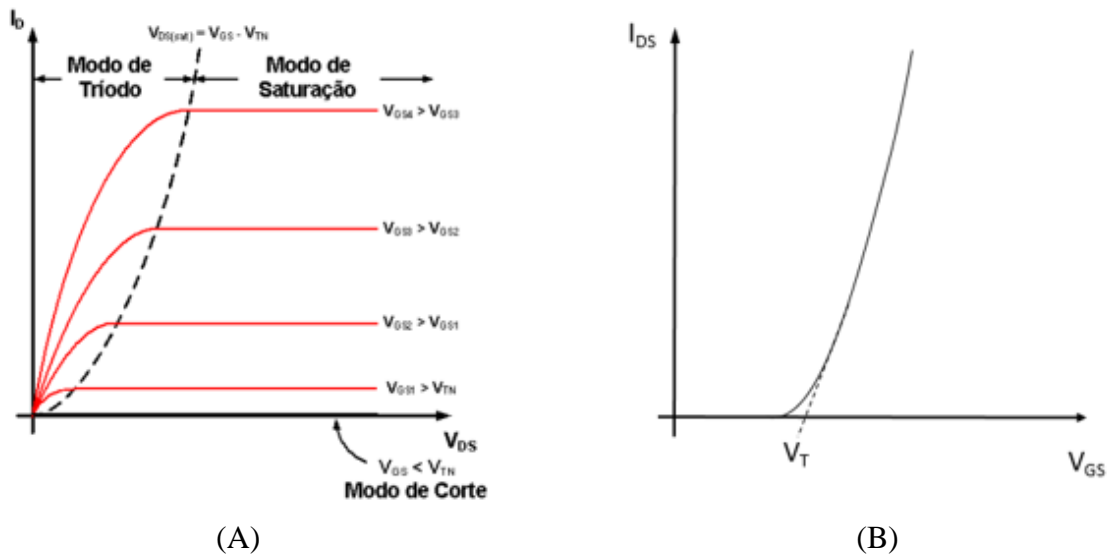
Figura 13 - Transistor MOS trabalhando em: (a) acumulação. (b) depleção. (c) inversão. (d) Região de triodo. (e) Transição triodo/saturação. (f) região de saturação.



Fonte: Adaptado de (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003)

As regiões de operação de um transistor também podem ser facilmente observadas nas curvas características do transistor $I_{DS} \times V_{DS}$ (característica de saída) e $I_{DS} \times V_{GS}$ (curva de transferência). A Figura 14 ilustra as curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ e $I_{DS} \times V_{GS}$ indicando cada uma das regiões de operação do transistor (triódo, saturação e corte), bem como a tensão de limiar associada ao transistor.

Figura 14 - Curvas características MOSFET. (a) $I_{DS} \times V_{DS}$ (b) $I_{DS} \times V_{GS}$



Fonte: Museu das comunicações –

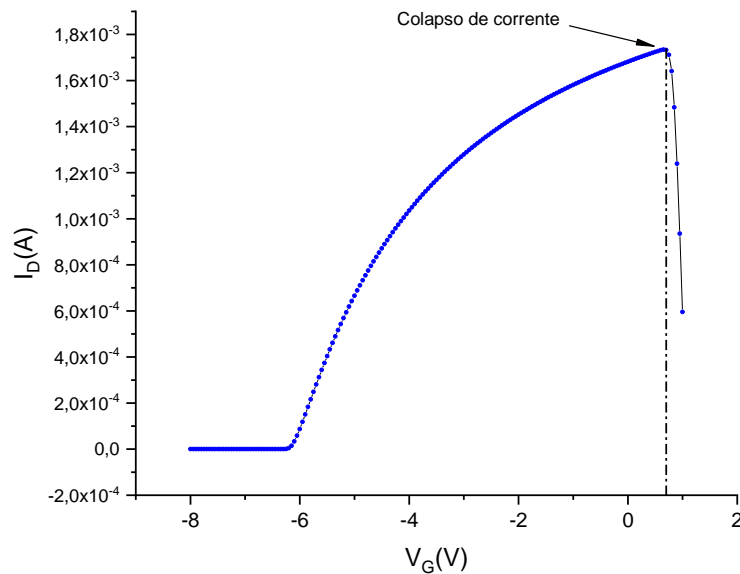
http://www.cmm.gov.mo/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_10_4_HowFETWorks.html. Acesso em nov.

2021

2.4 DISPOSITIVO MISHEMT / MOSHEMT

Como mencionado anteriormente neste estudo, o dispositivo HEMT consiste de uma junção Schottky entre o metal de porta e o semiconductor de barreira (Figura 9). Alguns problemas ocorrem quando há um aumento da tensão de porta pois, a região de depleção vai diminuindo até que praticamente toda a corrente passe pela porta, colapsando a corrente de dreno. A corrente de colapso dificulta a obtenção de dispositivos *normally off* uma vez que não se pode trabalhar com tensões de porta positivas.

A curva $I_D \times V_G$ da Figura 15 mostra o problema relacionado a fuga de corrente pela porta do dispositivo HEMT. Nota-se que, mesmo para valores negativos de tensões de porta o dispositivo já está conduzindo, ou seja, o dispositivo tem um V_T negativo, o que caracteriza um dispositivo *normally on*. Para um dispositivo construído com sistema de matérias AlGaIn/GaN, devido as polarizações induzidas no material, mesmo para valores negativos de porta, o canal de condução 2DEG já se forma tornando o dispositivo ligado. Devido as características da junção Schottky, uma alta corrente de fuga pela porta acontece em valores próximos a 700mV de V_G .

Figura 15 - Curva I_D x V_G do dispositivo HEMT.

Fonte: Elaborado pelo autor

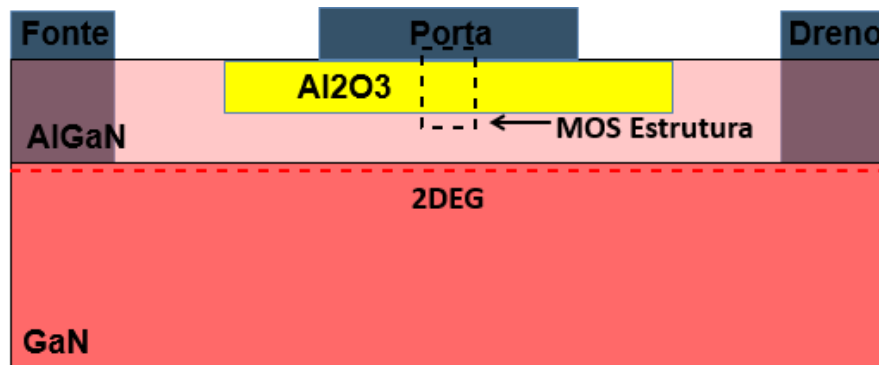
Estudos estão sendo realizados e novos dispositivos estão sendo desenvolvidos para suplantarem o problema da corrente de colapso no dispositivo HEMT. Uma das soluções é utilizar a estrutura MOS. Assim, um dispositivo que tem se mostrado muito promissor para resolver o problema da corrente de colapso no HEMT, é o dispositivo MOSHEMT. De forma geral, esta estrutura pode ser chamada de MISHEMT, se referindo ao fato de um isolante, sendo óxido ou não, ser utilizado como material de isolamento entre a porta e o semicondutor.

2.4.1 ESTRUTURA DO DISPOSITIVO

Uma estrutura simples do transistor MISHEMT é representada na Figura 16. Um óxido, ou isolante, é inserido logo abaixo do metal de porta criando uma estrutura MO(I)SHEMT.

Estudos indicam que a estrutura MO(I)S no dispositivo MO(I)SHEMT minimiza/elimina a alta corrente de fuga da porta e melhora o desempenho do dispositivo (OUDUANGVILAI, LEE, *et al.*, 2019) (LAN, CHIN, *et al.*, 2014).

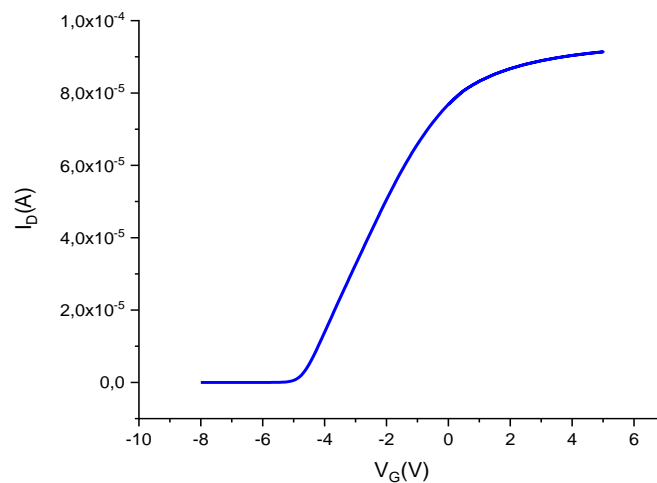
Figura 16 - Estrutura simples MOSHEMT AlGaIn/GaN.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 17 mostra a curva $I_D \times V_G$ para um dispositivo MISHEMT com estrutura $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$. Observa-se neste gráfico que não há colapso de corrente de dreno mesmo para tensões de porta de 5V. No entanto, o dispositivo ainda apresenta um valor de V_T muito negativo. Pesquisas estão sendo realizadas a fim de deslocar a tensão de limiar do dispositivo MISHEMT para valores positivos tornando o dispositivo *normally off*.

Figura 17 - Curva $I_D \times V_G$ dispositivo MISHEMT $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$



Fonte: Elaborado pelo autor

2.5 PARÂMETROS ELÉTRICOS

Alguns parâmetros elétricos importantes para um melhor entendimento dos dispositivos transistores serão abordados nesta seção. Esses parâmetros auxiliam na compreensão do comportamento do dispositivo.

Nota-se que, para transistores MOSFET, os modelos que descrevem o comportamento do transistor são muito bem conhecidos e se tem um consenso sobre os modelos a utilizar. Isso talvez ainda não se aplique para os transistores HEMT e MO(I)SHEMT. A literatura apresenta modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos dispositivos HEMT e MO(I)SHEMT, porém, parece ainda não haver um consenso sobre os modelos e a aplicação de um modelo geral.

O comportamento do transistor HEMT é fortemente dependente do material que é aplicado na construção do dispositivo. Por exemplo, tem-se que o HEMT AlGaAs/GaAs precisa ser dopado enquanto que o HEMT AlGaN/GaN não necessita de dopantes apresentando polarizações induzidas intrínsecas ao material. Essas polarizações devem ser consideradas no modelamento do dispositivo. Com o dispositivo MO(I)SHEMT acontece o mesmo e sendo este um dispositivo mais novo, pesquisas sobre seu comportamento ainda estão sendo realizadas.

2.5.1 TENSÃO DE FAIXA PLANA (V_{FB}) (FLAT BAND VOLTAGE)

Quando os materiais da estrutura MOS são colocados em contato, as bandas de energia do silício se curvam, ou dobram. O dobramento das bandas nesta situação pode acontecer por 3 fenômenos: diferenças na função trabalho do semicondutor e do eletrodo de porta, a presença de cargas no óxido e as armadilhas de interface (COLINGE e COLINGE, 2002). Portanto, pode-se definir a Tensão de Faixa Plana (*Flat Band Voltage*) como a tensão que deve ser aplicada à porta para que as bandas de energia do semicondutor voltem ao seu estado plano. Em um transistor MOSFET, V_{FB} pode ser definida pela equação (3).

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} \quad (3)$$

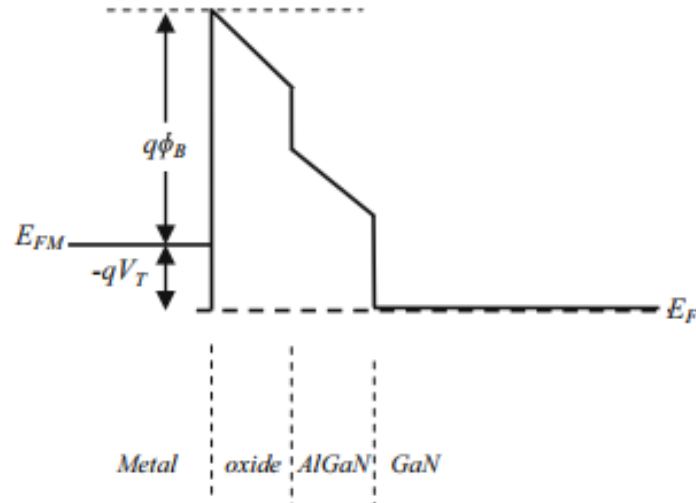
$$\phi_{ms} = \phi_m - \phi_{sc} \quad (4)$$

onde ϕ_{ms} é a diferença de função trabalho entre o metal de porta e o semicondutor, Q_{OX} são as cargas efetivas no óxido, C_{OX} a capacitância do óxido de porta.

O conceito de tensão de banda plana também pode ser aplicado para os transistores HEMT e MOSHEMT. No entanto, a condição de banda plana, neste caso, é alcançada quando o poço quântico se torna totalmente depletado, ou seja, desaparece por completo e as bandas de

energia se tornam planas (SWAIN, PANDA, *et al.*, 2015). A Figura 18 apresenta a condição de banda plana no dispositivo MISHEMT, que também pode ser análogo ao dispositivo HEMT.

Figura 18 - Representação da condição de banda plana no dispositivo MISHEMT.



Fonte: (SWAIN, PANDA, *et al.*, 2015)

Para o transistor HEMT, considerando um sistema de materiais AlGaAs/GaAs, a tensão de faixa plana V_{FB} pode ser dada pela equação (5) (SNOWDER e MILES, 1993).

$$V_{FB} = \phi_B - V_N - \frac{(\Delta E_C - \Delta E_F)}{q} \quad (5)$$

onde, ϕ_B representa a energia da altura da barreira na junção metal-semicondutor, ΔE_C é a descontinuidade na banda de condução, ΔE_F é descrito em (6) e V_N é a queda de tensão no material de barreira na condição de banda plana e pode ser dado por (7)

$$\Delta E_F = E_C - E_{FP} \quad (6)$$

E_C é a energia da banda de condução e E_{FP} é a energia de Fermi para doadores tipo P.

$$V_N = q \int_0^d \frac{N_D(x)}{\epsilon_i(x)} x dx \quad (7)$$

N_D é o perfil de dopantes na camada de barreira, $\epsilon_i(x)$ é a permissividade do material dependendo da posição x .

Em um transistor MO(I)SHEMT AlGaIn/GaN, a tensão de faixa plana pode ser expressa pela equação (8) (SWAIN, PANDA, *et al.*, 2015)

$$V_{FB} = - \left(\phi_{MSub} - \frac{Q_{OX} + Q_{it0}}{C_{OX}} - \frac{q\sigma_{pol}t_{AlGaIn}}{\epsilon_{AlGaIn}} \right) \left(\frac{1}{1 - qN_{it}/C_{OX}} \right) \quad (8)$$

onde, ϕ_{MSub} é a diferença na função trabalho entre o metal e o substrato GaN, Q_{it} são as cargas presentes na interface óxido/AlGaIn, Q_{it0} representa as cargas na interface do óxido para $V_{GS} = 0V$, N_{it} é a densidade de estados de interface, ϵ_{AlGaIn} é a permissividade elétrica do material AlGaIn, t_{AlGaIn} é a espessura da camada AlGaIn e σ_{pol} representa as cargas devido as polarizações induzidas (polarizações espontâneas e polarizações piezoelétricas) no material AlGaIn.

2.5.2 TENSÃO DE LIMIAR (V_T)

A tensão de limiar (V_T) de um transistor MOSFET é a mínima tensão que deve ser aplicada na porta do dispositivo para formar uma camada de inversão (COLINGE e COLINGE, 2002), ou criar um caminho de condução de corrente entre os terminais de fonte e dreno. A tensão de limiar pode ser definida em (9) (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003) como:

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{qN_A \cdot d_{max}}{C_{OX}} = \phi_{ms} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + 2\phi_F + \frac{qN_A \cdot d_{max}}{C_{OX}} \quad (9)$$

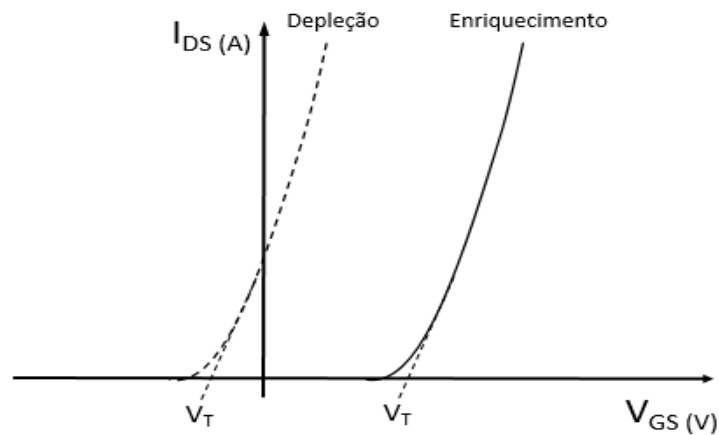
$$d_{max} = \sqrt{\frac{4\epsilon_{Si}\phi_F}{q \cdot N_A}}$$

N_A é a concentração de dopantes no material, ϵ_{Si} é a permissividade do silício, d_{max} é a depleção máxima.

Dependendo do material utilizado no eletrodo de porta e da concentração de dopantes no material, bem como de outros fatores, a tensão de limiar pode ter valores positivos ou negativos. Quando V_T de um transistor nMOS tem valores negativos o dispositivo é dito como sendo um dispositivo de modo depleção. O transistor de modo depleção, também conhecido como transistor *normally on*, já possui uma camada de inversão quando a tensão de porta for zero ou mesmo até para valores menores que zero. Por sua vez, dispositivos que operam com

V_T positivo são conhecidos como sendo transistores de modo enriquecimento, ou transistores *normally off*. Os transistores modo enriquecimento exigem uma tensão de porta positiva para criar a camada de inversão (COLINGE e COLINGE, 2002). Um gráfico com curvas I_{DS} x V_{GS} demonstrando o MOSFET modo depleção (V_T negativo) e modo enriquecimento (V_T positivo) está representado na Figura 19.

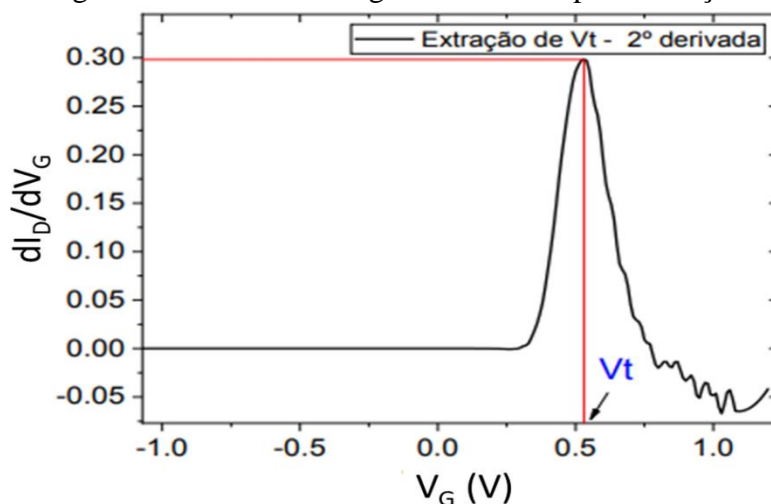
Figura 19 - Gráfico representando as curvas I_{DS} x V_{GS} para transistor MOSFET modo enriquecimento e modo depleção.



Fonte: adaptado (MARTINO, PAVANELLO e VERDONCK, 2003)

Um método bem conhecido para a extração da tensão de limiar dos dispositivos é o método da segunda derivada. Este método consiste em aplicar uma derivada de segunda ordem na curva da corrente de dreno em função da tensão aplicada à porta do dispositivo e a tensão de limiar será o valor de V_G que corresponde ao ponto de máximo da curva de I_D x V_G quando aplicado a segunda derivada. (Figura 20)

Figura 20 - Método da segunda derivada para extração de V_T



Fonte: (BRAGA, 2021)

Quando considerado dispositivos que se baseiam em canais de condução 2DEG, para o dispositivo estar desligado é necessário que a camada de depleção induzida pela tensão de porta atinja o 2DEG, cortando a condução. Nesta condição, a densidade de cargas no canal abaixo da porta é zero (JENA, SWAIN e LENKA, 2015).

No dispositivo HEMT AlGaIn/GaN, a tensão de limiar pode ser expressa pela equação (10) como descrito em JENA, SWAIN e LENKA (2015).

$$V_T = \phi_B - \Delta E_C - \frac{qN_D t_{AlGaIn}^2}{2\epsilon_{AlGaIn}} - \frac{q\sigma_{pol} t_{AlGaIn}}{\epsilon_{AlGaIn}} \quad (10)$$

onde, q é a carga do elétron, ϕ_B é a energia da altura da barreira na junção Schottky, ΔE_C é a descontinuidade da banda de condução na interface entre AlGaIn/GaN.

A equação (11) descreve o comportamento da tensão de limiar para o transistor MOSHEMT AlGaIn/GaN (JENA, SWAIN e LENKA, 2015).

$$V_T = \gamma(\phi_m - \chi_{AlGaIn}) + (1 - \gamma)\phi_0 - \frac{\gamma q N_D t_{AlGaIn}}{C_{OX}} - \Delta E_C - \frac{q\sigma_{pol} t_{AlGaIn}}{\epsilon_{AlGaIn}} \quad (11)$$

onde, ϕ_m é a função trabalho do metal, χ_{AlGaIn} é a afinidade eletrônica, ϕ_0 é a diferença de potencial entre o nível neutro e os limites da banda de condução. E_0 é o nível neutro. Todos os níveis acima de E_0 são estados aceitadores e abaixo de E_0 são estados doadores. N_D é o perfil de dopantes. γ é descrito em (12).

$$\gamma = \frac{1}{1 + N_{it} q^2 / C_{OX}} \quad (12)$$

2.5.3 TRANSCONDUTÂNCIA (g_m)

A transcondutância do transistor é definida como a variação da corrente no dreno com a tensão aplicada a porta (COLINGE e COLINGE, 2002). É uma medida de eficácia ou eficiência do controle da corrente de dreno pela tensão de porta. Um valor mais alto de g_m corresponde a uma maior alteração na corrente de dreno, para uma dada alteração em V_{GS}

(RAZAVI, 2010). A transcondutância (g_m) é definida em (13).

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_G} \quad (13)$$

De forma geral, a equação (13), sendo uma equação geral que descreve o comportamento da transcondutância em termos de corrente de dreno e tensão de porta, pode ser aplicada nos dispositivos HEMT e MO(I)SHEMT.

Uma abordagem do modelamento de g_m aplicado em transistores HEMT AlGaIn/GaN pode ser encontrado em (ELIZA, 2008) e para MISHEMT em (JENA, SWAIN e LENKA, 2015).

2.5.4 INCLINAÇÃO DE SUBLIMIAR (SS)

A corrente de sublimiar, como é conhecida a corrente do dreno abaixo do limiar, é independente da tensão do dreno quando assegurada a condição em que V_{DS} for muito maior que kT/q . Portanto, isto sugere que a corrente de sublimiar é causada pelo mecanismo de difusão e não pelo mecanismo de deriva (COLINGE e COLINGE, 2002). A equação (14) descreve a corrente de sublimiar.

$$I_D = \mu \frac{W}{L} q \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \frac{n_i^2}{N_A} [1 - \exp(-qV_D/kT)] \frac{\exp(q\Phi_s/kT)}{\left(-\frac{d\Phi_s}{dx} \right)} \quad (14)$$

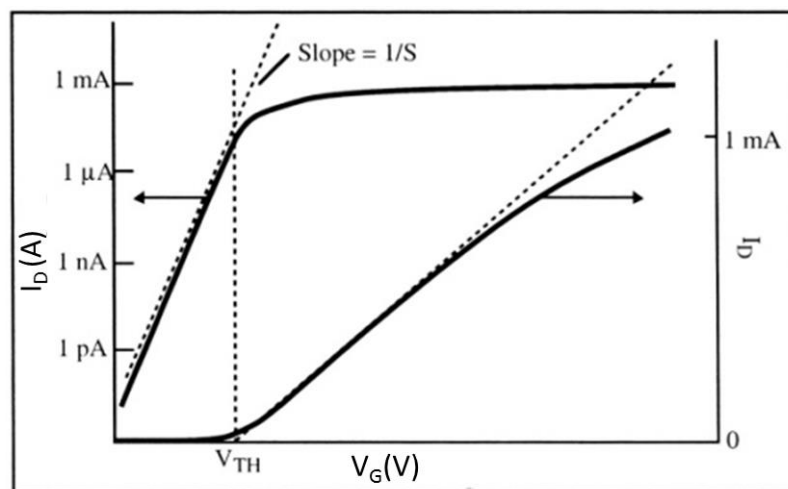
A equação mostra que a corrente de sublimiar aumenta exponencialmente com o potencial de superfície. O gráfico em $\log I_D \times V_G$ da Figura 21 mostra a corrente de sublimiar como uma linha reta. O inverso da inclinação desta linha é chamado de inverso da inclinação de sublimiar, ou simplesmente, inclinação de sublimiar (SS). O parâmetro SS é expresso em mV/dec e diz o quanto em milivolts de tensão de porta deve ser incrementada para aumentar a corrente do dreno por um fator de 10. Quanto menor o valor de SS, maior será a rapidez com que o dispositivo vai do estado desligado para o estado ligado (COLINGE e COLINGE, 2002). As equações (15) e (16) definem a inclinação de sublimiar.

$$SS = \frac{dV_G}{d \log(I_D)} \quad (15)$$

$$SS = \frac{kT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{OX}} \right) = 60 \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{OX}} \right) \frac{mV}{dec} \quad (temp. de 300K) \quad (16)$$

Sendo C_D a capacitância de depleção e C_{it} a capacitância devido aos estados de interface.

Figura 21 - Gráfico $I_D \times V_G$ representando a corrente do dreno em escala logarítmica e linear. A região da corrente de sublimiar e a inclinação de sublimiar.



Fonte (COLINGE e COLINGE, 2002)

O comportamento do parâmetro SS para o dispositivo HEMT AlGaIn/GaN pode ser caracterizado como em (17) (PRASAD, DWIVEDI e ISLAM, 2016).

$$SS = \frac{kT}{q} (1 + \eta) \ln(10) \quad (17)$$

Sendo η um fator de não idealidade relacionado as armadilhas de interface. η é aproximadamente 0,5945 para AlGaIn/GaN HEMT (PRASAD, DWIVEDI e ISLAM, 2016).

2.5.5 CONDUTÂNCIA DE SAÍDA (g_D)

A condutância de saída do transistor é um parâmetro que está relacionado com o desempenho do dispositivo na região de saturação. Este parâmetro relaciona a corrente de saída I_{DS} com V_{DS} , ou seja, o quanto a corrente do dreno é influenciada pela variação da tensão

aplicada no dreno (BORDALLO, 2017). O parâmetro de g_D pode ser obtido pela derivada da corrente I_{DS} pela tensão V_{DS} conforme a equação (18)

$$g_D = \frac{dI_{DS}}{dV_{DS}} \quad (18)$$

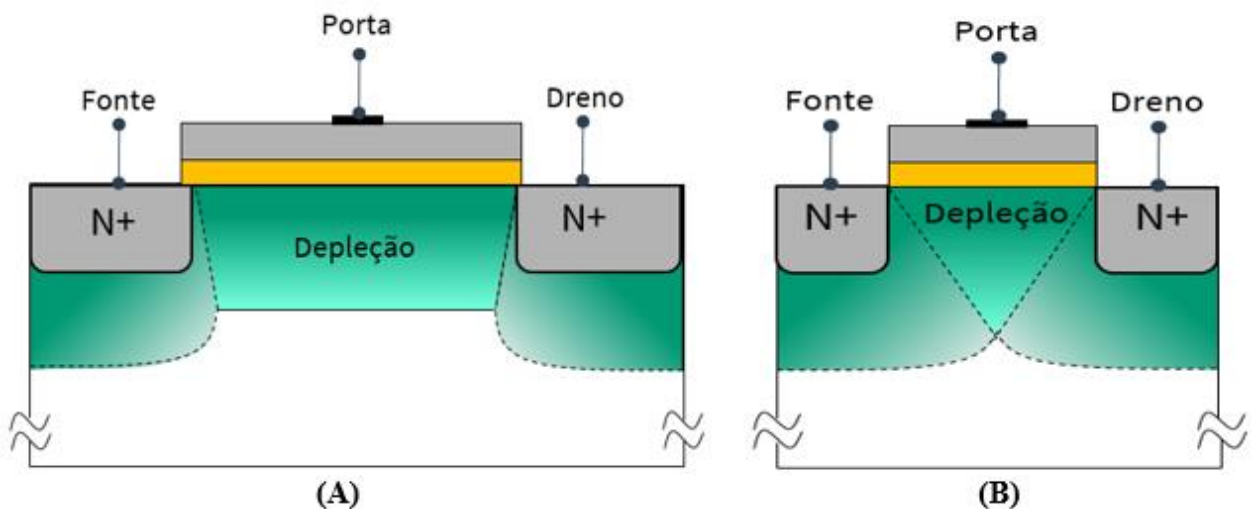
A condutância é um importante parâmetro para dispositivos HEMTs AlGaN/GaN que determina o ganho máximo de tensão que o dispositivo pode alcançar (BELLAKHDAR, TELIA, *et al.*, 2012).

Mais detalhes do modelamento de g_D para o transistor HEMT, encontra-se em (BELLAKHDAR, TELIA, *et al.*, 2012)

2.5.6 EFEITO DE CARNAL CURTO E O PARÂMETRO DIBL

A evolução na tecnologia dos processos de fabricação leva a uma constante redução das dimensões dos dispositivos semicondutores, especialmente do comprimento da porta. Essas constantes reduções trazem consigo alguns problemas de confiabilidade não vistos em dispositivos de canal longo. Esta tendência de redução das dimensões do dispositivo resulta no surgimento de vários efeitos indesejados (COLINGE e COLINGE, 2002). Dispositivos de canal longo e canal curto estão sendo ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Regiões de depleção dos dispositivos MOSFET de canal longo (A) e de canal curto (B)



Fonte: Elaborado pelo autor

Drain Induced Barrier lowering, ou apenas DIBL, é um efeito de canal curto que mostra quanto a tensão aplicada ao dreno afeta a tensão de limiar. Quanto maior o V_D , maior a região de depleção do dreno o que, por sua vez, pode induzir a redução da barreira de potencial na fonte o que provoca um menor controle de cargas do canal. O DIBL causa a redução da tensão de limiar (SILVA, 2011). O parâmetro DIBL pode ser extraído utilizando a equação (19).

$$DIBL = \frac{|V_{TH_{triode}} - V_{TH_{sat}}|}{V_{DS_{sat}} - V_{DS_{triode}}} \quad (19)$$

$V_{TH_{triode}}$ e $V_{DS_{triode}}$ são, respectivamente, as tensões de limiar e tensões de dreno na região de triodo, $V_{TH_{sat}}$ e $V_{DS_{sat}}$ são as tensões de limiar e de dreno na região de saturação.

2.5.7 PARÂMETRO GANHO INTRÍNSECO DE TENSÃO (A_V)

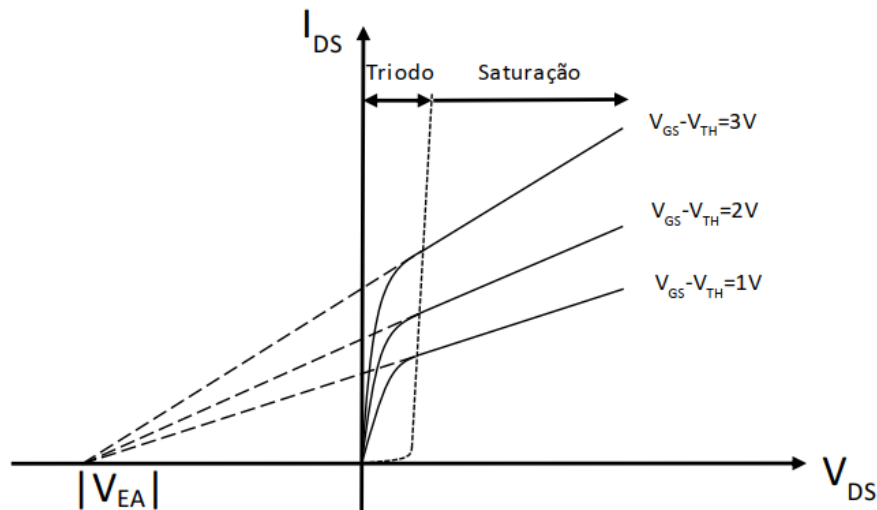
Uma das características mais importantes de um transistor, para aplicações analógicas, é a sua capacidade de amplificação (PERINA, 2021). Sendo uma importante figura de mérito para análises AC, o ganho intrínseco de tensão (A_V) pode ser obtido pela razão entre a transcondutância sobre a condutância de saída ou pela eficiência do transistor multiplicada pela tensão *Early* (V_{EA}) como descrito pela equação (20).

$$A_V = \frac{g_m}{g_D} \approx \frac{g_m}{I_{DS}} \cdot V_{EA} \quad (20)$$

2.5.8 TENSÃO EARLY (V_{EA})

O campo elétrico criado pela polarização da tensão do dreno (V_D) faz aparecer uma camada de depleção na junção dreno-substrato (Figura 13f). Essa camada de depleção aumenta à medida que V_D aumenta. O aumento da camada de depleção entre dreno-substrato causa uma diminuição no comprimento efetivo do canal o que provoca um aumento na corrente de dreno (I_D). V_{EA} é um parâmetro de medida indireta que relaciona a corrente do dreno com a tensão de dreno. Pode ser extraído diretamente do gráfico $I_{DS} \times V_{DS}$ extrapolando a parte linear da curva até o ponto de corrente nula. A Figura 23 mostra o ponto de V_{EA} no gráfico.

Figura 23 - Obtenção do parâmetro VEA utilizando a extrapolação da curva I_{DS} x V_{DS} .



Fonte: (PERINA, 2021)

2.5.9 PONTO INVARIANTE COM A TEMPERATURA (ZTC)

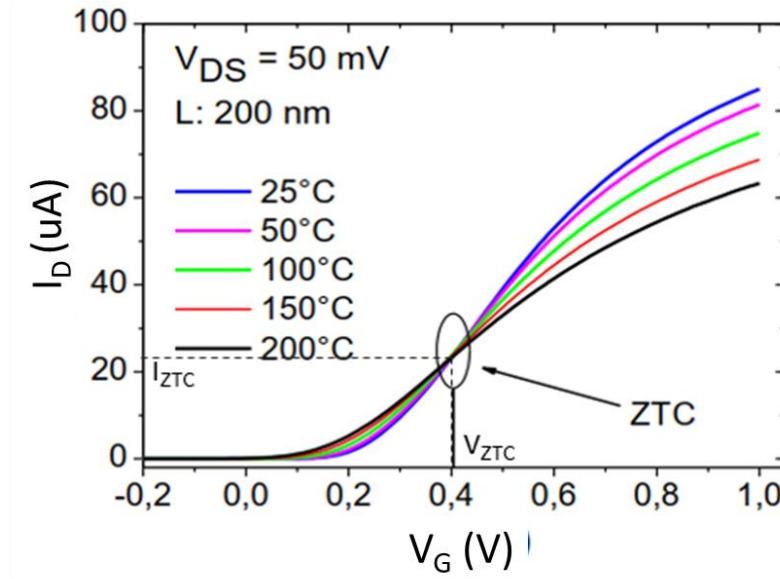
A

Figura 24 apresenta as curvas I_D x V_G para temperaturas variando de 25 °C a 200 °C. A análise do gráfico mostra que existe um ponto onde todas as curvas da corrente do dreno se encontram, ou se cruzam, para uma mesma tensão de porta, independente da temperatura. Este ponto é chamado de ponto invariante com a temperatura ou ZTC (*Zero Temperature Coefficient*). De forma geral, tem-se:

$$\frac{dI_{DS}}{dT} = 0 \quad (21)$$

Por definição, o ponto invariante com a temperatura (ZTC) é o ponto de polarização de porta que resulta em uma corrente de dreno (I_D) constante, ou quase constante, com a variação de temperatura (COELHO, 2021). No MOSFET, o parâmetro ZTC é devido a dois fenômenos que agem de forma compensatória entre si. Com o aumento da temperatura ocorre a redução de V_T devido a redução do nível de Fermi, o que promove aumento I_D , e em contrapartida, ocorre também a degradação da mobilidade dos elétrons o que resulta na redução de I_D .

Figura 24 - Curvas $I_D \times V_G$ para várias temperaturas de operação e o ponto ZTC



Fonte: Adaptado de (COELHO, 2021)

2.5.10 MOBILIDADE

Quando um campo elétrico é aplicado a um cristal, o elétron fluindo nesse cristal apresenta uma velocidade de deriva que é influenciada pelas interações do elétron com os defeitos de rede, as impurezas da rede e as vibrações dos átomos na rede cristalina provenientes principalmente pela temperatura. A velocidade de deriva é dada pela equação (22)

$$v_{dn} = \mu \epsilon \quad (22)$$

onde, ϵ é o campo elétrico aplicado e μ é a mobilidade do elétron na banda de condução. Da equação (23), tem-se que a mobilidade é:

$$\mu = \frac{v_{dn}}{\epsilon} \quad (23)$$

Portanto, a mobilidade é uma constante de proporcionalidade entre a velocidade de deriva e o campo elétrico e expressa o quão facilmente um elétron se move dentro do cristal na presença de um campo elétrico. A mobilidade também pode ser dada pela equação (24).

$$\mu = \frac{q\tau_n}{m_e^*} \quad (24)$$

onde m_e^* é a massa efetiva do elétron. τ_n é o tempo de relaxação do elétron ou, o tempo médio entre duas colisões do elétron na rede cristalina.

2.5.11 EFEITOS DA TEMPERATURA

Tensão de limiar

De (25), pode-se notar que o nível de Fermi (ϕ_F) é dependente da temperatura e a equação (9) expressa a relação de V_T com o nível de Fermi. Portanto, devido a dependência do nível de Fermi com a temperatura, o nível de Fermi aumenta com a redução da temperatura (AGOPIAN, 2008), e devido a dependência da tensão de limiar com o nível de Fermi, o parâmetro V_T aumenta com a redução da temperatura.

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (25)$$

onde K é a constante de Boltzmann, q a carga do elétron, T a temperatura em kelvin, N_A a concentração de dopantes (aceitadores) e n_i é a concentração intrínseca de portadores

Mobilidade

A mobilidade diminui com o aumento da temperatura (por causa das vibrações térmicas da rede (phonons)), e diminui com o aumento de impurezas e defeitos do cristal que causam maiores colisões dos elétrons (Scattering) (COLINGE e COLINGE, 2002). A dependência da mobilidade com a temperatura pode ser expressa pela equação (26).

$$\mu(T) \propto T^{-3/2} \quad (26)$$

A dependência da mobilidade sobre a concentração de impurezas é dada por:

$$\mu(N) \propto \frac{T^{-3/2}}{N} \quad (27)$$

onde, T é a temperatura e N a concentração de impurezas. O que produz a equação (28) quando ambos são levados em consideração.

$$(28)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu T} + \frac{1}{\mu N}$$

O transistor HEMT apresenta uma alta mobilidade devido o canal de condução ser formado em um material que apresenta uma característica de alta mobilidade, mas a dependência com a temperatura descrita acima ainda é válida.

Transcondutância (g_m)

A equação (13) mostra a relação direta da transcondutância com a corrente I_D . De (1), nota-se que I_D é diretamente proporcional a mobilidade μ . Assim sendo, a transcondutância está relacionada com a mobilidade dos portadores (μ), e seu comportamento com a temperatura está ligado ao estudo da mobilidade. A mobilidade diminui com o aumento da temperatura o que ocasiona uma menor I_D e, por conseguinte, uma menor transcondutância. Há uma relação entre o comportamento da mobilidade sob a influência da temperatura e o comportamento da transcondutância sob a influência da temperatura (AGOPIAN, 2008).

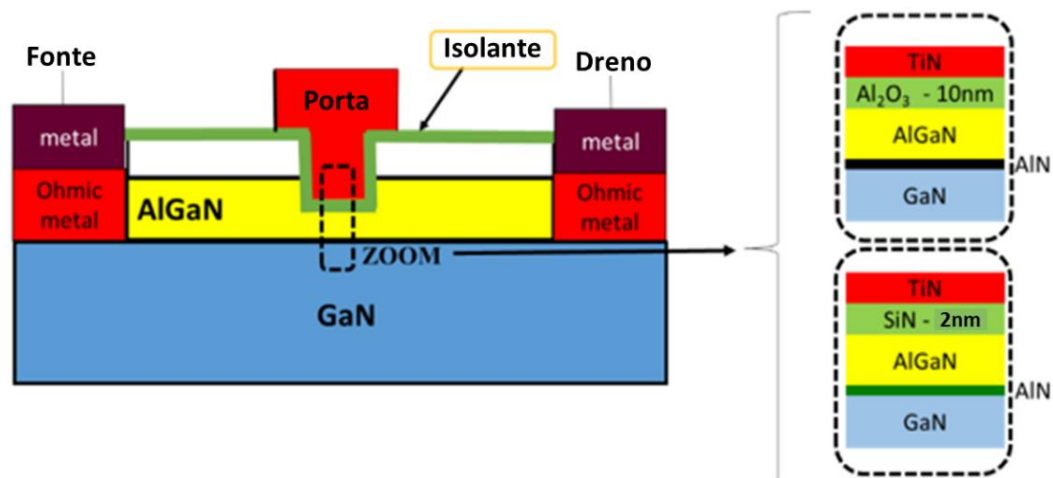
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritas as estruturas dos transistores utilizados neste estudo, bem como o software e os modelos utilizados nas simulações.

3.1 ESTRUTURA DO DISPOSITIVO

Para este estudo, foi analisado experimentalmente um dispositivo fabricado no IMEC, Bélgica, bem como foram realizadas simulações numéricas deste dispositivo. Essas simulações levaram em consideração o dispositivo fabricado com suas características construtivas para que o transistor simulado tivesse o mesmo comportamento do transistor fabricado. O dispositivo fabricado está representado na Figura 25.

Figura 25 - Representação dos dispositivos MOSHEMT (dielétrico de porta de Al_2O_3) e MISHEMT (dielétrico de porta de SiN_x).



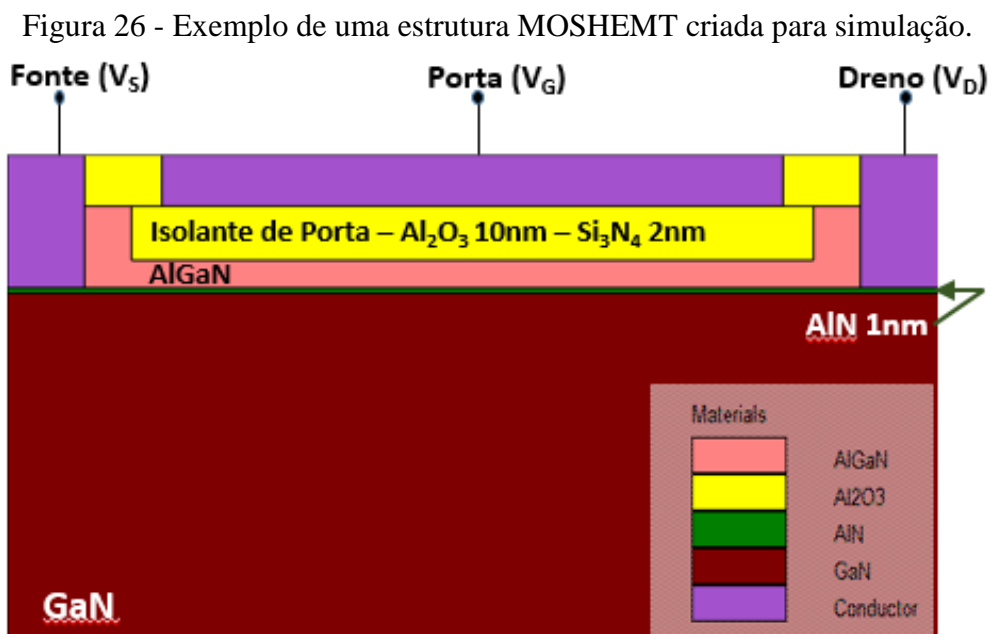
Fonte: Adaptado (AGOPIAN, CARMO, *et al.*, 2021)

Dispositivo MO(I)SHEMT Isolante/AlGaN/AlN/GaN fabricado consiste de uma camada de GaN crescida em um substrato de silício seguida por uma camada de AlN de 1nm de espessura. Acima da camada AlN foi depositado a camada barreira de AlGaN de 15nm de espessura. Dois diferentes materiais foram utilizados como isolante de porta para o dispositivo MO(I)SHEMT, configurando dois diferentes sistemas de materiais a serem analisados. Foram utilizados como isolantes de porta os materiais Al_2O_3 de 10nm de espessura para o dispositivo MOSHEMT e Si_3N_4 com uma espessura de 2nm para o isolante de porta no dispositivo

MISHEMT. O sistema é completo com os metais de contatos de porta (TiN), fonte e dreno bem como a passivação.

3.2 SIMULAÇÃO

Com o intuito de simular os efeitos da escolha de diferentes materiais e diferentes dimensões no dispositivo MO(I)SHEMT, utilizou-se o simulador de dispositivos Atlas da Silvaco. Este software permite uma simulação que nos ajuda a compreender a física que explica o comportamento do dispositivo. Utilizando o ambiente de simulação “*Deckbuild*”, uma estrutura do dispositivo MO(I)SHEMT foi desenvolvida para simular o seu comportamento elétrico. A estrutura criada para simulação se trata de uma estrutura bidimensional, portanto, todos os resultados são obtidos por unidade de largura do transistor ($/\mu\text{m}$). A Figura 26, extraída do ambiente de simulação, mostra uma representação do dispositivo simulado.



Os parâmetros medidos e simulados levaram em consideração ambos os materiais utilizados como isolante de porta (Al_2O_3 e Si_3N_4) e o comportamento do dispositivo para ambos os materiais. Acima do material utilizado como isolante de porta foi inserido o material de porta circundado por uma camada de material isolante utilizado como passivação. Por fim, foram criados os contatos de fonte e dreno em ambos os lados do contato de porta. Para a simulação foi desenvolvida uma grade de pontos (*mesh*), sendo que os espaçamentos entre os pontos, ou

nós, dessa malha são muito menores nas áreas de maior interesse na estrutura, a saber, onde acontecem as junções dos materiais e onde acontecem os canais de condução.

Alguns modelos para descrever o comportamento físico do dispositivo foram considerados nas simulações. Para considerar os efeitos de recombinação e descobrir a probabilidade de geração e recombinação de portadores, elétrons e lacunas, através do fenômeno de armadilha ou defeitos no material, o modelo SRH (*Shockley Read Hall*) tem sido empregado na simulação do dispositivo. Esta equação pode ser encontrada e discutida com maior profundidade em SILVACO (2018). O modelo albrct é utilizado para mobilidade em baixo campo de elétrons e lacunas. Outros dois modelos que foram utilizados na simulação do dispositivo MISHEMT foram o CONMOB, que especifica a mobilidade dependente da concentração e o FLDMOB, que habilita o modelo da mobilidade dependente do campo elétrico. Drift Diffusion, Polarization, Calc.Strain e Polar Scale são modelos que também foram utilizados na simulação. A modelagem dos efeitos de polarização é importante em dispositivos baseados em GaN, sendo que o GaN apresenta efeitos de polarizações espontâneas que devem ser levadas em conta na simulação do dispositivo, pois esses efeitos induzem a criação do 2DEG sem a necessidade de dopagem. O modelo Polarization habilita os cálculos de polarizações em dispositivos baseados em GaN. Calc.Strain calcula a tensão que pode ser ocasionada pela incompatibilidade de rede que possa existir no sistema de materiais utilizado. Uma abordagem mais detalhada desses modelos se encontra em SILVACO (2018).

O dispositivo foi simulado em temperatura ambiente, variando-se as tensões de polarizações. A tensão de dreno permaneceu em 0,05V. Nas simulações a tensão de polarização de porta variou de -8V a 5V. As simulações foram validadas tendo como base as respostas do dispositivo fabricado às medidas feitas em laboratório.

Os resultados obtidos nas medidas do dispositivo fabricado e nas simulações geradas são discutidos na próxima seção e os respectivos gráficos gerados são analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados provenientes das medições experimentais e das simulações em software serão analisados e discutidos.

4.1 COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL DO DISPOSITIVO

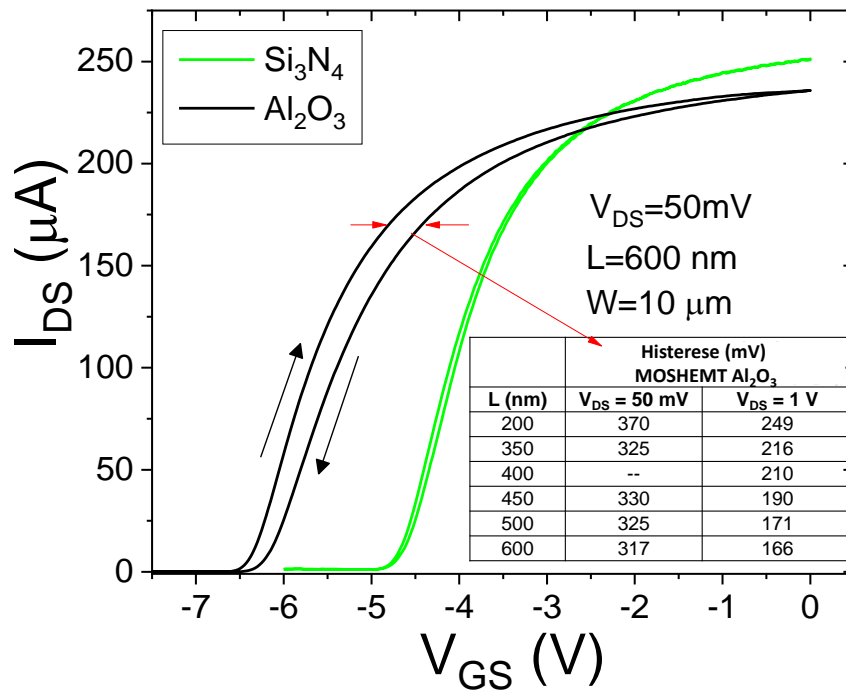
Nesta sessão serão apresentados e discutidos resultados obtidos nas medições e simulações dos dispositivos estudados. Para medições e simulações, o dispositivo MISHEMT foi configurado com dois diferentes isolantes de porta e diferentes espessuras dos isolantes. Nos gráficos, chamou-se de dispositivo MOSHEMT, o transistor com isolante de Al_2O_3 com espessura de 10nm e de dispositivo MISHEMT, o transistor com material isolante de Si_3N_4 com 2nm de espessura.

4.1.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DISPOSITIVO VARIANDO A TEMPERATURA E O COMPRIMENTO DO CANAL. DADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS

As curvas experimentais $I_{\text{DS}} \times V_{\text{GS}}$ dos dispositivos com diferentes isolantes de porta são apresentadas na Figura 27.

Nota-se uma diferença considerável na tensão de limiar entre os dispositivos. O transistor com isolante de porta Si_3N_4 de 2nm apresentou uma tensão de limiar com valores menos negativos que o dispositivo com óxido de porta de Al_2O_3 de 10nm. As curvas apresenta uma histerese de V_{T} . A histerese vista no gráfico, pode estar relacionado com o fenômeno de armadilhamento de cargas no dielétrico de porta. O deslocamento positivo de V_{T} pode estar associado ao armadilhamento de cargas no isolante de porta, ou o armadilhamento de elétrons nos estados de interface. Outra possível explicação seria a degradação da resistência de estado ligado (*ON-resistance*)

Figura 27 - Curvas experimentais I_{DS} x V_{GS} para os dispositivos fabricados com diferentes dielétricos de porta para $T=25^\circ\text{C}$. Tabela inserida com os valores de histerese para duas diferentes tensões de dreno.



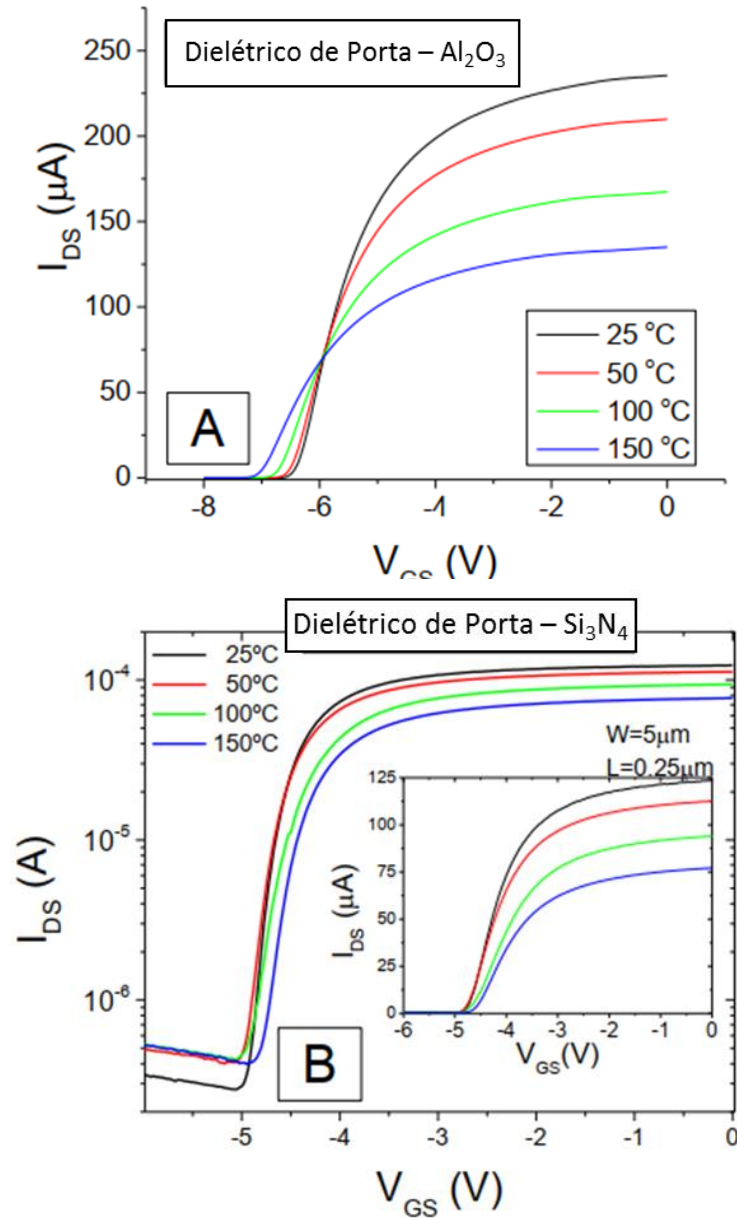
Fonte: Elaborado pelo autor

A degradação da resistência *ON* (estado ligado), ocorre devido a necessidade de maiores tensões de polarizações para um mesmo valor de corrente do dispositivo. (ROCCAFORTE, GRECO, *et al.*, 2019). Para maiores tensões de polarização do dreno, o deslocamento de V_T se tornou menor, o que por sua vez, reduziu o deslocamento dos valores de histerese, como apresentado na tabela inserida no gráfico da Figura 27. Quando comparados os dispositivos de diferentes isolantes de porta, pode-se observar que o MISHEMT com isolante de porta de Si_3N_4 tem uma histerese muito menor que o dispositivo com isolante de porta construído de Al_2O_3 . Sendo ainda menor a medida que a tensão de polarização aumenta, tornando-se assim desprezível.

Observando a tensão de limiar de ambos os dispositivos, pode-se notar que o dispositivo com isolante de Si_3N_4 de 2nm tem um deslocamento de V_T para valores menos negativos em relação ao dispositivo construído de Al_2O_3 de 10nm. Esse deslocamento é de quase 2 volts. Tal deslocamento de V_T para valores menos negativos observado entre os dispositivos pode ser resultado da espessura e da permissividade do material utilizado como isolante de porta. Mesmo desconsiderando a permissividade dos materiais em questão, o comportamento dos dispositivos indica uma relação direta entre o deslocamento de V_T na direção positiva e a espessura do dielétrico utilizado como material de isolante de porta (SWAIN, JENA e LENKA, 2017). As

curvas experimentais I_{DS} x V_{GS} para os dispositivos MOSHEMT e MISHEMT variando a temperatura de 25°C a 150°C são apresentadas nas Figura 28 A e B..

Figura 28 – Curvas experimentais de I_{DS} x V_{GS} com temperaturas variando de 25°C a 150°C para transistores com dielétrico de porta de Al_2O_3 (A) e Si_3N_4 (B).



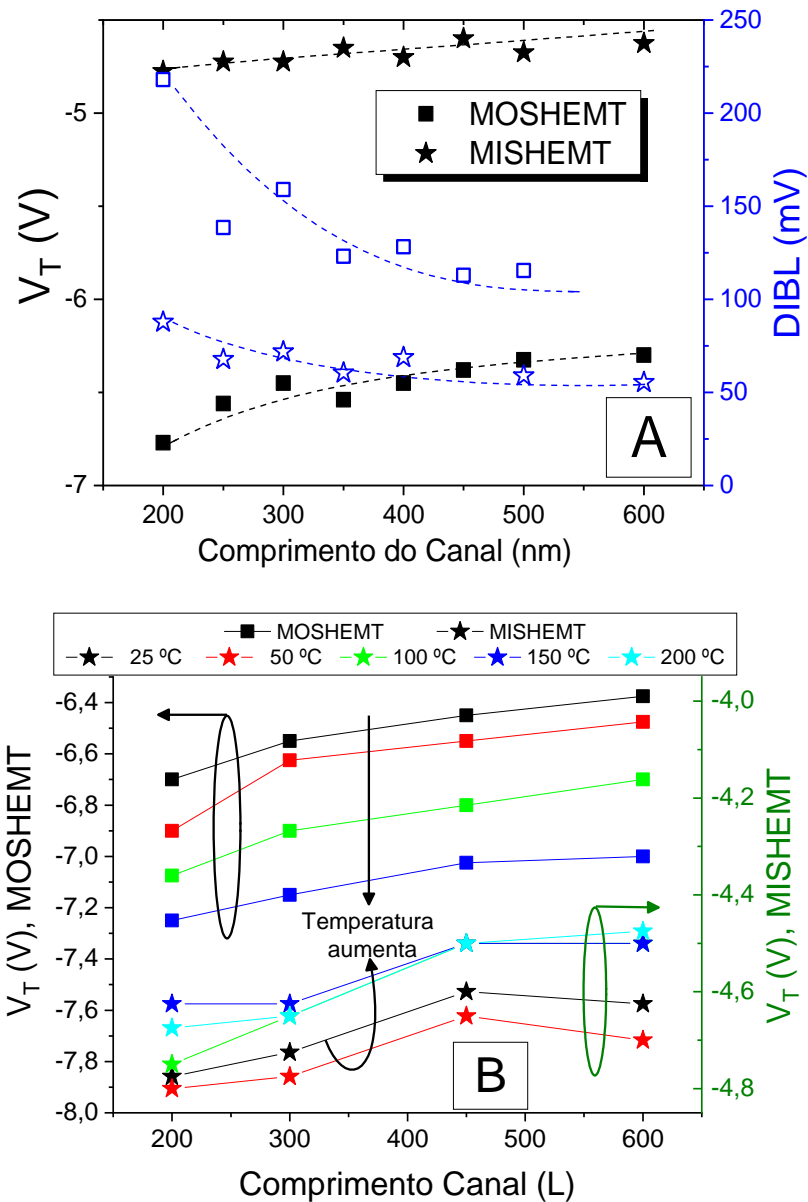
Fonte: Elaborado pelo autor

As características de transferência de ambos os dispositivos são apresentadas nos gráficos da Figura 28A e Figura 28B. O dispositivo MOSHEMT (Figura 28A) teve um comportamento esperado, mostrando um ponto de coeficiente de zero temperatura (ZTC) devido a competição entre a redução da tensão de limiar e a degradação da mobilidade. No

dispositivo com isolante de Si_3N_4 não foi encontrado o ZTC.

As curvas experimentais da tensão de limiar e o parâmetro DIBL em função do comprimento do canal do transistor são apresentadas na Figura 29. Os parâmetros foram medidos para diferentes valores de comprimento do canal do transistor (200nm a 600nm).

Figura 29 – Curvas experimentais dos parâmetros de V_T e DIBL como função do comprimento do canal para os dispositivos MOSHEMT com dielétricos de porta de Al_2O_3 e MISHEMT com dielétrico de porta de Si_3N_4 (A). Comportamento do parâmetro V_T em diferentes temperaturas para ambos os dispositivos (B).



Fonte: Elaborado pelo autor

Quando comparado ambos os dispositivos, observa-se que o deslocamento de V_T foi maior para dispositivos com menores comprimentos de canal devido a influência do efeito de

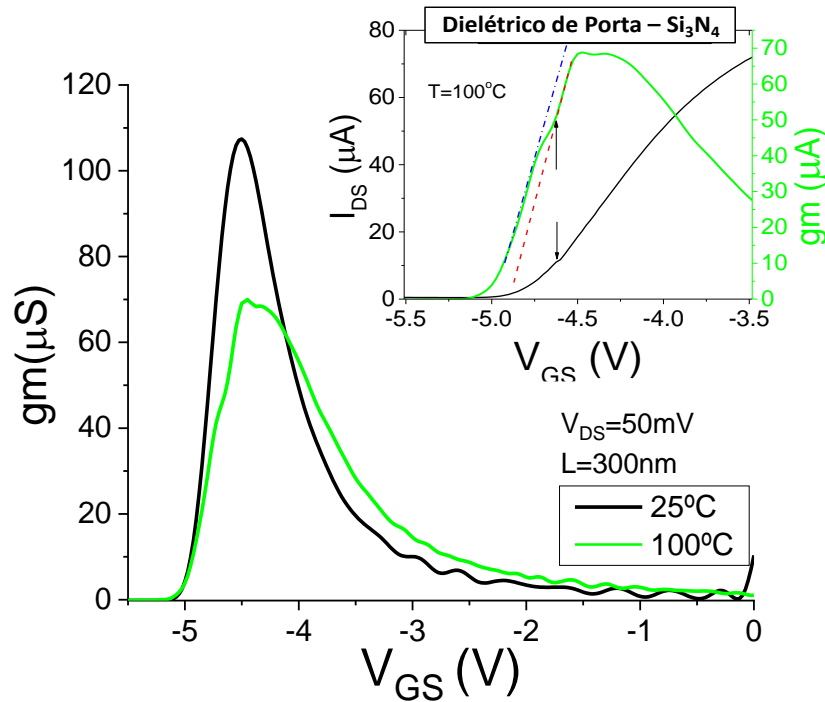
canal curto nos dispositivos. Para dispositivos com maiores comprimentos de canal a diferença do deslocamento de V_T é da ordem de 1,75V, sendo que para dispositivos de menores comprimentos de canal essa diferença de deslocamento de V_T entre dispositivos é da ordem de 2,025V. A análise do gráfico sugere que o dispositivo MOSHEMT sofre mais com os efeitos de canal curto. A medida que o comprimento do canal diminui, o dispositivo MISHEMT apresenta valores menos negativos de V_T e valores menores de DIBL em comparação com o dispositivo de MOSHEMT

O parâmetro DIBL (*Drain Induced Barrier Lowering*) é um efeito de canal curto relacionado a redução da tensão de limiar dos transistores com o aumento da polarização de dreno. Quanto menor o comprimento do canal do dispositivo, maior a influência do parâmetro DIBL em dispositivos MOS.

Quando analisado o parâmetro DIBL na Figura 29A, pode ser observado que o dispositivo MISHEMT apresenta uma melhor resposta ao parâmetro DIBL. Embora o dispositivo com isolante de Si_3N_4 apresente uma menor influência da tensão de porta sobre a tensão de limiar, o que corresponde a menores valores de DIBL, ambos os dispositivos, com isolantes de porta de Si_3N_4 e isolante de porta de Al_2O_3 , começam a degradar, com relação ao parâmetro DIBL, para comprimento de canal de 400nm. Para variação de $L = 600\text{nm}$ a $L = 200\text{nm}$ o ΔDIBL é de aproximadamente 105mV/V para dispositivos MOSHEMT e de apenas 32 mV/V para dispositivos MISHEMT. O transistor MISHEMT, devido a menor espessura do isolante de porta e, por sua vez, um melhor acoplamento eletrostático entre a porta e o 2DEG, apresentou uma degradação do DIBL aproximadamente 3 vezes menor em comparação com o transistor MOSHEMT na faixa de valores de comprimento de canal estudados.

O comportamento da tensão de limiar do dispositivo MOSHEMT e do dispositivo MISHEMT em função do comprimento do canal para diferentes temperaturas é apresentado na Figura 29B. O gráfico mostra um comportamento convencional da tensão de limiar do MOSHEMT em função do aumento da temperatura. A medida que a temperatura aumenta, a um deslocamento de V_T para valores mais negativos devido a diminuição do potencial de Fermi e menor profundidade de depleção. Para o dispositivo MISHEMT, nota-se um deslocamento da tensão de limiar para valores mais negativos nas temperaturas de 25°C a 50°C, porém, para temperaturas maiores ou igual a 100°C, a tensão de limiar começa a se deslocar para valores menos negativos. Isto pode ocorrer devido o dispositivo apresentar múltiplos canais de condução. Para melhor entender este efeito, a transcondutância será avaliada. A transcondutância g_m do MISHEMT de 25°C e 100°C é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Curva experimental da transcondutância do dispositivo MISHEMT com $W = 5\mu\text{m}$ e $L = 300\text{ nm}$ operando em temperatura ambiente e a 100°C . Gráfico inserido mostra as curvas de g_m e $I_{DS} \times V_{GS}$ relacionando a transcondutância com a corrente de dreno.



Fonte: Elaborado pelo autor

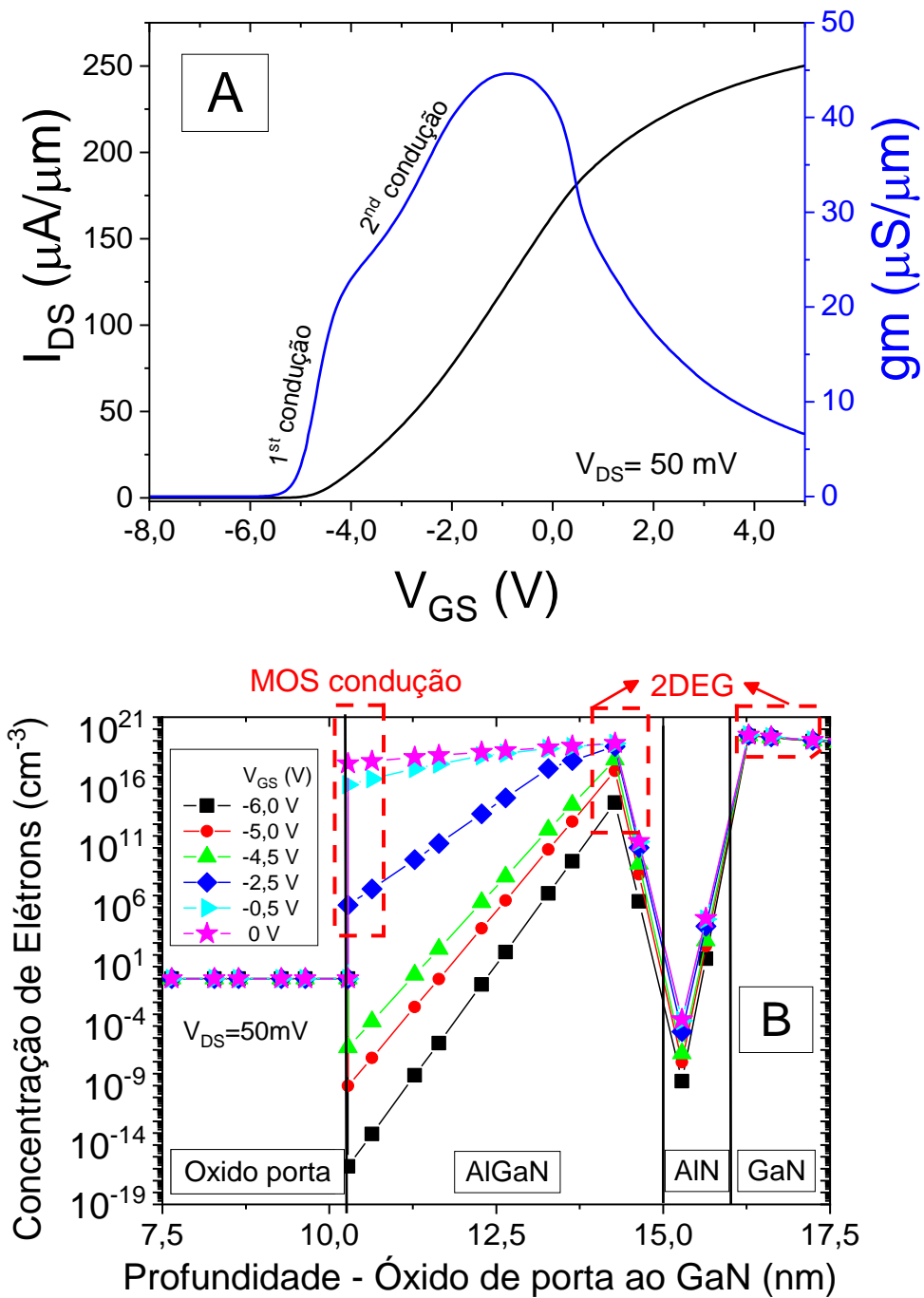
Na temperatura de 25°C a transcondutância mostra um comportamento convencional. Porém, quando analisado o dispositivo MISHEMT para temperatura de 100°C , o gráfico sugere uma dupla condução na curva de g_m . Essa dupla condução afeta a extração do valor efetivo do V_T do dispositivo. O comportamento da curva g_m pode explicar o efeito observado nas curvas de V_T do dispositivo MISHEMT no gráfico da Figura 29B. Com o propósito de compreender ainda melhor o comportamento do dispositivo e a dupla condução que aparece na curva de g_m , foram realizadas algumas simulações e os principais resultados são apresentados nos gráficos seguintes.

Comparado o comportamento da curva g_m da Figura 31 com o comportamento da curva g_m na Figura 30, nota-se que ambos os gráficos apresentam um comportamento muito similar das curvas de g_m . A curva de g_m apresenta uma dupla condução um pouco antes do pico, ou valor máximo da curva, embora essa dupla condução não aparece na curva de $I_{DS} \times V_{GS}$ apresentada no mesmo gráfico. A primeira e a segunda condução na curva g_m são mostradas na Figura 31A. A primeira condução ocorre em aproximadamente $V_{GS} = -6\text{ V}$ e a segunda em aproximadamente $V_{GS} = -2,5\text{ V}$.

A Figura 31B apresenta a concentração de elétrons ao longo da profundidade do dispositivo. Pode-se observar pela análise do gráfico que existem 3 regiões de alta concentração de cargas que podem ser canais de corrente e ter impacto sobre a corrente total do dispositivo. Tem-se uma região de alta concentração de elétrons que se localiza próximo a interface AlN/GaN. Nesta região, devido a diferença de *bandgap* (banda proibida) entre os materiais, forma-se uma descontinuidade que, por sua vez, leva a formação de um poço quântico, ou poço de potencial, o que possibilita a formação de um 2DEG. Próximo a interface AlGaIn/AlN, observa-se uma segunda região de alta concentração de elétrons devido a formação de um poço quântico e conseqüentemente a formação de um 2DEG. Portanto, do gráfico podemos extrair duas regiões onde se formam dois 2DEG's. Esses 2DEG's podem se tornar canais de condução uma vez que um caminho entre fonte e dreno é estabelecido. Esses canais de condução 2DEGs parecem estar relacionados a primeira condução observada na curva da transcondutância apresentada na Figura 31. Há uma alta concentração de elétrons em $V_{GS} = -6$ V.

Devido ao aumento da tensão de porta, acontece um aumento da concentração de elétrons próximo a interface entre o semicondutor AlGaIn e o isolante da porta. Essa região é denominada região MOS por se tratar da junção entre um metal, óxido e semicondutor. O comportamento dessa região parece ser similar ao comportamento de um transistor MOS convencional. A análise do gráfico 31B sugere que a medida que a tensão de porta aumenta e vai para valores mais positivos, há uma tendência de acúmulo de elétrons próximo a interface Isolante/AlGaIn. Esse acúmulo de elétrons possibilita que um canal de condução seja criado entre o dreno e fonte. A partir do gráfico 31B, é possível notar que a tensão de limiar observada dessa região MOS fica ligeiramente acima de $V_{GS} = -2.5$ V. Para este valor de V_{GS} a concentração de elétrons se torna importante resultando na condução adicional do dispositivo observada no gráfico (condução MOS).

Figura 31 – Curvas simuladas da corrente de dreno e transcondutância como função da tensão de porta (A), e a concentração de elétrons no dispositivo (B).



Fonte: Elaborado pelo autor

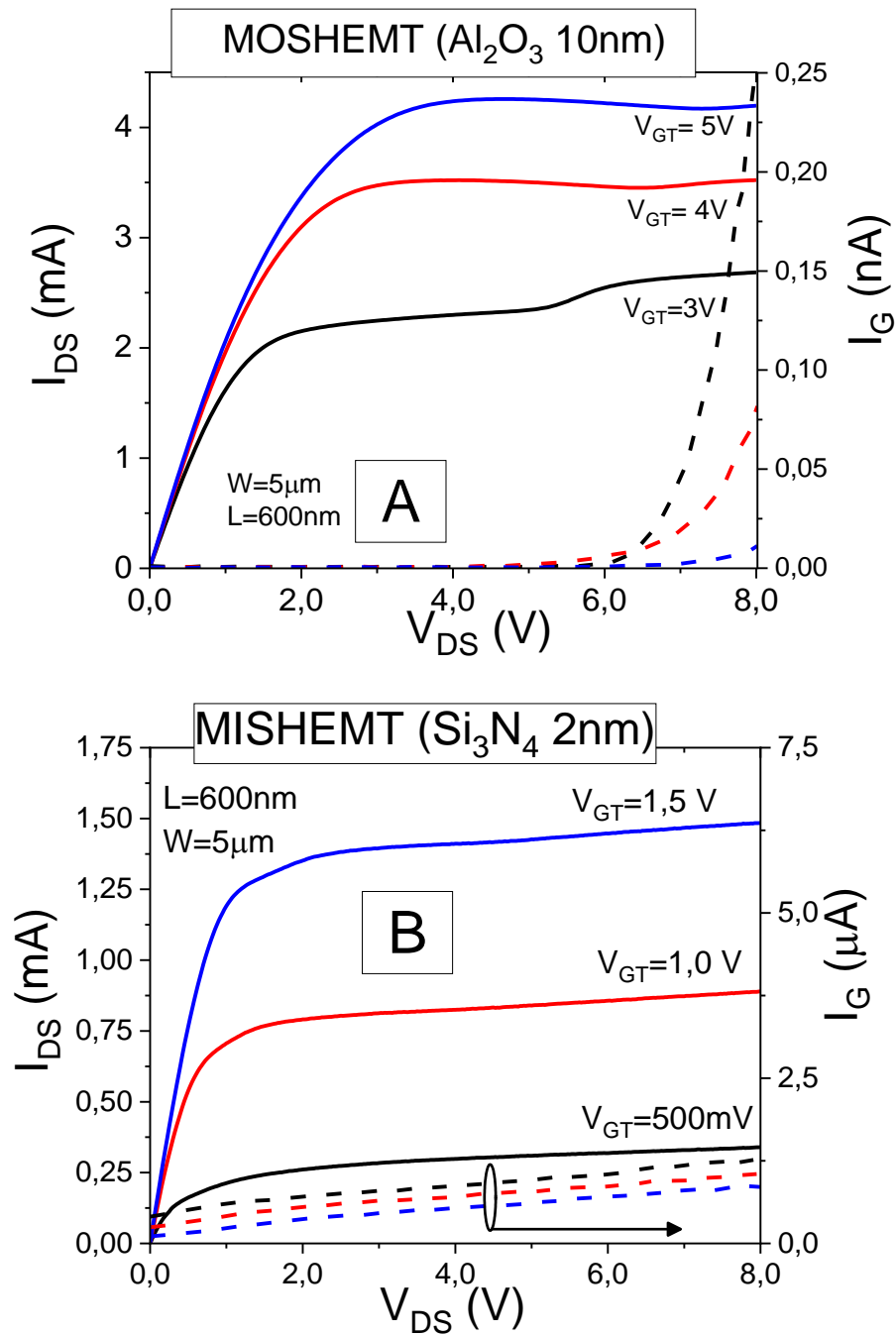
Sabe-se que a tensão de limiar diminui com o aumento da temperatura, no entanto, as diferentes regiões de condução estudadas no dispositivo tem diferentes mecanismos que habilitam ou desligam o canal de condução dessas regiões. Com o aumento da temperatura, o fator determinante para a condução 2DEG é a profundidade de depleção, ao passo que o fator predominante para a condução MOS é o potencial de Fermi. Quando considerado cada fator

com a variação da temperatura é possível explicar o comportamento de V_T para cada região de condução. As descontinuidades da curva de g_m vista nos gráficos da Figura 30 e Figura 31A estão relacionadas com o V_T para cada região de condução. Estas descontinuidades podem ser explicadas se considerado cada condução do dispositivo em separado, a condução MOS e a condução 2DEG, cada condução é habilitada em diferentes tensões de porta.

As curvas experimentais das características de saída dos transistores MOSHEMT e MISHEMT são apresentadas na Figura 32. A Figura 32A mostra as curvas experimentais de $I_{DS} \times V_{DS}$ e as curvas I_G para o transistor MOSHEMT com V_{GT} variando de 3V a 5V. Nota-se que, para a corrente de dreno do dispositivo MOSHEMT com $V_{GT} = 4$ e $V_{GT} = 5$, a condutância de saída (g_D) tem valores negativos. Altas correntes de dreno promovem um auto aquecimento do dispositivo para estas tensões de polarização, o que torna o dispositivo inadequado para aplicações analógicas nestes patamares de tensão. Para baixas tensões de V_{GT} o dispositivo apresenta um V_G muito negativo pois, como discutido, o dispositivo possui um $V_T = -6.425$ para isolante de porta de Al_2O_3 . Nessas condições, aumentar V_D significa um V_{GD} elevado e o campo elétrico entre a porta e o dreno se torna muito alto, o que aumenta a corrente de porta (I_G). Portanto, aumentar a tensão de polarização do dreno no dispositivo MOSHEMT pode causar um aumento exponencial da corrente de porta (curva pontilhada Figura 32A).

A Figura 32B apresenta as características de saída para o transistor MISHEMT. Para as curvas do gráfico foram aplicados V_{GT} variando de 500mV a 1,5V. Um melhor comportamento na região de saturação foi observado para o dispositivo MISHEMT nessas tensões de polarizações de porta. Por causa de um dielétrico de porta com menor espessura que o dielétrico utilizado no MOSHEMT, a corrente de fuga é maior no dispositivo MISHEMT que a do dispositivo MOSHEMT. Apesar da corrente de fuga de porta apresentar maiores valores que as observadas no MOSHEMT (curva tracejada do gráfico), a corrente I_G não aumenta exponencialmente. Uma vez que o dispositivo MISHEMT trabalha com um valor menos negativo de V_T , é possível aplicar menores valores de V_{GT} . Menores valores de tensão aplicadas na porta suprimem o efeito de alto aquecimento, o que por sua vez, permite que o dispositivo seja utilizado em aplicações analógicas.

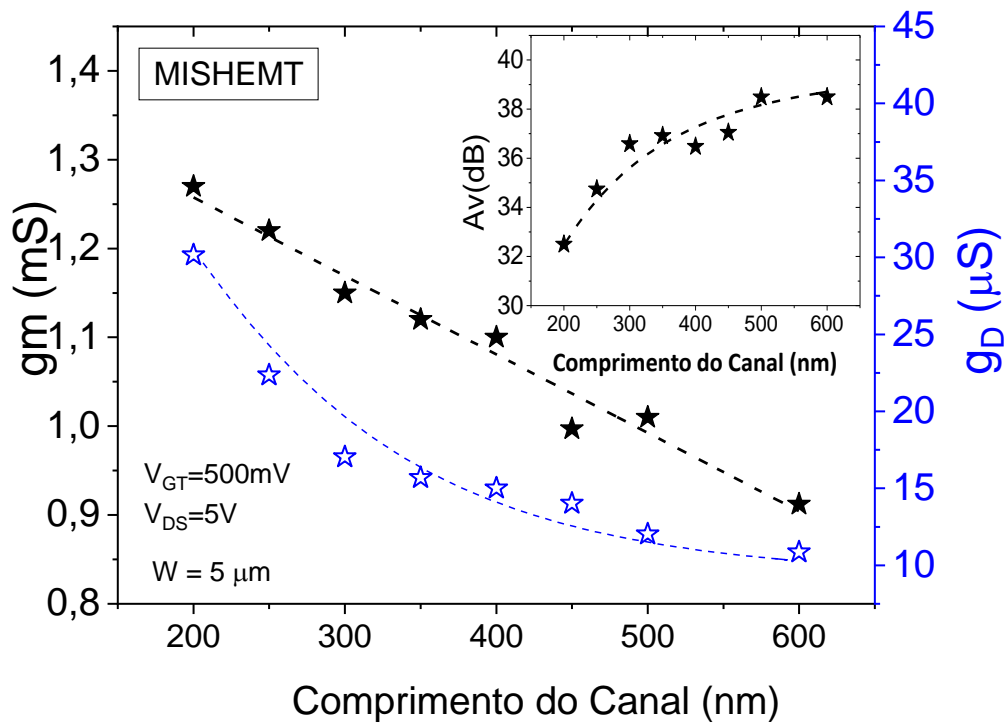
Figura 32 – Curvas experimentais da corrente de dreno e corrente de porta como função da tensão de dreno para o dispositivo MOSHEMT (A) e dispositivo MISHEMT (B)



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas experimentais da transcondutância e da condutância de saída como função do comprimento do canal são apresentadas na Figura 33.

Figura 33 – Curvas experimentais da transcondutância (g_m), condutância de saída (g_D) e ganho intrínseco de tensão em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT. $T=25C^\circ$

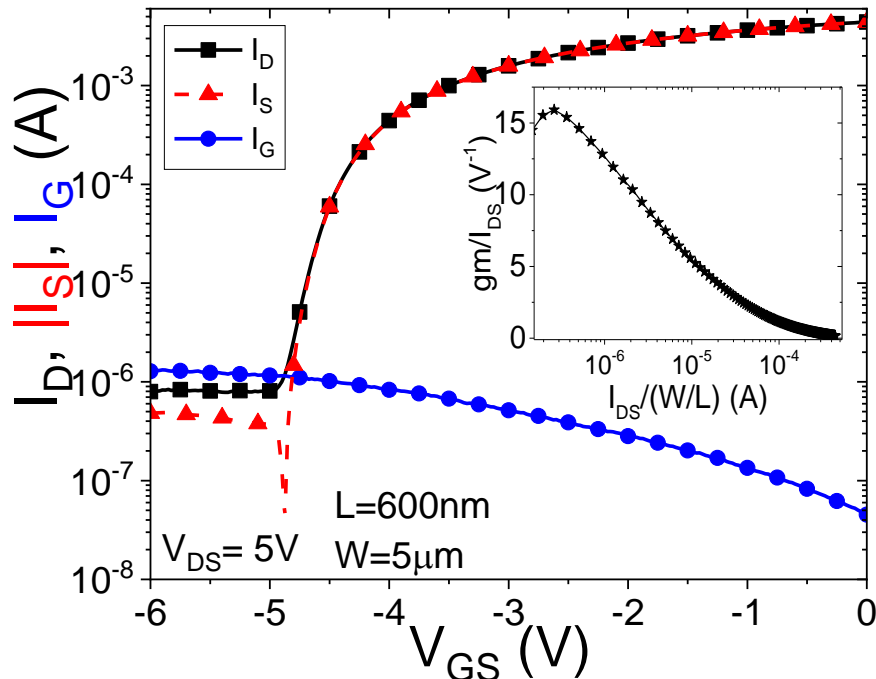


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o dispositivo MISHEMT com comprimento de canal de 200nm a transcondutância medida foi de quase 1,3 mS. A medida que o comprimento do canal aumenta para o valor máximo de 600nm, o valor de g_m diminui em uma relação inversamente proporcional quase linear entre L e g_m . A curva da condutância de saída g_D não tem um comportamento linear como o apresentado pela curva g_m . Embora g_D também seja inversamente proporcional ao comprimento do canal, essa não linearidade apresentada pela curva de g_D indica que possa existir algum outro parâmetro que esteja influenciando o comportamento de g_D . Uma análise do dispositivo indica que a modulação do comprimento do canal tem impacto sobre a condução MOS e, conseqüentemente, sobre a condução total da corrente de dreno do dispositivo. O fato da modulação do canal ter impacto sobre a condução MOS, pode explicar a não linearidade existente entre a condutância de saída g_D e o comprimento do canal L . O inseto do gráfico apresenta o comportamento do ganho intrínseco de tensão A_v . Considerando que o parâmetro A_v é a razão entre g_m e g_D como visto na equação (20), e que valores de g_D são muito menores que os valores de g_m , g_D em μS e g_m em mS, isso resulta em uma boa resposta do ganho intrínseco de tensão. O A_v alcança valores de 38dB para dispositivos com maiores comprimentos de canal e mesmo para dispositivos com menores comprimentos de canal o

ganho se mantêm acima de 32dB. A comparação entre as correntes do dispositivo MISHEMT é apresentada na Figura 34.

Figura 34 – Curvas experimentais das correntes I_D , I_G e I_S em função de V_{GS} (gráfico principal), eficiência do transistor em função de I_{DS} normalizada (gráfico inserido).

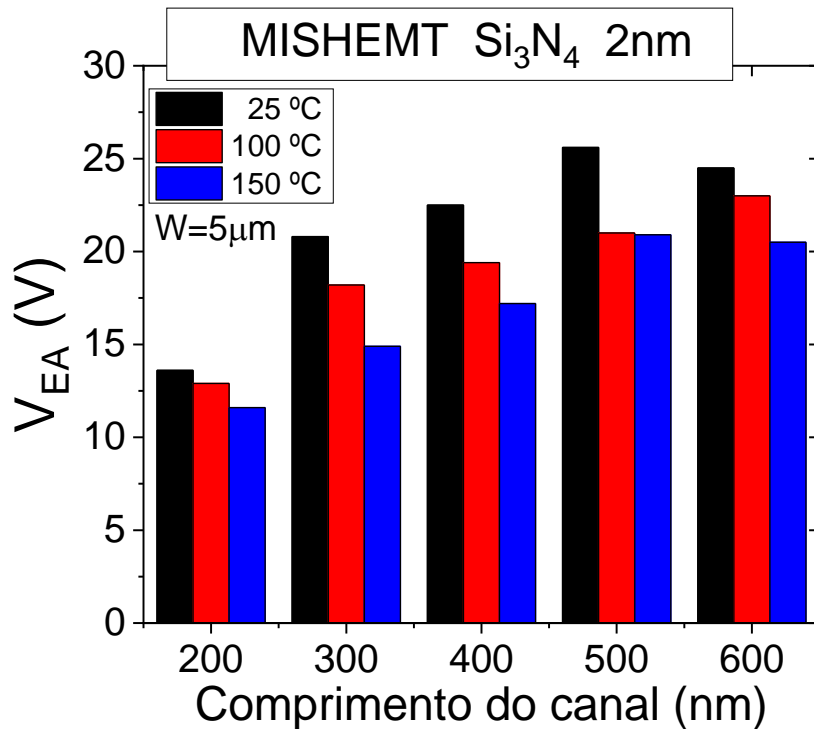


Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 34 apresenta as curvas experimentais das correntes de dreno (I_D), fonte (I_S) e porta (I_G) como função da tensão de porta (V_{GS}) para altas tensões de polarização do dreno ($V_{DS} = 5V$). Nota-se no gráfico que, para o estado em que o dispositivo está ligado, as curvas para as correntes I_D e I_S são coincidentes, ou seja, as correntes da fonte e dreno são iguais. Assim ocorre, pois, a influência da corrente de fuga de porta para quando o dispositivo está ligado é desprezível. Porém, quando o dispositivo está trabalhando na região de sublimiar, ou região de corte ($V_{GS} < V_T$), a corrente da porta é alta e limita a eficiência do transistor na inversão fraca (gráfico *inset*). Do *inset* do gráfico temos que, embora a eficiência do transistor (g_m/I_{DS}) no regime de inversão fraca seja baixa ($16V^{-1}$), pois é limitada pela corrente de fuga de porta, nos regimes de inversão moderada e forte a corrente I_G não afeta a eficiência do transistor que mostra um bom comportamento nessas regiões. Sendo assim, todas as análises analógicas como função da temperatura para o dispositivo estudado são realizadas na inversão forte.

Na Figura 35, tem-se o comportamento experimental do dispositivo MISHEMT com relação a tensão Early (V_{EA}). A tensão Early foi extraída para diferentes comprimentos de canais e temperatura variando de 25°C a 150°C.

Figura 35 – Valores experimentais de V_{EA} em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT com temperaturas variando de 25°C a 150°C.



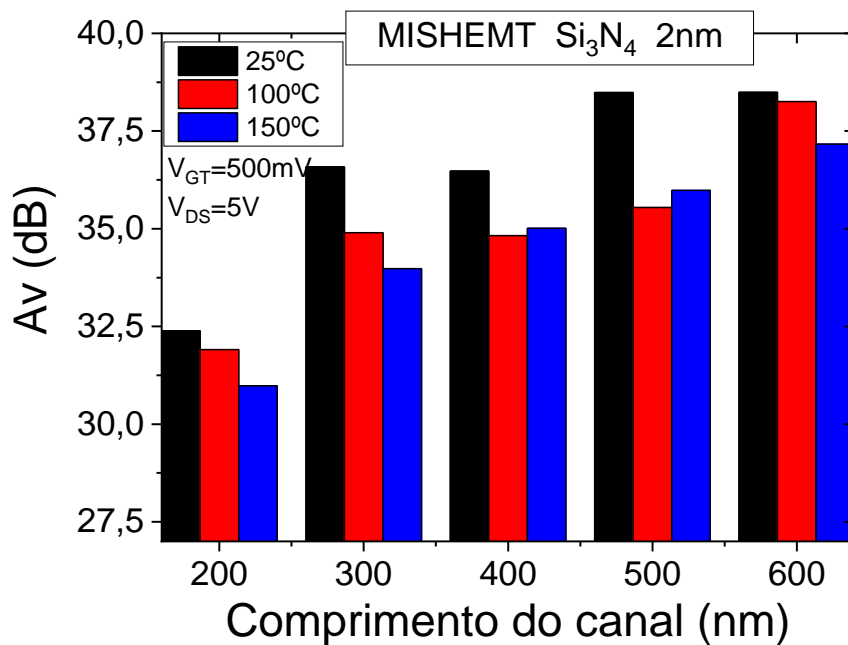
Fonte: elaborado pelo autor

V_{EA} aumenta com o aumento do comprimento do canal e diminui com o aumento da temperatura. O aumento de V_{EA} com o aumento do comprimento de canal acontece provavelmente devido uma menor modulação do comprimento do canal sobre a condução MOS. Para um dispositivo MOSFET convencional, V_{EA} é proporcional ao comprimento do canal. A redução de V_{EA} em altas temperaturas é causada pela degradação da mobilidade dos portadores que reduz o nível da corrente do dreno.

O gráfico do ganho intrínseco de tensão (A_V) em função do comprimento do canal para diferentes temperaturas (Figura 36), mostra um melhor comportamento do ganho intrínseco de tensão (A_V) nos dispositivos com maiores comprimentos de canal, similar ao visto na Figura 35 para V_{EA} . Quanto maior o comprimento do canal do dispositivo, maior será A_V . Quando analisado em temperatura, nota-se que quanto maior a temperatura, menor será A_V . Porém, no geral, o dispositivo apresentou um bom desempenho do parâmetro A_V . Mesmo com a variação da temperatura o dispositivo apresentou uma boa estabilidade térmica. Transistores com

maiores comprimentos de canal tiveram um A_V de aproximadamente 38,5 dB e de 32dB para transistores de menores comprimentos de canal na temperatura de 25°C. O dispositivo com maior comprimento de canal apresentou uma degradação de A_V de apenas 1,5 dB quando a temperatura aumenta de 25°C para 150°C.

Figura 36 – Valores experimentais de A_V em função do comprimento do canal para o dispositivo MISHEMT com temperaturas variando de 25°C a 150°C.



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, o desempenho dos transistores em relação aos parâmetros elétricos estudados.

Tabela 2 – Comparação dos transistores com diferentes dielétricos de porta em relação aos parâmetros elétricos estudados

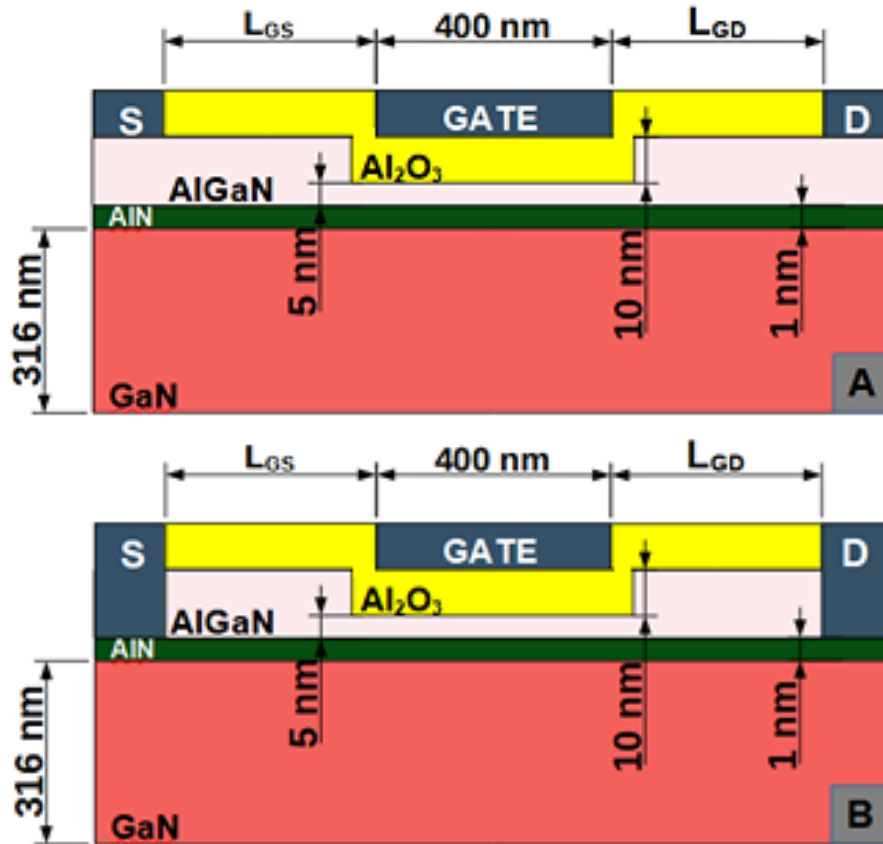
	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃
Histerese	Melhores valores de histerese	
V _T	Menos negativa	
Efeito de Canal Curto e DIBL	Menor influência	
I _D	Menores valores de I _D . Sem auto aquecimento	
I _G		Menor, porém, com aumento exponencial
ZTC	Não apresentou	Apresentou
V _{EA}	Boa resposta	
A _V	Boa resposta	
Estabilidade Térmica (condição analógica)	Boa (analógico)	
Dupla condução (podendo ser 3)	Apresentou	Apresentou

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DISPOSITIVO VARIANDO LGS, LGD E PROFUNDIDADE DE CONTATOS. DADOS SIMULADOS

O dispositivo apresentou diferentes mecanismos de condução de corrente: condução MOS e condução HEMT. Para entender melhor como os canais de condução de corrente se comportam bem como os mecanismos envolvidos, e por sua vez, entender melhor o comportamento do dispositivo estudado, alguns parâmetros da estrutura física do dispositivo foram alterados e simulações foram realizadas. A Figura 37 apresenta a estrutura física do dispositivo com os parâmetros alterados nas simulações realizadas.

Figura 37 - Variação dos parâmetros L_{GS} e L_{GD} (A) e profundidade dos contatos de fonte e dreno (B) na estrutura MOSHEMT.



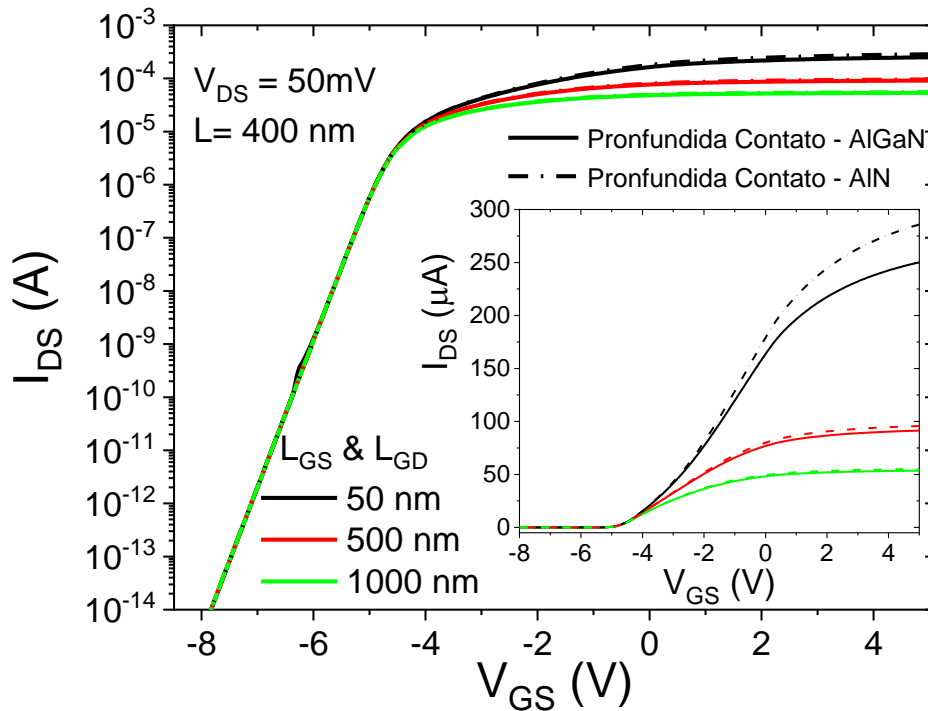
Fonte: elaborado pelo autor

As distâncias entre a porta e a fonte (L_{GS}) e entre a porta o dreno (L_{GD}), bem como a profundidade dos contatos de fonte (S) e de dreno (D), foram alteradas com o propósito de entender como o dispositivo se comporta com a variação desses parâmetros estruturais. As simulações e análises foram realizadas variando as distâncias de L_{GS} e L_{GD} de 50nm a 1000nm bem como variando a profundidade de alcance dos contatos de fonte e dreno. Os contatos de fonte e dreno se aprofundam até alcançarem os materiais AlGaIn e AlN respectivamente.

As curvas das correntes de dreno (I_{DS}) em função da tensão de porta (V_{GS}) para o dispositivo MOSHEMT são mostradas na

Figura 38. O dispositivo tem um comprimento de contato de porta de 400nm e foi aplicada uma tensão de dreno de 50mV. Neste gráfico, pode-se observar o comportamento das curvas do dispositivo MOSHEMT para diferentes profundidades de contatos de dreno e fonte e diferentes distâncias entre os contatos de porta/fonte (L_{GS}) e de porta/dreno (L_{GD}).

Figura 38 - Curva I_{DS} x V_{GS} para a estrutura MOSHEMT variando L_{GS} , L_{GD} e as profundidades dos contatos de dreno e fonte.

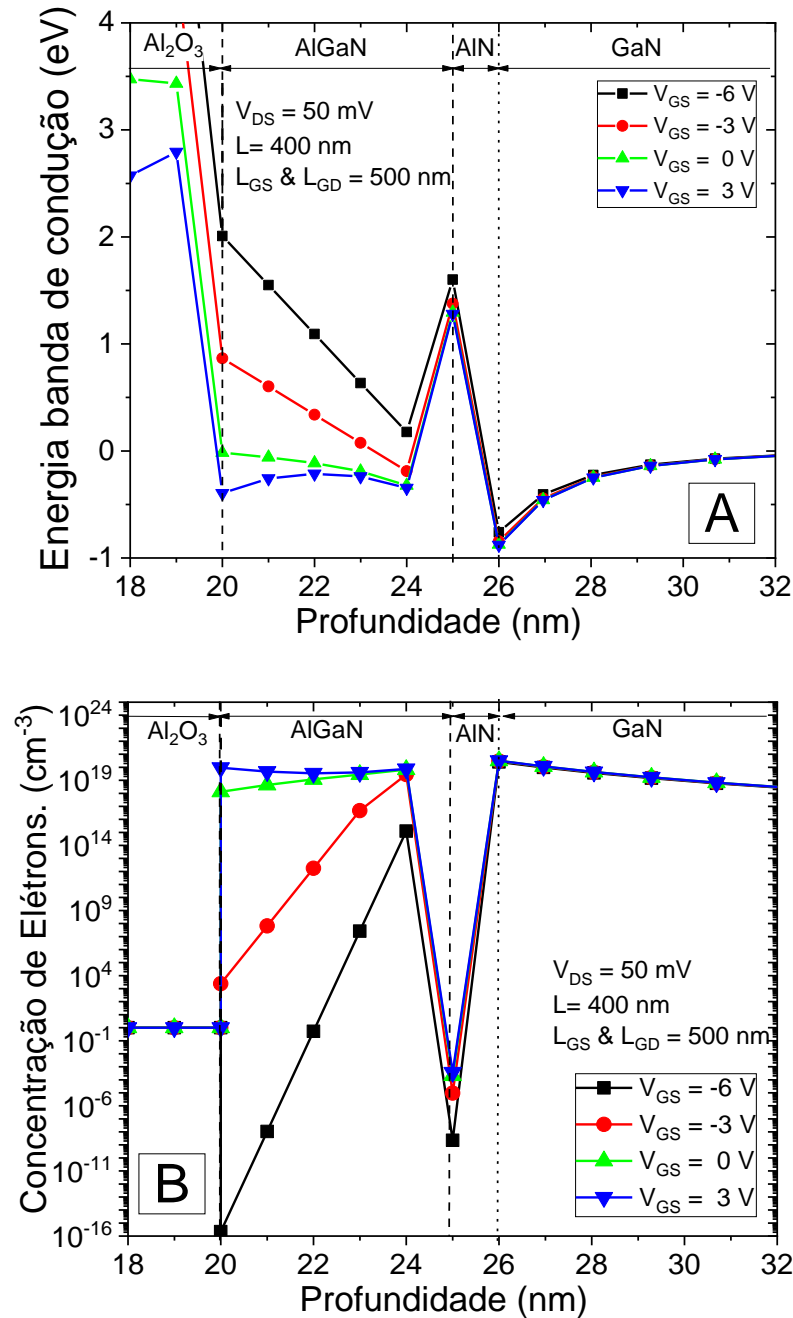


Fonte: elaborado pelo autor

A medida que a profundidade dos contatos de fonte e dreno aumenta, alcançando a camada AlN, uma maior corrente de dreno (I_{DS}) é observada. Esse aumento de I_{DS} com o aumento da profundidade dos contatos de fonte e dreno, pode ser explicado por uma menor resistência entre os eletrodos de contatos e o canal de condução 2DEG formado próximo a interface AlGaIn/AlN. Quando consideradas as distâncias de L_{GS} e L_{GD} , nota-se uma alta degradação de I_{DS} à medida que as distâncias L_{GS} e L_{GD} aumentam. O canal de condução 2DEG acontece em toda a extensão do comprimento do material empregado no dispositivo, portanto, a degradação de I_{DS} com as variações de L_{GS} e L_{GD} não é um comportamento esperado para este dispositivo. Este comportamento é melhor entendido nos gráficos seguintes.

Os gráficos A e B da Figura 39 são, respectivamente, as curvas das bandas de condução de energia do dispositivo e as curvas da concentração de elétrons do dispositivo pela extensão da profundidade do dispositivo. Estes gráficos apresentam o dispositivo MOSHEMT simulado com L_{GS} e L_{GD} de 500nm, contatos de fonte e dreno alcançando o material AlN e polarização de V_{GS} variando de -6V a 3V.

Figura 39 - Energia das Bandas de Condução (A) e Concentração de Elétron (B) para diferentes valores de V_{GS} .



Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se no gráfico 39A que, próximo a interface AlN/GaN acontece um dobramento da banda de condução mesmo para valores negativos de $-6V$, o que por sua vez possibilita a formação de um canal de condução 2DEG. Observa-se, próximo a interface AlGaN/AlN, outra possível formação de um canal de condução. Para estas curvas, à medida que aumenta a tensão de polarização do dispositivo, de $-6V$ a $3V$, o dobramento da banda de condução neste local se torna mais profundo e a formação de um canal 2DEG parece ser mais evidente. É sabido que,

quando utilizado o material AlN no sistema de materiais que compõe o dispositivo, para este caso $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$, há um maior aprofundamento na formação do chamado poço quântico. Esse fenômeno pode ser explicado devido a maior diferença das larguras da banda de energia dos materiais $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ (SHRESTHA, WANG, *et al.*, 2013) (JENA e LENKA, 2016). Observando a interface $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$, nota-se que as bandas de condução são fortemente dependentes da tensão de polarização aplicada.

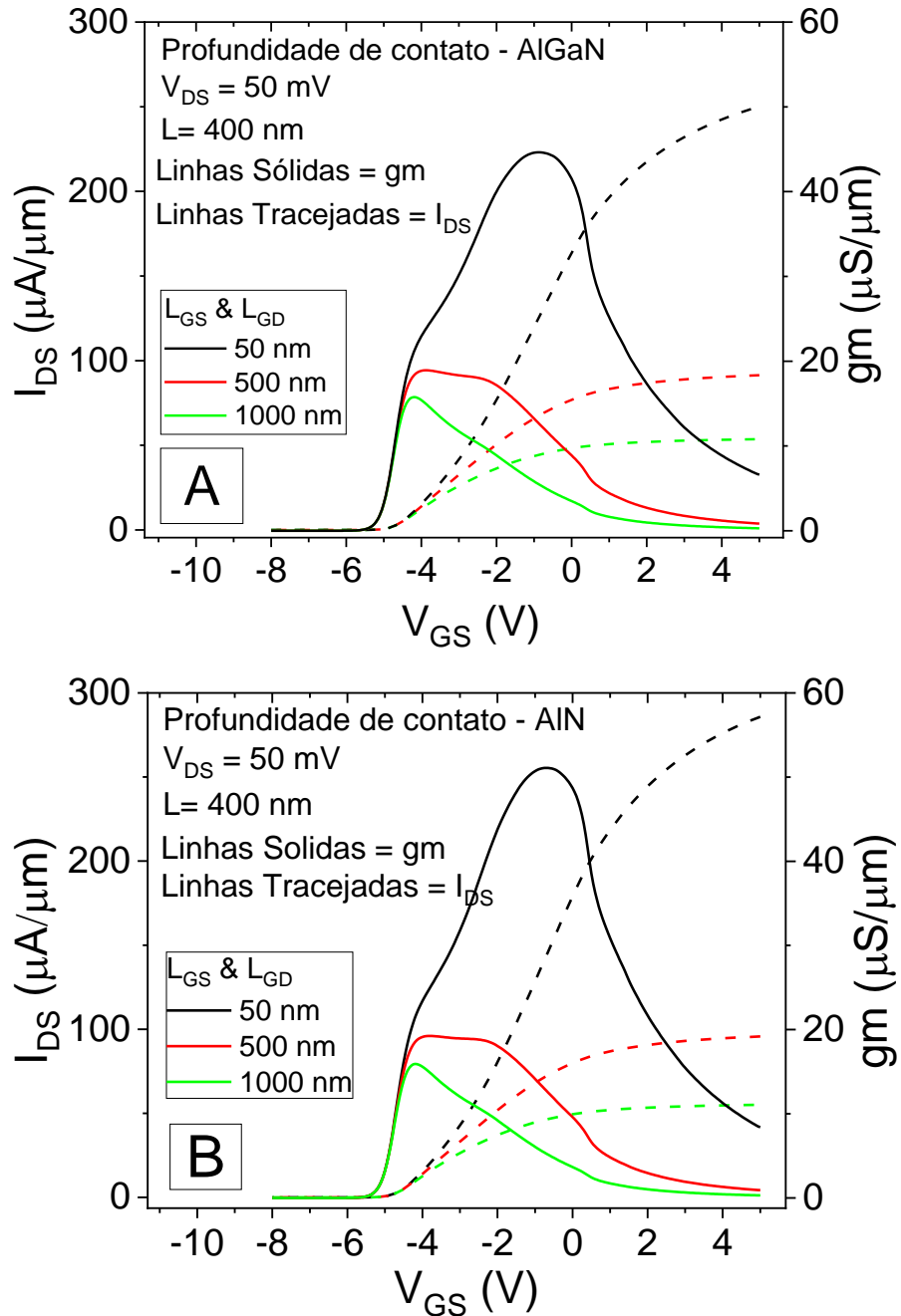
Do gráfico 39B, pode ser observado que há 3 regiões que podem atuar como canais de condução entre a fonte e o dreno do dispositivo. Essas regiões tem uma alta concentração de elétrons o que pode caracterizar um canal de condução de corrente. Duas regiões são menos influenciadas pela polarização de porta do dispositivo (interfaces AlGaIn/AlN e AlN/GaIn), o que indica estarem relacionadas com a condução HEMT, ou a condução devido a formação do 2DEG, e uma terceira região de alta concentração de elétrons na interface $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ que é altamente dependente da polarização de porta, à medida que aumenta a polarização de porta, a concentração de elétrons nesta interface aumenta, o que caracteriza uma condução MOS devido a formação de uma canal de condução semelhante a condução de um dispositivo MOS convencional.

A Figura 40 apresenta os gráficos da transcondutância (g_m) e da corrente I_{DS} em função da polarização de porta para diferentes distâncias L_{GS} e L_{GD} e com diferentes profundidades de contatos de fonte e dreno.

Na Figura 40A as distâncias dos contatos alcançam o topo do material AlGaIn e para a Figura 40B os contatos alcançam o material AlN . Em ambos os gráficos é possível notar uma anomalia na curva de g_m que é causada pela múltipla condução presente no dispositivo (condução 2DEG (HEMT) + MOS). Esta mesma anomalia foi reportada nos gráficos anteriores do dispositivo medido em laboratório. Devido a condução HEMT, a curva de g_m começa a aumentar em um valor de V_{GS} um pouco acima de -6V enquanto que para a condução MOS esse aumento é perceptível para valores de $V_{GS} \geq -3\text{V}$. Este comportamento de g_m acontece para ambos os dispositivos (profundidade de contatos em AlGaIn e em AlN).

Comparando as curvas de I_{DS} e g_m de ambos os gráficos, nota-se uma diminuição da corrente de dreno e degradação de g_m para o dispositivo em que as profundidades dos contatos alcançam o topo do material AlGaIn . Isso acontece devido a resistência entre os contatos e o canal de condução HEMT ser maior para este dispositivo que para o dispositivo onde os contatos alcançam o material AlN . Uma vez que os contatos alcançam o material AlN , e por sua vez alcançam o canal HEMT, a resistência entre os contatos e o canal diminui o que aumenta o valor de I_{DS} e diminui a degradação de g_m , como observado nos gráficos.

Figura 40 - Curvas de $I_D \times V_G$ e g_m para os dispositivos com profundidade de contatos alcançando os materiais AlGaIn (A) e AlIn (B).

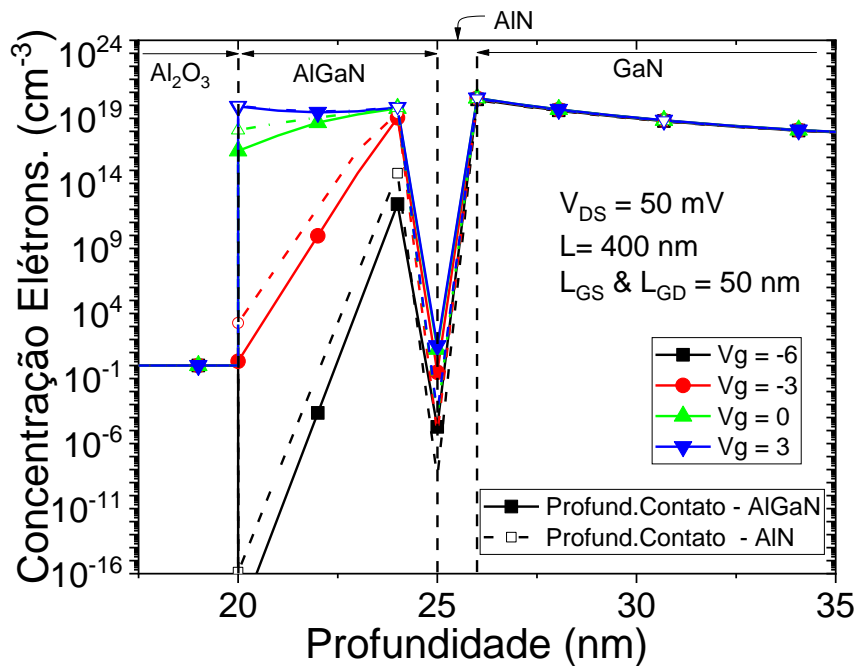


Fonte: elaborado pelo autor

Quando as distâncias de porta/fonte (L_{GS}) e porta/dreno (L_{GD}) são levadas em consideração na análise, nota-se que esses parâmetros afetam o segundo pico de g_m . Quanto maior as distâncias de L_{GS} e L_{GD} , maior será a resistência serie associada a condução MOS, que por sua vez, diminui I_{DS} .

Uma vez conhecido que, aumentar as distâncias de L_{GS} e L_{GD} promovem uma alta resistência série e alta degradação da corrente I_{DS} , o dispositivo com menores valores de L_{GS} e L_{GD} ($L_{GS} = L_{GD} = 50$ nm) foi utilizado para a análise da concentração de elétrons (Figura 41). Para esta análise, duas configurações de profundidade de contatos de fonte e dreno foram utilizadas: Contatos de fonte e dreno alcançando o material AlGaIn e alcançando o material AlN.

Figura 41 - Curva da Concentração de Elétrons para o dispositivo MOSHEMT com profundidade de contatos alcançando o material AlGaIn e o material AlN.



Fonte: elaborado pelo autor

Quanto mais próximo os contatos de fonte e dreno estão do canal de condução 2DEG, maior será a concentração de elétrons no material AlGaIn onde acontece a formação do canal 2DEG. Esse comportamento, como mencionado, se deve ao fato de se ter uma menor resistência entre contatos e canal de condução. Devido à alta resistência que o material AlN impõe no sistema, a concentração de elétrons no material GaN é pouco afetada por V_{GS} .

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho se propôs analisar os parâmetros elétricos relacionados ao comportamento/desempenho do dispositivo MO(I)SHEMT. O transistor foi analisado para diferentes isolantes e diferentes espessuras de isolantes de porta (Si_3N_4 2nm e Al_2O_3 10nm), bem como para diferentes comprimento do contato de porta e para faixas de temperaturas variando de 25°C até 200°C. Os comprimentos de L_{GS} e L_{GD} e as profundidades dos contatos de fonte e dreno e como esses parâmetros influenciam o comportamento do transistor também foram objetivo de estudo. Esses parâmetros foram analisados afim de se ter um melhor entendimento da operação do transistor.

O dispositivo com isolante de Si_3N_4 apresentou um ótimo comportamento com relação a histerese, quase que suprimindo a histerese na curva apresentada. A histerese pode estar relacionada com o fenômeno de armadilhamento de cargas no dielétrico de porta. Valores menos negativos de V_T são observados no dispositivo, o que leva o transistor a ter um comportamento mais próximo do *normally off*. Tal desempenho de V_T pode ser explicado pela espessura dos isolantes de porta.

Um melhor desempenho do transistor de Si_3N_4 aos efeitos de canal curto foi notado. Enquanto o dispositivo de Al_2O_3 sofre mais com os efeitos de canal curto, o dispositivo de Si_3N_4 apresentou melhores valores a degradação por DIBL. A medida que o comprimento do canal diminui, o dispositivo Si_3N_4 apresenta uma menor variação de V_T e valores menores de DIBL em comparação com o dispositivo de Al_2O_3 . No entanto, quando a tensão de limiar é analisada em função do comprimento do canal para diferentes temperaturas, o dispositivo de Al_2O_3 apresentou um melhor comportamento. O MISHEMT Si_3N_4 demonstrou ter maiores correntes de fuga de porta que afetam o desempenho da transcondutância em altas temperaturas, o que por sua vez, afeta a eficiência do transistor. Ainda que uma menor corrente de fuga, o dispositivo Al_2O_3 apresentou um aumento exponencial da corrente de porta I_G . Valores menos negativos de V_T observados no dispositivo Si_3N_4 permitem o uso de menores tensões de porta, o que significa uma redução no auto aquecimento do transistor devido a corrente do dreno e, portanto, habilita o dispositivo para aplicações analógicas.

Uma dupla condução foi observada na curva da transcondutância do transistor Si_3N_4 que pode estar relacionado às diferentes conduções (MOS e HEMT) do dispositivo. Quando analisado a concentração de elétrons, nota-se que há 3 possíveis canais de condução nos dispositivos. Dois canais relacionados ao 2DEG e um canal relacionado a estrutura MOS (condução MOS). Esses canais podem influenciar na corrente total do dispositivo. O

entendimento dos meios de condução do dispositivo e como eles influenciam a condução total são essenciais para melhorar a performance do transistor.

As curvas de I_D e I_S são praticamente iguais no regime de inversão forte, o que está de acordo com o propósito do dispositivo MISHEMT, eliminar a corrente de fuga pela porta. Os transistores apresentaram boas características de saída exibindo uma boa resposta do ganho intrínseco de tensão e da tensão *Early*. O comportamento de A_V e de V_{EA} são muito similares quanto a tendência. À medida que o comprimento de canal aumenta, A_V e V_{EA} tendem a aumentar, ao passo que a temperatura aumenta, A_V e V_{EA} tende a diminuir. Mesmo com a variação da temperatura o dispositivo apresentou uma boa estabilidade térmica.

O transistor com contatos de fonte e dreno alcançando o material AlN apresentou uma menor degradação da curva de g_m e da curva I_D em comparação com o transistor onde os contatos de fonte e dreno alcançam o topo do material AlGaIn. Considerando que um canal de condução 2DEG acontece no material AlGaIn próximo a interface AlGaIn/AlN, quanto mais próximo os contatos estiverem do canal de condução, menor será a resistência em série associada e, portanto, menor a degradação da corrente I_{DS} .

Comparando as distâncias de L_{GS} e L_{GD} , dispositivos com maiores valores de L_{GS} e L_{GD} promovem maiores valores de resistência série e maior degradação da corrente I_{DS} e g_m , afetando principalmente a condução MOS.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi analisado a influência de diferentes dielétricos de portas com diferentes espessuras no comportamento do dispositivo MISHEMT. Apesar de cumprir o papel de forma satisfatória quanto a supressão da corrente de fuga pela porta, o dispositivo apresenta valores negativos de V_T . Afim de tornar o dispositivo *normally off* e ter um entendimento melhor sobre o comportamento do dispositivo, simulações e análises podem ser realizadas a fim de propor melhorias estruturais otimizando o transistor estudado. Serão discutidas a influência dessas configurações nos parâmetros estudados com o objetivo de tornar o dispositivo *normally off*. Diversos parâmetros devem ser avaliados para se entender melhor como os canais de condução do dispositivo influenciam na condução total do transistor.

5.2 PUBLICAÇÕES GERADAS

Agopian, P. G. D.; Carmo, G. J.; Martino, J. A.; Simoen, E.; Collaert, N. **Gate dielectric material influence on DC behavior of MO(I)SHEMT devices operating up to 150 °C.** Solid-State Electronics, v. 185, 2021, doi.org/10.1016/j.sse.2021.108091.

Agopian, P. G. D.; Carmo, G. J.; Martino, J. A.; Simoen, E.; Peralagu, S.; Parvais, B.; Waldron, N.; Collaert, N. **Impact of gate dielectric material on basic parameters of MO(I)SHEMT devices.** ECS Transactions, v. 97, n. 5, p. 53-58, 2020, doi.org/10.1149/09705.0053ecst

Canales, B. G.; Camo, G. J.; Agopian, P. G. D. The conduction mechanisms analysis of AlGa_N/Ga_N MOSHEMTs with different source/drain electrode configurations, '2021 35Th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2021, pp.1-4, doi:10.1109/SBMicro50945.2021.9585769

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPIAN, P. G. D. **Estudo do efeito de elevação atípica da transcondutância na região linear de polarização em dispositivos SOI nMOSFETS ultra-submicrométricos**. Tese de Doutorado em Microeletrônica Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 147 doi:10.11606/T.3.2008.tde-09022009-190025. 2008.

AGOPIAN, P. G. D. et al. Gate dielectric material influence on DC behavior of MO(I)SHEMT devices operating up to 150 °C. **Solid-State Electronics**, v. 185. 108091 , 2021.

BELLAKHDAR, A. et al. **The thermal effect on the output conductance in AlGaIn/GaN HEMT's**. 2012 24th International Conference on Microelectronics (ICM). Algiers, Algeria: IEEE. 2012. p. 1-4 doi: 10.1109/ICM.2012.6471365.

BENVEGNI, A. **Trapping and Reliability investigations in GaN-based HEMTs**. Degree of Doctor of Philosophy. Université de Limoges; Università degli studi. Padoue, Italie. 2016.

BORDALLO, C. C. M. **Estudo do comportamento de transistores de tunelamento induzido por efeito de campo (TFET) operando em diferentes temperaturas**. Tese (Doutorado em Microeletrônica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 114 doi:10.11606/T.3.2018. 2017.

BRAGA, T. M. **ANÁLISE DE TRANSISTORES FINFETS PARA APLICAÇÕES EM CIRCUITOS DIGITAIS BÁSICOS**. Bacharel em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São João da Boa Vista, p. 62. 2021.

COELHO, C. H. S. **Estudo do Ponto Invariante com a Temperatura (ZTC) em Transistores Nanofolhas com Porta ao Redor (GAA-Nanosheet)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São João da Boa Vista, p. 102. 2021.

COLINGE, J. P.; COLINGE, C. **Physics of Semiconductor Devices**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

ELIZA , A. **Modeling of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor for Sensors and High-Temperature Circuit Applications**. PhD Dissertation, University of Tennessee, 2008. [S.l.], p. 76. 2008.

ERNST, A. N.; SOMERVILLE, M. H.; DEL ALAMO, J. A. Dynamics of the kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs. **IEEE Electron Device Letters**, v. 18, n. 12, p. 613-615, December 1997.

GUPTA, ; MISHRA, S. N.; JENA, K. DC characteristic analysis of AlGaIn/GaN HEMT and MOSHEMT. **International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)**, Paralakhemundi, 2016. 1777-1780.

HAFEZ, I. M.; GHIBAUDO, G.; BALESTRA, F. Analysis of the Kink Effect in MOS Transistors. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 37, n. 3, p. 818-821, 1990.

HAMADY, S. **New concepts for normally-off power Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistor (HEMT)**. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Universite Toulouse III Paul Sabatier. [S.l.], p. 121. 2014.

HU, Z. **GAN HEMTS AND MOSHEMTS FOR POWER SWITCHING APPLICATIONS**. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy) University of Notre Dame. Notre Dame, Indiana, p. 227. 2014.

IAF.FRAUNHOFER.DE. **Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF**, 14 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.iaf.fraunhofer.de/en/media-library/press-releases/MOSHEMT.html>>. Acesso em: 04 out. 2021.

JENA, K.; LENKA, T. R. **Effect of AlN spacer thickness on device characteristics of AlInN/AlN/GaN MOSHEMT**. IEEE Region10 Conference (TENCON). [S.l.]: [s.n.]. 2016. p. 3253 - 3256.

JENA, K.; SWAIN, R.; LENKA, R. Modeling and comparative analysis of DC characteristics of AlGaN/GaN HEMT and MOSHEMT devices. **Int. J. Numer. Model**, v. 29, p. 83-92, 2015.

KARBOYAN, S. et al. Analysis and path localization of gate current in AlGaN/GaN HEMTs using low frequency noise measurements and Optical Beam Induced Resistance Change technique. **IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)**, 2013. 1-4.

LAN, W. C. et al. Study of HfO₂/AlGaN/GaN MOS-HEMT for High Power Application. **Solid State Devices and Materials**, p. 134-135, 2014.

LIU, D. **Design, Fabrication and Characterization of InAlAs/InGaAs/InAsP Composite Channel HEMTs**. Degree Doctor of Philosophy, The Ohio State University. [S.l.], p. 173. 2008.

MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. **Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

MENEGHESSO, G. et al. Anomalous Kink Effect in GaN High Electron Mobility Transistors. **IEEE Electron Device Letters**, v. 30, n. 2, p. 100-102, February 2009.

MIMURA, T. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 50, March 2002. 780-782.

MIMURA, T. Invention of High Electron Mobility Transistor (HEMT) and Contributions to Information and Communications Field. **Fujitsu Scientific & Technical Journal**, 54, n. 5, October 2018. 3-8.

NATIONAL Inventors Hall of Fame. **invent.org**, 2021. Disponível em: <<https://www.invent.org/inductees/dawon-kahng>>. Acesso em: 29 out. 2021.

NIRMAL, D.; AJAYAN, J. **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2019.

OSTENDORF, A.; KÖNIG, K. **Optically Induced Nanostructures. Biomedical and Technical Applications**. Berlim: De Gruyter, 2015.

ODUANGVILAI, K. et al. Study of Gate Leakage Current on AlGaIn/GaN MOSHEMTs with Atomic Layer Deposited Al₂O₃ Gate Oxide. **JOURNAL OF SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY AND SCIENCE**, v. 19, n. 6, p. 540-550, Dezembro 2019.

PANDA, J. et al. Modeling on oxide dependent 2DEG sheet charge density and threshold voltage in AlGaIn/GaN MOSHEMT. **Journal of Semiconductors**, v. 37, n. 4, p. 044003, abril 2016.

PERINA, W. F. **Estudo de transistores em estrutura de nanofios e de nanofolhas e aplicações em fontes de corrente**. Dissertação (Mestrado em Microeletrônica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 81. 2021.

PRASAD, ; DWIVEDI, A. K.; ISLAM, A. Characterization of AlGaIn/GaN and AlGaIn/AlN/GaN HEMTs in terms of mobility and subthreshold slope. **J Comput Electron**, v. 15, p. 172-180, 2016.

RAZAVI, B. **Fundamentos da Microeletrônica**. Tradução de J. R. Souza. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ROCCAFORTE, F. et al. An Overview of Normally-Off GaN-Based High Electron Mobility Transistors. **Materials**, v. 12, p. 1599, Maio 2019.

SHRESTHA, N. M. et al. Effect of AlN Spacer Layer on AlGaIn/GaN HEMTs. **16th International Workshop on Computational Electronics**, Nara, Japan, 04-07 June 2013.

SILVA, E. L. R. **Obtenção e análise de ruído de baixa frequência em transistores SOI MOSFETs de canal gradual**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, p. 114. 2011.

SILVACO. **Atlas User's Manual Device Simulation Software**. Santa Clara: [s.n.], 2018.

SNOWDER, C. M.; MILES, R. E. **Compound Semiconductor Device Modelling**. Leeds: Springer-Verlag, 1993.

SUN, Y. et al. Review of the Recent Progress on GaN-Based Vertical Power Schottky Barrier Diodes (SBDs). **Electronics**, v. 8, p. 575, 2019.

SWAIN, R. et al. Modeling and simulation of oxide dependent 2DEG sheet charge density in AlGaIn/GaN MOSHEMT. **Journal of Computational Electronics (J Comput Electron)**, v. 14, p. 754-761, September 2015.

SWAIN, R.; JENA, ; LENKA, T. R. Modelling of capacitance and threshold voltage for ultrathin normally-off AlGaIn/GaN MOSHEMT. **Pramana - J Phys**, v. 3, p. 88, 2017.

SWAIN, R.; KANJALOCHAN, J.; LENKA, T. R. Modelling of capacitance and threshold voltage for ultrathin normally-off AlGaIn/GaN MOSHEMT. **Pramana - J Phys**, 88, n. 3, 2017.

VERNEK, E. **Propriedades de transporte de sistemas nanoscópicos: átomos e moléculas**. Tese Doutorado, Departamento de Física, PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 132. 2007.

WANG, M.; CHEN, K. J. Kink Effect in AlGaIn/GaN HEMTs Induced by Drain and Gate Pumping. **IEEE Electron Device Letters**, v. 32, n. 4, p. 482-484, April 2011.

XIAO-GUANG, H.; DE-GANG, Z.; DE-SHENG, J. Formation of two-dimensional electron gas at AlGaIn/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression. **Chinese Phys. B**, 24, n. 6, April 2015.

XUE, H. et al. An Overview of the Ultrawide Bandgap Ga₂O₃ Semiconductor-Based Schottky Barrier Diode for Power Electronics Application. **Nanoscale Research Letters**, v. 13, 2018.