

Bruno Godoy Canales

**Estudo da influência das múltiplas conduções do MISHEMT sobre
seus principais parâmetros digitais e analógicos**

São João da Boa vista
2022

Bruno Godoy Canales

**Estudo da influência das múltiplas conduções do MISHEMT sobre
seus principais parâmetros digitais e analógicos**

Defesa de dissertação

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus de São João da Boa Vista.

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

São João da Boa Vista
2022

C212e

Canales, Bruno Godoy

Estudo da influência das múltiplas conduções do MISHEMT sobre seus principais parâmetros digitais e analógicos / Bruno Godoy

Canales. -- São João da Boa Vista, 2022

98 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientadora: Paula Ghedini Der Agopian

1. Transistores. 2. Semicondutores. 3. Microeletrônica. 4. Engenharia elétrica. I. Título.

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.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo da influência das múltiplas conduções do MISHEMT sobre seus principais parâmetros digitais e analógicos

AUTOR: BRUNO GODOY CANALES

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 Eletronica e de Telecomunicacoes / Faculdade de Engenharia de Sao Joao 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. JOÃO ANTONIO MARTINO (Participação Virtual)
Engenharia Elétrica, sistemas eletrônicos / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

São João da Boa Vista, 27 de julho de 2022

Verônica Liberali Messias
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Paula Ghedini Der Agopian pelos valiosos ensinamentos, pela dedicação e pela confiança depositada.

Aos meus pais Tânia e Herivelto, irmãos Yan e Roberto e amigo Luiz por tornarem meu trabalho possível e por me apoiarem durante a vida.

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

RESUMO

Os Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons (HEMT) do tipo Metal-Isolante-Semicondutor (MIS) têm sido alvo de diversos estudos devido à sua capacidade de operação com altas frequências (RF), altas potências e em altas temperaturas, além de apresentar corrente de porta mais baixa que seu antecessor (HEMT) por possuir um isolante de porta. Neste trabalho, foram estudadas as diferentes conduções de corrente e como estas afetam os parâmetros elétricos básicos dos MISHEMTs de estruturas AlGa_N/ AlN/ GaN. Por fim, o potencial desses dispositivos para aplicações analógicas será estudado. Para entender melhor o comportamento elétrico do dispositivo, foram avaliados o diagrama de bandas de energia e a concentração de elétrons, ambos ao longo da profundidade do dispositivo. Os parâmetros elétricos avaliados foram a tensão de limiar (V_t), a inclinação da região de sublimiar (SS), a transcondutância (g_m), a condutância de saída (g_D), a tensão Early (V_{EA}) e o ganho intrínseco de tensão (A_v). Neste estudo foram consideradas a variação da profundidade dos eletrodos de fonte e dreno (d_{SD}), distância entre os eletrodos de fonte/ dreno e o eletrodo de porta (L_{GS} & L_{GD}), a espessura do isolante de porta (t_{ox}), e o comprimento do canal (L_g). O material do isolante de porta e fração molar do alumínio no material Al_xGa_{1-x}N (x) também foram alterados. Os resultados mostram que a condução no MISHEMT de estrutura de porta metal/ isolante/ AlGa_N/ AlN/ GaN acontece por 3 diferentes canais, os quais são formados pelo acúmulo de elétrons, em ordem crescente de polarização de porta, na 3ª interface (AlN/ GaN) através da região onde se forma o gás bidimensional de elétrons (2DEG), na 2ª interface (AlGa_N/ AlN) também através do 2DEG, e na 1ª interface (isolante da porta/ AlGa_N) através da acumulação de elétrons por efeito de campo elétrico. Foi constatado que: conforme os eletrodos de fonte e dreno se tornam mais espessos e atingem maiores profundidades, a resistência vertical entre os eletrodos de fonte/ dreno e os canais é reduzida; o aumento da espessura do isolante de porta causa maior queda do campo elétrico ao longo do isolante, o que altera o valor de polarização de porta que faz com que corte o canal nessas regiões (V_t); o aumento da espessura da camada AlGa_N aumenta a resistência vertical entre os eletrodos de fonte/ dreno e os canais; a alteração na fração molar do AlGa_N altera suas

propriedades, que por sua vez, altera o comportamento de todos os canais com relação à predominância de cada canal na corrente total do dispositivo; o comprimento da porta altera principalmente a influência da 1ª interface na condução; os canais são afetados por efeito de saturação, semelhante ao efeito da modulação do comprimento do canal; com uma alta influência da 1ª interface na condução (baixo L_{GS} & L_{GD}), é possível atingir valores maiores de ganhos de tensão para polarizações de porta mais positivas.

Palavras chave: MISHEMT, Comportamento elétrico, Múltiplas conduções, Estrutura, AlGaIn, AlN, GaN.

ABSTRACT

The Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) High Electron Mobility Transistors (HEMT) have been the subject of several studies due to their ability to operate at high frequencies (RF), high powers and at high temperatures, in addition to their lower gate current than its predecessor (HEMT) because of its gate insulator. In this work, the different current conduction mechanisms were studied and how they affect the AlGa_N/ AlN/ GaN MISHEMTs basic electrical parameters. Finally, the potential of these devices for analog applications will be studied. To better understand the electrical behavior of the device, the band diagram and the electron concentration were evaluated, both along the device's depth. The electrical parameters evaluated were the threshold voltage (V_t), the subthreshold slope (SS), the transconductance (g_m), the output conductance (g_D), the Early voltage (V_{EA}) and the intrinsic voltage gain (A_v). In this study, the variation in the depth of the source and drain electrodes (d_{SD}), the distance between the source/drain electrodes and the gate electrode (L_{GS} & L_{GD}), the thickness of the gate insulator (t_{ox}), and the channel length (L_g). The material of the gate insulator and the aluminum molar fraction in the Al_xGa_{1-x}N (x) were also changed. The results show that the conduction in the metal/ insulator/ AlGa_N/ AlN/ GaN MISHEMT occurs through 3 different channels, which are formed by the accumulation of electrons, in increasing order of gate polarization, at the 3rd interface (AlN/ GaN) through the region where the two-dimensional electron gas (2DEG) is formed, at the 2nd interface (AlGa_N/ AlN) also through 2DEG, and at the 1st interface (gate insulator/ AlGa_N) through the accumulation of electrons by electric field effect. It was found that: as the source and drain electrodes become thicker and go deeper, the vertical resistance between the source/ drain electrodes and the channels is reduced; increasing the thickness of the gate insulator causes a greater drop in the electric field along the insulator, which changes the gate voltage that causes it to cut the channel in these regions (V_t); increasing the thickness of the AlGa_N layer increases the vertical resistance between the source/drain electrodes and the channels; the change in the AlGa_N molar fraction changes its properties, which in turn, changes the behavior of all channels with respect to the predominance of each channel in the total current of the device; the gate length mainly changes the influence of the 1st interface on

the conduction; channels are affected by saturation effect, similar to channel length modulation effect; with a high influence of the 1st interface on the conduction (low L_{GS} & L_{GD}), it is possible to achieve higher values of voltage gain for more positive gate voltages.

Keywords: MISHEMT, Electrical behavior, Multiple conduction, Structure, AlGaIn, AlN, GaN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Recorte das colunas 3 a 5 da tabela periódica. Fonte: adaptado de Holzle (2021).....	19
Figura 1.2: Evolução dos transistores utilizados para aplicações com média e alta potência e alta frequência de chaveamento. Fonte: adaptado de Onsemi (2021).	20
Figura 1.3: Seção transversal de um HEMT. Fonte: Adaptado de Nirmal & Ajayan, (2019).....	21
Figura 1.4: Seção transversal de um MISHEMT.	22
Figura 2.1: Seção transversal do NMOSFET convencional.	24
Figura 2.2: MOSFET no regime de inversão.....	25
Figura 2.3: Curvas características do NMOSFET convencional: (a) curva I_{DS} x V_{GS} e (b) curvas I_{DS} x V_{DS} para dois valores de V_{GS} . Fonte: Adaptado de Sedra & Smith (2015).....	26
Figura 2.4: Seção transversal do HEMT, destacando a junção Schottky e a região de depleção formada por ela.....	28
Figura 2.5: Classificação de heterojunções. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).....	29
Figura 2.6: Heterojunção tipo I após o contato e balanço de energia. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).	30
Figura 2.7: Célula unitária da wurtzita. Fonte: Troy et al. (2021b).....	31
Figura 2.8: Comparação entre uma heteroestrutura formada com materiais com parâmetros de rede iguais e uma heteroestrutura formada com materiais com parâmetros de rede distintos. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).....	32
Figura 2.9: Efeito da polarização interna em uma wurtzita de nitretos III-V dopados com impurezas tipo n. Fonte: adaptado de He et al. (2015).	32
Figura 2.10: MOSHEMT genérico	35
Figura 2.11: Comparação entre as correntes pela porta do HEMT e do MOSHEMT. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).	35
Figura 2.12: Seção transversal de um MISHEMT $Si_3N_4/AlGaIn/AlN/GaN$	36
Figura 2.13: Comparação de I_{DS} e g_m entre um MOSHEMT sem a camada AlN e um com a camada. Fonte: adaptado de Hu et al. (2018).	36

Figura 2.14: Diagrama de bandas e densidade de elétrons do MISHEMT Al _{0,83} Ga _{0,17} N/AlN/GaN. Fonte: adaptado de Lachab et al. (2014)	37
Figura 2.15: (A) Método da segunda derivada para extração de V_t de uma curva $I_{DS} \times V_{GS}$ genérica. (B) Derivada terceira de $I_{DS} \times V_{GS}$	39
Figura 2.16: Gráfico em escala logarítmica de $I_{DS} \times V_{GS}$ e do inverso da derivada de $\log_{10}(I_{DS}) \times V_{GS}$ na região de sublimiar de um MOSFET convencional.	40
Figura 2.17: Transcondutância em função da tensão aplicada à porta do transistor.	41
Figura 2.18: Método gráfico para a extração da tensão Early. Fonte: adaptado de Sedra & Smith (2015).	42
Figura 3.1: MISHEMT simulado.	45
Figura 3.2: Demonstração de estruturas com diferentes profundidades dos eletrodos de fonte e dreno, d_{SD}	46
Figura 4.1: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) medida em escalas linear e semilog dos dispositivos fabricados estudados.	48
Figura 4.2: Gráfico da transcondutância dos dispositivos fabricados estudados.	49
Figura 4.3: Gráfico da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ suavizado dos dispositivos fabricados estudados.	49
Figura 4.4: Dupla inclinação na curva de g_m , sugerindo dupla condução.	50
Figura 4.5: Curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para 3 valores de V_{GS} , normalizadas, do MISHEMT com Si ₃ N ₄ de espessura 2 nm como isolante de porta.	51
Figura 4.6: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ e $g_{m,sat}$ para $V_{DS} = 5$ V, normalizadas, do MISHEMT com Si ₃ N ₄ de espessura 2 nm como isolante de porta.	51
Figura 4.7: MOSHEMT referência simulado.	52
Figura 4.8: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m do dispositivo referência simulado.	53
Figura 4.9: Corte no centro da estrutura que indica a posição da extração de E_c e concentração de elétrons.	53
Figura 4.10: (A) Concentração de elétrons, (B) diagrama de bandas e (C) aproximação do diagrama de bandas, todos em relação à profundidade do dispositivo simulado para uma polarização de $V_{GS} = 0$ V e $V_{DS} = 0$ V.	54

Figura 4.11: Gráficos utilizados como critério para seleção dos valores de V_{GS} para investigação dos diagramas de E_c e de concentração de elétrons...	55
Figura 4.12: Diagrama da energia da banda de condução versus a profundidade do MOSHEMT simulado com diferentes tensões de porta. .	56
Figura 4.13: Diagrama da concentração de elétrons versus a profundidade do MOSHEMT simulado com diferentes tensões de porta.	56
Figura 4.14: Gráficos da corrente de dreno em função de V_{GS} de MOSHEMTs com diferentes profundidades de eletrodo e com $L_{GS} = L_{GD} = 50$ nm.	58
Figura 4.15: Gráficos de transcondutância de MOSHEMTs com diferentes profundidades de eletrodo e com $L_{GS} = L_{GD} = 50$ nm.	59
Figura 4.16: (A) Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) em escala semilog e (B) gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MOSHEMTs com diferentes d_{SD}	60
Figura 4.17: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MOSHEMTs com diferentes d_{SD}	61
Figura 4.18: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m de baixo campo dos MOSHEMTs com $d_{SD} \neq \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}	62
Figura 4.19: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m de baixo campo dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}	63
Figura 4.20: Gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ para MOSHEMTs com diferentes d_{SD} e com L_{GS} & $L_{GD} = [50$ nm; 500 nm; 1000 nm]	64
Figura 4.21: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}	64
Figura 4.22: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}	65
Figura 4.23: Comparação entre as curvas de transcondutância de MISHEMTs com diferentes d_{SD} e L_{GS} & L_{GD}	65
Figura 4.24: Comparação entre as curvas da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ de MISHEMTs com diferentes d_{SD} e L_{GS} & L_{GD}	66
Figura 4.25: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}	67
Figura 4.26: (A) Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) em escala semilog e (B) gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}	68

Figura 4.27: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}	68
Figura 4.28: Curva de transcondutância dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}	69
Figura 4.29: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ dos ($V_{DS} = 50$ mV) MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$ e $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	70
Figura 4.30: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$ e $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	70
Figura 4.31: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$, L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	71
Figura 4.32: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	72
Figura 4.33: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$, L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	72
Figura 4.34: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	73
Figura 4.35: (A) Curva de $I_{DS} \times V_{GS}$ em escala semilog e (B) $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com ambos d_{SD} , L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	74
Figura 4.36: (A) Curva de $I_{DS} \times V_{GS}$ em escala semilog e (B) $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com ambos d_{SD} , L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm e diferentes t_{AlGaIn}	74
Figura 4.37: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) para um MISHEMTs com (A) $d_{SD} = AlN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, (B) $d_{SD} = AlN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm, (C) $d_{SD} = GaN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, e (D) $d_{SD} = GaN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm com diferentes concentrações de alumínio em $AlGaIn$	75
Figura 4.38: Curvas de transcondutância para um MISHEMTs com (A) $d_{SD} = AlN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, (B) $d_{SD} = AlN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm, (C) $d_{SD} = GaN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, e (D) $d_{SD} = GaN$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm com diferentes concentrações de alumínio em $AlGaIn$	76
Figura 4.39: Diagrama da energia da banda de condução do MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes frações molares.	77
Figura 4.40: Diagrama da concentração de elétrons do MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes frações molares.	78

Figura 4.41: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com $d_{SD} = [AlN; GaN]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .	79
Figura 4.42: Curvas de transcondutância dos MISHEMTs com $d_{SD} = [AlN; GaN]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .	79
Figura 4.43: Curvas de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = [AlN; GaN]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .	80
Figura 4.44: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ e g_m dos dispositivos simulados.	81
Figura 4.45: Curva da derivada 2ª da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ dos dispositivos simulados.	82
Figura 4.46: Curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para diferentes polarizações de porta.	82
Figura 4.47: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.	83
Figura 4.48: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 200$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.	84
Figura 4.49: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.	85
Figura 4.50: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ em saturação ($V_{DS} = 6$ V) dos dispositivos com diferentes L_g e $L_{GS} \& L_{GD}$.	86
Figura 4.51: Gráficos em barra dos resultados de g_D e V_{EA} dos diferentes MISHEMTs sob diferentes V_{GS} .	87
Figura 4.52: Gráficos em barra dos resultados de A_v dos diferentes MISHEMTs sob diferentes V_{GS} .	87
Figura 4.53: Concentração de elétrons nas 3 interfaces do MISHEMT com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm para 3 diferentes V_{GS} .	89
Figura 4.54: Concentração de elétrons nas 3 interfaces do MISHEMT com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000$ nm para 3 diferentes V_{GS} .	89
Figura 4.55: Curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para 3 valores de V_{GT} do dispositivo físico com Si_3N_4 de 2 nm como isolante de porta e do dispositivo simulado com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000$ nm.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais parâmetros elétricos do MOSFET.....	27
Tabela 2.2: Parâmetros de banda em temperatura ambiente.	29
Tabela 2.3: Polarização espontânea de alguns materiais.	31
Tabela 2.4: Propriedades básicas dos isolantes. Fonte: Adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).....	37
Tabela 4.1: Resultados dos parâmetros analógicos do MISHEMT com Si_3N_4 de 2 nm de espessura como isolante de porta para três polarizações de porta para $V_{\text{DS}} = 5 \text{ V}$	52
Tabela 4.2: Quantidade de elétrons nas camadas barreira (AlGaIn) e <i>buffer</i> (GaIn) do MISHEMT para diferentes valores de fração molar de Al em $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}$	78
Tabela 4.3: : Resultados de parâmetros analógicos de MISHEMTs com diferentes L_g e L_{GS} & L_{GD} para $V_{\text{DS}} = 6 \text{ V}$	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MOSFET	Transistor de efeito de campo do tipo metal-óxido-semicondutor – <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i>
CI	Circuito Integrado
ULSI	Integração em escala ultra alta – <i>Ultra Large Scale Integration</i>
SHE	Efeitos de auto aquecimento – <i>Self Heating Effects</i>
SCE	Efeitos de canal curto – <i>Short Channel Effects</i>
TFET	Transistor de tunelamento induzido por efeito de campo – <i>Tunneling Field Effect Transistor</i>
SOI	Silício sobre isolante – <i>Silicon on insulator</i>
UTBB	Transistor de corpo e óxido enterrado ultra finos – <i>Ultra-Thin Body and Buried oxide</i>
GaN	Nitreto de gálio
AlN	Nitreto de alumínio
AlGaN	Nitreto de alumínio e gálio
SiC	Carbeto de silício
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada – <i>Isolated Gate Bipolar Transistor</i>
SJ	MOSFET de super junção – <i>Super Junction MOSFET</i>
HEMT	Transistor de alta mobilidade dos elétrons – <i>High Electron Mobility Transistor</i>
GaAs	Arseneto de gálio
AlGaAs	Arseneto de alumínio e gálio
2DEG	Gás de elétrons bidimensional – <i>Two-Dimensional Electron Gas</i>
MIS	Metal-isolante-semicondutor
MOSHEMT	Transistor de alta mobilidade dos elétrons do tipo metal-óxido-semicondutor – <i>Metal-Oxide-Semiconductor High Electron Mobility Transistor</i>
MISHEMT	Transistor de alta mobilidade dos elétrons do tipo metal-isolante-semicondutor – <i>Metal-Insulator-Semiconductor High Electron Mobility Transistor</i>
RF	Rádio frequência
ddp	Diferença de potencial

TE	Emissão termiônica – <i>Thermionic Emission</i>
PF	Emissão Poole-Frankel
TAT	Tunelamento assistido por armadilhas – <i>Trap-Assisted Tunneling</i>
Si₃N₄	Nitreto de silício
Al₂O₃	Óxido de alumínio
SRH	Schokley-Read Hall

LISTA SÍMBOLOS

A_v	Ganho intrínseco de tensão [dB]
C_D	Capacitância da depleção [F]
C_{GS}	Capacitância entre porta e fonte [F]
C_{ox}	Capacitância do óxido de porta por unidade de área [F/m ²]
C_{it}	Capacitância proveniente das armadilhas de interface por unidade de área [F/m ²]
c_{ij}	Constante elástica [N/m]
d_{SD}	Profundidade dos eletrodos de fonte e dreno [m]
$d_{máx}$	Largura máxima da região de depleção [m]
d_{31}	Coeficiente de tensão piezoelétrica [C/N]
E_C	Nível da energia da banda de condução [eV].
E_F	Nível da energia do nível de Fermi [eV]
E_v	Nível da energia da banda de valência [eV]
E_g	Largura da banda proibida [eV].
f_T	Frequência de transição [Hz]
$f_{máx}$	Frequência máxima de oscilação [Hz]
g_D	Condutância de saída [S]
$g_{D,sat}$	Condutância de saída em saturação [S]
g_m	Transcondutância [S]
$g_{m,sat}$	Transcondutância de saturação [S]
$g_{m,máx}$	Transcondutância máxima [S]
I_{DS}	Corrente de dreno [A]
$I_{DS,sat}$	Corrente de dreno em saturação [A]
I_g	Corrente de fuga pela porta [A]
k	Constante de Boltzmann [kg.m ² /K.s ²]
L_g	Comprimento do canal [m]
L_{GS}	Distância entre os eletrodos de fonte e porta [m]
L_{GD}	Distância entre os eletrodos de dreno e porta [m]
$L_{eletrodos}$	Comprimento dos eletrodos de fonte e de dreno [m]
$L_{transistor}$	Comprimento total do transistor [m]
N_A	Conc. de impurezas aceitadoras no semic. tipo P [m ⁻³]
n_s	Concentração de folha ou do 2DEG [cm ⁻³]

P_{PE}	Polarização piezoelétrica [V]
P_{SP}	Polarização espontânea [V]
P_{int}	Polarização interna [V]
Q_{ss}	Densidade de cargas efetiva no óxido de porta [C/m ²]
q	Carga elementar do elétron [C]
R_G	Resistência da porta [Ω]
R_{SD}	Resistência série de fonte e dreno [Ω]
R_i	Resistência intrínseca [Ω]
R_o	Resistência de saída [Ω]
SS	Inclinação de sublimar [V/dec]
T	Temperatura [K]
t_{AlGaN}	Espessura da camada de barreira feita de AlGaN [m]
t_d	Espessura da camada de barreira [m]
t_{ox}	Espessura do isolante de porta [m]
V_{Br}	Tensão de ruptura [V]
V_{DS}	Tensão de dreno [V]
$V_{DS,sat}$	Tensão de dreno em saturação [V]
V_{EA}	Tensão Early [V]
V_{GS}	Tensão de porta em relação à fonte [V]
V_{eff}	Tensão efetiva [V]
V_{fb}	Tensão de faixa plana [V]
V_t	Tensão de limiar [V]
W	Largura do canal [m]
x	Fração molar [1]
ϕ_F	Potencial de Fermi [eV]
ϕ_{MS}	Diferença entre função trabalho entre metal e semic. [eV]
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa [F]
ϵ_{xx}	Tensão mecânica na direção horizontal [Pa]
μ	Mobilidade dos portadores [m ² /V.s]
μ_N	Mobilidade dos elétrons [m ² /V.s]
χ	Afinidade eletrônica [eV]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO	22
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO DO TIPO METAL-ÓXIDO-SEMICONDUCTOR (MOSFET).....	24
2.2	TRANSISTOR DE ALTA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS (HEMT)	27
2.2.1	Classificação de heteroestruturas e formação do 2DEG.....	28
2.2.2	Polarização interna	30
2.2.3	Características de corrente e equacionamento básico.....	33
2.3	TRANSISTOR DE ALTA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS DO TIPO METAL-ISOLANTE-SEMICONDUCTOR (MISHEMT)	34
2.4	PARÂMETROS ELÉTRICOS BÁSICOS	38
2.4.1	Tensão de limiar (V_t)	38
2.4.2	Inclinação da região de sublimiar (SS)	39
2.4.3	Transcondutância (g_m)	40
2.4.4	Tensão Early (V_{EA}) e condutância de saída (g_D)	41
2.4.5	Ganho intrínseco de tensão (A_v)	42
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	DISPOSITIVOS FÍSICOS	44
3.2	DISPOSITIVOS SIMULADOS	45
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	48
4.1	CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA EXPERIMENTAL	48
4.2	DISPOSITIVOS SIMULADOS.....	52
4.2.1	Profundidade dos eletrodos de fonte e dreno (d_{SD}).....	58
4.2.2	Distância entre os eletrodos de fonte/ dreno e o eletrodo de porta (L_{GS} & L_{GD}).....	61
4.2.3	Material do isolante de porta e sua espessura (t_{ox})	66
4.2.4	Espessura da camada de barreira (t_{AlGaIn})	69
4.2.5	Fração molar de alumínio em $Al_xGa_{x-1}N$ (x)	75
4.2.6	Comprimento do canal (L_g)	78
4.2.7	Características de saída para diferentes polarizações de porta	80
5.	CONCLUSÕES.....	91
6.	REFERÊNCIAS	94

1. INTRODUÇÃO

Entre os anos 1920 e 1960 a sociedade passou por um evidente avanço tecnológico, o qual originou a indústria de semicondutores e modelou a microeletrônica como a conhecemos hoje. Tal avanço é devido a fatores como a idealização do transistor em 1926, a invenção e fabricação do Transistor de Efeito de Campo do tipo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET) de 1930 a 1959, e o desenvolvimento dos primeiros circuitos integrados (CI) em 1958 (Tang, 1988; Smith et al., 1998). Antes destas invenções, os componentes que serviam como chave eletrônica eram as válvulas termiônicas, as quais apresentavam problemas regularmente e possuem grandes dimensões (Brock, 2006).

O CI foi elaborado pensando na integração de componentes e funções em um único substrato, com os objetivos de simplificar a elaboração de blocos funcionais e reduzir o custo, o tamanho e o peso dos dispositivos eletrônicos (Kilby, 2000). Até os anos 1990, a eletrônica deixou de ter baixa escala de integração e passou a ter escala de integração ultra alta (ULSI), na qual é possível comportar milhões de MOSFETs em um único encapsulamento (Tang, 1988).

A redução das dimensões dos transistores e o aumento concentração de componentes numa unidade de área agrava alguns efeitos indesejados, como os efeitos de auto aquecimento (SHE) e os efeitos de canal curto (SCE) (Tang, 1988; Deleonibus et al., 2006). Novas tecnologias são elaboradas para superar essas e outras limitações, e também para atender a diferentes requisitos de performance, como potências e frequências de operação cada vez mais altas (Nirmal; Ajayan, 2019).

Algumas dessas novas tecnologias se focam em melhorias no transistor visando uma aplicação ou produto específicos, outras focam em novos materiais, estruturas e mecanismos. Essas novas abordagens deram origem produtos como o Transistor de Tunelamento (TFET), o SpinFET (Xiu, 2019), a tecnologia Silício Sobre Isolante (SOI) (Colinge, 2004) e suas variações, como aquela que utiliza uma fina camada de isolante, o que dá origem ao SOI de silício e isolante ultra-finos (UTBB) (Thakral et al., 2014; Deleonibus, 2015), e os transistores baseados em materiais III-V.

Semicondutores baseados em materiais III-V são compostos de elementos das colunas 3 e 5 da tabela periódica (Figura 1.1), dentre os quais se destacam aqueles baseados em nitretos, como os compostos binários nitreto de gálio (GaN) e nitreto de alumínio (AlN) e o composto ternário nitreto de alumínio e gálio (AlGaN) (Nirmal; Ajayan, 2019).

13	14	15
5 B boro 10,81	6 C carbono 12,011	7 N nitrogênio 14,007
13 Al alumínio 26,982	14 Si silício 28,085	15 P fósforo 30,974
31 Ga gálio 69,723	32 Ge germânio 72,630(8)	33 As arsênio 74,922
49 In índio 114,82	50 Sn estanho 118,71	51 Sb antimônio 121,76
81 Tl tálio 204,38	82 Pb chumbo 207,2	83 Bi bismuto 208,98
113 Nh nihônio	114 Fl fleróvio	115 Mc moscóvio

Figura 1.1: Recorte das colunas 3 a 5 da tabela periódica. Fonte: adaptado de Holzle (2021).

Os semicondutores baseados em GaN são capazes de oferecer maior variedade relacionada às bandas proibidas, E_g , e alta velocidade de saturação dos elétrons. Altos valores de E_g , por exemplo, significam alta performance em altas temperaturas e alto valor de tensão de ruptura, V_{Br} (Nirmal; Ajayan, 2019). Esses transistores operam com altas frequências e são capazes de oferecer potências de saída na ordem de kW, como pode ser visto pelo gráfico de frequência de chaveamento *versus* capacidade de potência de saída na Figura 1.2, a qual também apresenta transistores baseados em carbeto de silício (SiC), transistores bipolares de porta isolada (IGBT) e MOSFETs de super junção (SJ) para comparação, e também mostra algumas das principais áreas de utilização dessas tecnologias (Onsemi, 2021).

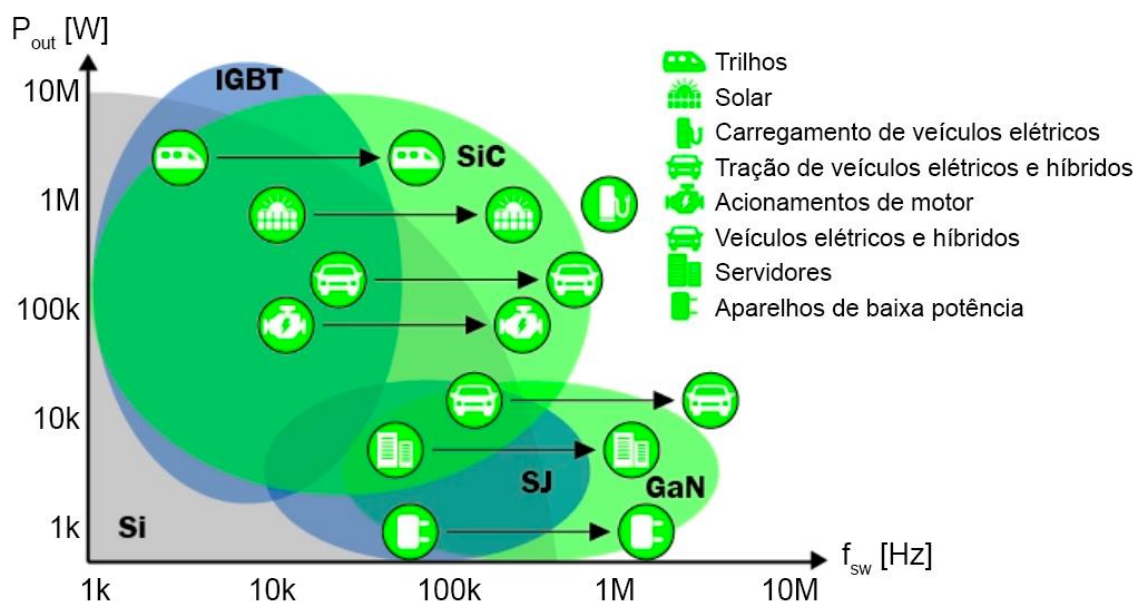


Figura 1.2: Evolução dos transistores utilizados para aplicações com média e alta potência e alta frequência de chaveamento. Fonte: adaptado de Onsemi (2021).

Um dos transistores baseados em materiais III-V é o Transistor de Alta Mobilidade dos Elétrons (HEMT), anunciado pela Fujitsu em 1980 (Mimura, 2018), apresentado pela Figura 1.3. O HEMT é baseado na heterojunção de materiais III-V, sua estrutura de porta é uma junção Schotky, i.e., um metal sobre um semiconductor. Devido à diferença entre E_g dos materiais da heterojunção, ocorrerá a difusão de elétrons do material com maior E_g (camada barreira) ao material com menor E_g (camada *buffer*), acarretando em um encurvamento na banda de condução, E_c , dos semicondutores. Este encurvamento da banda cria uma fina região de poço quântico que confina elétrons próximo à interface da heterojunção, formando um gás bi-dimensional de elétrons (2DEG) (Störmer et al., 1979; Nirmal; Ajayan, 2019). Ao utilizar um metal de porta com função trabalho suficientemente alta, os elétrons do semiconductor próximos da região de contato são afastados, formando uma região de depleção, a qual, segundo Mimura (2018), é análoga ao óxido na estrutura MOS do MOSFET.

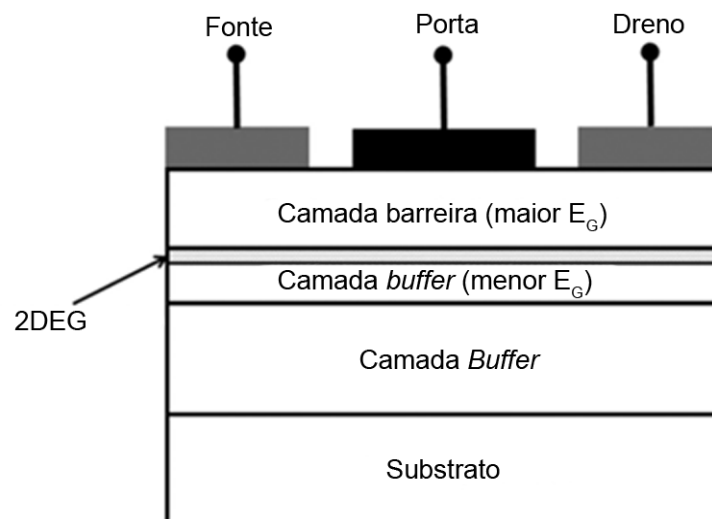


Figura 1.3: Seção transversal de um HEMT. Fonte: Adaptado de Nirmal & Ajayan, (2019).

Por oferecer alta mobilidade de elétrons e altas taxas de transmissão, o propósito original do HEMT era a transmissão de micro-ondas via satélite. Depois das suas primeiras utilizações, foi descoberto que o HEMT também oferece baixo ruído, sendo assim, ele também foi utilizado em receptores de transmissões de broadcasting e como receptor criogênico de fracos sinais de micro-ondas (amplificador de baixo ruído) para telescópios (Mimura, 2002).

Assim como toda tecnologia, o HEMT possui suas limitações, sendo seu principal problema a própria junção metal-semicondutor, a qual acarreta em uma alta corrente de fuga pela porta, I_g , na ordem de dezenas de $\mu\text{A}/\text{mm}$ (Ghosh et al., 2015). Para resolver este problema, a estrutura do HEMT foi adaptada para a estrutura metal-isolante-semicondutor (MIS), ou seja, foi inserido um isolante entre o metal de porta e a heteroestrutura (Sazawa et al., 2008; Mao et al., 2010). Esta adição deu origem ao MOSHEMT, no caso de um óxido como isolante de porta, ou MISHEMT, no caso geral, apresentado na Figura 1.4.

O MISHEMT combina a alta mobilidade dos elétrons proveniente do 2DEG e dos materiais III-V com a adequada isolamento de porta da estrutura MOS. Em comparação com o HEMT, o MISHEMT além de ter resolvido o problema de corrente de fuga de porta (redução de 3 ordens de grandeza em I_g) (Sazawa et al., 2008; Mao et al., 2010), maior corrente de dreno (I_{DS}) (Kordos et al., 2005), maior transcondutância (g_m), menor resistência série (R_{SD}), aumento na mobilidade efetiva dos portadores, menor densidade de armadilhas nas interfaces, menor histerese na curva de capacitância, i.e. curva C-V (Gregušová

et al., 2007), menor capacitância de porta e maiores frequências de transição (ou frequência de ganho unitário) (f_T), e maior frequência máxima de oscilação ($f_{m\acute{a}x}$) (Mao et al., 2010).

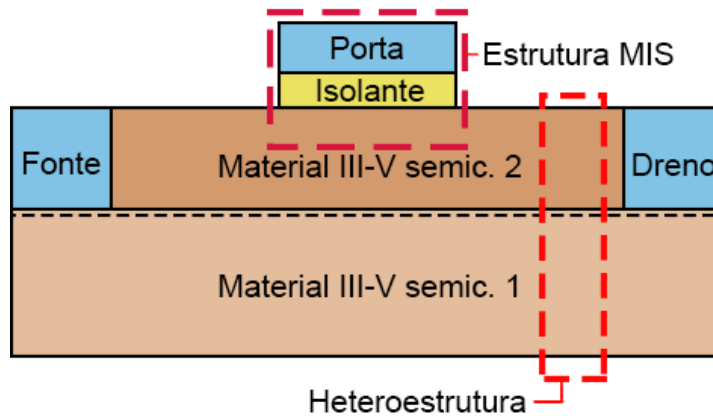


Figura 1.4: Seção transversal de um MISHEMT.

No entanto o funcionamento deste dispositivo considerando suas múltiplas conduções e a influência de cada um na composição de corrente do dispositivo ainda não foi estudado. Neste trabalho, serão investigados os mecanismos de condução do MISHEMT, a fim de apontar a contribuição de cada uma no comportamento digital e analógico do dispositivo.

1.1 Objetivo

A necessidade da caracterização de novas tecnologias foi o que motivou este trabalho. É conhecido que o MISHEMT solucionou o problema de corrente de porta do HEMT, que ele é capaz de oferecer alto ganho de tensão e também de trabalhar com frequências da ordem de centenas de GHz. Entretanto, os estudos que levam a tais resultados não fazem considerações aos mecanismos de condução do transistor e aos seus canais de condução, sendo assim é impossível endereçar os responsáveis pela característica elétrica do dispositivo.

Diante disso, o objetivo do trabalho é avaliar os mecanismos de condução do MISHEMT (quais são, onde ocorrem e suas contribuições para a corrente total) para determinar o impacto de cada uma nos principais parâmetros DC (digitais e analógicos) do dispositivo.

Para este estudo foram usadas medidas das curvas de corrente dos transistores MOSHEMT $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ e MISHEMT $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$, fabricados no Imec/Bélgica e para análise das múltiplas conduções foram utilizadas simulações de dispositivo, utilizando-se o software Atlas da SILVACO. Por fim, o comportamento analógico também foi avaliado através dos parâmetros elétricos DC.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em 5 capítulos. Iniciando-se no capítulo 1, com a introdução geral e apresentação do objetivo.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica necessária para o entendimento completo do trabalho, na qual serão estudados os transistores HEMT, os transistores MOSFET, os transistores MISHEMT e as estruturas estudadas atualmente, e também os parâmetros elétricos de interesse.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, desde os transistores reais e os instrumentos utilizados para a medição, até os parâmetros físicos e modelos utilizados para a simulação do dispositivo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados relacionados aos dispositivos fabricados, aos dispositivos simulados, aos parâmetros dimensionais e estruturais estudados, e aos parâmetros elétricos DC digitais e analógicos.

No capítulo 5 são apresentadas pontualmente as conclusões obtidas através da análise dos resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais do MOSFET convencional, do HEMT, do MISHEMT, e os principais parâmetros e características conhecidas dessas tecnologias.

2.1 Transistor de Efeito de Campo do tipo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET)

O MOSFET é o componente eletrônico mais utilizado na microeletrônica atualmente, sua estrutura é bastante conhecida e seus modelos elétricos bem definidos. O NMOSFET modo enriquecimento apresentado pela Figura 2.1 é um transistor de canal formado por elétrons, que permite a passagem de corrente entre dreno e fonte (tipo n).

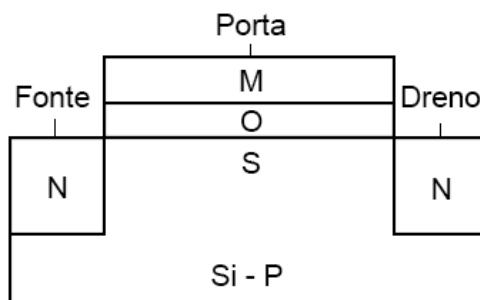


Figura 2.1: Seção transversal do NMOSFET convencional.

Na estrutura MOS do dispositivo da Figura 2.1, o corpo do dispositivo é um semicondutor do tipo P, ou seja, possui excesso de lacunas. Juntamente com as cargas no óxido, o excesso de lacunas causa um desalinhamento no diagrama de bandas do MOSFET. A tensão de porta, V_{GS} , que alinha o diagrama de bandas é chamada tensão de faixa-plana, V_{fb} . Quando polarizado diretamente ($V_{GS} > V_{fb}$) o capacitor MOS irá repelir as lacunas da interface óxido/semicondutor e, ao atingir a tensão de limiar ($V_{GS} \geq V_t$) deverá atrair elétrons, que são portadores minoritários nessa estrutura, suficientes para criar uma camada de inversão de portadores (Martino et al., 2003), como mostra a Figura 2.2. A camada de inversão funciona como uma extensão das regiões N de fonte

e dreno e, assim, ao aplicar tensão entre fonte e dreno, V_{DS} , haverá corrente de dreno, I_{DS} . Ao aplicar uma tensão de porta negativa (polarização reversa) a estrutura MOS, também chamada de capacitor MOS, irá acumular lacunas na interface óxido/semicondutor. Nessa configuração o circuito entre fonte e dreno é equivalente a dois diodos em série reversamente polarizados, o qual não apresenta condução de corrente.

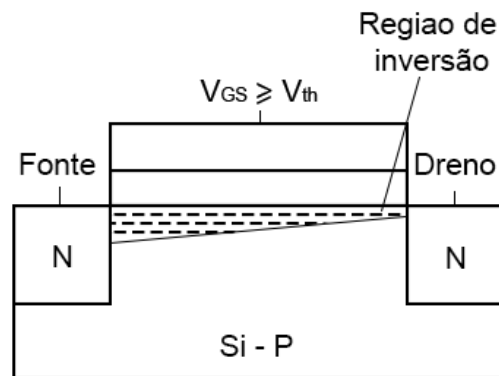


Figura 2.2: MOSFET no regime de inversão.

As curvas características do NMOSFET são apresentadas na Figura 2.3. Pela curva da corrente de dreno (I_{DS}) em função da tensão aplicada entre a porta e a fonte (V_{GS}) é possível notar que há condução a partir de um valor de V_{GS} de aproximadamente V_t . Na curva da corrente de dreno em função da tensão aplicada entre o dreno e a fonte (V_{DS}), a área sem cor se refere à região de triodo e a área com preenchimento azul se refere à região de saturação, na qual é esperado que a corrente de dreno seja pouco dependente de V_{DS} (Martino et al., 2003; Sedra; Smith, 2015).

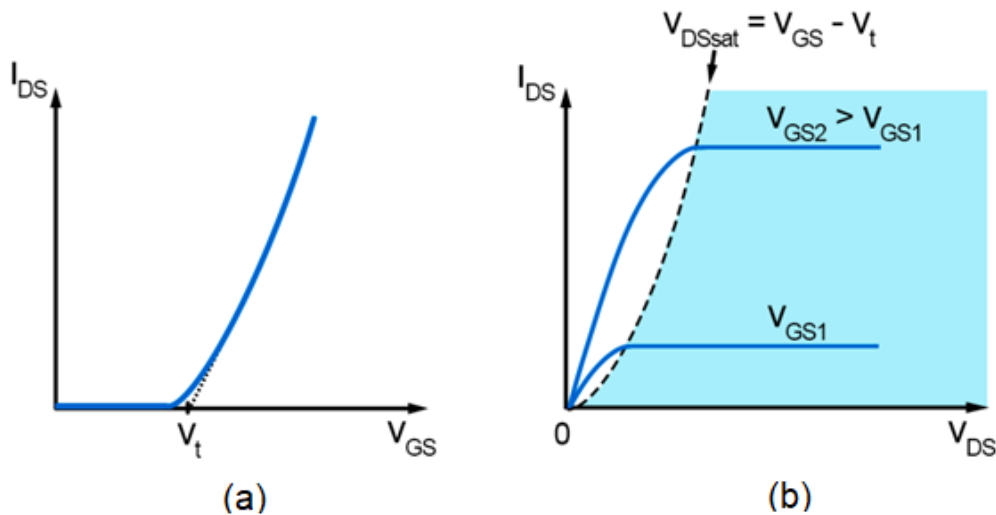


Figura 2.3: Curvas características do NMOSFET convencional: (a) curva $I_{DS} \times V_{GS}$ e (b) curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para dois valores de V_{GS} . Fonte: Adaptado de Sedra & Smith (2015).

Na região de sublimiar ($V_{GS} < V_t$), o principal mecanismo de condução é a difusão dos portadores. Após a tensão de limiar, a condução acontece pela deriva dos portadores. A partir deste ponto, qualquer incremento em V_{GS} servirá para aumentar a disponibilidade de portadores no canal (Sedra; Smith, 2015).

As principais equações que modelam o comportamento elétrico do NMOSFET são apresentadas pela Tabela 2.1 (Martino et al., 2003; Colinge, 2004; Sedra; Smith, 2015).

Nas quais q é a carga elementar, N_A é a concentração de impurezas aceitadoras do semiconductor tipo P, $d_{máx}$ é a largura máxima da região de depleção, ϕ_F é o potencial de Fermi, C_{ox} é a capacitância do óxido de porta por unidade de área, Q_{ss} é a densidade de cargas efetiva no óxido de porta, ϕ_{MS} é a diferença de função trabalho entre metal e semiconductor, W é a largura do canal, L_g o comprimento do canal, V_{DS} é a tensão aplicada ao entre dreno e fonte, g_m é a transcondutância, SS é a inclinação de sublimiar, k é a constante de Boltzmann, T a temperatura em Kelvin, kT/q a tensão térmica, C_D a capacitância de depleção por unidade de área, C_{it} a capacitância por unidade de área proveniente das armadilhas de interface, A_v é o ganho intrínseco de tensão, g_D é a condutância de saída e V_{EA} é o módulo da tensão Early.

Tabela 2.1: Principais parâmetros elétricos do MOSFET.

Parâmetro	Símbolo	Equacionamento	Equação
Tensão de limiar	$V_{t,MOS}$	$\frac{qN_A d_{máx}}{C_{ox}} + 2\phi_F - \frac{Q_{SS}}{C_{ox}} + \phi_{MS}$	2.1
Corrente de dreno na região triodo	$I_{DS,MOS,tri}$	$\mu_{N,MOS} C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_{th,MOS})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}]$	2.2
Corrente de dreno na região de saturação	$I_{DS,MOS,sat}$	$\frac{\mu_{N,MOS} C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{th,MOS})^2 \left(1 + \frac{V_{DS}}{V_{EA}}\right)$	2.3
Mobilidade dos elétrons em baixo campo	$\mu_{N,MOS}$	$\frac{L}{WC_{ox}V_{DS}} g_{m,triado}$	2.4
Inclinação de sublimiar	SS_{MOS}	$\frac{kT}{q} \ln(10) \left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{ox}}\right)$	2.5
Transcondutância	g_m	$\frac{d I_{DS}}{d V_{GS}}$	2.6
Ganho intrínseco de tensão	$ A_{V,MOS} $	$\frac{g_m}{g_D}$	2.7
Condutância de saída	$g_{D,MOS}$	$\frac{I_{DS}}{V_{EA}}$	2.8

2.2 Transistor de Alta Mobilidade dos Elétrons (HEMT)

A evolução na área de transistores e materiais semicondutores tem o objetivo de suprir a demanda por maiores temperaturas de operação, tensão de ruptura, velocidade de operação entre outras. Da pesquisa com materiais III-V e heteroestruturas, surgiu o Transistor de Alta Mobilidade dos Elétrons (HEMT). Diferente do MOSFET, cujo canal de condução é a camada de inversão ou acumulação próxima ao isolante de porta, o HEMT possui um gás de elétrons bidimensional (2DEG) que age como canal (Mimura, 1980). Devido a isso, o HEMT oferece alta mobilidade dos elétrons e baixo ruído, o que é interessante para aplicações que exigem altíssimas estabilidade e sensibilidade, como em radiofrequências (RF) e na amplificação de sinais fracos (Nirmal; Ajayan, 2019). Materiais III-V são capazes de oferecer mobilidade elevada, maior variabilidade de E_g e menor massa efetiva dos portadores em relação ao silício, enquanto que

a heteroestrutura proporciona a diferença de E_g e a polarização interna, P_{int} , responsáveis pela formação do 2DEG na interface e sua densidade de carga (Farahmand et al., 2001).

A estrutura do HEMT modo enriquecimento, apresentada pela Figura 2.4 é composta por uma heteroestrutura, e um metal de porta posicionado logo acima da camada de barreira (Mimura, 1980). O modo enriquecimento é obtido ao possuir uma fina camada de barreira juntamente com um metal de porta cuja função trabalho é maior que a função trabalho do semiconductor (Nirmal; Ajayan, 2019). É comum se referir ao HEMT pela composição de sua heteroestrutura, como AlGaAs/GaAs, ou AlGaN/GaN.

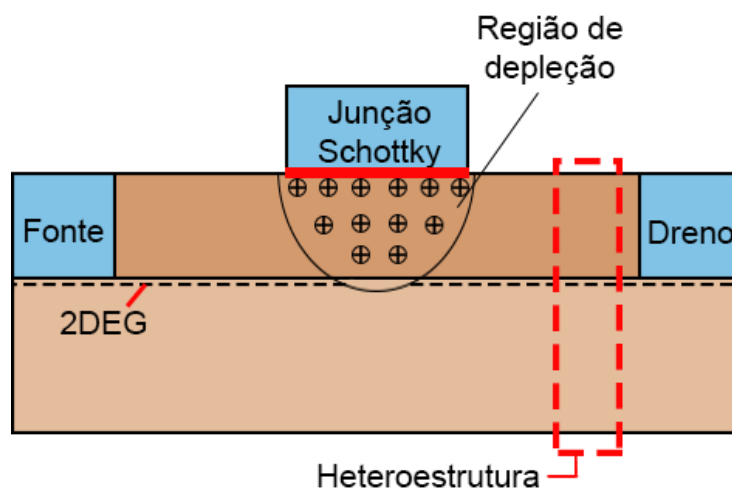


Figura 2.4: Seção transversal do HEMT, destacando a junção Schottky e a região de depleção formada por ela.

2.2.1 Classificação de heteroestruturas e formação do 2DEG

A heterojunção pode ser classificada em 3 tipos, dependendo da energia de suas bandas de condução, E_c , e de valência, E_v , como mostra a Figura 2.5, sendo a heterojunção AlGaN/GaN do tipo I (Nirmal; Ajayan, 2019). A Tabela 2.2 apresenta parâmetros de banda de energia em temperatura ambiente dos materiais utilizados neste trabalho, enquanto que a equação 2.9 apresenta o cálculo de E_g do composto ternário $Al_xGa_{1-x}N$ em relação a fração molar de Al, x , no composto, sendo $E_{g,AlN}$ a banda proibida do AlN, $E_{g,GaN}$ a banda proibida do GaN e b o parâmetro de encurvamento, igual a 1,3 eV para o AlGaN a 300 K (Touati et al., 2019).

Tabela 2.2: Parâmetros de banda em temperatura ambiente.

Material	E_g (eV)	χ (eV)	Referência
GaN	3,55	3,05	Touati et al., (2019)
AlN	6,08	1,01	Touati et al., (2019)

$$E_{g,Al_xGa_{1-x}N} = E_{g,AlN}x + E_{g,GaN}(1 - x) - bx(1 - x) \quad (2.9)$$

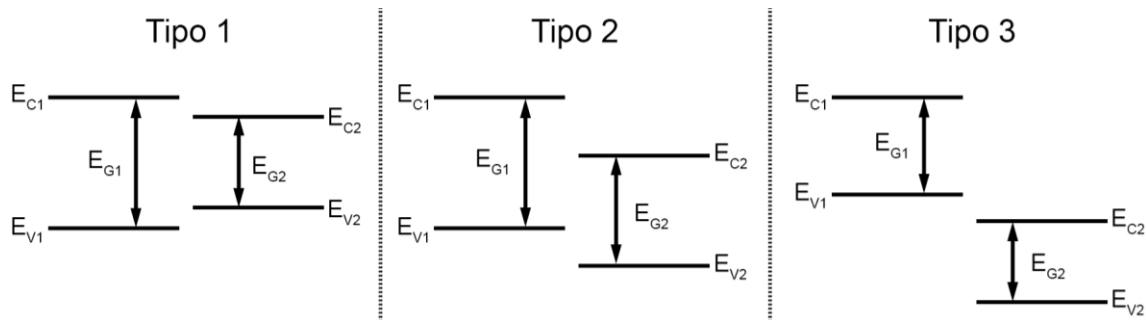


Figura 2.5: Classificação de heterojunções. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).

Ao fazer contato entre os materiais acontecerá a difusão dos portadores de carga e o alinhamento do nível de Fermi, E_F . Os elétrons livres da camada barreira (maior E_g) se difundem para a camada *buffer* (menor E_g). Isso causa um encurvamento nas bandas e uma descontinuidade em E_c . O encurvamento de E_c é tal que, em uma fina região do lado da camada *buffer* próxima à interface, E_c atinge níveis de energia menores que E_F , formando um poço quântico de formato triangular. Os elétrons, tanto os disponíveis pelo material quanto os injetados pelos contatos ôhmicos, serão fortemente atraídos por este poço quântico devido ao seu baixo nível de energia, formando um gás de elétrons que tem a espessura de alguns angstroms, sendo praticamente bidimensional. Este gás recebe o nome de 2DEG, e tem a funcionalidade de canal no HEMT (Nirmal; Ajayan, 2019). A Figura 2.6 apresenta uma heterojunção do tipo I após o contato e o equilíbrio das cargas, onde ΔE_c e ΔE_v são as diferenças entre os níveis de energia da banda de condução e de valência, respectivamente.

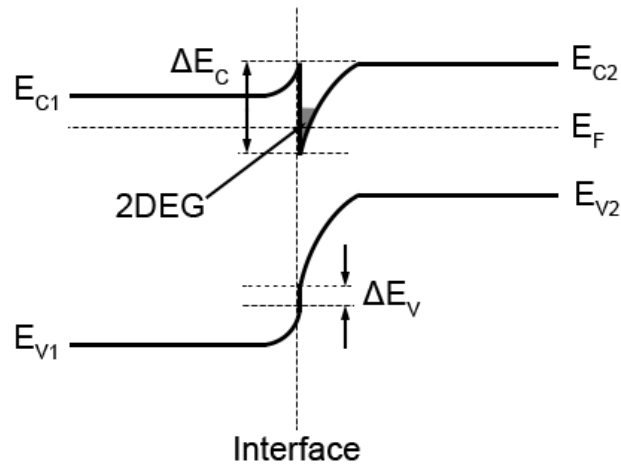


Figura 2.6: Heterojunção tipo I após o contato e balanço de energia. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).

Devido à separação dos elétrons do 2DEG de seus íons originários e à distância entre os mesmos, estes elétrons proporcionam baixo choque de elétrons e, portanto, possuem alta mobilidade (Nirmal; Ajayan, 2019).

2.2.2 Polarização interna

A polarização interna é composta pela soma da polarização espontânea, P_{SP} , e da polarização piezoelétrica, P_{PE} (Eq. 2.10) (Nirmal; Ajayan, 2019).

$$P_{int} = P_{SP} + P_{PE} \quad (2.10)$$

A polarização espontânea é originada pela estrutura cristalina do tipo wurtzita dos semicondutores baseados em materiais III-V, cuja célula unitária é apresentada pela Figura 2.7, onde A_1 (material V) é um ânion e C_{1-4} são cátions (material III), $\hat{c}$ é a direção da face da estrutura, a , c_1 e c_2 são parâmetros de rede. Este tipo de estrutura causa um tipo de polarização interna devido à distorção que os átomos constituintes apresentam de seu arranjo ideal. Isso causa uma assimetria na distribuição de carga na estrutura e uma diferença de potencial (ddp) é gerada sem a aplicação de potencial elétrico externo (Troy et al., 2021a)

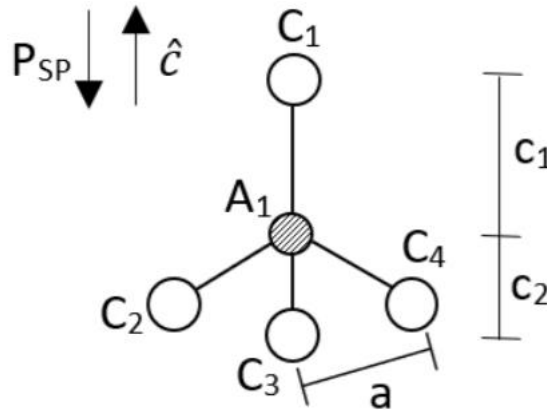


Figura 2.7: Célula unitária da wurtzita. Fonte: Troy et al. (2021b)

A P_{SP} pode ser calculada a partir da equação 2.11 (Troy et al., 2021a). A Tabela 2.3 apresenta o valor de P_{SP} de alguns materiais.

$$P_{SP} = \frac{e^*(3c_2 - c_1)}{2\sqrt{3}a^2(c_1 + c_2)} \quad (2.11)$$

Tabela 2.3: Polarização espontânea de alguns materiais.

Material	P_{SP} (m ⁻²)	Referência
GaN	-0,029	Nirmal & Ajayan, (2019)
AlN	-0,081	Ambacher et al. (1999)

A P_{SP} de nitretos ternários pode ser calculada a partir da equação 2.12, na qual A é o cátion, B é o ânion e x é a fração molar correspondente a $A_xB_{1-x}N$, e b é o parâmetro de encurvamento obtido experimentalmente ($b_{AlGaN} = 0,021$ eV) (Nirmal; Ajayan, 2019).

$$P_{SP}ABN(x) = -P_{SP}ANx - P_{SP}BN(1 - x) + bx(1 - x) \quad (2.12)$$

Como ilustrado na Figura 2.8, a polarização piezoelétrica é originada na heterojunção pelo estresse mecânico causado pela diferença entre os parâmetros de rede na superfície de contato dos materiais que constituem a heteroestrutura, dependente da direção da estrutura cristalina da wurtzita (Asbeck et al., 1997; Ambacher et al., 1999), sendo a tensão mecânica entre os materiais $Al_xGa_{1-x}N$ e GaN compressiva (Nirmal; Ajayan, 2019). A P_{PE} pode ser

calculada a partir da equação 2.13, na qual d_{31} é o coeficiente de tensão piezoelétrica do material da camada barreira, c_{ij} são as constantes elásticas do material da camada *buffer*, e ϵ_{xx} é a tensão mecânica na direção x (perpendicular à interface da heterojunção) (Asbeck et al., 1997).

A polarização interna em um semiconductor dopado com impurezas doadoras acarreta no aparecimento de um campo elétrico interno, fazendo com que os elétrons se difundam na direção do campo e acumulem em uma determinada região, originando uma carga efetiva (Yu et al., 1997; Touati et al., 2019). Como mostra a Figura 2.9, a carga efetiva dá origem a um encurvamento no diagrama de bandas do material. Juntamente com o tipo de heteroestrutura, estes fenômenos controlam a densidade de folha, n_s , no 2DEG (Nirmal; Ajayan, 2019; Touati et al., 2019).

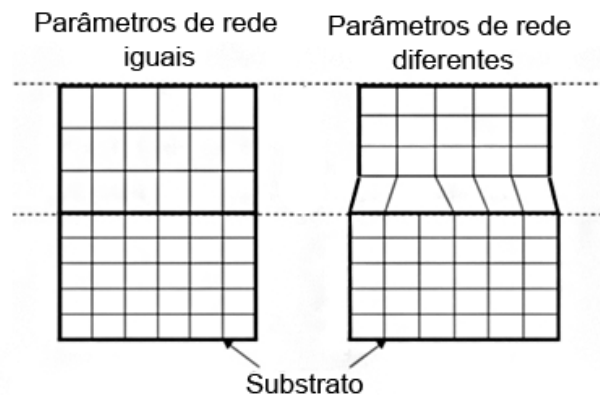


Figura 2.8: Comparação entre uma heteroestrutura formada com materiais com parâmetros de rede iguais e uma heteroestrutura formada com materiais com parâmetros de rede distintos. Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).

$$P_{PE} = 2d_{31}(c_{11} + c_{12} - \frac{2c_{13}^2}{c_{33}})\epsilon_{xx} \quad (2.13)$$

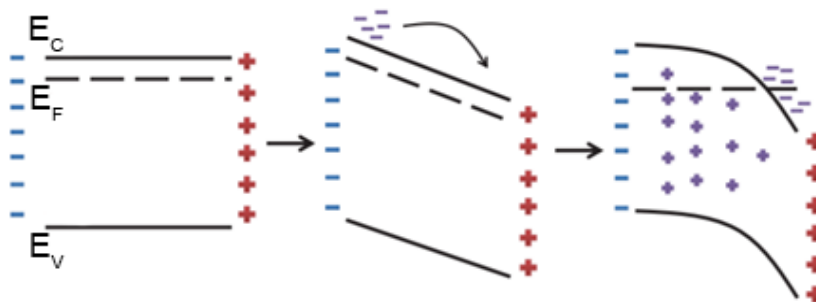


Figura 2.9: Efeito da polarização interna em uma wurtzita de nitretos III-V dopados com impurezas tipo n. Fonte: adaptado de He et al. (2015).

2.2.3 Características de corrente e equacionamento básico

A corrente no HEMT pode ser calculada pela equação 2.14 (Nirmal; Ajayan, 2019).

$$I_{DS,HEMT} = \mu(E)qn(x)\frac{dV}{dx}W \quad (2.14)$$

Na qual μ é a mobilidade dos elétrons, W é a largura da porta e $qn(x)$ é a densidade de superfície na direção da corrente, dado pela equação 2.15.

$$qn(x) = \frac{\epsilon_1}{d}(V_{eff} - V_{th2}) \quad (2.15)$$

Onde V_{eff} é a tensão efetiva em x dada pela diferença entre a tensão de porta e a tensão em x (equação 2.16).

$$V_{eff} = V_G - V(x) \quad (2.16)$$

A tensão de limiar do HEMT AlGaAs/GaAs pode ser calculada a partir das equações 2.17 a 2.20.

$$V_{th1,HEMT} = V_s - \frac{\Delta E_{F2}}{q} - a(d - d_0) \quad (2.17)$$

$$a = \frac{qN_D}{\epsilon_1} \quad (2.18)$$

$$ad_0^2 = ad^2 + \frac{\Delta E_C - \Delta E_{F2} - \Delta E_{F1}}{q} \quad (2.19)$$

$$V_{th2,HEMT} = V - \frac{\Delta E_C}{q} - \frac{E_F}{q} - at_d^2 \quad (2.20)$$

Nas quais ΔE_C é a diferença entre as energias da banda de condução dos materiais da heteroestrutura, ΔE_{F1} é a diferença entre a energia da banda de

condução do 2DEG e o nível de Fermi, ΔE_{F2} é a diferença entre a energia da banda de condução da parte neutra do semiconductor de maior banda proibida e o nível de Fermi, q é a carga do elétron, t_d é a espessura da camada de barreira. $V_{t1,HEMT}$ é relacionado ao controle das cargas, e $V_{t2,HEMT}$ está relacionado ao controle da porta (Nag, 2000; Nirmal; Ajayan, 2019).

O ganho do HEMT AlGaIn/GaN é dado pela equação 2.21, onde R_{DS} é a resistência série, R_o é a resistência de saída, R_i é a resistência intrínseca (ou de entrada), R_G é a resistência da porta e C_{GS} é a capacitância entre porta e fonte (Nirmal; Ajayan, 2019).

$$|A_{v,HEMT}| \cong \frac{g_m(R_{DS}/R_o)}{WC_{GS}(R_i+R_G)} \quad (2.21)$$

O HEMT modo enriquecimento foi obtido ao aumentar a função trabalho do metal através de engenharia de materiais, o que tem a tendência de afastar os elétrons do semiconductor que estão próximos à junção Schottky, criando uma região de depleção. Sendo a região ativa (camada de barreira), suficientemente fina esta depleção deverá ser capaz de cortar o canal sem a aplicação de campos elétricos externos (Mimura, 1980). Apesar disso, a estrutura metal sobre semiconductor acarreta em alta corrente de colapso pela porta, I_g (Touati et al., 2019). Quando polarizado diretamente, o principal mecanismo da condução de corrente pela porta é a emissão termiônica (TE), já quando polarizado reversamente são a emissão Poole-Frenkel (PF) e o tunelamento assistido por armadilhas (TAT). Devido a isso, o HEMT pode sofrer com grande dissipação de potência no estado desligado e com a redução da tensão de ruptura (Ghosh et al., 2015).

2.3 Transistor de Alta Mobilidade dos Elétrons do tipo Metal-Isolante-Semiconductor (MISHEMT)

O MISHEMT foi apresentado por volta dos anos 2000, e possui estrutura semelhante à do HEMT, com a diferença de possuir isolante de porta (Figura 2.10) (Nirmal; Ajayan, 2019). Devido à sua heteroestrutura ocorrerá a formação

do 2DEG, que servirá como canal principal, logo, é semelhante ao HEMT em relação à alta mobilidade dos elétrons (Peralagu et al., 2019).

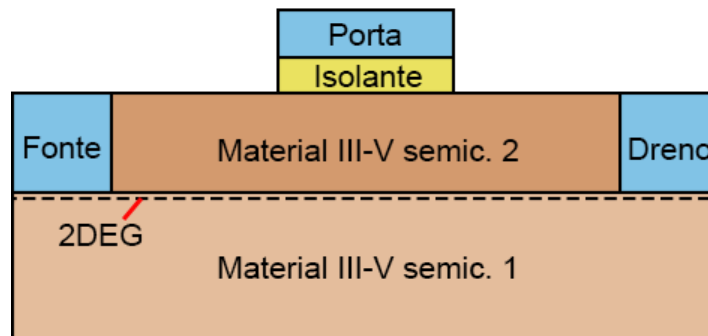


Figura 2.10: MOSHEMT genérico

Como visto pela Figura 2.11, a integração da estrutura MIS ao HEMT causou uma redução de corrente de fuga pela porta I_g de pelo menos duas ordens de grandeza (Ye et al., 2005; Nirmal; Ajayan, 2019). Também apresenta os benefícios das tecnologias baseadas em GaN, como alta tensão de ruptura, alta concentração de 2DEG e baixa resistência de folha. Assim como o HEMT, ele é indicado como promissor para aplicação em dispositivos portáteis e que trabalhem com altas frequências, com a diferença de proporcionar baixa corrente de porta. É um candidato para atender à crescente demanda por taxas de transmissão de informações cada vez mais altas, com alta potência de saída, alta eficiência e baixo ruído (Wu et al., 2021; Peralagu et al., 2019).

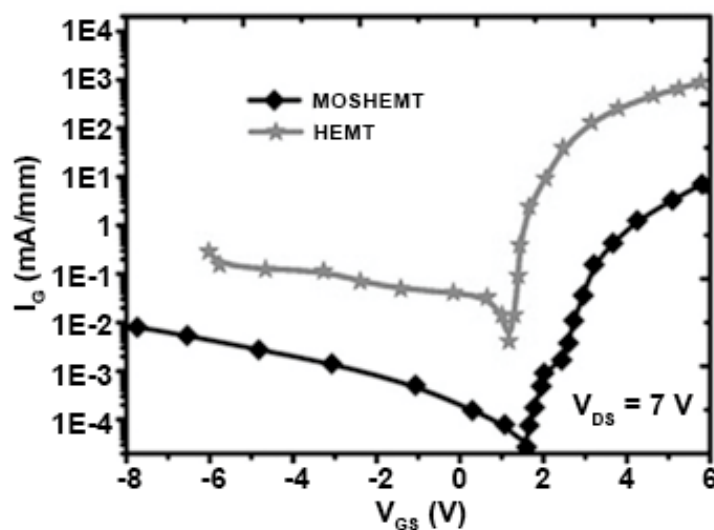


Figura 2.11: Comparação entre as correntes pela porta do HEMT e do MOSHEMT.
Fonte: adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).

O MISHEMT básico é um dispositivo normalmente ligado visto que para 0V de tensão de porta o 2DEG já está formado. Muitas abordagens para melhorar seu desempenho têm sido propostas, como a tecnologia de porta rebaixada para tornar o dispositivo normalmente desligado (Chang et al., 2010; Freedman et al., 2014), a utilização de isolantes de alta constante dielétrica (high-k) (Nirmal; Ajayan, 2019), e a inserção da camada de AlN (Chang et al., 2010; Hu et al., 2018).

Para aumentar a performance do MISHEMT foi inserido uma fina camada de AlN acima do *buffer* de GaN e abaixo da barreira de AlGaIn (Figura 2.12). O AlN possui alto valor de E_g , e por isso intensifica a formação do 2DEG e melhora sua condutividade, além de aumentar V_{Br} e I_{DS} e melhorar g_m (Figura 2.13) (Chang et al., 2010; Hu et al., 2018). O diagrama de bandas da nova estrutura é apresentado na Figura 2.14.

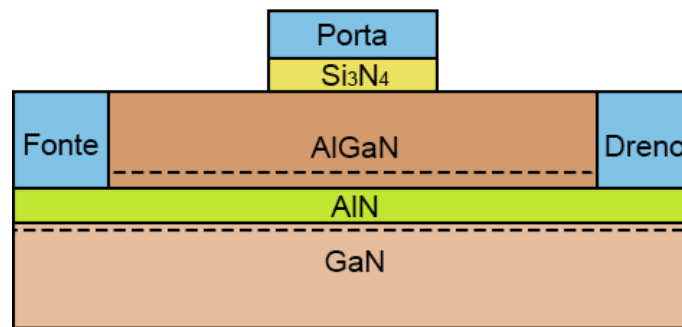


Figura 2.12: Seção transversal de um MISHEMT $Si_3N_4/AlGaIn/AlN/GaN$.

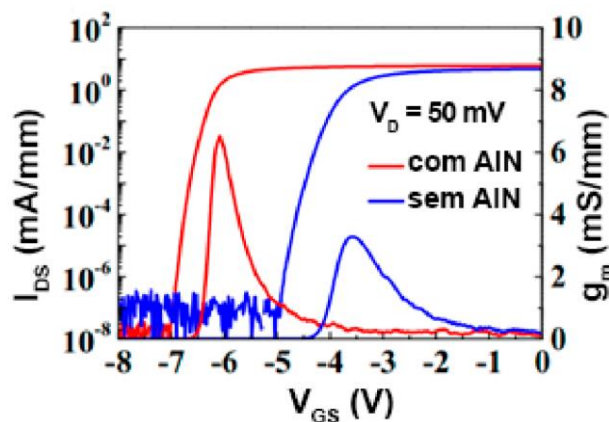


Figura 2.13: Comparação de I_{DS} e g_m entre um MOSHEMT sem a camada AlN e um com a camada. Fonte: adaptado de Hu et al. (2018).

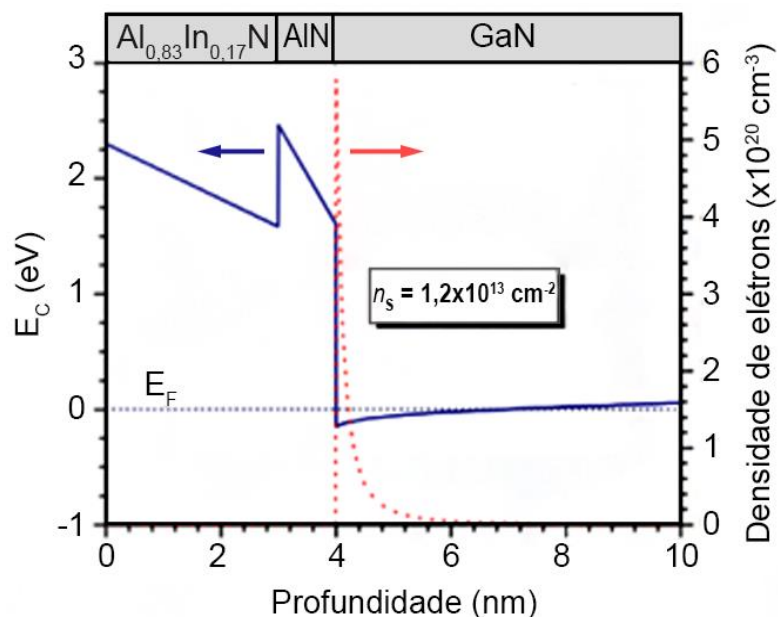


Figura 2.14: Diagrama de bandas e densidade de elétrons do MISHEMT Al_{0,83}Ga_{0,17}N/AlN/GaN. Fonte: adaptado de Lachab et al. (2014)

Ao longo do trabalho serão estudados MOSHEMTs com óxido de alumínio (Al₂O₃) como isolante de porta, e MISHEMTs com nitreto de silício (Si₃N₄) como isolante de porta. A Tabela 2.4 apresenta parâmetros básicos desses isolantes.

Tabela 2.4: Propriedades básicas dos isolantes. Fonte: Adaptado de Nirmal & Ajayan (2019).

Isolante	ϵ_r	E_g (eV)	Estrutura cristalina
Al ₂ O ₃	9	8,7	Amorfa
Si ₃ N ₄	7	5,1	Amorfa

Grande parte das características elétricas do MISHEMT são estudadas utilizando como referência um HEMT de estrutura semelhante, devido à condução principal ocorrer pelo 2DEG. Quando comparado ao HEMT, foram relatados resultados sobre o aumento de corrente de dreno, a redução da capacitância e uma redução na degradação da transcondutância (Ye et al., 2005; Sazawa et al., 2008) e um aumento da mobilidade (Gregusova et al., 2007). Além disso, diversas pesquisas recentes focam em avaliar o comportamento elétrico do MISHEMT alterando a forma da heteroestrutura, o isolante de porta e a inserção de diferentes camadas de semicondutores.

Contudo, há pouco relato acerca dos mecanismos de condução do MISHEMT. Para a realização deste estudo em questão, é necessária a análise sistemática das curvas características e a extração de alguns parâmetros elétricos e figuras de mérito que indiquem como é a condução de corrente no dispositivo, para então relacioná-los com o comportamento elétrico digital e analógico do mesmo.

2.4 Parâmetros Elétricos Básicos

O comportamento de um transistor pode ser parcialmente avaliado através dos parâmetros elétricos básicos relacionados às suas curvas características. Da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ é possível extrair, por exemplo, a tensão de limiar (V_t), a inclinação de sublimiar (SS), e a transcondutância (g_m), e da curva $I_{DS} \times V_{DS}$ a tensão Early (V_{EA}), a condutância de saída (g_D), e o ganho intrínseco de tensão, (A_v).

2.4.1 Tensão de limiar (V_t)

A tensão de limiar é a tensão aplicada entre porta e fonte que faz com que o dispositivo se encontre no limiar entre ligado ($V_{GS} > |V_t|$) e desligado ($V_{GS} < |V_t|$).

A tensão de limiar pode ser estimada ou extraída de diversas formas, uma delas é a partir da análise do diagrama de bandas da estrutura de porta do transistor (Martino et al., 2003). Para as tecnologias mais conhecidas são elaboradas equações que sumarizam os principais parâmetros da tecnologia, como as equações 2.1 para o MOSFET e 2.17 a 2.20 para o HEMT AlGaAs/GaAs.

Também é possível extrair V_t a partir da curva $I_{DS} \times V_{GS}$, utilizando o método da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$, na qual, comumente, o máximo pico corresponde à V_t (Figura 2.15A) (Terao et al., 1991 apud Martino et al., 2003). Para corroborar, foi tomada a terceira derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$, na qual V_t corresponde ao ponto onde a curva cruza o valor zero com coeficiente angular negativo naquela região (Figura 2.15B).

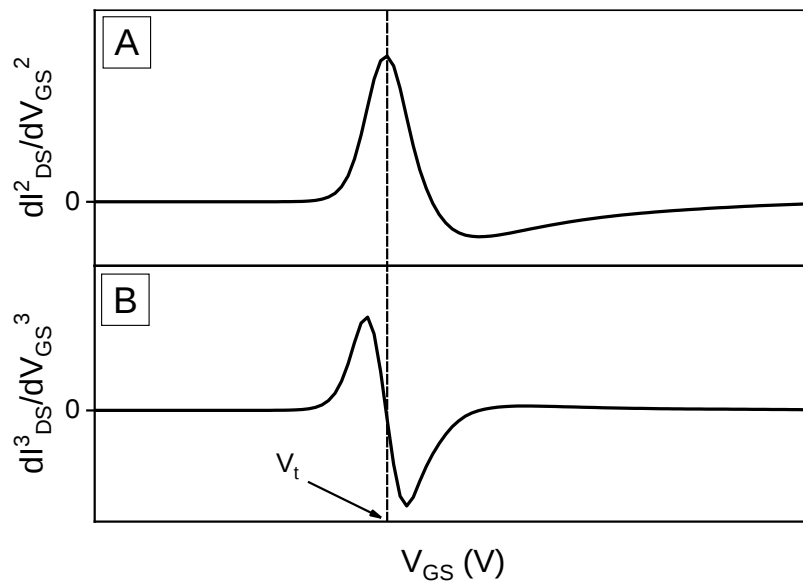


Figura 2.15: (A) Método da segunda derivada para extração de V_t de uma curva $I_{DS} \times V_{GS}$ genérica. (B) Derivada terceira de $I_{DS} \times V_{GS}$.

2.4.2 Inclinação da região de sublimiar (SS)

Também chamada de inclinação de sublimiar, ela indica a velocidade em que um dispositivo é capaz de trocar do estado ligado para o desligado e vice-versa. O resultado diz quantos volts são necessários para elevar em uma década o nível de corrente, sendo medido normalmente em mV/dec, quanto menor, melhor, mais rápido é o chaveamento do transistor.

Na região de sublimiar a corrente tem um comportamento exponencial, o que indica a dependência do mecanismo de difusão, já que este é dependente do gradiente da concentração de portadores. É possível extrair a SS graficamente tomando o ponto mínimo do inverso da derivada de $\log_{10}(I_{DS}) \times V_{GS}$ (Figura 2.16), o que está de acordo com a equação 2.22.

$$SS = \frac{dV_{GS}}{d\log(I_{DS})} \quad (2.22)$$

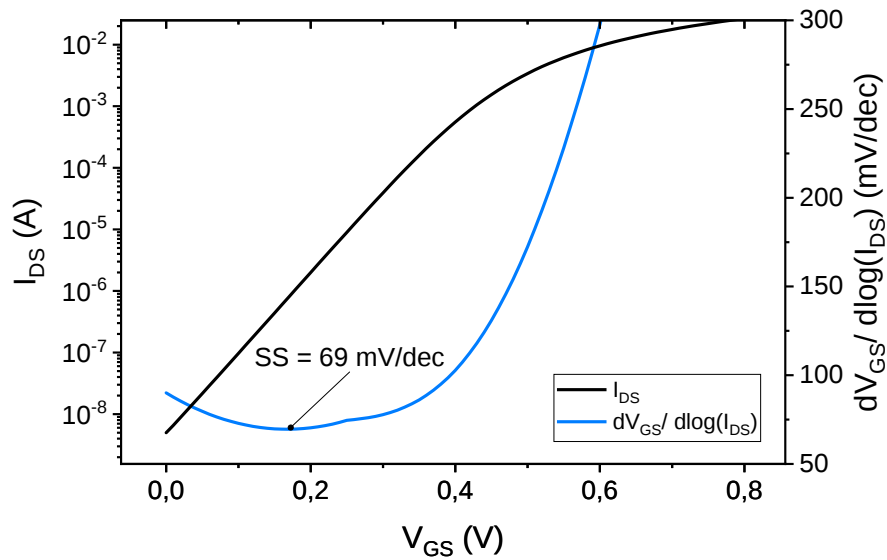


Figura 2.16: Gráfico em escala logarítmica de I_{DS} x V_{GS} e do inverso da derivada de $\log_{10}(I_{DS})$ x V_{GS} na região de sublimar de um MOSFET convencional.

A inclinação de sublimar do MOSFET pode ser calculada utilizando a equação 2.5, cujo limite teórico, à temperatura ambiente, é próximo a 60 mV/dec.

2.4.3 Transcondutância (gm)

A transcondutância é o parâmetro que indica a efetividade do controle da corrente I_{DS} pela tensão aplicada na porta V_{GS} (Colinge, 1988; Nirmal; Ajayan, 2019). Pode ser obtida através da derivação da curva I_{DS} x V_{GS} de baixo campo, conforme a equação 2.23.

$$gm = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \quad (2.23)$$

Para o MOSFET, derivando a equação 2.2 e de acordo com a equação 2.23, é obtida a equação 2.6 e demonstrada pela Figura 2.17.

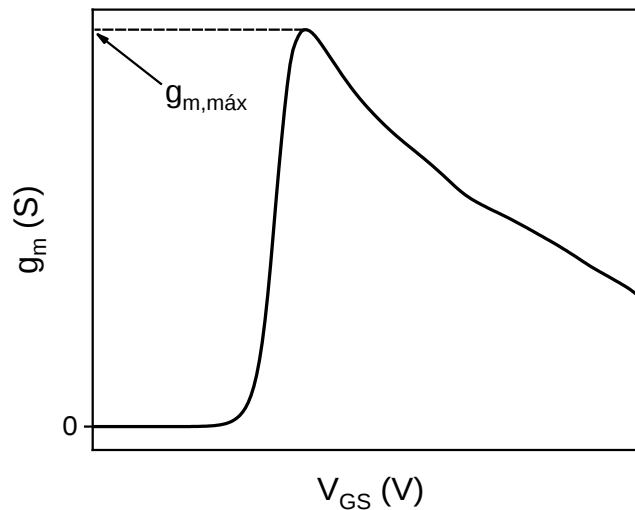


Figura 2.17: Transcondutância em função da tensão aplicada à porta do transistor.

2.4.4 Tensão Early (V_{EA}) e condutância de saída (g_D)

A tensão Early é um parâmetro que indica a característica de resistência de saída do transistor. Ela está diretamente ligada ao ganho do transistor e ao comportamento analógico do dispositivo (Joseph et al, 1997; Valle et al., 2010).

Nos MOSFETs o efeito Early se deve à modulação do comprimento de canal. Em $V_{DS} = (V_{GS} - V_t)$ ocorre o pinçamento do canal (pinchoff), que é o estrangulamento da região de inversão que acontece entre dreno e canal na superfície do silício. Ao aumentar V_{DS} para valores acima de $(V_{GS} - V_t)$, este estrangulamento vai se deslocando para mais próxima do terminal de fonte, aumentando a resistência entre fonte e dreno (Colinge, 2006; Valle et al., 2010; Sedra; Smith, 2015).

A tensão Early pode ser extraída através da extrapolação da região de saturação da curva $I_{DS} \times V_{DS}$ até o ponto que cruza o eixo das abscissas, conforme mostra a Figura 2.18. Também pode ser calculada através da equação 2.24.

Onde $g_{D,sat}$ é a condutância de saída na saturação, que, naturalmente, é o inverso da resistência de saída. Este parâmetro também é um indicativo da qualidade do dispositivo para circuitos analógicos e indica a dependência de $I_{DS,sat}$ com o campo elétrico proveniente de V_{DS} (Colinge, 2006; Sedra; Smith, 2015). É esperado que seja independente. O ideal é que V_{EA} seja infinito, e para

isso é preciso que g_D seja zero (que a resistência de saída seja infinita). A condutância de saída pode ser calculada pela equação 2.25.

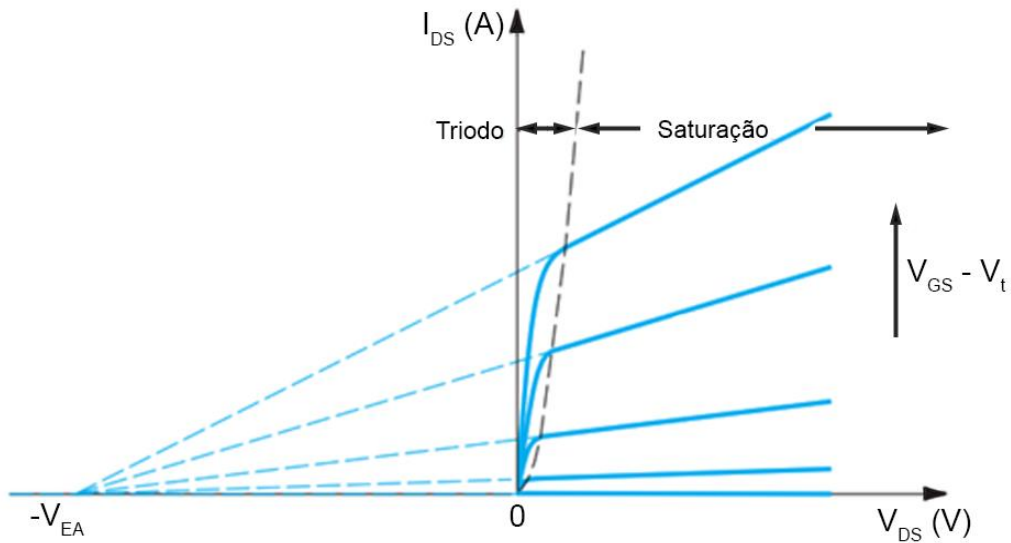


Figura 2.18: Método gráfico para a extração da tensão Early. Fonte: adaptado de Sedra & Smith (2015).

$$V_{EA} \cong \frac{I_{DS,sat}}{g_D} \quad (2.24)$$

$$g_D \equiv \left[\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right]_{V_{GS}=cte} \quad (2.25)$$

2.4.5 Ganho intrínseco de tensão (A_v)

O ganho intrínseco de tensão de um transistor, dado pela relação entre a tensão de saída (V_{DS}) e a de entrada (V_{GS}), como na equação 2.26. Para o MOSFET, a equação 2.26 torna-se a equação 2.7, e para o HEMT a equação 2.21.

$$|A_v| = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{g_m}{g_D} \quad (2.26)$$

Para o MOSFET, substituindo a equação 2.8 na equação 2.26, é obtida a equação 2.27.

$$|A_v| \cong \frac{g_m}{I_{DS}} V_{EA} \quad (2.27)$$

Na qual a relação g_m/I_{DS} é chamada de eficiência do transistor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo os dispositivos físicos e os simulados são apresentados em detalhes, assim como a metodologia e os equipamentos utilizados para as medidas experimentais. A partir das curvas de corrente serão detalhados os métodos utilizados para a extração dos parâmetros e resultados que posteriormente serão analisados.

Para extrair g_D e V_{EA} foram utilizadas curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ com para 3 valores de V_{GS} , correspondentes às sobretensões ($V_{GT} = V_{GS} - V_t$), de 0,35 V, 1,85 V, e 3,35 V (a motivação da escolha desses valores será esclarecida no próximo capítulo). Para extrair $I_{DS,sat}$ e $g_{m,sat}$ foi uma polarização de dreno de 5 V para os dispositivos físicos e de 6 V para os dispositivos simulados. Os valores de V_{DS} foram escolhidos visando a região das curvas onde há uma variação mais linear de I_{DS} conforme V_{DS} .

3.1 Dispositivos Físicos

Os dispositivos medidos foram fabricados pelo Imec em seu laboratório na Bélgica. São eles 1 MOSHEMT 10nm- Al_2O_3 / 10nm-AlGaIn/ 1nm-AlN/ 300 μ m-GaN, e 1 MISHEMT 2nm- Si_3N_4 / 10nm-AlGaIn/ 1nm-AlN/ 300 μ m-GaN, ambos com $L_g = 400$ nm e $W = 10$ μ m. Esses dispositivos e suas curvas de corrente foram utilizados como referência ao longo de todo o trabalho. As medidas experimentais foram normalizadas por unidade de largura em micrometros, ou seja, foram divididas por 10.

As medições de corrente foram realizadas utilizando o Analisador de Parâmetros de Dispositivos Semicondutores Keysight Agilent B1500. Para as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ foram utilizados um passo de 25 mV para V_G com $V_{DS} = 50$ mV (baixo campo) e um passo de 10 mV com $V_{DS} = 5$ V (alto campo). Para as curvas $I_{DS} \times V_{DS}$, o passo foi de 10 mV e V_G assumiu 3 valores $V_{GS} = [-4,11; -3,61; 3,11]$, correspondentes a $V_{GT} = [0,35; 1,85; 3,35]$ V.

3.2 Dispositivos Simulados

Foi elaborado um código para simulações utilizando o Atlas da Silvaco que modela um MISHEMT de parâmetros e materiais ajustáveis. O dispositivo simulado é apresentado pela Figura 3.1, a qual apresenta as variáveis dimensionais na forma de seus símbolos, sendo L_g o comprimento da porta, d_{SD} a profundidade dos eletrodos de fonte e dreno, L_{GS} & L_{GD} a distância entre os eletrodos de fonte/dreno e o eletrodo de porta, t_{ox} a espessura do isolante de porta, e t_{AlGaN} a espessura da camada de barreira AlGaN. Além destas, foram variados também a fração molar de alumínio no material AlGaN e o material do isolante de porta.

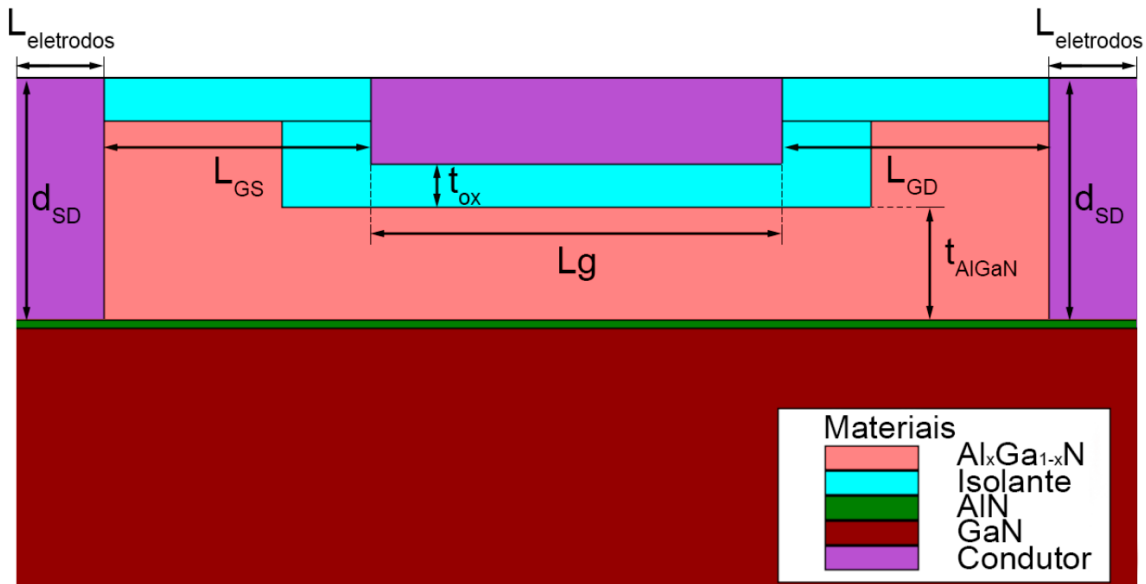


Figura 3.1: MISHEMT simulado.

O MISHEMT simulado utilizado como referência possui heteroestrutura 2nm-Si₃N₄/ 13nm-Al_{0,25}Ga_{0,75}N/ 1nm-AlN/ 300µm-GaN, com dopagem das regiões de *underlap* tipo n de 10^{17} cm^{-3} , L de 400 nm, $W = 1 \text{ µm}$, L_{GS} e L_{GD} de 50 nm, com os eletrodos de fonte e dreno tocando a camada de AlN (Figura 3.1). A dopagem das regiões de *underlap* dopadas é limitada pela largura do óxido de porta, a qual excede a largura de porta em 10 nm de cada lado. O comprimento total do transistor, $L_{transistor}$, pode ser calculado pela equação 3.1.

$$L_{transistor} = L_g + L_{GD} + L_{GS} + 2L_{eletrodos} \quad (3.1)$$

Sendo $L_{\text{eletrodos}}$ o comprimento dos eletrodos de fonte e dreno. Sendo L_{GD} mantido igual a L_{GS} ao decorrer de todo o trabalho, a equação 3.1 se torna a equação 3.2.

$$L_{\text{transistor}} = L_g + 2L_{GD} + 2L_{\text{eletrodos}} \quad (3.1)$$

A variação da profundidade dos eletrodos de fonte e dreno, d_{SD} , faz com que os mesmos “perfurem” o dispositivo e alcancem as diferentes camadas da heteroestrutura, como mostrado na Figura 3.2. A variação de L_{GS} & L_{GD} altera o posicionamento dos eletrodos de fonte e dreno, o que deve afetar a resistência entre fonte e dreno. O material do isolante de porta, t_{ox} e t_{AlGaN} afetam a facilidade que o campo elétrico proveniente da porta encontra em se aprofundar na heteroestrutura. O parâmetro L_g altera a área da região de depleção, e x altera as propriedades da camada de barreira AlGaN entre as de um material mais isolante (AlN para $x = 100\%$) e as de um material mais condutor (GaN para $x = 0\%$).

As variáveis receberam os seguintes valores: $d_{SD} = [AlGaN; AlN; GaN]$, $L_g = [200; 400; 600]$ nm, $L_{GS} \text{ \& } L_{GD} = [50; 500; 1000]$ nm, $t_{ox} = [2; 5; 10]$ nm, $t_{AlGaN} = [5; 8; 10]$ nm, $x = [0,25; 0,30; 0,35]$ e o material do isolante de porta foi alterado entre Al_2O_3 e Si_3N_4 .

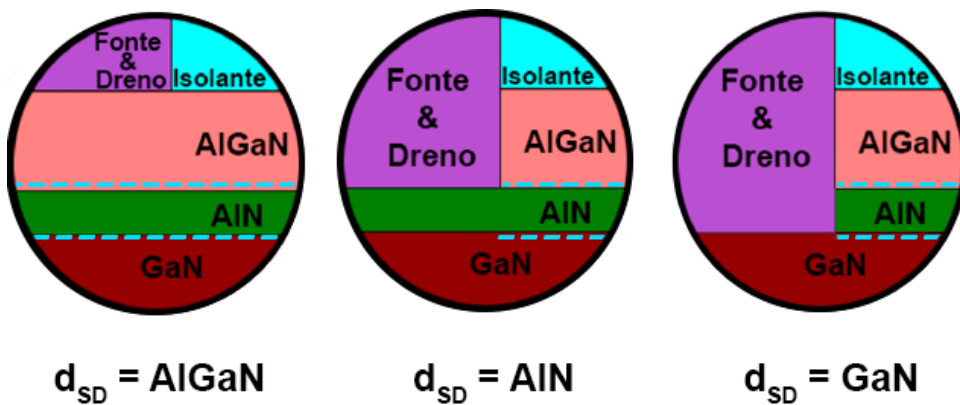


Figura 3.2: Demonstração de estruturas com diferentes profundidades dos eletrodos de fonte e dreno, d_{SD} .

O modelos matemáticos utilizados nas simulações foram FERMI-DIRAC para estatística de portadores, Schokley-Read-Hall (SRH) para processo de recombinação, LATTICE.TEMPERATURE para transferência de calor, POLARIZATION + CALC.STRAIN para polarização interna dos nitretos de gálio, FMCT.N para a mobilidade de baixo campo em nitretos de gálio a depender da concentração de alumínio (x) em $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ e da temperatura, e GANSAT para mobilidade de alto campo em nitretos de gálio a depender da temperatura e campo elétrico (Silvaco, 2007). Para as medições $I_{DS} \times V_{GS}$ e $I_{DS} \times V_{DS}$ foi utilizado um passo de 5 mV.

Para avaliar a formação dos possíveis canais de corrente foram extraídos os diagramas de bandas e de concentração de elétrons ao longo da profundidade do dispositivo. A avaliação da influência de cada canal nas características de entrada do MISHEMT, foi realizada através da extração das curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ para diversas configurações dos parâmetros estudados, também foram extraídas as curvas de g_m , de I_{DS}'' (derivada 2ª da curva), e SS (ponto mínimo do inverso da derivada 1ª de $\log_{10}(I_{DS}) \times V_{GS}$), das quais são possíveis ser extraídos os parâmetros DC digitais V_t , SS e g_m . Por fim, para avaliar as características de saída do MISHEMT, foram extraídas as curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para configurações específicas das variáveis estudadas, das quais foram extraídos os parâmetros DC analógicos g_D , V_{EA} e A_v .

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na relação de resultados obtidos existem aqueles referentes ao comportamento digital do transistor, baseados na análise das curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ de baixo e alto campo, e aqueles referentes ao comportamento analógico, que são baseados na análise de curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ com polarizações de porta específicas.

4.1 Caracterização elétrica experimental

Os dispositivos fabricados são um MOSHEMT com Al_2O_3 como óxido de porta e $t_{ox} = 10$ nm, e um MISHEMT com Si_3N_4 como isolante de porta e $t_{ox} = 2$ nm. As medições de corrente dos dispositivos fabricados foram obtidas utilizando um Keysight Agilent B1500. O gráfico da Figura 4.1 apresenta as curvas de transferência ($V_{DS} = 50$ mV) em escalas linear e semilog de ambos os dispositivos.

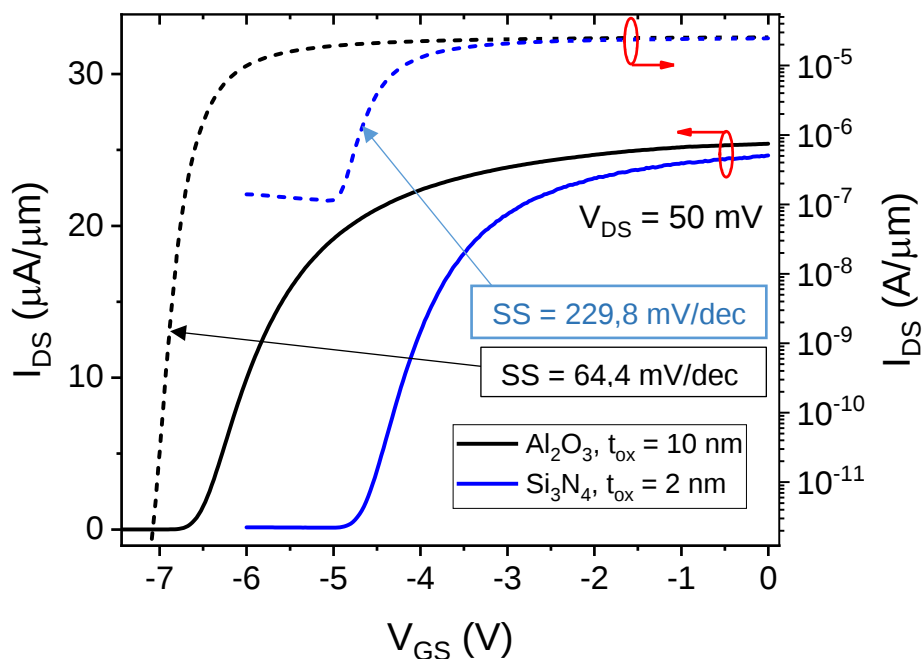


Figura 4.1: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) medida em escalas linear e semilog dos dispositivos fabricados estudados.

As curvas mostram que o MOSHEMT possui nível de corrente levemente maior que o MISHEMT, uma menor inclinação de sublimiar ($SS_{\text{MOSHEMT}} \ll SS_{\text{MISHEMT}}$) e menor tensão de limiar (mais negativa).

A Figura 4.2 apresenta o gráfico de transcondutância dos dispositivos fabricados, e a Figura 4.3, o gráfico da segunda derivada de $I_{\text{DS}} \times V_{\text{GS}}$ suavizado por filtro Savitzky-Golay para a extração de V_t (método da segunda derivada).

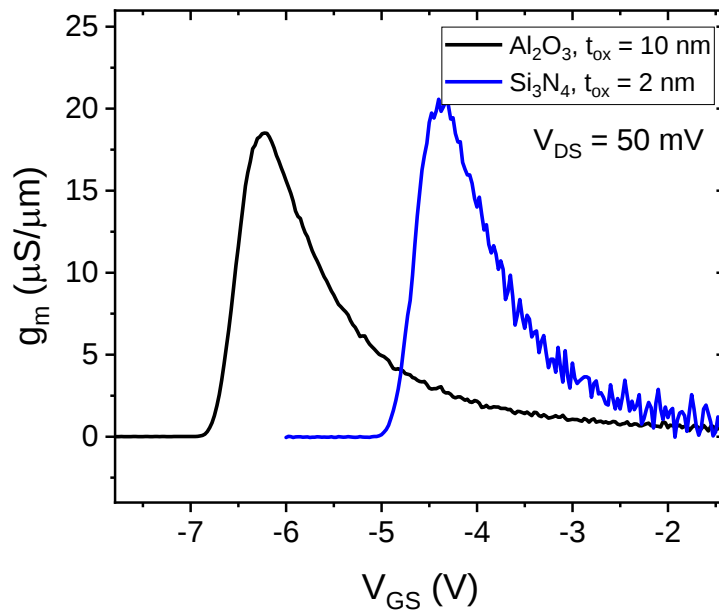


Figura 4.2: Gráfico da transcondutância dos dispositivos fabricados estudados.

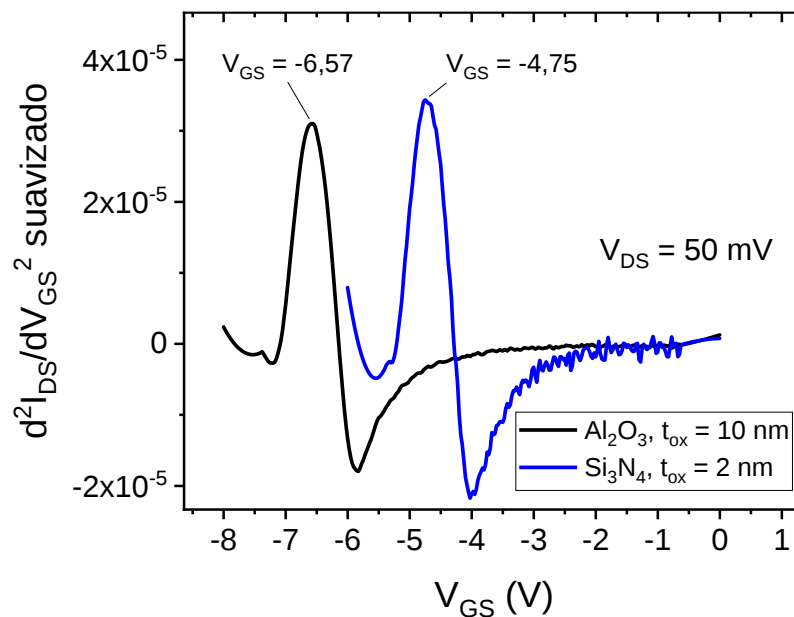


Figura 4.3: Gráfico da segunda derivada de $I_{\text{DS}} \times V_{\text{GS}}$ suavizado dos dispositivos fabricados estudados.

Nas curvas de g_m de baixo campo é possível notar uma suave mudança na inclinação de g_m (destacadas pelas linhas tracejadas na Figura 4.4), o que sugere condução de corrente por dois canais distintos que disparam em momentos também distintos.

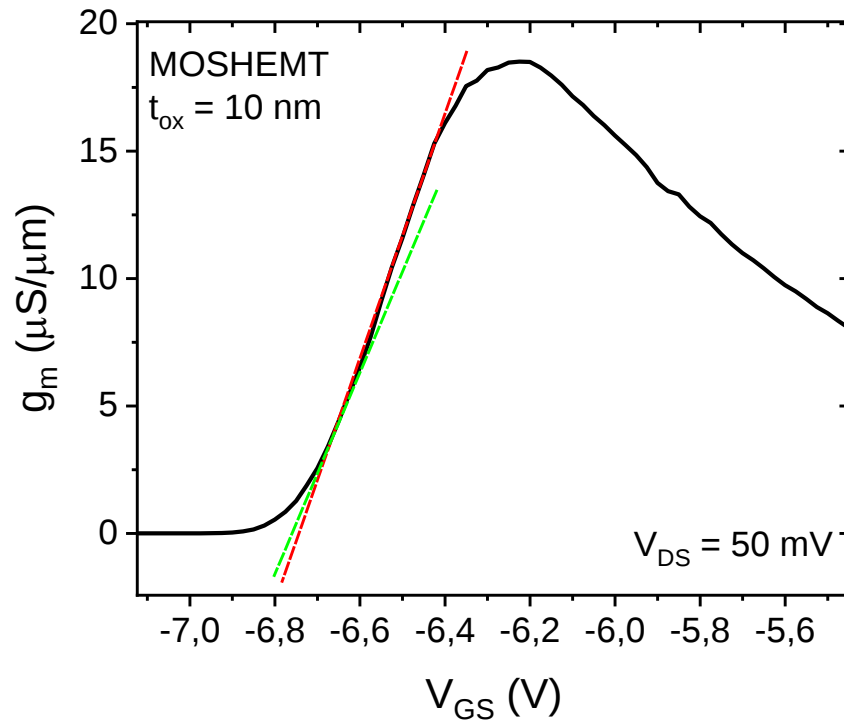


Figura 4.4: Dupla inclinação na curva de g_m , sugerindo dupla condução.

A Figura 4.5 apresenta a curva $I_{DS} \times V_{DS}$ do MISHEMT (Si_3N_4 , $t_{ox} = 2 \text{ nm}$) para $V_{GS} = [-4,40; -2,90; -1,40] \text{ V}$ correspondentes a $V_{GT} = [0,35; 1,85; 3,35] \text{ V}$, enquanto que a Figura 4.6 apresenta a curva $I_{DS} \times V_{GS}$ com $V_{DS} = 5 \text{ V}$ e sua derivada.

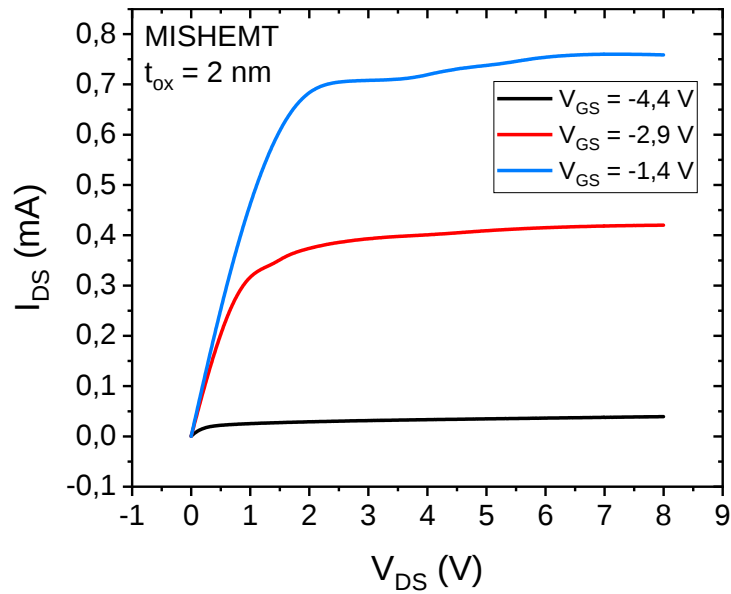


Figura 4.5: Curvas I_{DS} x V_{DS} para 3 valores de V_{GS} , normalizadas, do MISHEMT com Si_3N_4 de espessura 2 nm como isolante de porta.

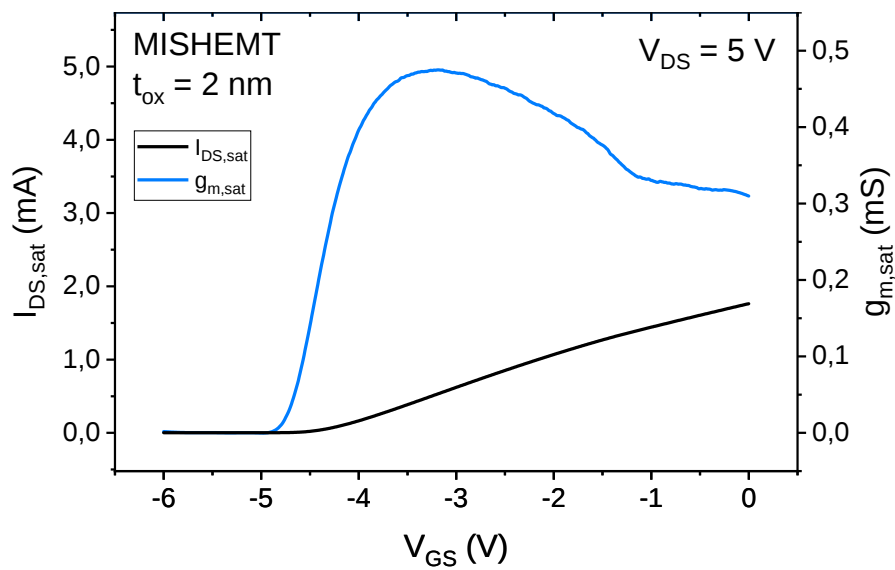


Figura 4.6: Curva I_{DS} x V_{GS} e $g_{m,sat}$ para $V_{DS} = 5 \text{ V}$, normalizadas, do MISHEMT com Si_3N_4 de espessura 2 nm como isolante de porta.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos parâmetros analógicos estudados, dos quais A_v foi calculado utilizando a Equação 2.7.

Tabela 4.1: Resultados dos parâmetros analógicos do MISHEMT com Si_3N_4 de 2 nm de espessura como isolante de porta para três polarizações de porta para $V_{DS} = 5 \text{ V}$.

$V_{GS} \text{ (V)}$	$I_{DS,sat} \text{ (mA)}$	$g_{m,sat} \text{ (mS)}$	$g_D \text{ (uS)}$	$V_{EA} \text{ (V)}$	$A_v \text{ (dB)}$
-4,4	0,037	0,207	1,55	17,4	42,5
-2,9	0,667	0,469	7,35	50,6	36,1
-1,4	1,304	0,363	16,50	36,7	26,8

4.2 Dispositivos simulados

Para melhor entender como e por que acontece a dupla inclinação em g_m , primeiramente foi simulado o MOSHEMT com a mesma estrutura e mesmas dimensões do experimental, i.e., 10 nm- Al_2O_3 / 10 nm- AlGaIn / 1 nm- AlN / 300 nm- GaIn , com $L_g = 400 \text{ nm}$, e com $W = 1 \text{ um}$, já que as medidas experimentais foram normalizadas.

Além das dimensões apresentadas, o MOSHEMT simulado escolhido como referência das simulações possui $L_{GD} = L_{GS} = 50 \text{ nm}$ e os eletrodos de fonte e dreno tocando a camada AlN ($d_{SD} = \text{AlN}$), como mostrado na Figura 4.7. As curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50 \text{ mV}$) e g_m do dispositivo simulado são apresentadas pela Figura 4.8.

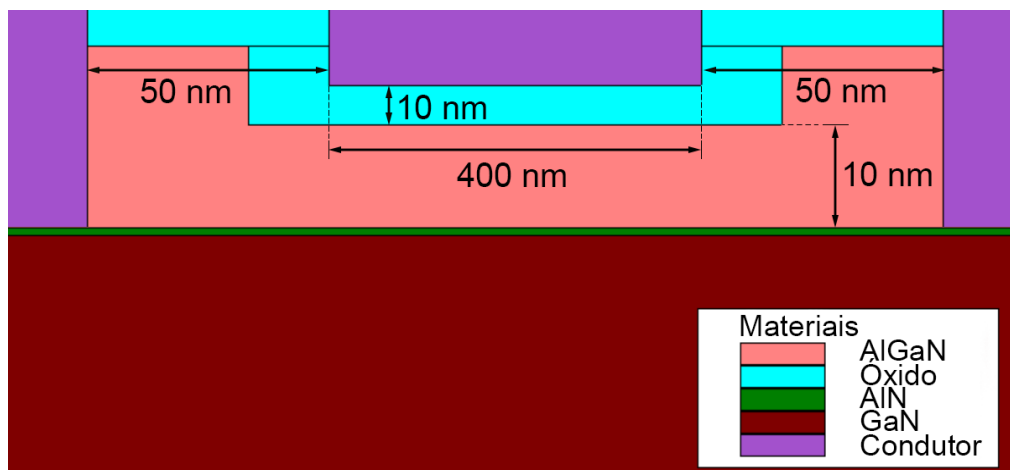


Figura 4.7: MOSHEMT referência simulado.

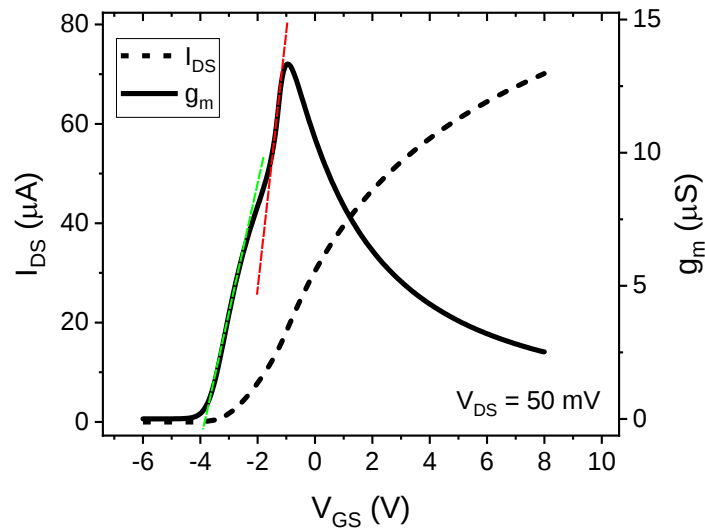


Figura 4.8: Curvas I_{DS} x V_{GS} ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m do dispositivo referência simulado.

É possível perceber que na curva g_m simulada também aparecem duas inclinações, as quais foram destacadas pelas linhas tracejadas.

Prosseguindo na investigação da dupla inclinação em g_m e verificando a possibilidade de múltiplos canais na estrutura, foram analisados os diagramas de banda e de concentração de elétrons ao longo da profundidade do MOSHEMT. Os diagramas foram extraídos por meio de um corte na parte central da estrutura de porta do dispositivo, como mostrado na Figura 4.9. Os diagramas extraídos são apresentados pela Figura 4.10.

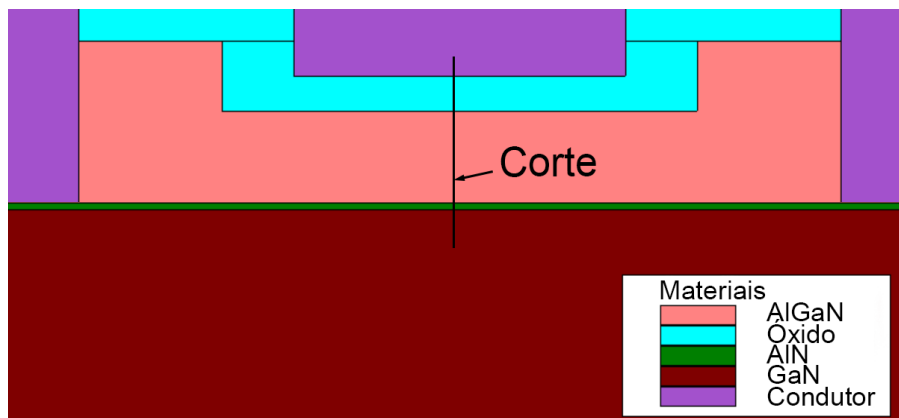


Figura 4.9: Corte no centro da estrutura que indica a posição da extração de E_c e concentração de elétrons.

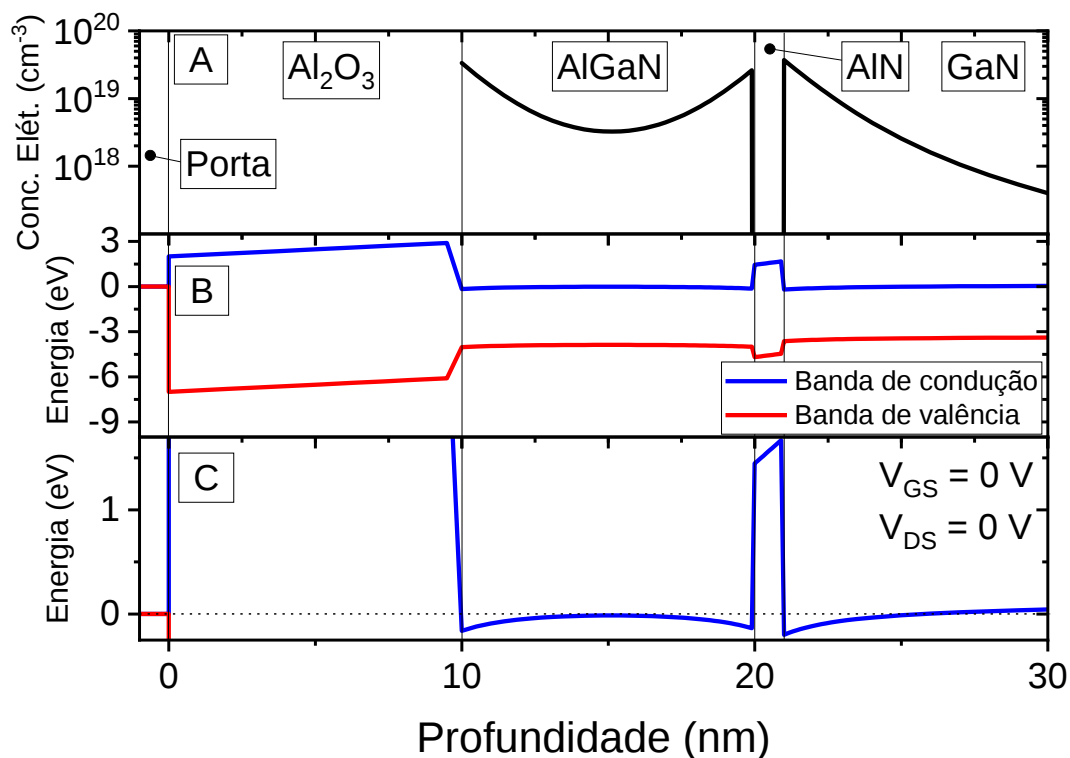


Figura 4.10: (A) Concentração de elétrons, (B) diagrama de bandas e (C) aproximação do diagrama de bandas, todos em relação à profundidade do dispositivo simulado para uma polarização de $V_{GS} = 0$ V e $V_{DS} = 0$ V.

De acordo com os diagramas da Figura 4.10 há acúmulo de elétrons em 3 regiões, as quais podem servir como diferentes canais de corrente. Essas regiões são a 1ª interface (óxido de porta/ AlGaN), próxima à 2ª interface (AlGaN/ AlN), e a 3ª interface (AlN/ GaN). O forte acúmulo de portadores próximo à 2ª interface e na 3ª interface se devem à polarização interna em wurtzitas de GaN, enquanto que na 1ª interface o acúmulo de elétrons é mais fraco.

Diante disso, foram analisados os diagramas da energia da banda de condução e de concentração de elétrons aplicando diferentes tensões de porta. Os valores para V_{GS} foram selecionados de acordo com os gráficos de corrente e transcondutância e utilizando o método da segunda derivada (Figura 4.11), com os critérios de: o dispositivo estar em estado desligado com $V_{GS} = [-5,50$ V; $-5,00$ V; $-4,50$ V]; o dispositivo estar na região onde g_m apresenta a primeira inclinação, que coincide com o primeiro pico na curva da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$, com $V_{GS} = -3,20$ V; o dispositivo estar na região onde g_m apresenta um segundo valor de inclinação, que coincide com o segundo pico na curva da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$, com $V_{GS} = -1,30$ V; o dispositivo apresentar $g_{m,max}$ com

$V_{GS} = -1,00$ V; e o dispositivo estar em estado ligado com $V_{GS} = 1,00$ V. Os diagramas de energia da banda de condução obtidos são apresentados pela Figura 4.12, enquanto que os de concentração de elétrons são apresentados pela Figura 4.13.

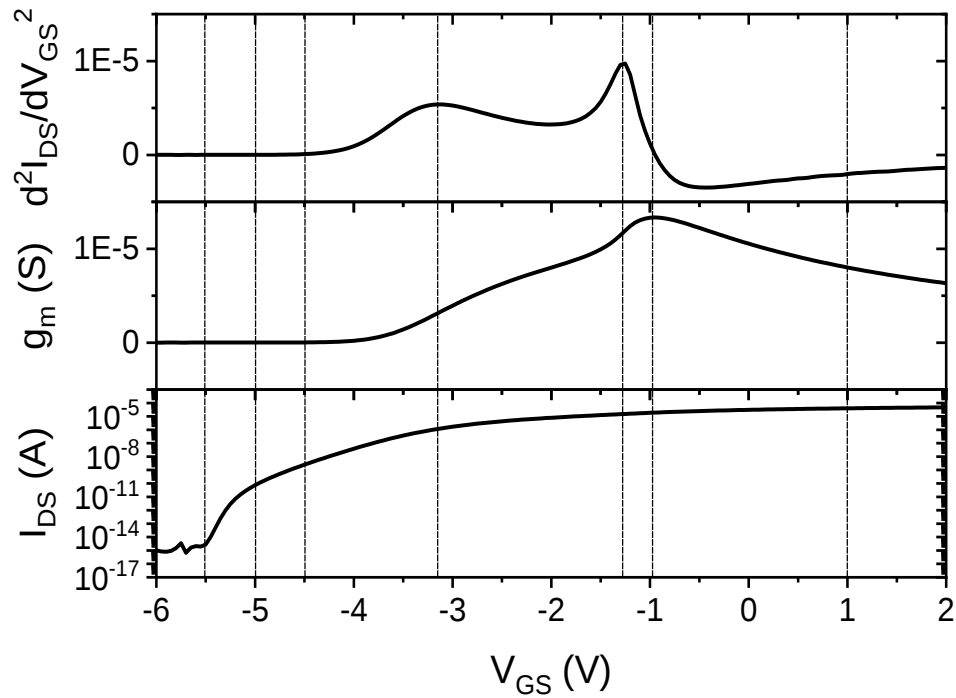


Figura 4.11: Gráficos utilizados como critério para seleção dos valores de V_{GS} para investigação dos diagramas de E_c e de concentração de elétrons.

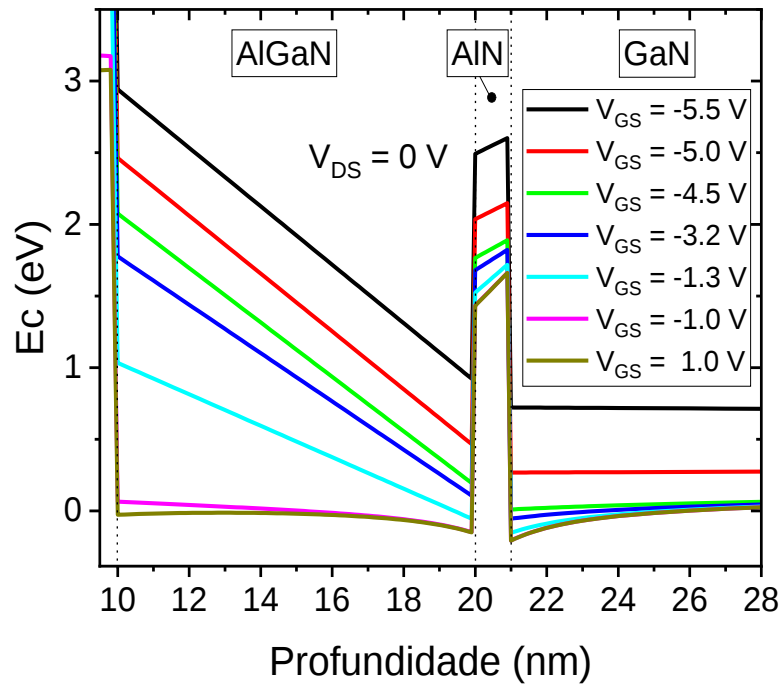


Figura 4.12: Diagrama da energia da banda de condução versus a profundidade do MOSHEMT simulado com diferentes tensões de porta.

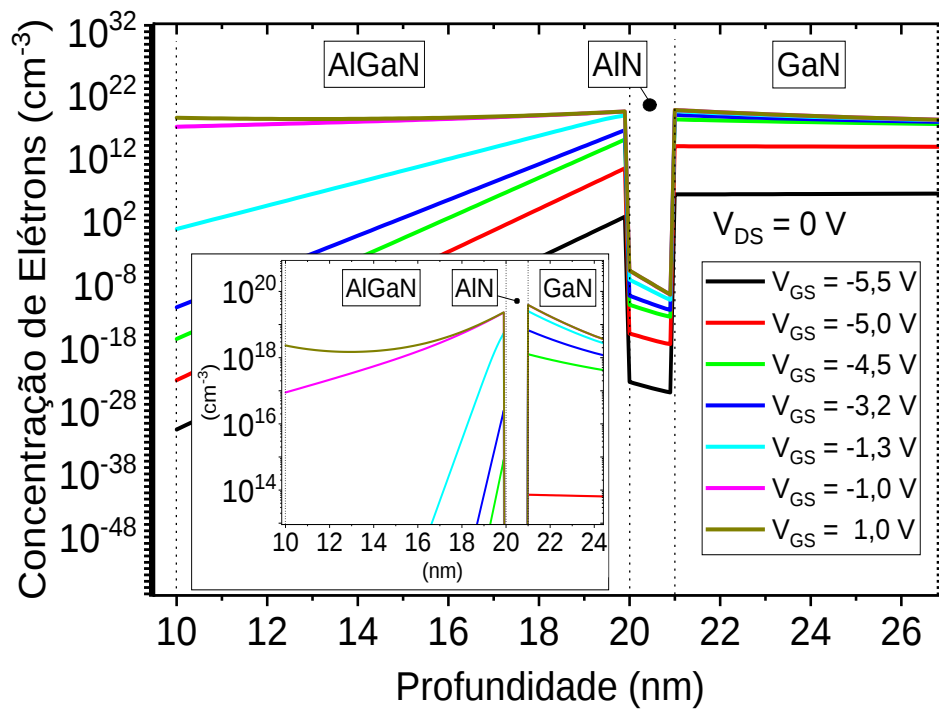


Figura 4.13: Diagrama da concentração de elétrons versus a profundidade do MOSHEMT simulado com diferentes tensões de porta.

Ao analisar os diagramas das Figuras 4.12 e 4.13 em ordem crescente de V_{GS} , se nota que os elétrons se acumulam primeiramente na 3ª interface, região cuja a mínima região de depleção já permite a passagem de corrente pelo 2DEG,

seguido pelo acúmulo próximo à 2ª interface quando V_{GS} é suficiente para reduzir ainda mais a depleção causada pela tensão de porta. Por último os elétrons tendem a se acumular próximo à 1ª interface, ao mesmo tempo que se distribuem cada vez mais por toda a extensão da camada de barreira AlGaIn, o que significa um aumento na espessura efetiva do canal.

O acúmulo de elétrons na 3ª interface é um 2DEG, pois ocorre o encurvamento na energia da banda de condução nessa região, e a concentração de elétrons atinge um valor máximo e tende a se estabilizar. Na 2ª interface o acúmulo de elétrons tem a mesma característica e comportamento do anterior (é um 2DEG, atinge um valor máximo de concentração e estabiliza), mas é mais influenciado por V_{GS} . Por fim, o acúmulo de elétrons na 1ª interface é fortemente influenciado por V_{GS} e segue o mecanismo de condução do MOSFET. Essa dependência mais forte ou mais fraca de V_{GS} varia conforme a distância entre o metal de porta e os diferentes canais, e também devido à polarização interna.

O efeito de campo é responsável pelo acúmulo de elétrons nas interfaces e formação dos canais da estrutura, sendo que cada canal surge para diferentes valores de V_{GS} devido à sua distância do metal de porta. Sendo assim, cada parte das curvas relacionadas à curva $I_{DS} \times V_{GS}$ será relacionada ao acúmulo de elétrons em uma das 3 interfaces, e os parâmetros elétricos extraídos ou calculados em cada parte da curva serão denominados numericamente conforme a formação do canal em determinada interface. Dessa forma, será utilizado, por exemplo, g_{m3} para a parte da curva da transcondutância onde o canal na 3ª interface está formado ou em processo de formação, g_{m2} para a parte onde o canal na 2ª interface está se formando, e g_{m1} o mesmo para o canal na 1ª interface. Quando o canal na 1ª interface está se formando, os canais na 2ª e 3ª interfaces já estão formados, por isso, apesar do parâmetro g_{m1} estar relacionado à formação do canal na 1ª interface, não significa que ele está relacionado apenas à condução pela 1ª interface. Também serão denominadas tensões de limiar conforme o acúmulo de elétrons em dada interface: V_{t1} para a 1ª interface, V_{t2} para a 2ª interface e V_{t3} para a 3ª interface, sendo $V_{t3} < V_{t2} < V_{t1}$. Para o dispositivo referência simulado (com os eletrodos de fonte e dreno sobre o AlN, com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm), $V_{t1} = -1,0$ V, $V_{t2} = -3,2$ V e $V_{t3} = -4,5$ V.

Para investigar como cada um desses acúmulos de elétrons atuam como canal e quanto influenciam na corrente total, foi utilizada uma metodologia de proximidade entre os eletrodos de fonte e dreno e esses possíveis canais: foram variadas as distâncias horizontal e vertical entre os eletrodos de fonte/ dreno e as regiões de forte acúmulo de elétrons. A distância horizontal variou entre: os eletrodos tocando superficialmente a camada AlGaIn ($d_{SD} = \text{AlGaIn}$); os eletrodos tocando superficialmente a camada AlN ($d_{SD} = \text{AlN}$); e os eletrodos tocando superficialmente a camada GaN ($d_{SD} = \text{GaN}$). Como o comprimento de canal foi mantido constante em 400 nm, a distância vertical foi alterada variando apenas L_{GS} , que assumiu os valores de 50 nm, 500 nm e 1000 nm.

4.2.1 Profundidade dos eletrodos de fonte e dreno (d_{SD})

Primeiramente foi investigada a variação da profundidade dos eletrodos de fonte e dreno em relação às camadas dos materiais para MOSHEMTs mantendo constantes o comprimento de canal em 400nm e L_{GS} e L_{GD} , em 50 nm. Na Figura 4.14 são apresentados os gráficos de corrente em triodo ($V_{DS} = 50$ mV), e na Figura 4.15 são apresentados os gráficos da respectiva transcondutância.

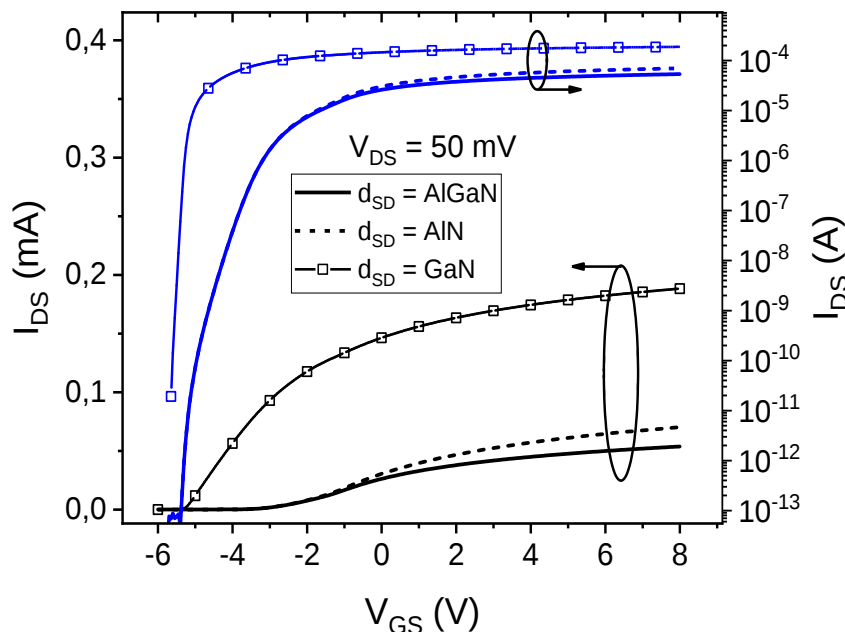


Figura 4.14: Gráficos da corrente de dreno em função de V_{GS} de MOSHEMTs com diferentes profundidades de eletrodo e com $L_{GS} = L_{GD} = 50$ nm.

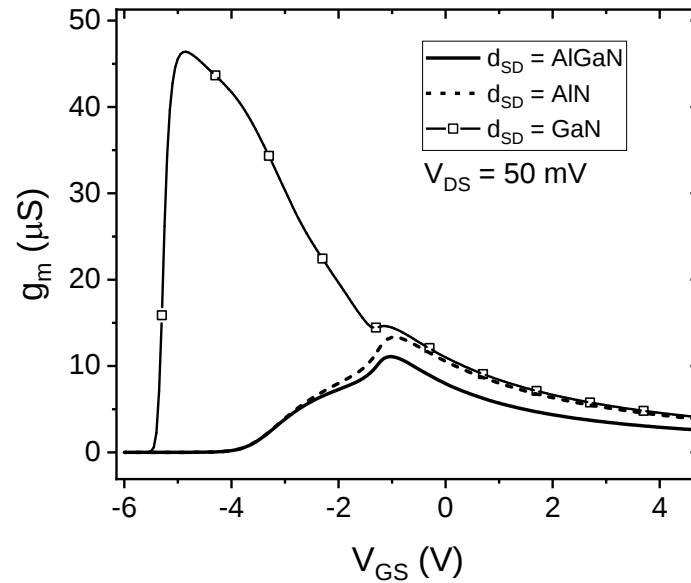


Figura 4.15: Gráficos de transcondutância de MOSHEMTs com diferentes profundidades de eletrodo e com $L_{GS} = L_{DS} = 50$ nm.

O MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlGaIn}$ apresenta a menor corrente entre os três devido à maior resistência vista pela corrente até os eletrodos de fonte e dreno. Comparando-o com o MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$, seus níveis de corrente e g_m são próximos, suas características de corrente são semelhantes, o que pode ser explicado por toda a camada de barreira AlGaIn já ser naturalmente “N” e, portanto, apresentar baixa resistência. A diferença entre os níveis de corrente e g_m destes dois casos é causada por uma pequena variação da resistência vista pelo 2DEG próximo à 2ª interface e os eletrodos de fonte e dreno, sendo que esta resistência é maior para o MOSHEMT com o eletrodo de fonte e dreno no topo da camada AlGaIn ($d_{SD} = \text{AlGaIn}$).

Quando o MOSHEMT com d_{SD} atingindo a camada GaN é avaliado, maior corrente e um g_m mais alto e para V_{GS} mais negativo são observados. A maior corrente e o g_m mais alto ocorrem devido aos eletrodos de fonte e dreno ultrapassarem a camada AlN habilitando a corrente proveniente do 2DEG da 3ª interface, que é mais profundo e possui alta mobilidade de portadores nesta região. Para os outros 2 casos a corrente da 3ª interface não é considerada visto que a camada AlN é vista como alta resistência devido à sua larga banda proibida (E_g). O V_t mais negativo (V_{t3}) ocorre pois como a camada GaN está mais distante da porta do transistor uma depleção mais profunda e portanto um V_{GS} mais negativo é exigido para cortar o 2DEG formado no GaN.

Nos casos em que d_{SD} não atingem GaN, são notáveis duas inclinações em g_m , uma relacionada à condução pela 2ª interface, outra à condução pela 1ª interface. No caso em que $d_{SD} = \text{GaN}$, é possível perceber o aparecimento de um novo pico e uma nova inclinação, os quais são relacionados ao 2DEG da 3ª interface. Então, neste caso a condução ocorre pela camada de barreira AlGaIn e pela camada de *buffer* GaN.

Os vários canais e várias conduções resultam em 3 diferentes patamares na curva de extração da inclinação de sublimar (SS) que podem ser observados na Figura 4.16. A primeira inclinação está relacionada ao 2DEG como canal, que apresenta o menor valor e é considerado como o SS efetivo do transistor. Mas cada vez que uma interface vai passar a conduzir, é possível observar um novo patamar na curva. Pode-se concluir que o 2DEG 3ª interface atua como canal principal para qualquer valor de V_{GS} . Já as outras duas inclinações, que aparecem apenas para os MOSHEMTs com $d_{SD} \neq \text{GaN}$, estão relacionadas ao 2DEG da 2ª interface, à alteração da distribuição dos elétrons na camada de barreira, e à interação entre os canais das 1ª e 2ª interfaces.

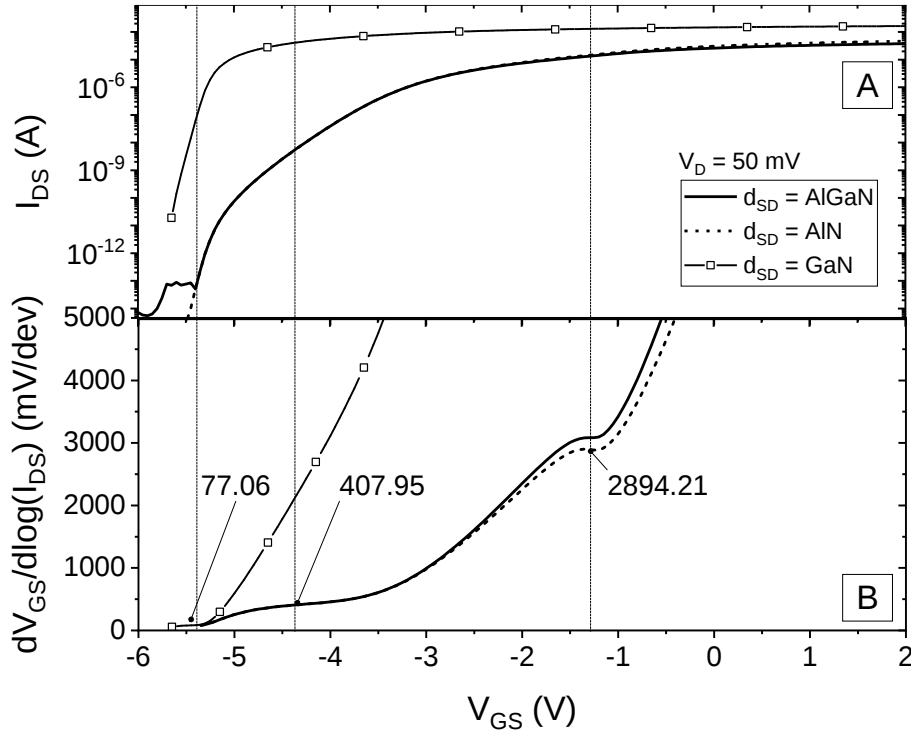


Figura 4.16: (A) Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) em escala semilog e (B) gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MOSHEMTs com diferentes d_{SD} .

No gráfico da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ (Figura 4.17), é possível observar um primeiro pico alto e dominante quando a 3ª interface está ativa e para os dispositivos com $d_{SD} \neq \text{GaN}$ dois picos, relacionados à V_{t2} e V_{t1} , são facilmente detectáveis. Para o dispositivo com $d_{SD} = \text{GaN}$, os picos relacionados a V_{t3} e V_{t1} são bastante evidentes, enquanto que o pico relacionado a V_{t2} não apresenta valor evidente.

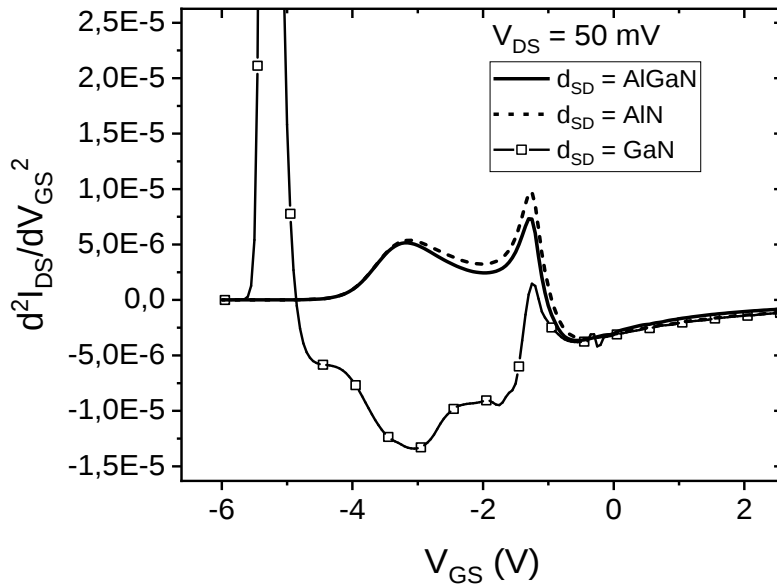


Figura 4.17: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MOSHEMTs com diferentes d_{SD} .

4.2.2 Distância entre os eletrodos de fonte/ dreno e o eletrodo de porta (L_{GS} & L_{GD})

Investigou-se também a variação da distância horizontal entre os eletrodos de dreno/ fonte e os canais, sendo que tal variação se deu pela alteração das distâncias entre os eletrodos de fonte/ dreno e o eletrodo de porta, mantendo sempre as duas distâncias iguais entre si ($L_{GD} = L_{GS}$). Para o MOSHEMT com $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$, sendo $L_g = 400 \text{ nm}$ e $L_{\text{eletrodos}} = 50 \text{ nm}$, tem-se um $L_{\text{transistor}} = 600 \text{ nm}$; para $L_{GS} \& L_{GD} = 500 \text{ nm}$, um $L_{\text{transistor}} = 1500 \text{ nm}$; e para $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$, um $L_{\text{transistor}} = 2500 \text{ nm}$.

Na verdade, tal variação de L_{GS} e L_{GD} não modifica a distância entre os 2DEGs e os eletrodos de fonte/ dreno, pois o 2DEG se estende por todo o

comprimento do transistor. Sendo assim, apenas a distância entre o canal da 1ª interface e os eletrodos é afetada.

A Figura 4.18 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m dos MOSHEMTs com $d_{SD} \neq \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} e L_{GD} , enquanto que a Figura 4.19 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$.

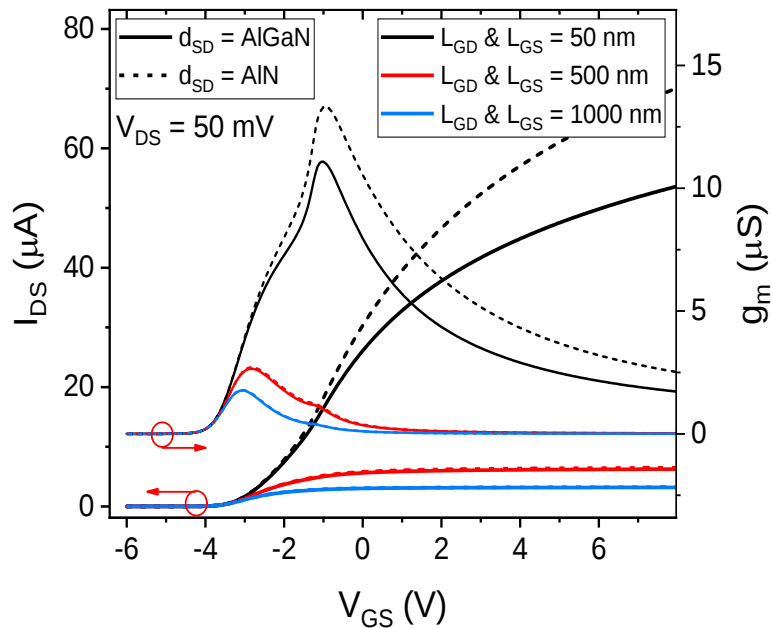


Figura 4.18: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m de baixo campo dos MOSHEMTs com $d_{SD} \neq \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD} .

Avaliando em ordem crescente de V_{GS} , nos MOSHEMT com $d_{SD} \neq \text{GaN}$ (Figura 4.18) é possível notar que quanto maior é L_{GS} e L_{GD} , menor é g_{m1} , indicando menor influência da 1ª interface na condução devido a maior resistência série entre a região abaixo da porta e os eletrodos de fonte e dreno. O g_{m2} é menos afetado pois existe 2DEG ao longo de toda a segunda interface e a influência é apenas do L total. Além disso, para os maiores valores de L_{GD} e L_{GS} , se nota que o comportamento elétrico é praticamente igual entre estes dois dispositivos ($d_{SD} \neq \text{GaN}$). Isso acontece pois quando L_{GD} e L_{GS} são muito extensos, a condução pela 2ª interface se torna predominante e a condução pela 1ª interface se torna praticamente nula, então a alteração da resistência vertical conforme a posição dos eletrodos dentro da camada AlGaIn, i.e., $d_{SD} = \text{AlGaIn}$ e $d_{SD} = \text{AlN}$, afeta muito pouco a condução de corrente.

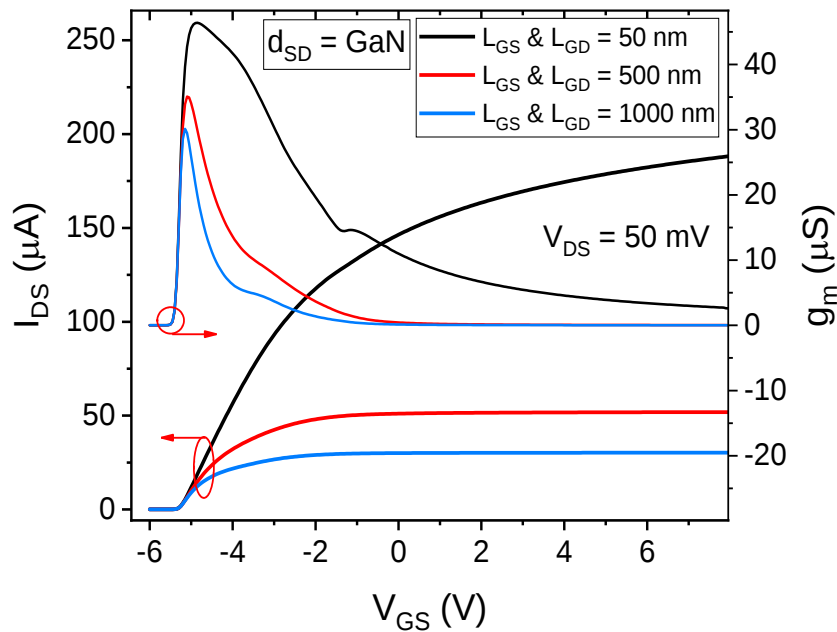


Figura 4.19: Curvas I_{DS} x V_{GS} ($V_{DS} = 50$ mV) e g_m de baixo campo dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD} .

No MOSHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$, a variação de L_{GD} e L_{GS} influencia fortemente g_{m1} , influencia menos g_{m2} , e influencia pouco g_{m3} , indicando que a condução pela 3ª interface é predominante. Também é perceptível um “afinamento” na curva g_m devido à redução de g_{m2} conforme L_{GS} & L_{GD} é aumentado. Em todos os casos, g_{m3} é predominante, indicando que o principal canal para condução é o 2DEG da 3ª interface.

Em todos os 3 casos de d_{SD} , os MOSHEMTs com L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, a condução pela 1ª interface influencia fortemente no comportamento elétrico, devido à proximidade entre os eletrodos de fonte e dreno e essa região. Para os maiores valores de L_{GS} & L_{GD} , pouca ou nenhuma influência da condução pela 1ª interface é notada. Esta influência também pode ser observada pelo gráfico do inverso da derivada da curva I_{DS} x V_{GS} em semilog, apresentado pela Figura 4.20.

Os picos relacionados à V_{t1} e V_{t2} do dispositivo com $d_{SD} = \text{AlN}$ são bem definidos e sofrem pouca alteração em seu valor, mas é notável a falta de influência de V_{t1} para L_{GS} e L_{GD} maiores. Para o MOSHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$, o primeiro pico relacionado à V_{t3} é proeminente para qualquer L_{GS} & L_{GD} , V_{t1} é evidente apenas para L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm (eletrodos mais próximos da 1ª

interface), e V_{t2} é pouco evidente para altos valores de L_{GS} & L_{GD} e não evidente para L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm. A influência da condução pela 1ª interface no comportamento da condução pela 2ª interface é atenuada para altos valores de L_{GS} & L_{GD} .

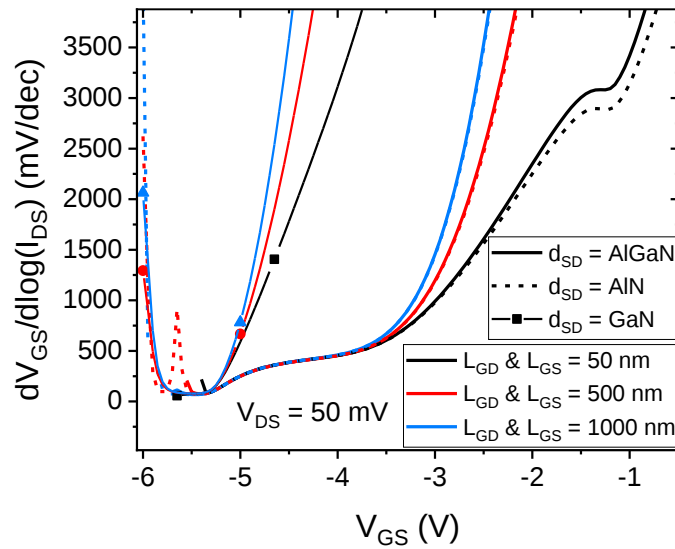


Figura 4.20: Gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ para MOSHEMTs com diferentes d_{SD} e com L_{GS} & $L_{GD} = [50 \text{ nm}; 500 \text{ nm}; 1000 \text{ nm}]$

Por último, para investigar a influência de L_{GS} e L_{GD} em V_t , foi feito o método da segunda derivada, o qual gerou o gráfico da Figura 4.21 para o MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$, e da Figura 4.22 para MOSHEMT com $d_{SD} = \text{GaIn}$.

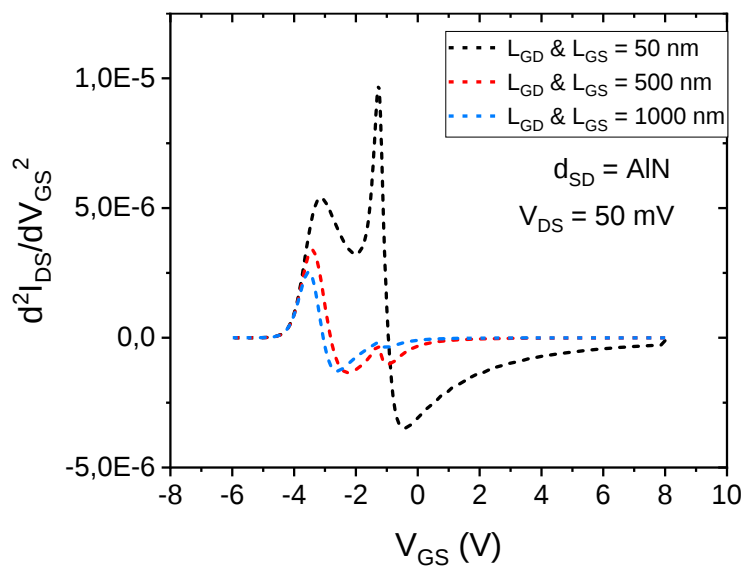


Figura 4.21: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}

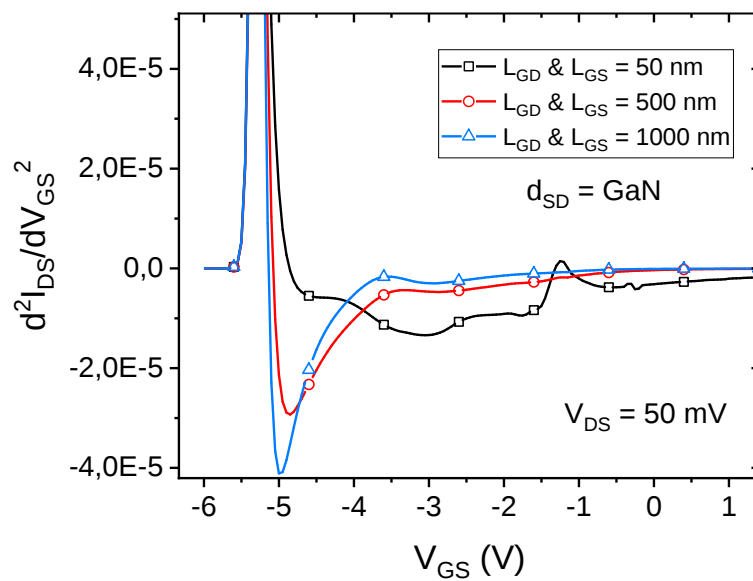


Figura 4.22: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$ e diferentes L_{GS} & L_{GD}

Devido à semelhança entre as características elétricas dos MOSHEMTs com $d_{SD} = \text{AlGaIn}$ e $d_{SD} = \text{AlN}$, o dispositivo com $d_{SD} = \text{AlGaIn}$ não será mais simulado.

Por fim, foi realizada a comparação entre as curvas de transcondutância e da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos dispositivos MOSHEMT com $d_{SD} = [\text{AlN}, \text{GaN}]$ e $L_{GS} = [50 \text{ nm}, 1000 \text{ nm}]$, apresentada pelas Figuras 4.23 e 4.24.

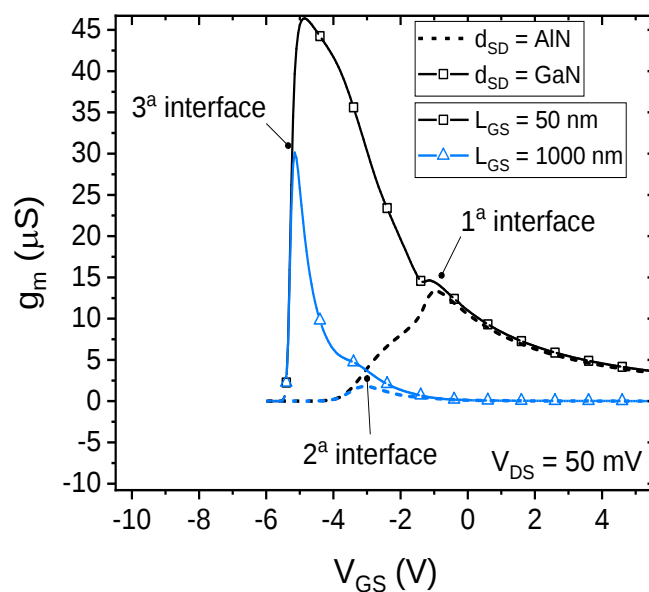


Figura 4.23: Comparação entre as curvas de transcondutância de MISHEMTs com diferentes d_{SD} e L_{GS} & L_{GD} .

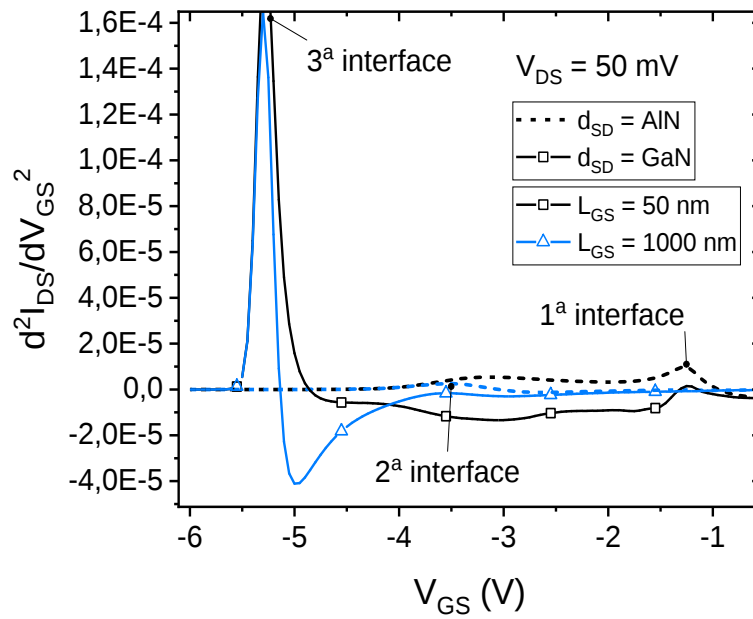


Figura 4.24: Comparação entre as curvas da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ de MISHEMTs com diferentes d_{SD} e L_{GS} & L_{GD} .

Ao comparar as curvas, foi possível perceber que o MISHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$ e $L_{GS} = 50 \text{ nm}$ prioriza a condução pelas 1ª e 2ª interfaces, o MISHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$ e $L_{GS} = 1000 \text{ nm}$ prioriza a condução pela 2ª interface, o MISHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$ e $L_{GS} = 1000 \text{ nm}$ prioriza a condução pelas 2ª e 3ª interfaces, e o MISHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$ e $L_{GS} = 50 \text{ nm}$ prioriza a condução por todas as interfaces.

Para o estudo dos próximos parâmetros, então, serão avaliados os dispositivos com $d_{SD} = [\text{AlN}; \text{GaN}]$, $L_{GS} \text{ \& } L_{GD} = [50 \text{ nm}, 1000 \text{ nm}]$, já que cada caso utiliza diferentes interfaces para a condução. O próximo parâmetro a ser estudado foi o material do isolante de porta e sua espessura.

4.2.3 Material do isolante de porta e sua espessura (t_{ox})

Os materiais de isolante de porta utilizados nos dispositivos experimentais foram o óxido de alumínio (Al_2O_3) no MOSHEMT com $t_{ox} = 10 \text{ nm}$, e o nitreto de silício (Si_3N_4) no MISHEMT com $t_{ox} = 2 \text{ nm}$. Para as simulações os mesmos materiais foram utilizados, e t_{ox} variada entre os valores de 2 nm, 5 nm e 10 nm

para ambos. Além disso, o d_{SD} foi mantido constante em AlN, com L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm.

Cada material possui uma permissividade, a qual está diretamente relacionada à corrente total, já que $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$. Os valores de permissividade relativa dos materiais utilizados nas simulações são $\epsilon_{Al_2O_3} = 9,3$, e $\epsilon_{Si_3N_4} = 7,5$. As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam a curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) e de inclinação de sublimiar dos MOSHEMTs e MISHEMTs, ambos com $t_{ox} = [2$ nm, 5 nm, 10 nm].

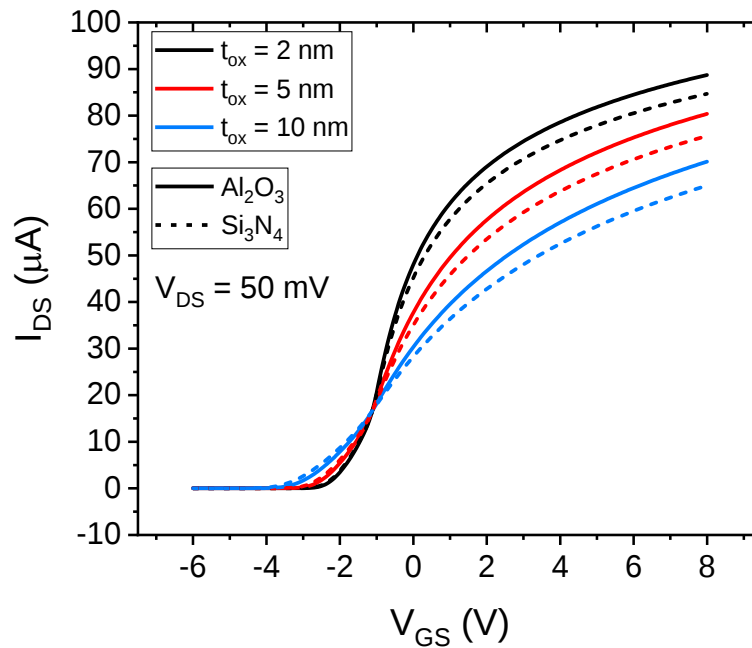


Figura 4.25: Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox} .

A redução da permissividade ($Al_2O_3 \rightarrow Si_3N_4$) causa redução do nível de $I_{DS,m\acute{a}x}$, provavelmente devido à contribuição da 1ª interface, um leve aumento em SS , e torna V_t ligeiramente mais negativo enquanto que desloca a curva de corrente para a esquerda, o que se deve à maior dificuldade do campo elétrico atravessar o isolante com menor permissividade. No gráfico de inclinação de sublimiar, as linhas verticais tracejadas indicam a região de sublimiar.

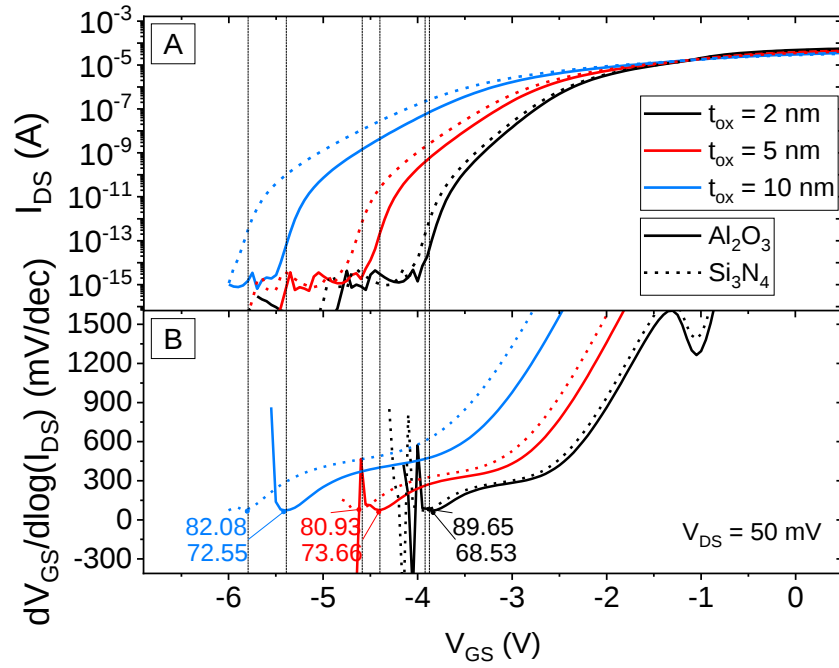


Figura 4.26: (A) Curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) em escala semilog e (B) gráfico de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}

O aumento de t_{ox} enquanto quase não afeta SS, deixa V_t da 2ª interface bastante mais negativo enquanto que o V_t da 1ª interface muda pouco. A grande variação de V_t da 2ª interface provavelmente está associada à variação da região de depleção que depende do potencial da superfície na primeira interface que será menor devido a maior queda de potencial no óxido. A alteração na tensão de limiar pode ser melhor observada através da Figura 4.27.

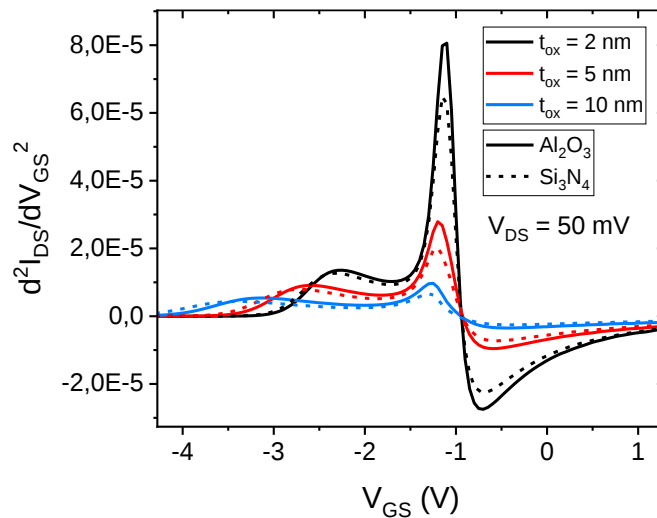


Figura 4.27: Gráfico da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox}

Por último, o gráfico de transcondutância da Figura 4.28, mostra que o aumento de t_{ox} causa uma redução em $g_{m,máx}$, ao mesmo tempo que distancia a condução pela 2ª interface da condução pela 1ª interface.

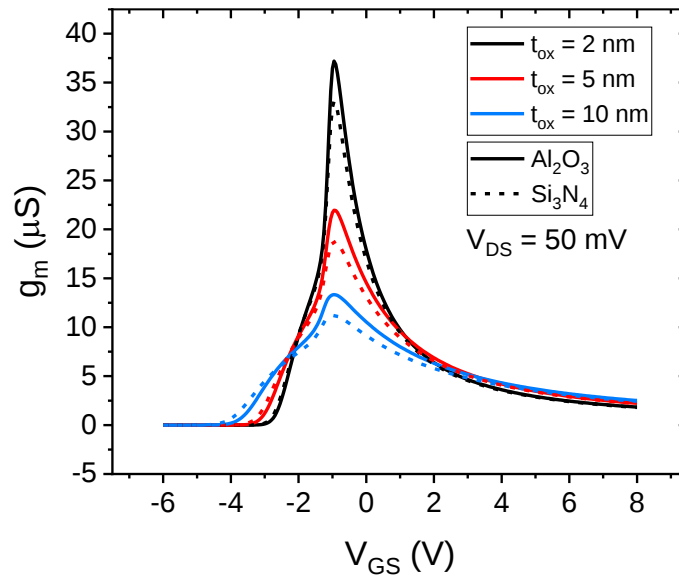


Figura 4.28: Curva de transcondutância dos MISHEMTs com diferentes materiais de isolante de porta e diferentes t_{ox} .

A partir deste ponto, o isolante de porta adotado será o Si_3N_4 , ou seja será avaliado o MISHEMT com Si_3N_4 com $t_{ox} = 2$ nm.

Com o material de isolante de porta e sua espessura definidos, o próximo passo foi variar a espessura da camada de barreira AlGaIn.

4.2.4 Espessura da camada de barreira (t_{AlGaIn})

A alteração da espessura da camada de barreira deverá fazer com que os canais da 1ª interface e da 2ª interface se afastem fisicamente, além de fazer com que a porta se distancie dos canais da 2ª e 3ª interfaces. Os MISHEMTs simulados possuem $d_{SD} = [AlN; GaN]$, $L_{GS} \& L_{GD} = [50 \text{ nm}; 1000 \text{ nm}]$. O parâmetro t_{AlGaIn} foi variado entre os valores de 5 nm, 8 nm e 10 nm.

A Figura 4.29 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com ambos d_{SD} e com $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm, simulados com diferentes espessuras da camada de barreira (t_{AlGaIn}). A Figura 4.30 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ (V_{DS}

= 50 mV) dos MISHEMTs com ambos d_{SD} e com L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm, simulados com diferentes t_{AlGaN} .

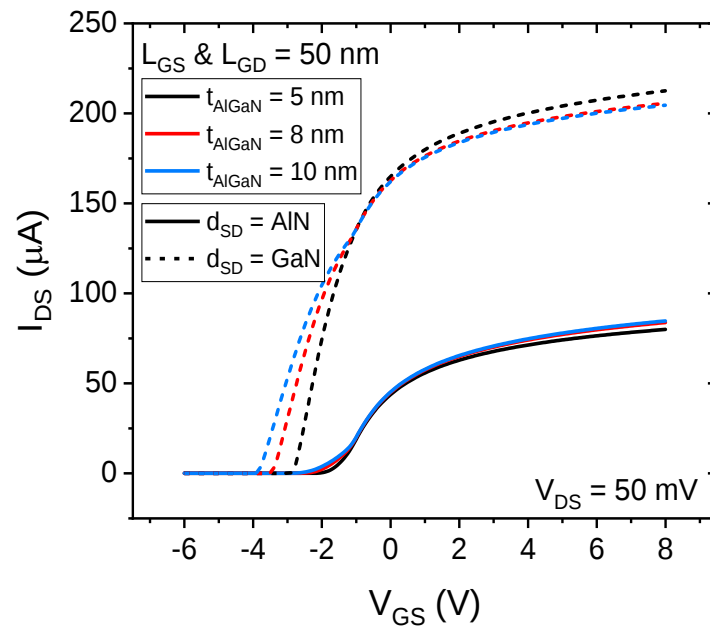


Figura 4.29: Curva I_{DS} x V_{GS} dos ($V_{DS} = 50$ mV) MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$ e $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaN} .

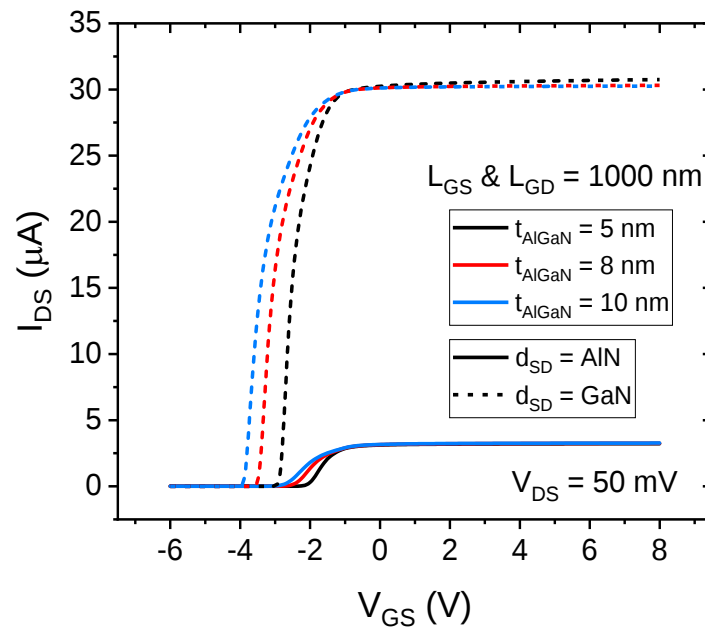


Figura 4.30: Curva I_{DS} x V_{GS} ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$ e $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm e diferentes t_{AlGaN} .

A partir dos gráficos de corrente, se observa que t_{AlGaN} afeta principalmente a tensão de limiar. Para melhor investigar essas características, foram estudadas

as curvas de transcondutância e os gráficos da segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos dispositivos.

Em relação aos MISHEMTs com $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaN} , os quais possuem grande influência da condução pela 1ª interface, a Figura 4.31 mostra as suas curvas de transcondutância e da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ do dispositivo com $d_{SD} = AlN$ e a Figura 4.32 apresenta os gráficos do dispositivo com $d_{SD} = GaN$.

Através das Figuras 4.31 e 4.32 se percebe que g_{m3} relacionada à V_{t3} e g_{m2} relacionada à V_{t2} se distanciam de g_{m1} relacionado à V_{t1} conforme t_{AlGaN} aumenta, enquanto que V_{t1} é pouco afetado. Além disso, quanto maior é a espessura da barreira, menor é g_{m3} e g_{m2} . No MISHEMT com $d_{SD} = GaN$, se percebe que a transcondutância sofre uma melhoria na degradação conforme t_{AlGaN} aumenta, devido à distanciação de g_{m2} em relação à g_{m3} .

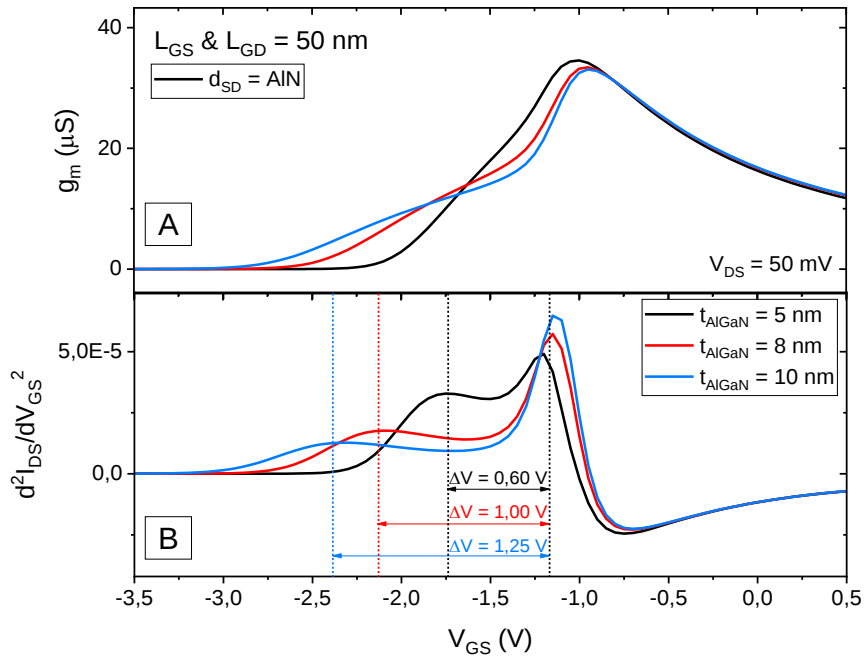


Figura 4.31: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = AlN$, $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm e diferentes t_{AlGaN} .

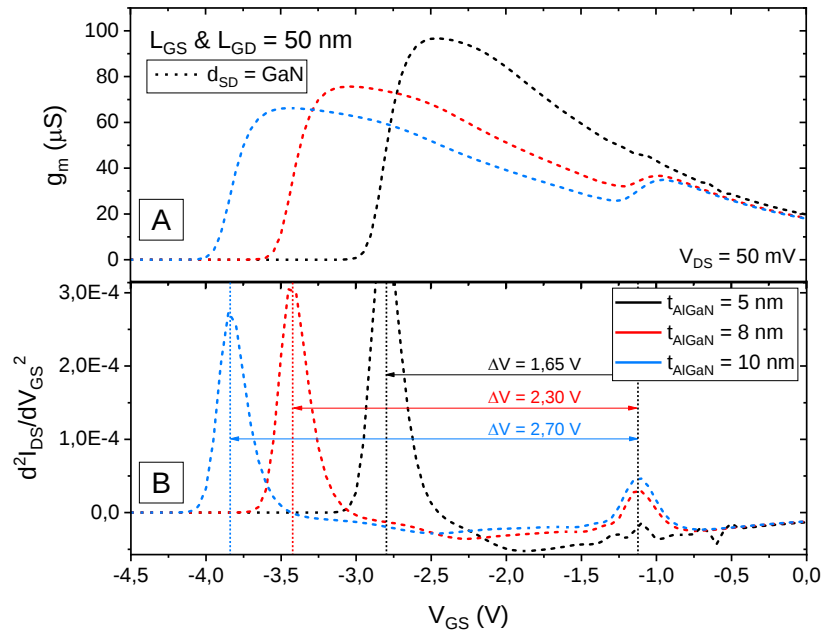


Figura 4.32: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$, $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

Dos MISHEMTs com $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} , os quais possuem pouca influência da condução pela 1ª interface, a Figura 4.33 mostra as curvas de transcondutância e da segunda derivada da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ do dispositivo com $d_{SD} = \text{AlN}$, e a Figura 4.34 apresenta os gráficos do dispositivo com $d_{SD} = \text{GaN}$.

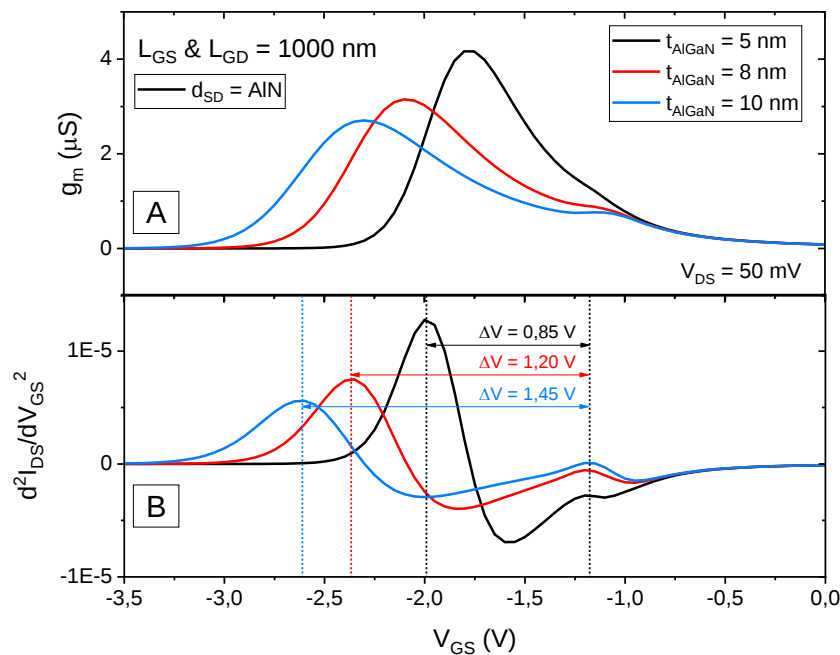


Figura 4.33: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$, $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

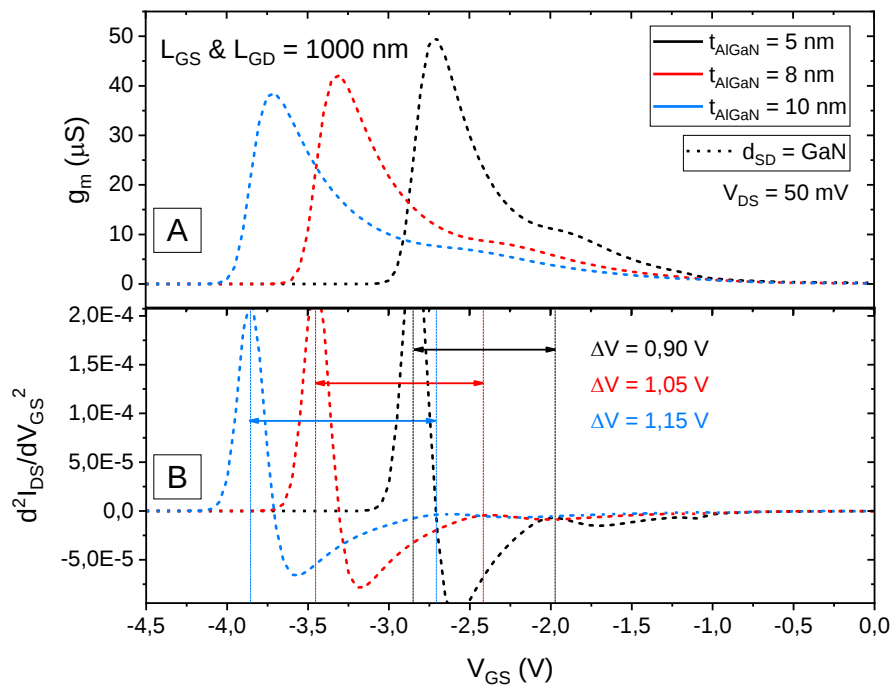


Figura 4.34: (A) Curva de transcondutância e (B) segunda derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = GaN$, $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

Nas Figuras 4.33 e 4.34, o comportamento do dispositivo é semelhante ao dos dispositivos com $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$, com a diferença de que g_{m1} relacionado à V_{t1} tem baixíssima influência no comportamento elétrico, já que $g_{m1} \ll g_{m2} \& g_{m3}$. No dispositivo com $d_{SD} = GaN$, a influência de g_{m1} é praticamente imperceptível, conseqüentemente se torna mais fácil vislumbrar a distanciação entre g_{m3} e g_{m2} .

Para analisar a SS dos dispositivos, foram tomados os gráficos de $I_{DS} \times V_{GS}$ em escala semilog juntamente com o gráfico do inverso da derivada de $I_{DS} \times V_{GS}$ em semilog. A Figura 4.35 apresenta os gráficos dos dispositivos com $d_{SD} = AlN$ e $d_{SD} = GaN$, com $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} , enquanto que a Figura 4.36 apresenta os gráficos dos MISHEMTs com ambos d_{SD} , com $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

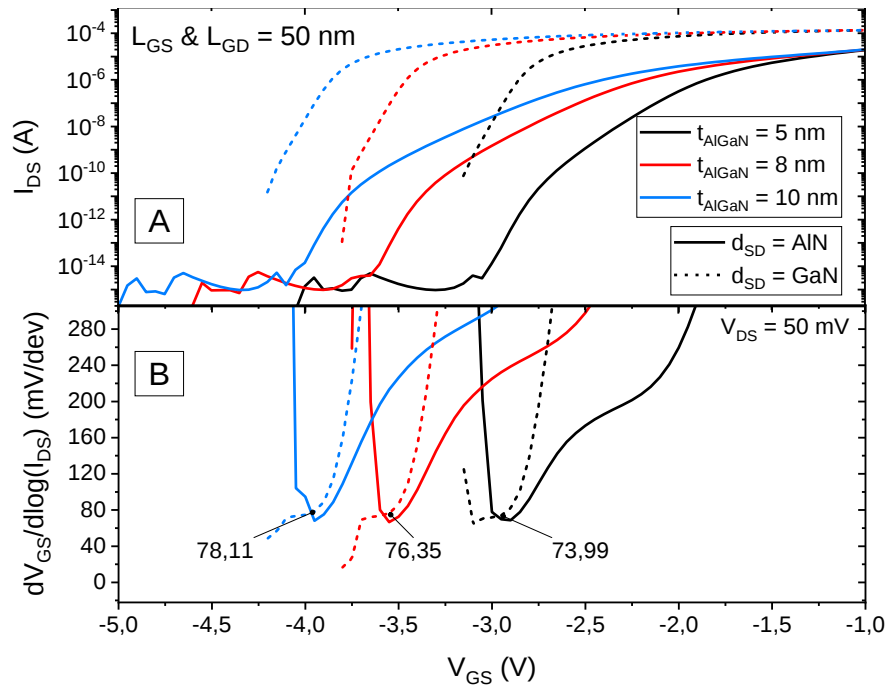


Figura 4.35: (A) Curva de I_{DS} x V_{GS} em escala semilog e (B) $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com ambos d_{SD} , L_{GS} & $L_{GD} = 50 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

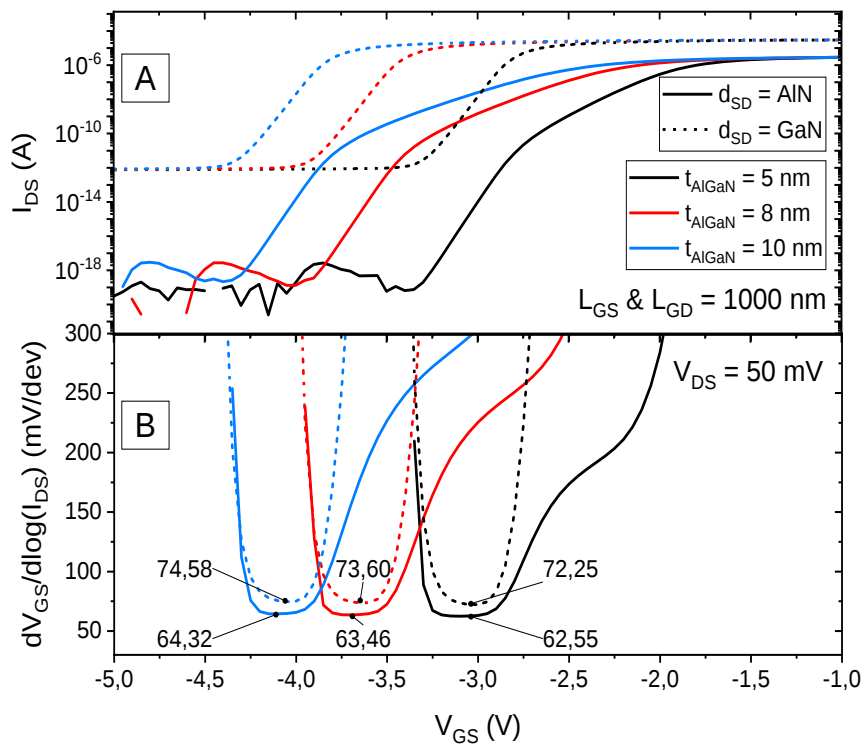


Figura 4.36: (A) Curva de I_{DS} x V_{GS} em escala semilog e (B) $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com ambos d_{SD} , L_{GS} & $L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ e diferentes t_{AlGaN} .

A partir das Figuras 4.35 e 4.36, é possível perceber que a inclinação relacionada à condução HEMT pela 2ª ou 3ª interfaces é diretamente

proporcional a $t_{\text{AlGa}}N$, embora tal influência seja baixa. Isso se deve à alteração da influência do campo elétrico vertical sobre os canais da 2ª e 3ª interfaces.

4.2.5 Fração molar de alumínio em $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x)

A fração molar de alumínio no $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ entre 0 e 1 é responsável pelas características desse material. Conforme a proporção, se o material possui $x = 0$, o material é, na verdade, o GaN, enquanto que se $x = 1$, o material é o AlN. Quando x assume um valor entre esses 0 e 1, as propriedades do material assumem valores intermediários aos do GaN e do AlN, com destaque à banda proibida e disponibilidade de elétrons. A banda proibida do AlN é muito maior que a do GaN.

A Figura 4.37 apresenta as curvas $I_{\text{DS}} \times V_{\text{GS}}$ ($V_{\text{DS}} = 50 \text{ mV}$) dos dispositivos MISHEMT com $d_{\text{SD}} = \text{AlN}$ e $L_{\text{GS}} = 50 \text{ nm}$, MISHEMT com $d_{\text{SD}} = \text{GaN}$ e $L_{\text{GS}} = 50 \text{ nm}$, MISHEMT com $d_{\text{SD}} = \text{AlN}$ e $L_{\text{GS}} = 1000 \text{ nm}$, e MISHEMT com $d_{\text{SD}} = \text{GaN}$ e $L_{\text{GS}} = 1000 \text{ nm}$.

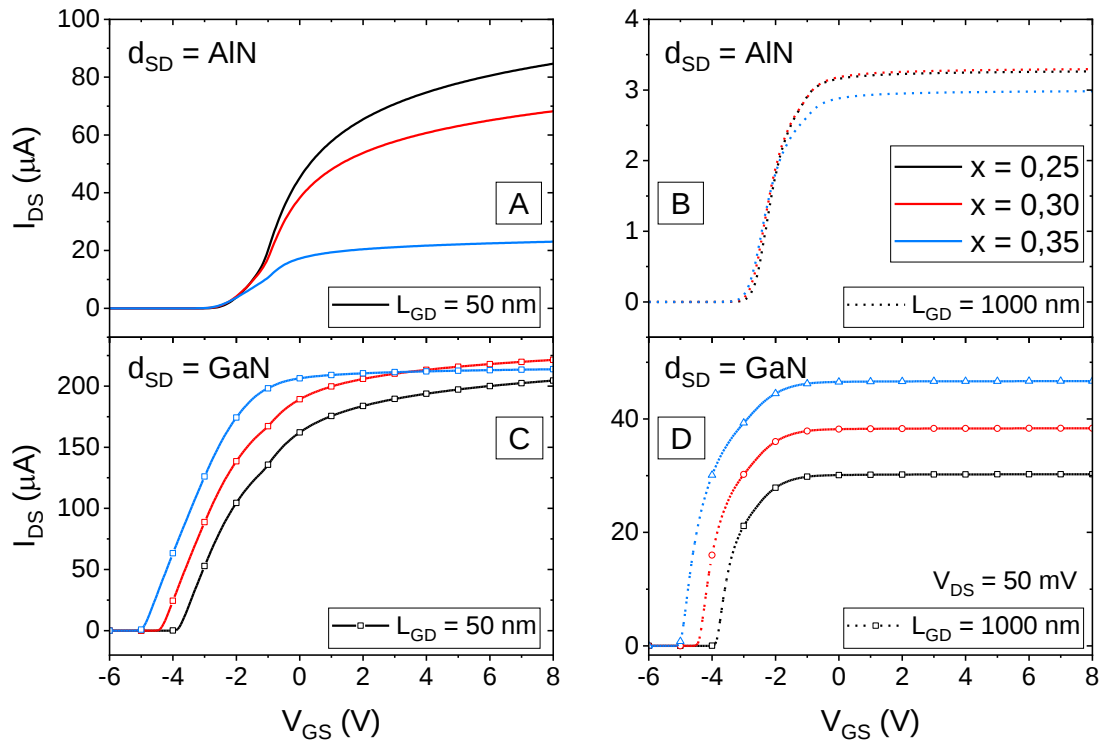


Figura 4.37: Curvas $I_{\text{DS}} \times V_{\text{GS}}$ ($V_{\text{DS}} = 50 \text{ mV}$) para um MISHEMTs com (A) $d_{\text{SD}} = \text{AlN}$ e $L_{\text{GS}} \& L_{\text{GD}} = 50 \text{ nm}$, (B) $d_{\text{SD}} = \text{AlN}$ e $L_{\text{GS}} \& L_{\text{GD}} = 1000 \text{ nm}$, (C) $d_{\text{SD}} = \text{GaN}$ e $L_{\text{GS}} \& L_{\text{GD}} = 50 \text{ nm}$, e (D) $d_{\text{SD}} = \text{GaN}$ e $L_{\text{GS}} \& L_{\text{GD}} = 1000 \text{ nm}$ com diferentes concentrações de alumínio em AlGa_xN .

O dispositivo com $d_{SD} = \text{AlN}$ apresenta mudança no nível de I_{DS} contrária à do dispositivo com $d_{SD} = \text{GaN}$, i.e., I_{DS} tende a ser diretamente proporcional a x para $d_{SD} = \text{GaN}$, e inversamente proporcional para $d_{SD} = \text{AlN}$.

A Figura 4.38 apresenta os gráficos de transcondutância dos diferentes dispositivos.

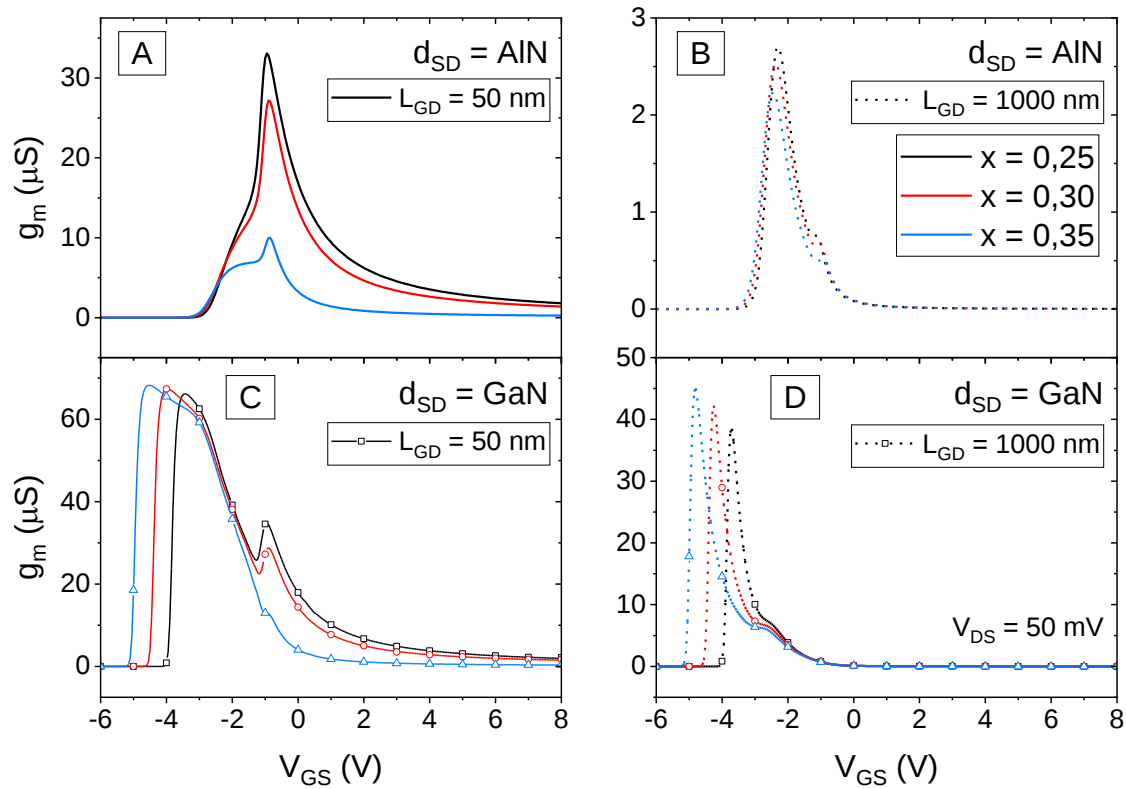


Figura 4.38: Curvas de transcondutância para um MISHEMTs com (A) $d_{SD} = \text{AlN}$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, (B) $d_{SD} = \text{AlN}$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm, (C) $d_{SD} = \text{GaN}$ e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, e (D) $d_{SD} = \text{GaN}$ e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm com diferentes concentrações de alumínio em AlGaN.

A partir dos gráficos se percebe que para os MISHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$, ao aumentar x ocorre um deslocamento de V_{t3} , devido ao aumento da polarização espontânea. Além disso, ocorre também a redução de g_{m1} para o dispositivo com $L_{GS} = 50$ nm, o que indica maior predominância das conduções pelas 2ª e 3ª interfaces. Nos dispositivos com $d_{SD} = \text{AlN}$, não ocorre a interação entre os elétrons dos dois 2DEG, e aumentar a quantidade de alumínio no AlGaN faz com que a camada de barreira se torne cada vez mais isolante, por isso ocorre uma redução geral de g_m .

A fração molar possui forte influência sobre todas as conduções. Quanto maior x , o AlGaN se torna mais parecido com o AlN, quanto menor x , mais

parecido com o GaN. Quanto mais parecido com o AlN, maior a banda proibida, o que potencializa polarização interna e o 2DEG na 3ª interface e atenua o 2DEG da 2ª interface, como mostrado pelas Figuras 4.39 e 4.40 e pela Tabela 4.2. Além disso, a camada de barreira torna-se cada vez mais isolante, dificultando a condução pela 1ª interface. Quanto mais parecido com o GaN o inverso acontece: atenuação no 2DEG da 3ª interface e potencialização do 2DEG na 2ª interface, e maior facilidade de conduzir pela 1ª interface. Por isso, para os MISHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$, ao aumentar a fração molar acontece uma redução de I_{DS} , já para os MISHEMTs com $d_{SD} = \text{GaN}$, aumentar a fração molar aumenta a I_{DS} .

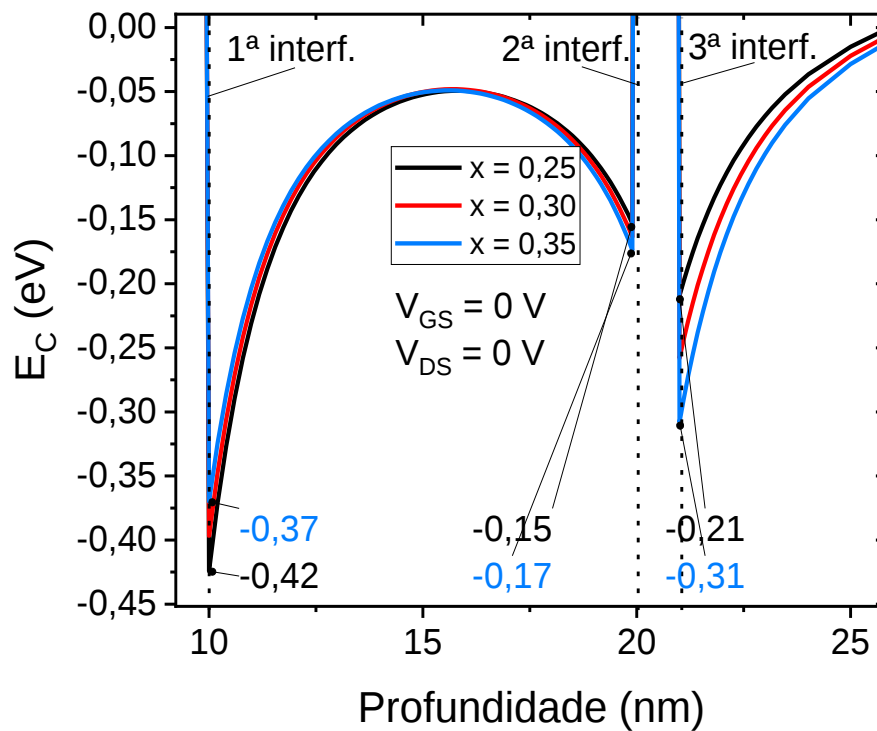


Figura 4.39: Diagrama da energia da banda de condução do MISHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$, $L_{GS} = 50 \text{ nm}$ e diferentes frações molares.

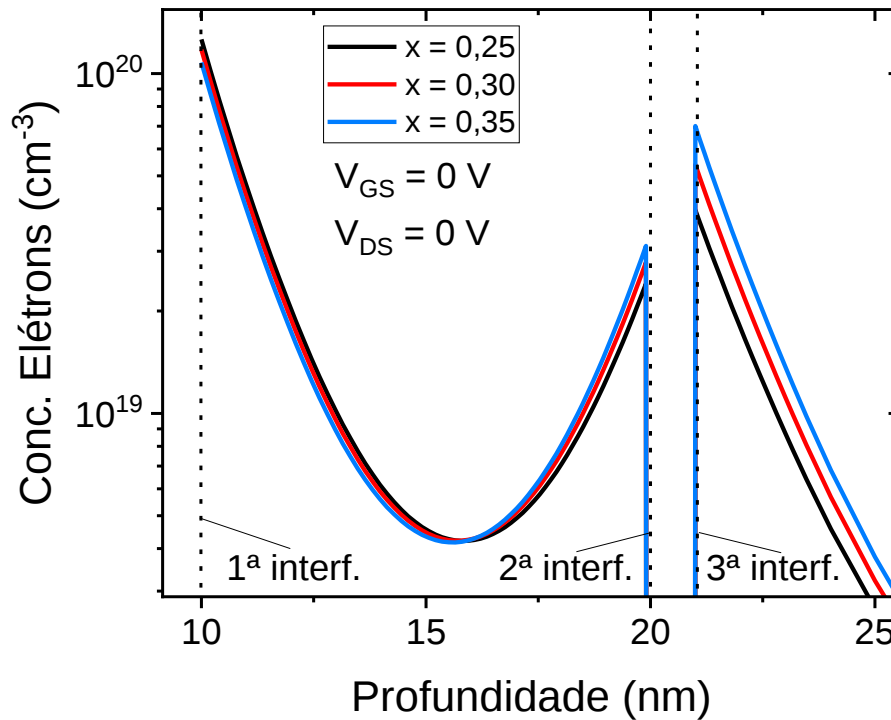


Figura 4.40: Diagrama da concentração de elétrons do MISHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$, $L_{GS} = 50 \text{ nm}$ e diferentes frações molares.

Tabela 4.2: Quantidade de elétrons nas camadas barreira (AlGaN) e *buffer* (GaN) do MISHEMT para diferentes valores de fração molar de Al em $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

x	Número de elétrons	
	Camada barreira	Camada <i>buffer</i>
0,25	1,66 E17	5,84 E16
0,30	1,62 E17	7,51 E16
0,35	1,55 E17	9,30 E16

4.2.6 Comprimento do canal (L_g)

Através da variação do comprimento do canal, também será variada a influência da condução pela 1ª interface devido ao aumento da extensão da mesma.

A Figura 4.41 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ ($V_{DS} = 50 \text{ mV}$) dos MISHEMTs com $d_{SD} = \text{AlN}$ e $d_{SD} = \text{GaN}$, com $L_{GS} = 50 \text{ nm}$ e L_g variando entre 200 nm, 400 nm e 600 nm.

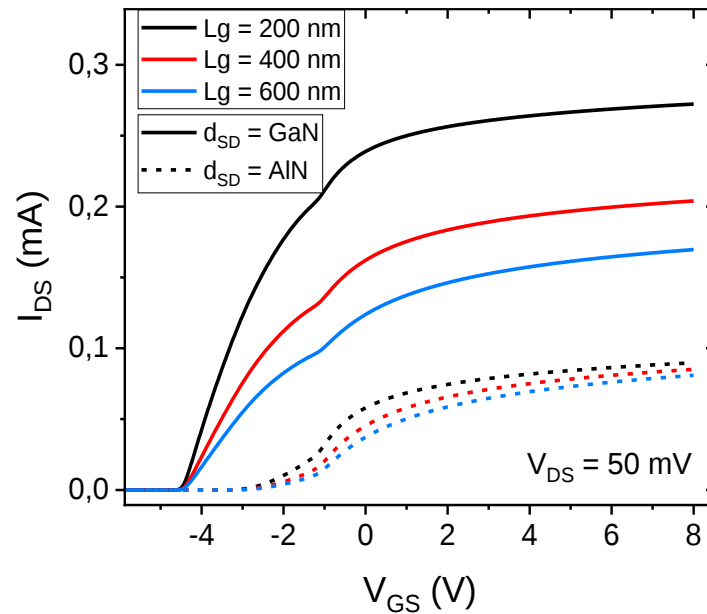


Figura 4.41: Curvas I_{DS} x V_{GS} ($V_{DS} = 50$ mV) dos MISHEMTs com $d_{SD} = [\text{AlN}; \text{GaN}]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .

O aumento de I_{DS} conforme a redução do canal é devido à redução da resistência série entre fonte e dreno. Devido à natureza do 2DEG, a resistência entre fonte e dreno por meio do canal 2DEG varia pouco conforme L_g é alterado.

Para melhor avaliar o impacto de L_g conduções pelas diferentes interfaces, foram extraídos os gráficos da transcondutância e da inclinação de sublimiar, apresentados pelas Figuras 4.42 e 4.43 respectivamente.

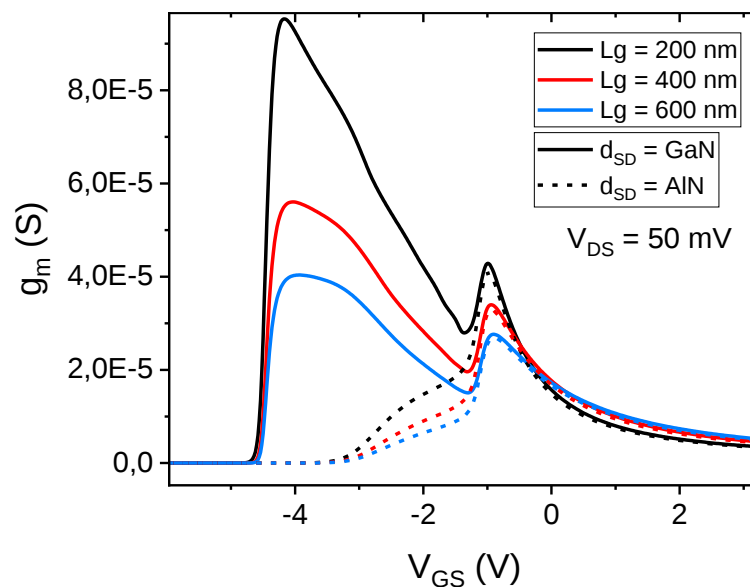


Figura 4.42: Curvas de transcondutância dos MISHEMTs com $d_{SD} = [\text{AlN}; \text{GaN}]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .

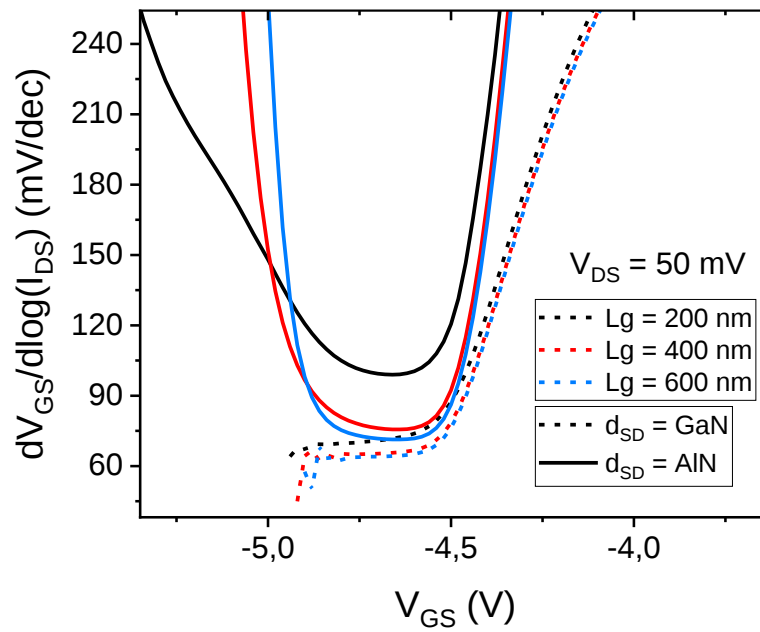


Figura 4.43: Curvas de $dV_{GS}/d\log(I_{DS})$ dos MISHEMTs com $d_{SD} = [AlN; GaN]$, $L_{GS} = 50$ nm e diferentes L_g .

Como L_{GS} & L_{GD} são curtos, a influência da 1ª interface na condução é alta, então quanto maior L_g , menor é a influência da condução pelas 2ª e 3ª interfaces pois maior é a influência da condução pela 1ª interface, percebido pela redução da diferença entre g_{m2} e g_{m1} e também entre g_{m3} e g_{m1} . Pelo gráfico da inclinação de sublimar, se nota que SS é inversamente proporcional à L_g , devido à maior efetividade do controle da porta sobre os canais.

4.2.7 Características de saída para diferentes polarizações de porta

Até este ponto foram avaliados diferentes aspectos sobre a formação de canais de corrente em diferentes interfaces do dispositivo, a contribuição desses canais na composição de I_{DS} conforme diferentes polarizações de porta, e as consequências da variação de diversos parâmetros dimensionais e estruturais sobre cada canal.

Tomando como referência o MISHEMT com parâmetros $d_{SD} = GaN$, L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm, Si_3N_4 de 2 nm como isolante de porta, com $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ e $L_g = 400$ nm, foram extraídas curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ para diferentes polarizações de porta e então analisados com vistas aos parâmetros relacionados ao comportamento

análogo. Foram escolhidos 3 valores de V_{GS} de acordo com o V_t de cada uma das interfaces. Em relação ao dispositivo referência, foram avaliados outros 2, um com $L_g = 200$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm, outro com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000$ nm, devido à variação que esses dois parâmetros causam na influência da 1ª interface na condução.

A Figura 4.44 mostra as curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ e g_m dos dispositivos, e a Figura 4.45 apresenta as curvas da derivada 2ª de $I_{DS} \times V_{GS}$.

É possível observar que a corrente de dreno não varia com o inverso do comprimento de canal, devido à alta resistência série impostas pelos contatos de fonte e dreno e também devido ao L_{GD} e L_{GS} . É possível observar também as múltiplas conduções observando os diferentes picos de g_m .

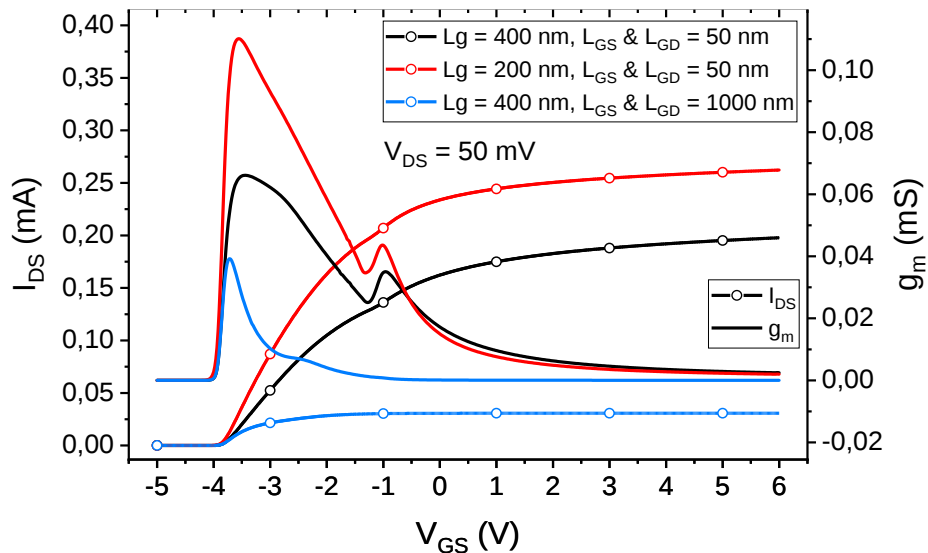


Figura 4.44: Curvas $I_{DS} \times V_{GS}$ e g_m dos dispositivos simulados.

Das características de entrada foram extraídas a tensão de limiar da 3ª interface $V_{t3} = -3,85$ V, a da 2ª interface $V_{t2} = -3,10$ V, e a da 1ª interface $V_{t1} = -1,10$ V. Os valores de V_{GS} que serão utilizados para a extração das curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ serão baseados nas tensões de limiar de cada interface.

A Figura 4.46 apresenta as curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para as polarizações de porta $V_{GS} = [-3,5; -2,0; -0,5]$ V, correspondentes a $V_{GT} = [0,35; 1,85; 3,35]$ V tomando V_{t3} como tensão de limiar dos dispositivos. Das curvas foram extraídos os valores de g_D e V_{EA} para cada polarização, sendo que a área amarela da Figura 4.46 indica o intervalo de V_{DS} utilizado para as extrações. As Figuras 4.47 a 4.49

apresentam perfis de concentração de elétrons dos diferentes MISHEMTs para diferentes polarizações de porta e dreno. Para a obtenção de $I_{DS,sat}$ e $g_{m,sat}$, foram utilizadas medições $I_{DS} \times V_{GS}$ para $V_{DS} = 6$ V, apresentadas pela Figura 4.50. Por fim foram calculados os ganhos de acordo com a Equação 2.27. Os valores são apresentados pela Tabela 4.3 e pelos gráficos das Figuras 4.51 e 4.52.

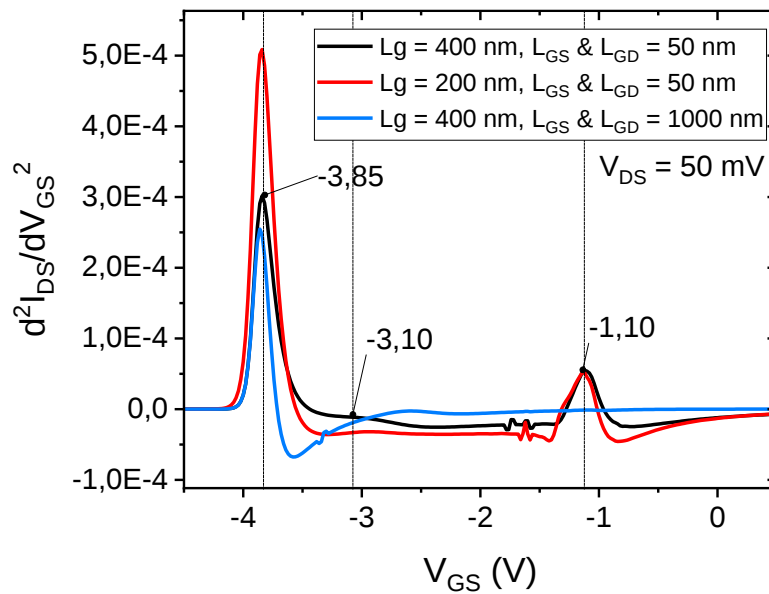


Figura 4.45: Curva da derivada 2ª da curva $I_{DS} \times V_{GS}$ dos dispositivos simulados.

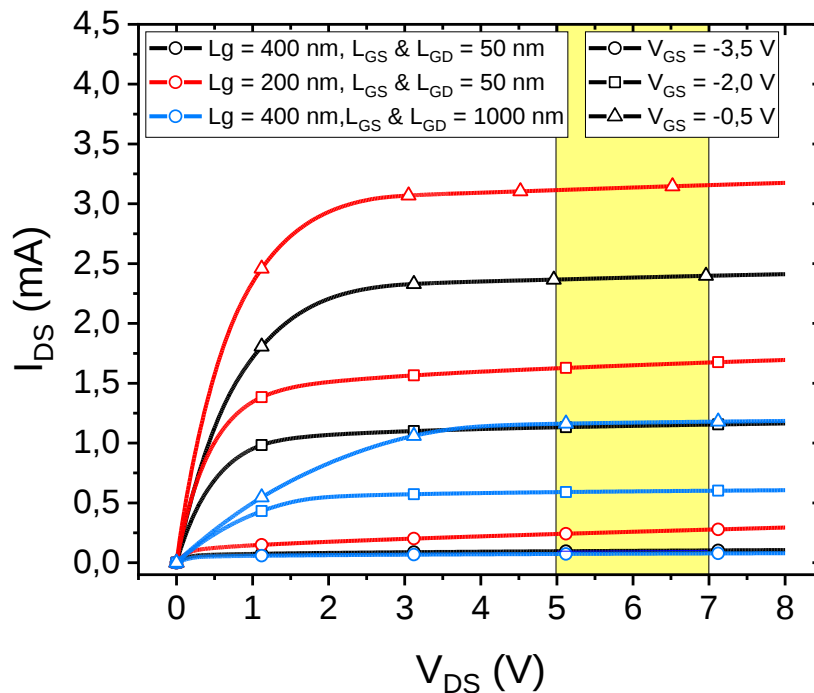


Figura 4.46: Curvas $I_{DS} \times V_{DS}$ para diferentes polarizações de porta.

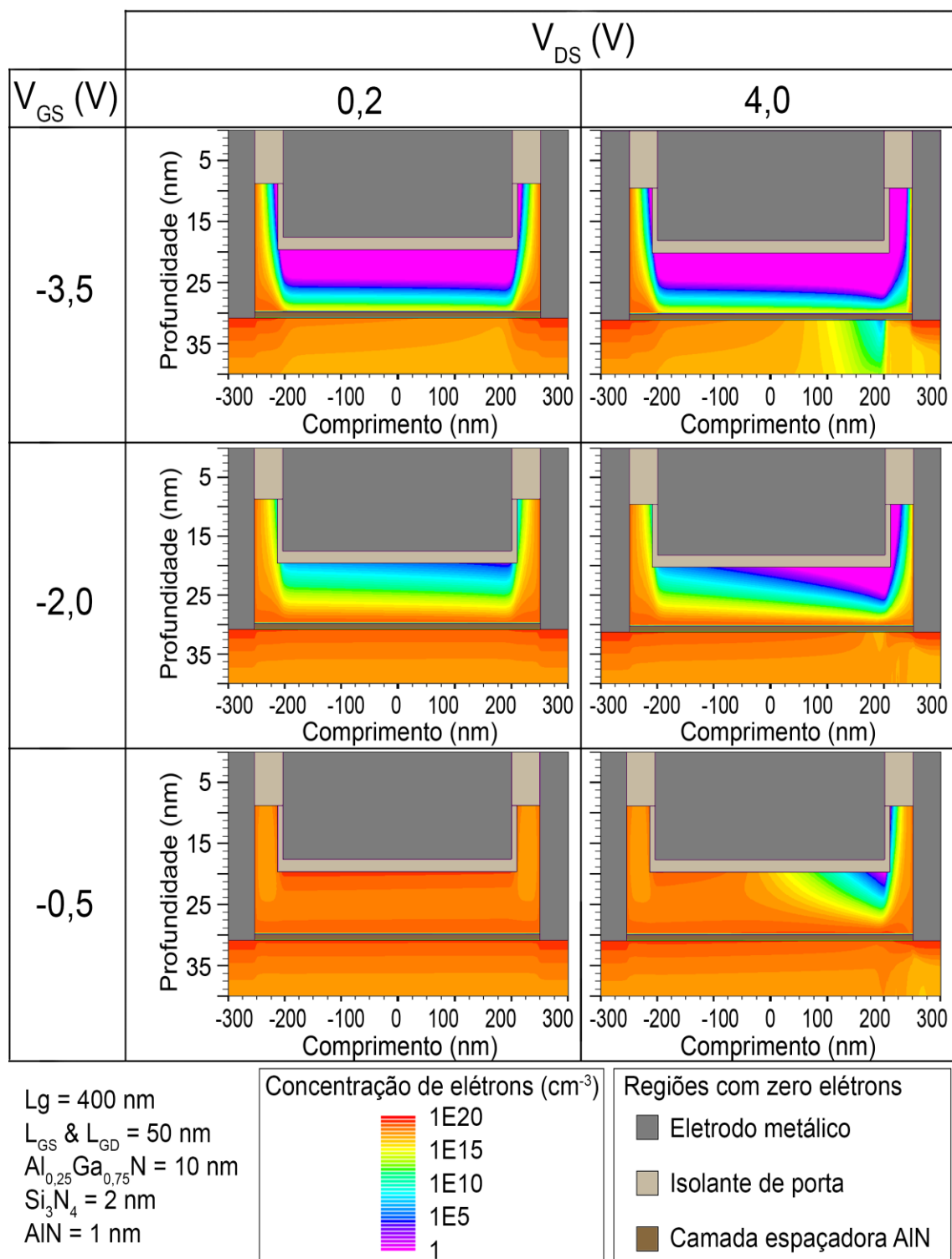


Figura 4.47: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 400$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.

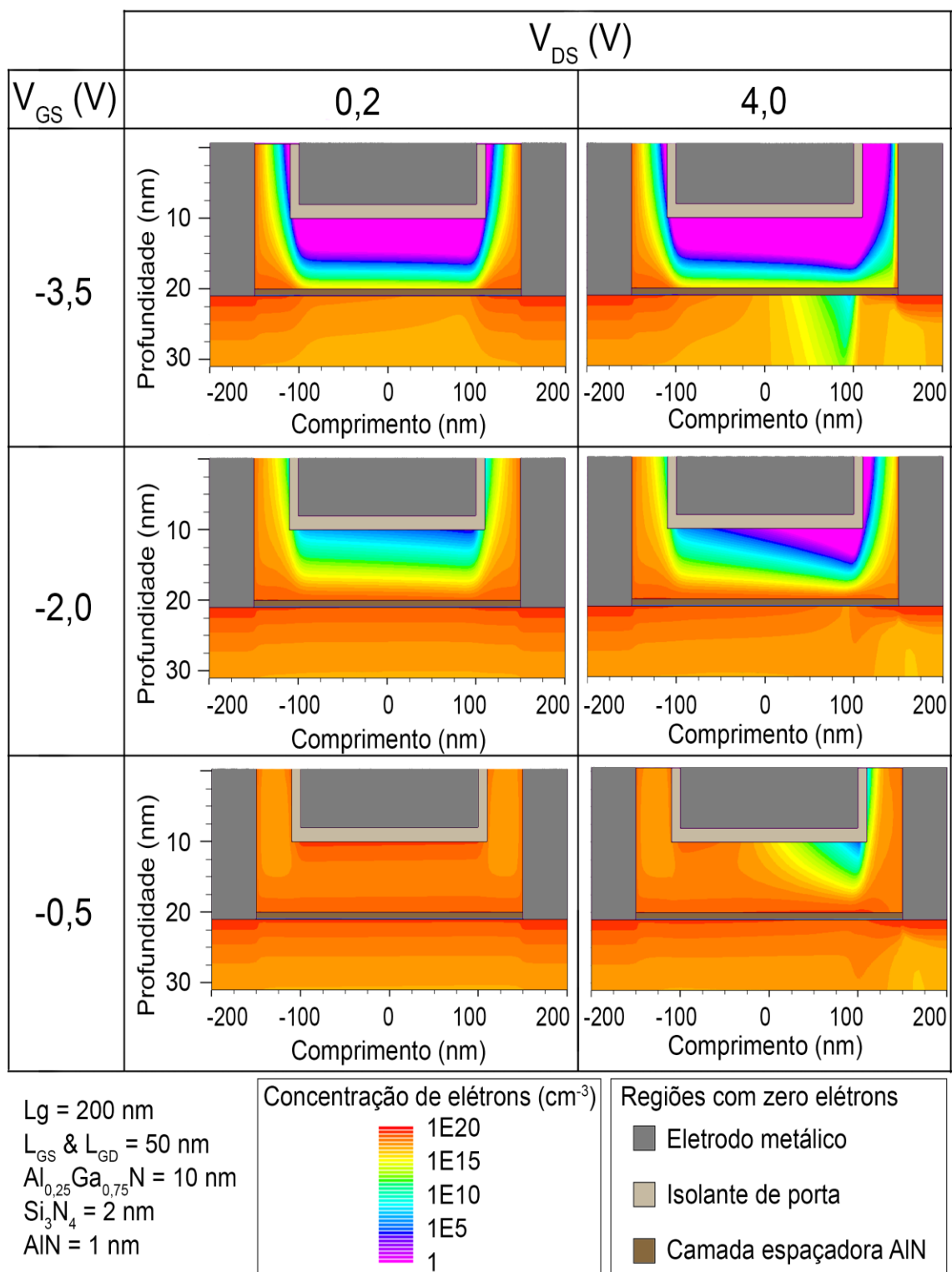


Figura 4.48: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 200$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.

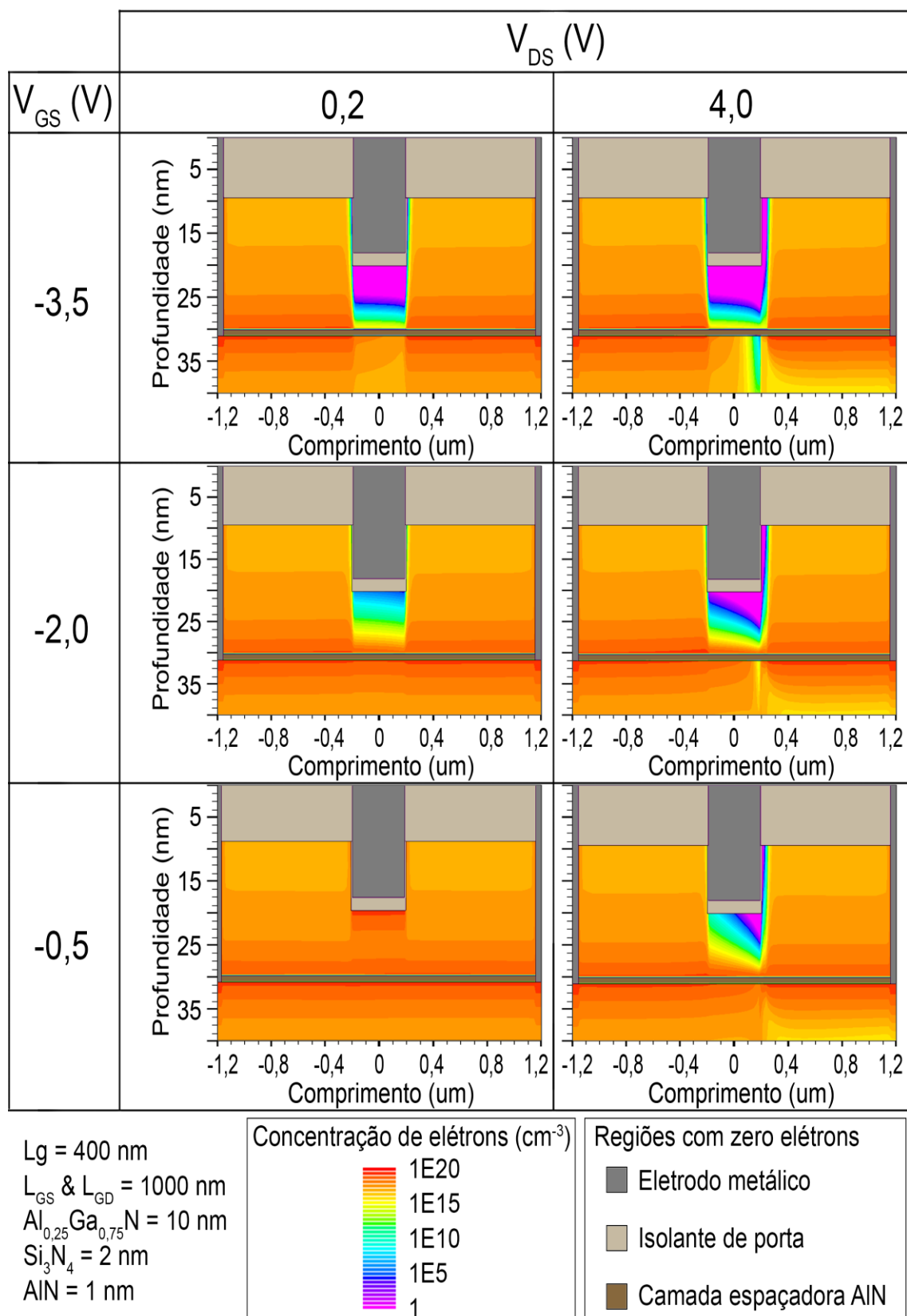


Figura 4.49: Perfis de concentração de elétrons do dispositivo referência ($L_g = 400$ nm e $L_{GS} \text{ \& } L_{GD} = 1000$ nm) para diferentes polarizações de porta e dreno.

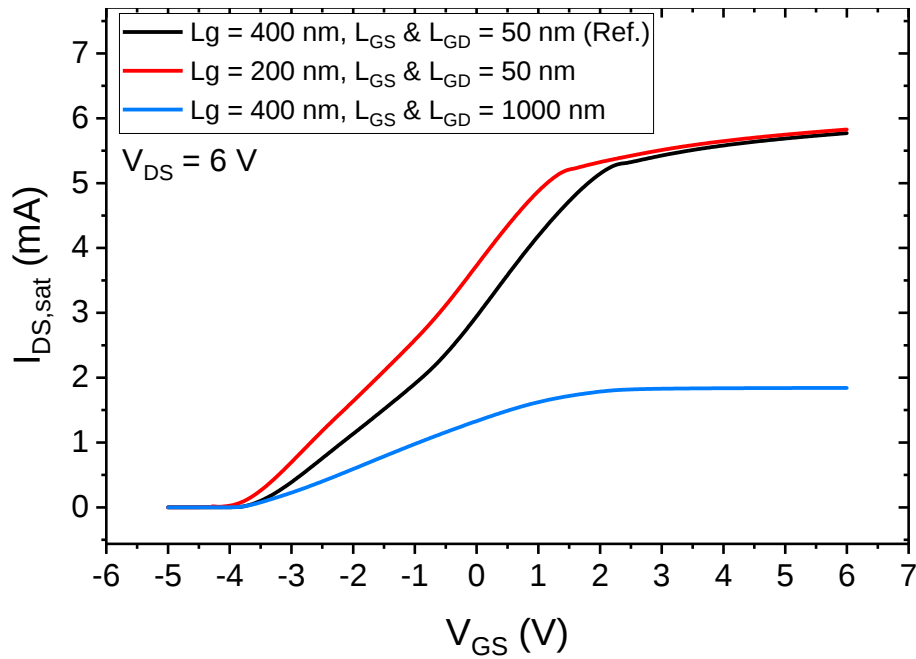


Figura 4.50: Curva I_{DS} x V_{GS} em saturação ($V_{DS} = 6$ V) dos dispositivos com diferentes L_g e L_{GS} & L_{GD} .

Tabela 4.3: Resultados de parâmetros analógicos de MISHEMTs com diferentes L_g e L_{GS} & L_{GD} para $V_{DS} = 6$ V.

L_g (nm)	L_{GS} & L_{GD} (nm)	V_{GS} (V)	$I_{DS,sat}$ (mA)	$g_{m,sat}$ (mS)	g_D (μ S)	V_{EA} (V)	Av (dB)
400	50	-3,5	0,099	0,426	3,36	23,5	42,1
		-2,0	1,132	0,741	11,26	95,5	36,4
		-0,5	2,363	1,053	15,84	144,4	36,4
200	50	-3,5	0,258	0,732	18,19	8,2	32,1
		-2,0	1,636	0,918	24,19	62,2	31,6
		-0,5	3,114	1,166	20,89	144,1	34,9
400	1000	-3,5	0,099	0,277	2,51	24,1	40,9
		-2,0	0,589	0,389	7,08	78,2	34,8
		-0,5	1,157	0,354	14,55	74,7	27,7

Das Figuras 4.47 a 4.49 é possível observar que, para todos os valores de V_{GS} , quando é aplicado um alto V_{DS} ocorre um efeito de saturação semelhante à modulação do comprimento do canal dos MOSFETs, no qual ocorre a cessão ou estrangulamento do canal próximo ao dreno e que se desloca em direção à fonte conforme o aumento de V_{DS} . Quando $V_{GS} = -3,5$ V e $V_{DS} = 0,2$ V, é possível perceber o 2DEG da 3ª interface formado atuando como canal, e quando $V_{DS} = 6,0$ V, há uma interrupção deste 2DEG próximo ao dreno. Para $V_{GS} = -2,0$ V, os 2DEGs da 3ª e 2ª interfaces estão formados, o que resulta em uma I_{DS} maior. Nesta configuração o 2DEG da 2ª interface está mais fracamente populado de

elétrons do que o da 3ª interface, e quando $V_{DS} = 6,0$ V, o 2DEG da 2ª interface é afetado sofre um estrangulamento, enquanto que o 2DEG da 3ª interface praticamente não é afetado. Enfim, para $V_{GS} = 0,5$ V, quando a 1ª interface está acumulada e é adicionada à condução, para um alto valor de V_{DS} a 1ª interface apresenta o efeito de modulação do comprimento do canal, enquanto que os 2DEGs das 2ª e 3ª interfaces são fracamente afetados.

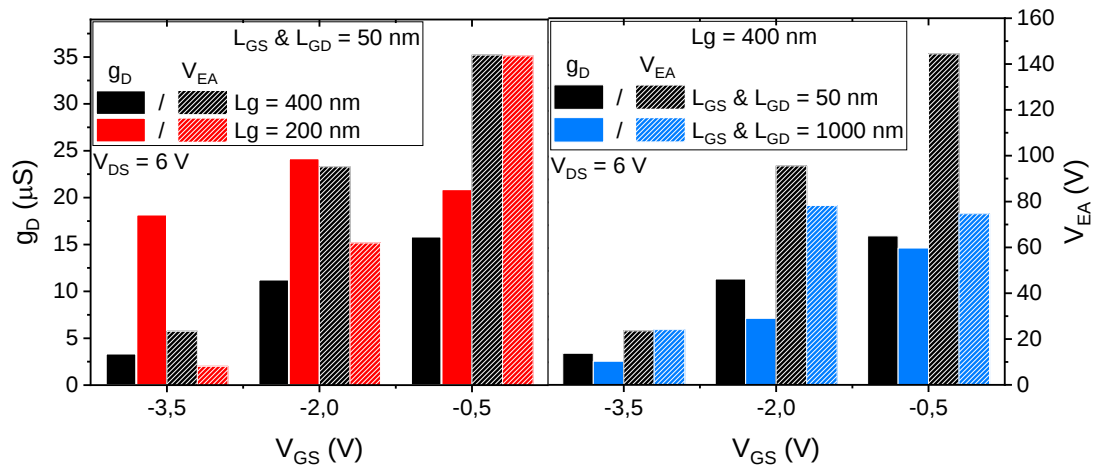


Figura 4.51: Gráficos em barra dos resultados de g_D e V_{EA} dos diferentes MISHEMTs sob diferentes V_{GS} .

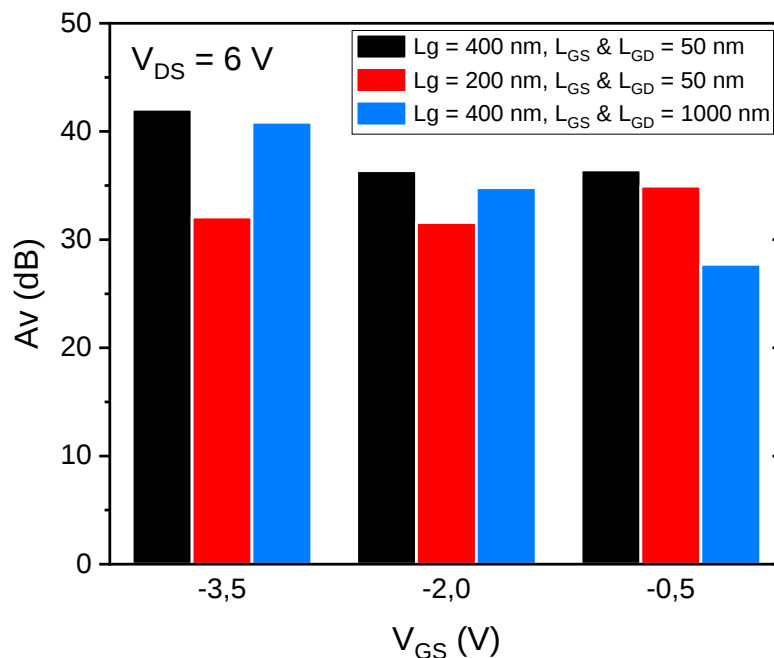


Figura 4.52: Gráficos em barra dos resultados de V_d dos diferentes MISHEMTs sob diferentes V_{GS} .

Dos gráficos em barras das Figuras 4.51 e 4.52, o dispositivo com $L_g = 400$ nm e $L_{GS} \& L_{GD} = 50$ nm, utilizado neste tópico como dispositivo referência, apresenta g_D crescente conforme V_{GS} se torna mais positivo, enquanto que V_{EA} apresenta um forte aumento devido ao salto de corrente. Devido a este aumento de V_{EA} , o aumento de I_{DS} e g_D para $V_{GS} = -0,5$ V não é suficiente para degradar A_v . O ganho é proporcional a g_m/I_{DS} , em outras tecnologias o aumento de I_{DS} causado pelo aumento de V_{GS} faz com que A_v seja reduzido para V_{GS} mais positivo. Então, no MISHEMT o valor do ganho ser mantido para polarizações de porta com 1,5 V de diferença não é esperado.

Como pode ser visto pela Figura 4.53, quando $V_{GS} = -0,5$ V e $V_{DS} = 6$ V a 1ª interface sofre modulação do comprimento do canal, mas as outras duas interfaces não são afetadas, por isso o dispositivo é capaz de manter alta corrente e não apresentar grande degradação em g_D .

Os valores mais altos de g_D atingidos quando $L_g = 200$ nm são devidos ao maior efeito da modulação do comprimento do canal em canais mais curtos. Em relação à referência, o salto de I_{DS} de $V_{GS} = -2,0$ para $V_{GS} = -0,5$ V é ainda maior (para $L_G \& L_{GD}$ pequenos), o que leva V_{EA} a apresentar um forte aumento. Esses fatores fazem com que A_v apresente um novo aumento para uma polarização de porta mais positiva, o que é inesperado.

Os valores mais baixos de g_D para $L_{GS} \& L_{GD} = 1000$ nm são devidos à utilização de apenas os 2DEGs das 2ª e 3ª interfaces como canal. Neste dispositivo o eletrodo de porta cobre uma área pequena do AlGaIn e dos canais das 2ª e 3ª interfaces, então não ocorre o aumento de I_{DS} e g_m devidos à condução pela 1ª interface (não há contribuição MOS), consequentemente não há aumento de V_{EA} , e também não é alcançada a condução por todo o volume do AlGaIn, enquanto que no dispositivo referência ambos os fenômenos acontecem. Logo, devido à falta de condução pela 1ª interface o dispositivo não apresenta aumento de A_v para valores mais positivos de V_{GS} .

Como é apresentado pela Figura 4.54, com $V_{DS} = 6$ V a 1ª interface não acumula para nenhum valor de V_{GS} , o que impossibilita a condução por todo o volume do AlGaIn.

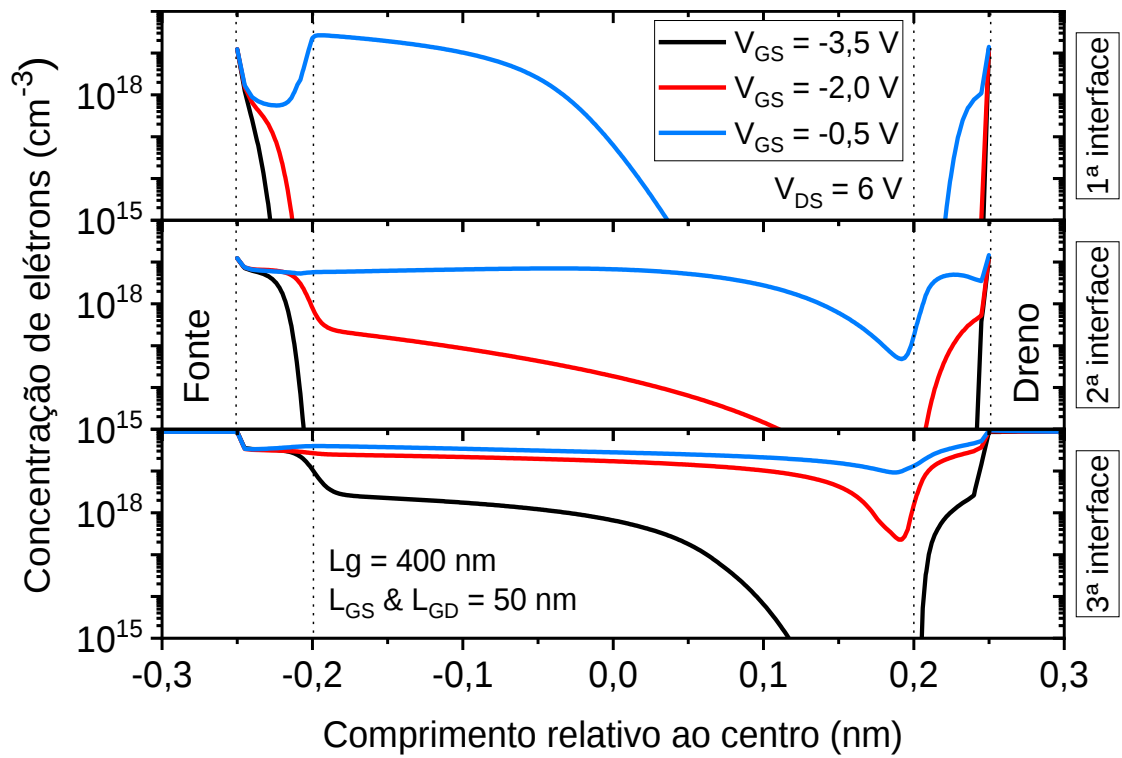


Figura 4.53: Concentração de elétrons nas 3 interfaces do MISHEMT com $L_g = 400$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 50$ nm para 3 diferentes V_{GS} .

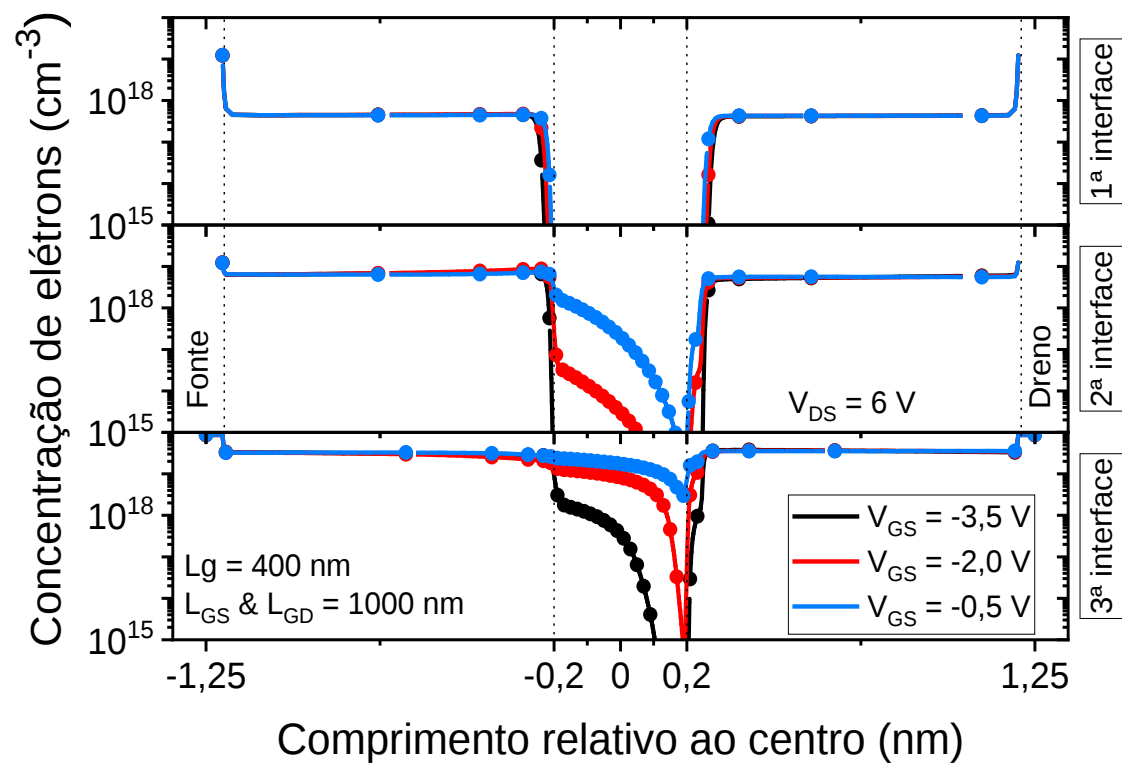


Figura 4.54: Concentração de elétrons nas 3 interfaces do MISHEMT com $L_g = 400$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm para 3 diferentes V_{GS} .

Comparando os resultados da Tabela 4.3 com os resultados experimentais da Tabela 4.1, e podendo ser confirmado visualmente através da Figura 4.55, o dispositivo com $L_g = 400$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm é o que apresenta valores dos parâmetros analógicos mais próximos daqueles obtidos experimentalmente para mesmos valores de V_{GT} . Isso indica que o dispositivo físico provavelmente não utiliza a 1ª interface para a condução de corrente.

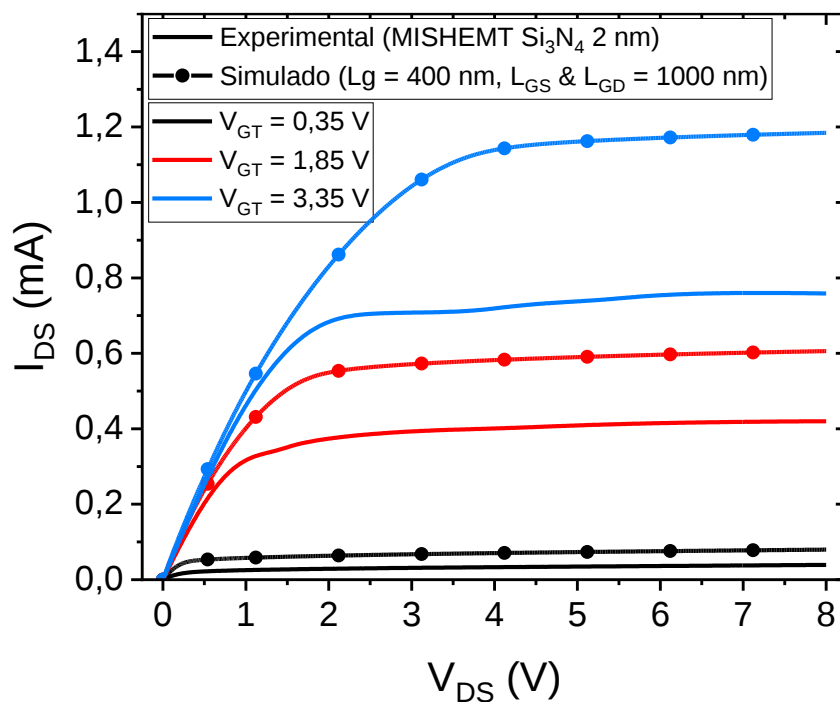


Figura 4.55: Curvas I_{DS} x V_{DS} para 3 valores de V_{GT} do dispositivo físico com Si_3N_4 de 2 nm como isolante de porta e do dispositivo simulado com $L_g = 400$ nm e L_{GS} & $L_{GD} = 1000$ nm.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o comportamento elétrico de MISHEMTs fabricados e simulados com estruturas 10 nm Al_2O_3 / 10 nm AlGaIn/ 1 nm AlN/ 300 μm GaN e 2 nm Si_3N_4 / 10 nm AlGaIn/ 1 nm AlN/ 300 μm GaN. Com vistas à sua utilização em circuitos digitais e analógicos, diversos parâmetros dimensionais e estruturais criteriosamente escolhidos foram variados, e então foi avaliado o comportamento do dispositivo.

Através da análise das curvas experimentais, foram detectadas diferentes inclinações em g_m , devidas à condução por diferentes canais de corrente. O dispositivo simulado também apresentou tal característica.

A fim de determinar a posição dos canais no dispositivo, foram avaliados os diagramas de banda de energia e a concentração de elétrons. Dois canais são formados devido à heteroestrutura e à polarizações internas em wurtzitas baseadas em GaN, um na 3ª interface, outro na 2ª interface, os quais possuem características de 2DEG. Um outro canal é formado na 1ª interface a partir de efeito de campo. Numa análise em ordem crescente de V_{GS} , o canal na 3ª interface é formado primeiro, o canal na 2ª interface é formado segundo, e o canal na 1ª interface é formado por último.

Avaliando a proximidade vertical entre os eletrodos de fonte/ dreno e os canais (d_{SD}), foi constatado que quando os eletrodos atingem a camada *buffer*, os canais de corrente principais são os 2DEG da 2ª e 3ª interfaces, e quando os eletrodos se encontram na camada de barreira, os canais de corrente principais são o 2DEG da 2ª interface e a 1ª interface por efeito de campo. Quando os eletrodos se situam na camada de barreira, a interação entre o 2DEG da 2ª interface e o canal da 1ª interface interagem entre si, prejudicando a transcondutância. Por fim, a diferença entre os níveis de corrente do MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlGaIn}$ e com $d_{SD} = \text{AlN}$ se dá pela alteração da resistência entre eletrodos de fonte/ dreno e o 2DEG da 2ª interface.

Após avaliar a proximidade horizontal entre os eletrodos de fonte/ dreno e os canais (L_{GS} & L_{GD}), foi concluído que para altos valores de L_{GS} (e.g., 500 nm ou 1000 nm) a condução pela 1ª interface praticamente não interfere no comportamento elétrico, e que quando L_{GS} & L_{GD} é pequeno, a condução pela 1ª interface é tão alta quanto às dos outros canais. Diante disso, foi observado que

a condução do MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$ e $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$ acontece principalmente pelas 1ª e 2ª interface, a condução do MOSHEMT com $d_{SD} = \text{AlN}$ e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ acontece principalmente pela 2ª interface, a do MOSHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$ e $L_{GS} \& L_{GD} = 50 \text{ nm}$ utiliza todas as interfaces, e a condução do MOSHEMT com $d_{SD} = \text{GaN}$ e $L_{GS} \& L_{GD} = 1000 \text{ nm}$ acontece principalmente pela 1ª e 2ª interfaces.

Ao estudar o material do isolante de porta foi constatado que a permissividade elétrica é diretamente proporcional à I_{DS} e g_m e inversamente proporcional à SS , como observado em MOSFETs. Através do estudo da espessura do isolante de porta foi constatado que quanto maior t_{ox} , mais difícil se torna para o efeito de campo cortar os canais das 2ª e 3ª interfaces, o que faz deslocar as tensões de limiar dessas interfaces, distanciando V_{t2} e V_{t3} de V_{t1} .

Da análise da espessura da camada de barreira (t_{AlGaIn}), foi constatado que uma maior proximidade do metal de porta dos canais nas 2ª e 3ª interfaces causa um aumento do V_t desses canais, enquanto que não altera V_{t1} .

Ao avaliar a fração molar de Al em $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x) foi percebido que quando x é baixo, as propriedades da camada de barreira se aproximam das do material GaN, o que facilita a condução pela 1ª interface, e prejudica a formação dos 2DEGs. Quando x é alto, as propriedades da camada de barreira se aproximam das do material AlN, o que tende a tornar a essa camada um isolante e intensificar a formação do 2DEG na 3ª interface, reduzindo o impacto da condução pela 1ª interface. Reduzir x faz reduzir o número de elétrons disponíveis na camada AlGaIn, ao mesmo tempo que faz aumentar o número de elétrons disponíveis na camada GaN.

Ao analisar o comprimento de canal (L_g), foi constatado um natural aumento em I_{DS} para valores mais baixos de L_g . Também foi observado que quanto maior L_g , mais proeminente se torna a condução pela 1ª interface, já que acontece a redução das transcondutâncias relacionadas aos canais das 2ª e 3ª interfaces.

Através da análise dos perfis de concentração de elétrons para diferentes V_{DS} , se notou que os canais de corrente do MISHEMT sofrem com um efeito semelhante ao da modulação do comprimento do canal em MOSFETs, que causa o deslocamento da cessão dos canais para valores de V_{DS} cada vez

maiores. No MISHEMT esse efeito afeta principalmente os canais que estão fracamente formados e quase não afeta os canais fortemente formados.

Focando no impacto dos diferentes mecanismos de condução nos parâmetros DC analógicos, aumentar L_g aumenta a influência da 1ª interface (mecanismo MOS) na condução, enquanto aumentar L_{GS} & L_{GD} aumenta a influência das 2ª e 3ª interfaces (mecanismo HEMT) na condução. A condução pela 1ª interface habilita a condução por todo o volume de AlGaN, que por sua vez atenua o efeito de modulação do comprimento do canal total, já que as 2ª e 3ª interfaces estão fortemente formadas para valores mais altos de V_{GS} e não sofrem cessão de seu canal para altos valores de V_{DS} . Este comportamento acarreta em maior tensão *Early* e maior ganho intrínseco de tensão para polarização de porta mais positiva, o que é inesperado.

5.1 Publicações geradas

O trabalho gerou duas publicações em anais de congressos internacionais, como segue:

1. Canales, Bruno G.; Carmo, Genilson J.; Agopian, Paula G. D. The conduction mechanisms analysis of AlGaN/GaN MOSHEMTs with different source/drain electrode configurations. Em: 35th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2021, Campinas.
2. Canales, Bruno G.; Agopian, Paula G. D. Influence of multiple conduction channels on MISHEMT's intrinsic voltage gain. Em: 36th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2022, Minuano.

6. REFERÊNCIAS

- Ambacher, O. et al., **“Two-dimensional electron gas induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures”**, J. of Appl. Phys., vol. 85, no. 6, p. 3222-3233, mar 1999.
- Asbeck, P. M.; Yu, E. T.; Lau, S. S.; Sullivan, G. J.; Van Hove, J.; Redwing, J., **“Piezoelectric charge densities in AlGaIn/GaN HFETs”**, Electronics Letters, vol. 33, no. 14, jul. 1997.
- Brock, D. C. Moore's Law at 40. **“Understanding Moore's Law: Four decades of innovation”**. Philadelphia: Chem. Heritage Foundation, 2006. p. 67-84.
- Chang, C. T.; Hsu, T. H.; Chang, E. Y.; Chen, Y.C.; Trinh, H. D.; Chen, K. J., **“Normally-off operation AlGaIn/GaN MOS-HEMT with high threshold voltage”**, Elec. Lett., vol. 46, no. 18, set. 2010.
- Colinge, J. P. **Silicon-On-Insulator Technology: Materials to VLSI**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004; 154-159
- Deleonibus, S. et al., "CMOS devices architectures for the end of the roadmap and beyond" 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. **Proceedings**, 2006, p. 51-54.
- Deleonibus, S., **“More moore and more than moore meeting for 3D”**. Em: 30th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2015, p. 1-4.
- Farahmand et al., **“Monte Carlo Simulation of Electron Transport in the III-Nitride Wurtzite Phase Materials System: Binaries and Ternaries”**. IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, no. 3, p. 535-542 mar. 2001.
- Freedman, J. J.; Egawa, T.; Yamaoka, Y.; Yano, Y.; Ubukata, A.; Tabuchi, T.; Matsumoto, K., **“Normally-OFF Al₂O₃/AlGaIn/GaN MOS-HEMT on 8 in. Si with Low Leakage Current and High Breakdown Voltage (825 V)”**, Appl. Phys. Ex., vol. 7, pp. 3, mar. 2014.
- Ghosh, S.; Dasgupta, A.; Khandelwal, S.; Agnihotri, S.; Chauhan, Y. S., **“Surface-potentialbased compact modeling of gate current in AlGaIn/GaN HEMTs”**, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 62, no. 2, p. 443–448, fev. 2015.
- Gregušová, D.; Stoklas, R.; Cico, K.; Lalinsky, T.; Kordoš, P., **“AlGaIn/GaN metal–oxide–semiconductor heterostructure field-effect transistors with 4**

nm thick Al₂O₃ gate oxide", Semicond. Sci. Technol., vol. 22, p. 947-951, jul. 2007.

He, X. G.; Zhao, D. G.; Jiang, D. S., **"Formation of two-dimensional electron gas at AlGa_N/Ga_N"**, Chin. Phys. B, vol. 24, no. 6, abr. 2015.

Holzle, L. R. B., "Tabela periódica dos elementos químicos". Tabela periódica dos elementos químicos, 2021. Disponível em: <<https://www.tabelaperiodica.org/>>. Acesso em: 10 dez 2021.

Hu, Q.; Li, S.; Li, T.; Wang, X.; Wu, Y., **"Optimized transport properties of Ga_N MISHEMTs with thin Al_N interlayer"**, 18th International Workshop on Junction Technology (IWJT), 2018.

Joseph, A. J.; Cressler, J. D.; Richey, D. M.; Jaeger, R. C.; Hareme, D. L., **"Neutral Base Recombination and Its Influence on the Temperature Dependence of Early Voltage and Current Gain—Early Voltage Product in UHV/CVD SiGe Heterojunction Bipolar Transistors"**, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 44, no. 3, p. 404-413, mar. 1997.

Kilby, J. S., **"The electrical century: The integrated circuit's early history"**. Proc. IEEE, vol. 88, no. 1, p. 109-111, jan. 2012.

Kordoš, P. et al., **"High-power SiO₂/AlGa_N/Ga_N metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors"**, Appl. Phys. Lett., vol. 87, set. 2005.

Lachab, M.; Sultana, M.; Fareed, Q.; Husna, F.; Adivarahan, V.; Khan, A., **"Transport properties of SiO₂/AlInN/AlN/GaN metal–oxide-semiconductor high electron mobility transistors on SiC substrate"**, J. of Phys. D: Appl. Phys., vol. 47, jan. 2014.

Mao, W. et al., **"Fabrication and Characteristics of AlInN/AlN/GaN MOS-HEMTs with Ultra-Thin Atomic Layer Deposited Al₂O₃ Gate Dielectric"**, Chin. Phys. Lett., vol. 27, no. 12, ago. 2010.

Martino, A. S.; Pavanello, M. A.; Verdonck, P. B., **"Caracterização elétrica de tecnologia e dispositivos MOS"**, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

Mimura, T. et al., **"A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As Heterojunctions"**. J. Appl. Phys., vol. 19, no. 5, p. L225-L227, mai. 1980.

Mimura, T. et al., **“The Early History of the High Electron Mobility Transistor (HEMT)”**. IEEE Trans. on microwave theory and techniques, vol. 50, no. 3, mar. 2002.

Mimura, T., **“Invention of High Electron Mobility Transistor (HEMT) and contributions to information and communications field”**. Fujitsu Sci. & Tech. Journal, vol. 54, no. 5, p. 3-8, out. 2018.

Nag, B. R., **“Physics of Quantum Well Devices”**, London: Kluwer Academic Publishers, vol. 7, 2000.

Nirmal, D.; Ajayan, J., **“Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies”**. CRC Press, 14 mai. 2019.

Onsemi, Semiconductor Components Industries, LLC., **“The Difference Between GaN and SiC Transistors”**, 16 nov 2021. Disponível em: <<https://www.powerselectronicsnews.com/the-difference-between-gan-and-sic-transistors/>>. Acesso em: 8 jun 2022.

Peralagu, U. et al., **“CMOS-compatible GaN-based devices on 200mm-Si for RF applications: Integration and Performance”**, IEEE International Electron Devices Meeting, vol. 19, p. 398-401, 2019.

Touati, Z.; Hamaizia, Z.; Messai, Z., **“Design and analysis of 10 nm T-gate enhancement-mode MOS-HEMT for high power microwave applications”**, J. Sci.: Adv. Mat. Dev., vol. 4, p. 180-187, jan. 2019.

Troy, W.; Dutta, M.; Stroscio, M. **“Spontaneous Polarization Calculations in Wurtzite II-Oxides, III-Nitrides, and SiC Polytypes through Net Dipole Moments and the Effects of Nanoscale Layering”**. Nanomaterials, vol.11, no. 1956, jul. 2021a.

Troy, W.; Dutta, M.; Stroscio, M. **“Spontaneous Polarization in Nanoparticles”**. IEEE Electron Device Lett., vol.42, no. 12, dez. 2021b.

Sazawa, H. et al., **“A low-leakage and reduced currentcollapse AlGaIn/GaN heterojunction field effect transistor with AlOx gate insulator formed by metal-organic chemical vapor deposition”**, Phys. Stat. Sol., vol. 5, no. 6, p. 1986-1988, 2008.

Sedra, J. A.; A. S.; Smith, K. C., **“Microelectronic Circuits”**, Oxford: Oxford Univ. Press, Ed. 7, 2015.

Silvaco international. **ATLAS User Manual**: Device Simulation Software. Santa Clara: mar. 2007, pp. 898.

- Smith, C. M. M. et al., **“The transistor: An invention becomes a big business”**. Proc. IEEE, vol. 86, no. 1, p. 86-110, jan. 1998.
- Störmer, E. L.; Dingle, R.; Gossard, A. C.; Wiegmann, W.; Sturge, M. D., **“Two-dimensional electron gas at a semiconductor-semiconductor interface”**. Solid State Communications, vol. 29, no. 10, p. 705-709, jan. 1979.
- Tang, S. C. **“Evolution of the MOS transistor – From the conception to VLSI”**. Proc. IEEE, vol. 76, no. 10, p. 1280-1326, out. 1988.
- Terao, A. et al., **“Measurement of threshold voltages of Thin-Film Accumulation-Mode SOI MOSFETs”**, New York: IEEE Electron Device Letters, vol. 12, p. 682, 1991.
- Thakral, B.; Bakshi, G.; Kushwaha, A. K.; Manica, **“A review on SOI MOSFET and kink reduction using selective back oxide structure”** International Conference on Reliability Optimization and Information Technology (ICROIT), 2014, p. 487-490.
- Valle, J. L.; Carranza, R.; Medina, J., **“An Analytical Expression for Early Voltage Factor Useful for Hand Calculations”**, Em 7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010, p. 515-518.
- Wu, W. et al., **“ESD Failures of GaN-on-Si D-Mode AlGaN/GaN MISHEMT and HEMT Devices for 5G Telecommunications”**, 43rd Annual EOS/ESD Symposium (EOS/ESD), 2021.
- Xiu, L., **“Time Moore: Exploiting Moore's Law from the perspective of time”**. IEEE Solid-State Circuits Magazine, p. 39-55, fev. 2019.
- Ye, P. D. et al., **“GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility-transistor with atomic layer deposited Al₂O₃ as gate dielectric”**, Appl. Phys. Lett., vol. 86, pp. 3, jan. 2005.
- Yu, E. T.; Sullivan, G. J.; Asbeck, P. M.; Wang, C. D.; Qiao, D.; Lau, S. S., **“Measurement of piezoelectrically induced charge in GaN/AlGaN heterostructure fieldeffect transistors”**, Appl. Phys. Lett. vol. 71, no. 19, p. 2794-2796, nov. 1997.