

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia - Campus de Sorocaba

JOSUÉ CÂNDIDO

DEPENDÊNCIA TÉRMICA DA CORRENTE DE FUGA EM HEMTs DE AlGa_N/Ga_N
EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA DE CANAL E DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO
DE PORTA



Sorocaba

2025

JOSUÉ CÂNDIDO

DEPENDÊNCIA TÉRMICA DA CORRENTE DE FUGA EM HEMTs DE AlGaIn/GaN
EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA DE CANAL E DO PROCESSO DE METALIZAÇÃO
DE PORTA

Dissertação apresentada à Universidade
Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência
e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas eletrônicos

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Glória Caño de Andrade

Sorocaba

2025

C217d

Candido, Josué

Dependência térmica da corrente de fuga em HEMTs de AlGaIn/GaN em função da geometria do canal e do processo de metalização de porta. / Josué Candido. -- Sorocaba, 2025

117 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

1. Tunelamento (Física). 2. Diodos de barreira de schottky. 3. Heteroestruturas. 4. Diodos semicondutores. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Dependência Térmica da Corrente de Fuga em HEMTs de AlGaIn/GaN em Função da Geometria de Canal e do Processo de Metalização de Porta

AUTOR: JOSUÉ CÂNDIDO

ORIENTADORA: MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE

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

Prof.^a. Dr.^a. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Prof. Dr. RODRIGO TREVISOLI DORIA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário FEI

Prof. Dr. EVERSON MARTINS (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS

Sorocaba, 14 de novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me dar força, nos momentos difíceis da trajetória do estudo.

Aos meus pais, Gonçalo Sebastião Candido e Maria José Cardoso Candido, pela educação, amor que me propuseram.

À Lilian Helena Mathilde, da Seção de Pós-graduação, pela paciência e apoio dispensado a mim durante minhas dificuldades.

À professora Maria Glória Caño de Andrade, que me orientou me ensinou e me redarguiu, e sempre esteve ao meu lado me ajudando nas minhas limitações, e por todo acompanhamento, aumentando meu potencial de forma exponencial e acreditando em minhas capacidades.

Ao Imec, por ter recebido a Professora Maria Glória Caño de Andrade, para a realização do árduo trabalho da extração dos dados.

Ao Danilo Claudio de Godoy, pelo apoio e acompanhamento nas necessidades que vivenciei durante todo o curso.

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, pela excelência no exercício das suas funções através dos seus funcionários.

À minha esposa Katia Silene Candido e meus filhos pela motivação e apoio em todos os dias.

E em geral, a todos que de forma direta ou não contribuíram para a realização deste trabalho.

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

E à CAADI, à qual também agradeço.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços
repetidos dia após a dia.” (Robert Collier)

RESUMO

CÂNDIDO, J. Dependência térmica da corrente de fuga em HEMTs de AlGaIn/GaN em função da geometria do canal e do processo de metalização de porta. 2025.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

Este trabalho apresenta a caracterização elétrica de dispositivos HEMT baseados em heteroestruturas AlGaIn/GaN, com o objetivo de investigar os mecanismos responsáveis pela corrente de fuga na porta em diferentes condições de operação. Os dispositivos analisados foram fabricados no Centro Interuniversitário de Microeletrônica (IMEC) e apresentam variações no fluxo tecnológico de fabricação, particularmente relacionadas à metalização da porta.

A caracterização elétrica foi realizada por meio da análise das curvas de corrente de dreno em função da tensão de porta (I_D-V_G) e das curvas de corrente de porta (I_G-V_G). Adicionalmente, foram realizadas medições em diferentes temperaturas, permitindo avaliar a influência térmica nos mecanismos de condução responsáveis pela corrente de fuga.

Os resultados obtidos indicam que os dispositivos apresentam comportamento típico de transistores HEMT, com elevada capacidade de modulação da corrente de dreno pela tensão de porta. A análise da corrente de porta revelou diferenças significativas entre os dispositivos estudados, sugerindo que variações no processo de fabricação influenciam diretamente a altura da barreira de Schottky e a densidade de armadilhas presentes na interface metal–semicondutor.

A dependência térmica das curvas elétricas permitiu identificar a contribuição de diferentes mecanismos de condução. Em determinadas regiões de polarização, observou-se predominância de mecanismos termicamente ativados, como a emissão termiônica e a emissão de Poole–Frenkel. Em regimes de campo elétrico mais elevado, mecanismos de tunelamento, como o tunelamento direto e o tunelamento Fowler–Nordheim, tornam-se mais relevantes.

Os resultados obtidos contribuem para uma melhor compreensão dos mecanismos responsáveis pela corrente de fuga em dispositivos HEMT baseados em AlGaIn/GaN, fornecendo subsídios importantes para a otimização de processos de fabricação e para o desenvolvimento de dispositivos com melhor desempenho elétrico e maior confiabilidade.

Palavras–chave: AlGaIn/GaN; Transistor; Mobilidade; HEMTs.

ABSTRACT

CÂNDIDO, J. **Thermal dependence of the leakage current in AlGaIn/GaN HEMTs as a function of the channel geometry and the gate metallization process. 2025.** Master's thesis (Master in Electrical Engineering) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2025.

This work presents the electrical characterization of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs), aiming to investigate the physical mechanisms responsible for gate leakage current under different operating conditions. The analyzed devices were fabricated at the Interuniversity Microelectronics Center (IMEC) and exhibit variations in the technological process, particularly related to gate metallization.

Electrical characterization was performed through the analysis of drain current versus gate voltage (I_D – V_G) and gate current versus gate voltage (I_G – V_G) characteristics. In addition, measurements were carried out at different temperatures to evaluate the thermal dependence of the conduction mechanisms responsible for gate leakage current.

The results show that the devices exhibit typical HEMT behavior, with effective modulation of the drain current by the gate voltage. The analysis of the gate current revealed significant differences among the studied devices, indicating that variations in the fabrication process directly influence the Schottky barrier height and the density of interface traps.

Temperature-dependent measurements suggest the contribution of different conduction mechanisms. In certain bias regions, thermally activated mechanisms such as thermionic emission and Poole–Frenkel emission are dominant. At higher electric fields, tunneling mechanisms such as direct tunneling and Fowler–Nordheim tunneling become more significant.

The obtained results contribute to a better understanding of the physical mechanisms responsible for gate leakage current in AlGaIn/GaN HEMTs, providing important insights for device optimization and for the development of more reliable high-performance devices.

Keywords: AlGaIn/GaN; Transistor; Mobility; HEMTs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do número de transistores em circuitos integrados ao longo dos anos, conforme previsto pela Lei de Moore.	20
Figura 2: Estrutura de um transistor HEMT de Nitreto de Gálio-Alumínio / Nitreto de Gálio (AlGaIn/GaN).....	27
Figura 3: (A) Representação esquemática da formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG) em uma heterojunção AlGaIn/GaN. (B) Bandas de Energia de um HEMT de AlGaIn em aproximação antes do contato da heterojunção. (C) Bandas de Energia de um HEMT de AlGaIn após o contato da heterojunção.	31
Figura 4: Representação esquemática do processo de emissão termiônica em uma barreira metal-semicondutor.....	38
Figura 5: Representação esquemática do tunelamento direto em um transistor HEMT.	39
Figura 6: Representação esquemática do tunelamento Fowler–Nordheim em um transistor HEMT.	40
Figura 7: Representação esquemática da emissão de Poole–Frenkel em um transistor HEMT de AlGaIn/GaN.	41
Figura 8: Representação esquemática do tunelamento assistido termicamente em transistor HEMT de AlGaIn/GaN	42
Figura 9: (A) I_D vs. V_G , (B) g_m vs. V_G , e (C) Inclinação de Sublimiar em função de V_G para dispositivos HEMTs γ , β , α e Ω	46
Figura 10 : I_G vs. V_G for (A) $V_D = 0,5$ V, (B) $V_D = 4$ V, e (C) $V_D = 0,5$ V e 4 V a 298,15 K para dispositivos HEMTs γ , β , α , e Ω	48
Figura 11 : $I_D V_G$ em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).....	51
Figura 12 : g_m versus V_G em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).	53
Figura 13: Gráfico Linear $I_D V_G$ $V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).	57
Figura 14: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ $V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).	58
Figura 15: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ com $V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).....	62
Figura 16: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Gamma, (A) ($W = 1$ μm ; $L = 0,2$ μm), (B) ($W = 10$ μm ; $L = 0,2$ μm), (C) ($W = 1$ μm ; $L = 1$ μm) e (D) ($W = 10$ μm ; $L = 1$ μm).	65

Figura 17: Gráfico Linear $I_D V_G(C)$ ($W = 1 \mu m$; $L=1 \mu m$) e (D) ($W = 10 \mu m$; $L= 1 \mu m$). dispositivo Gamma, (A) ($W =1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W = 10 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$).....	67
Figura 18: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W =1 \mu m$; $L=0,2 \mu m$), (B) ($W =1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W =1 \mu m$; $L=1 \mu m$) e (D) ($W = 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$).	70
Figura 19: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W = 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W = 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$)...	72
Figura 20: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Alpha, (A) ($W=1 \mu m$; $L=0,2 \mu m$), (B) ($W=1 \mu m$; $L=0,2 \mu m$), (C) ($W=1 \mu m$; $L=1 \mu m$) e (D) ($W=10 \mu m$; $L=1 \mu m$).	74
Figura 21: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ dispositivo Alpha, (A) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W= 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W= 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$).....	76
Figura 22: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Ômega, (A) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W = 1 \mu m$; $L =1 \mu m$) e (D) ($W = 10 \mu m$; $L =1 \mu m$).	78
Figura 23: Gráficos logarítmicos $I_D V_G$ dispositivo Ômega, (A) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W = 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W = 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W = 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$).	81
Figura 24: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo Gamma, (A) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W= 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W= 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$)...	84
Figura 25: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W= 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W= 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$).....	87
Figura 26: Gráfico Log $I_G V_G$ dispositivo Alpha, (A) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W= 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W= 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$).	90
Figura 27: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo Ômega, (A) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (B) ($W= 1 \mu m$; $L = 0,2 \mu m$), (C) ($W= 1 \mu m$, $L = 1 \mu m$) e (D) ($W= 10 \mu m$; $L = 1 \mu m$)...	93
Figura 28: I_D versus temperatura em todos os dispositivos (γ , β , α , Ω).	96
Figura 29: I_G versus temperatura em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).	99
Figura 30: Temperatura dependente da I_D por dispositivos com (A) $L = 0.2 \mu m$ e (B) $L = 1 \mu m$	101
Figura 31: Temperatura dependente de I_G por dispositivo com (A) $L = 0.2 \mu m$ e (B) $L=1 \mu m$	103
Figura 32: I_G vs. temperatura sobre polarização de porta $V_G = -4 V$ para (A) $V_D = 0,5 V$ e (B) $V_D = 4 V$ no γ , β , α , e Ω HEMTs com $L = 0,2 \mu m$	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 :Detalhes estruturais e de processamento dos dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN (γ , β , α e Ω), incluindo a composição do metal de porta e os parâmetros de recozimento ôhmico.	45
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AsO ₂	Arseneto de fosforo e oxigênio
Al ₂ O ₃	Oxido de Alumínio
AlGaAs	Arseneto de Gálio-Alumínio
AlGaN	Nitreto de Alumínio-Gálio
ARC	Revestimento Anti-Reflexo
DC	Corrente Continua
DLTS	Espectroscopia Transientes de Níveis Profundos
DT	Tunelamento Direto
ESD	Descarga de Eletricidade Estática (Electrostatic Discharge)
FN	Fowler-Nordheim
GaAs	Arseneto de Gálio
GaN	Nitreto de Gálio
GHz	Giga Hertz
HEMT	Transistor de Alta mobilidade de Elétrons
HfO ₂	Oxido de háfnio
IMEC	Centro Interuniversitário de Microeletrônica
LNA	Amplificador de Baixos Ruídos
MIS	Semicondutor Metal Isolante (Metal-Insulator-Semiconductor)
MOCVD	Deposição de Vapor Químico Orgânico de Metal
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Oxido Metálico
PF	Emissão de Poole Frenkel
RF	Rádio Frequência
TAT	Tunelamento Assistido Termicamente
TCAD	Projeto Assistido por Computador em Tecnologia
TE	Emissão Termiônica
TiN	Nitreto de Titânio

TiPor	Titânio Poroso
UNESP	Universidade Estadual Paulista
5G	Quinta Geração

LISTA DE SÍMBOLOS

A^*	Constante de Richardson dependente do material ($A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$)
B	Contante dependente dos parâmetros físicos, como massa efetiva de elétrons e constante de Planck (V/m)
E_c	Energia da Banda de condução (eV)
E_F	Posição do nível de Fermi (eV)
E_g	Energia banda proibida do material (eV)
E_v	Energia banda de valência (eV)
ϵ	Constante dielétrica do semiconductor
ϵ_{si}	Permissividade elétrica (F/m)
g_m	Transcondutância (S)
h	Constante de Planck ($J \cdot s$)
I_D	Corrente de dreno (A)
I_G	Corrente de porta (A)
I_{Dmax}	Corrente de dreno máxima (A)
J_{DT}	Densidade de corrente por Tunelamento Direto (A/m)
J_{FN}	Densidade de corrente por Tunelamento de Fowler-Norten (A/m)
J_{PF}	Densidade de corrente por Tunelamento de Poole-Frenkel (A/m)
J_{TE}	Densidade de corrente por Tunelamento de Emissão termiônica (A/m)
K	Constante de Boltzmann (J/K)
K_F	Constante que define a intensidade do ruído 1/f em um transistor
L	Comprimento do canal do transistor (μm)
m	Massa efetiva de elétrons (kg)
n	Fator de corpo
q	Carga elementar de elétrons (C)
SS	Inclinação Sublimiar (V/dec)
T	Temperatura (Kelvin)
μ_n	Mobilidade de elétrons (cm^2/Vs)
V_D	Tensão de dreno (V)

V_G	Tensão de entrada aplicada a porta do dispositivo (V)
V_{GS}	Tensão de porta e fonte (V)
V_s	Tensão da fonte g(V)
V_{sat}	Tensão de saturação (V)
V_T	Tensão de limiar (V)
W	Largura do canal em transistor (μm)
ϕ_B	Altura da barreira de potencial (eV)
ϕ_F	Potencial de Fermi (V)
ϕ_m	Trabalho da função do metal de porta (eV)
ϕ_t	Profundidade da armadilha (eV)

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Contextualização e Histórico dos Transistores.....	19
1.2	Evolução dos Transistores e a Lei de Moore.....	19
1.3	Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons (HEMTs)	21
1.4	Estado da Arte	21
1.5	Motivação Científica	22
1.6	Objetivo do Trabalho	23
1.7	Estrutura do Trabalho	24
2	Fundamentação Teórica.....	25
2.1	Tecnologia HEMTs	25
2.1.1	Aplicações dos Transistores HEMTs.....	28
2.1.2	Heterojunção	29
2.1.3	Princípio de funcionamento	30
2.2	Parâmetros Analisados.....	32
2.2.1	Corrente de Porta (I_G).....	32
2.2.2	Corrente de Dreno (I_D).....	33
2.2.3	Transcondutância (g_m).....	34
2.2.4	Tensão de Limiar (V_T).....	35
2.2.5	Inclinação Subliminar (SS)	36
2.3	Efeitos Físicos: Mecanismos de Condução	37
2.3.1	Emissão Termiônica (TE)	38
2.3.2	Tunelamento Direto (DT).....	39
2.3.3	Tunelamento Fowler-Nordheim (FN)	39
2.3.4	Emissão Poole-Frenkel (PF).....	40
2.3.5	Tunelamento Assistido Termicamente (TAT)	41

3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
3.1	Lâminas e Dispositivos	43
3.2	Caracterização Elétrica Inicial dos Dispositivos a Ambiente.....	45
3.2.1	Desempenho dos Dispositivos HEMTs com $L=0,2\ \mu\text{m}$ ($W=1\ \mu\text{m}$)	45
3.2.2	Influência das Dimensões de Canal na Corrente de Dreno.....	49
3.2.3	Análise da Transcondutância	52
3.2.4	Análise do Gráfico I_D versus V_G Variando V_D em Todos os Dispositivos.....	54
3.2.5	Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G Variando V_D em Todos os Dispositivos.	59
3.3	Análise das Características Elétricas em Diferentes Temperaturas	63
3.3.1	Análise do gráfico Linear $I_D V_G$ no dispositivo Gamma variando W e L	63
3.3.2	Análise do Gráfico I_D-V_G do Dispositivo Beta Variando W e L	68
3.3.3	Análise do Gráfico I_D-V_G do Dispositivo Alpha Variando W e L	73
3.3.4	Análise do Gráfico I_D versus V_G do Dispositivo Ômega Variando W e L	77
3.3.5	Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Gamma Variando W e L	82
3.3.6	Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Beta Variando W e L	85
3.3.7	Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Alpha Variando W e L	87
3.3.8	Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Ômega Variando W e L	91
3.4	Análise das Características Elétricas em função da Temperatura	94
3.4.1	Análise da Corrente de Dreno (I_D) em Todos os Dispositivos	94
3.4.2	Análise da I_G em todos os dispositivos	97
3.5	Análise de temperatura dependente de I_D por dispositivo variando L	100
3.5.1	Análise de temperatura dependente de I_G por dispositivo variando L	102

3.5.2	Análise de I_G em função da temperatura variando V_D em todos os dispositivos	104
3.5.3	Discussão dos Mecanismos de Condução	106
4.	CONCLUSÕES DO TRABALHO	109
4.1	Perspectivas para Trabalhos Futuros	110
5	PUBLICAÇÕES DO AUTOR	111
5.1	Artigos publicados em congressos Internacionais	111
5.2	Artigos Publicados em Congressos Nacionais	111
	REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Histórico dos Transistores

Desde meados do século XX, os transistores desempenham papel fundamental no avanço da eletrônica moderna. Esses dispositivos semicondutores são elementos-chave em circuitos eletrônicos, sistemas digitais e chips computacionais, realizando funções de amplificação, comutação e controle de sinais elétricos. Fabricados a partir de materiais semicondutores como silício e germânio, os transistores substituíram progressivamente os tubos a vácuo, proporcionando maior eficiência, menor consumo de energia, menor dissipação térmica e maior confiabilidade operacional.

A invenção do primeiro transistor ocorreu em 1947, no Bell Telephone Laboratories, em Murray Hill (Nova Jersey), por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley, que buscavam alternativas mais compactas e eficientes aos tubos a vácuo [1]. A primeira versão funcional, o transistor de ponto de contato, foi desenvolvida por Bardeen e Brattain utilizando fios de ouro sobre um cristal de germânio. Em seguida, William Shockley aperfeiçoou o conceito ao criar o transistor de junção, composto por camadas semicondutoras do tipo P e N dispostas em estrutura colocadas umas sobre as outras [2].

O impacto dessa invenção foi imediato: em 1952, os transistores de junção começaram a ser produzidos comercialmente, e em 1954 foi lançado o primeiro rádio portátil transistorizado, o Regency TR-1 [3]. Pelo desenvolvimento do transistor, Bardeen, Brattain e Shockley receberam o Prêmio Nobel de Física em 1956 [3]. Desde então, os transistores tornaram-se a base de toda a eletrônica moderna, impulsionando o surgimento dos circuitos integrados e a era digital.

1.2 Evolução dos Transistores e a Lei de Moore

A contínua miniaturização dos transistores possibilitou um crescimento expressivo da capacidade de processamento dos circuitos integrados. Esse fenômeno foi amplamente descrito pela Lei de Moore, proposta por Gordon E. Moore, cofundador da Intel, em 1965 [3]. Moore observou que o número de transistores em um circuito integrado tendia a dobrar aproximadamente a cada dois anos, resultando em um crescimento exponencial no desempenho computacional e na eficiência energética dos dispositivos eletrônicos [2].

Inicialmente, Moore estimou um ciclo anual de duplicação, posteriormente revisado para aproximadamente 18 meses, conforme ilustrado na Figura 1. Essa previsão tornou-se uma referência estratégica para a indústria de semicondutores, orientando o desenvolvimento de novas tecnologias em áreas como computação, telecomunicações, automação, microeletrônica, inteligência artificial e sistemas embarcados.

Figura 1: Evolução do número de transistores em circuitos integrados ao longo dos anos, conforme previsto pela Lei de Moore.



Fonte: Intel Corporation [2].

A miniaturização dos dispositivos possibilitou aumento de desempenho, redução do consumo de energia e diminuição do custo por unidade de processamento. Entretanto, à medida que os transistores atingem dimensões nanométricas, surgem limitações físicas intrínsecas, como efeitos de canal curto, aumento das correntes de fuga e fenômenos de tunelamento quântico, que dificultam o controle eletrostático do dispositivo.

Apesar desses desafios, a busca por soluções inovadoras envolvendo novos materiais semicondutores e arquiteturas tridimensionais continua impulsionando o avanço tecnológico, mantendo os transistores como os principais elementos estruturais da eletrônica moderna.

1.3 Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons (HEMTs)

Os transistores de alta mobilidade de elétrons (High Electron Mobility Transistors – HEMTs) surgiram como uma alternativa de alto desempenho para aplicações que exigem operação em altas frequências, elevadas potências e condições ambientais severas [4]. Esses dispositivos são amplamente utilizados em sistemas de micro-ondas, comunicações sem fio, radares, amplificadores de baixo ruído e redes de comunicação de alta velocidade, incluindo tecnologias 5G [5].

Nas últimas décadas, os HEMTs baseados em nitreto de gálio (GaN) e em heteroestruturas AlGaN/GaN destacaram-se devido às suas propriedades superiores quando comparados aos dispositivos convencionais baseados em silício. Entre essas propriedades destacam-se a elevada mobilidade eletrônica associada ao gás bidimensional de elétrons (2DEG), a alta tensão de ruptura, a elevada densidade de potência e a excelente estabilidade térmica [6].

Essas características tornam os dispositivos AlGaN/GaN particularmente adequados para aplicações que exigem elevada eficiência energética, robustez térmica e operação em altas frequências, frequentemente na faixa de gigahertz. Embora apresentem funcionamento semelhante ao de MOSFETs de canal N, os HEMTs diferem estruturalmente por utilizarem heterojunções formadas por múltiplas camadas semicondutoras. Nesses dispositivos, a condução ocorre predominantemente no gás bidimensional de elétrons formado na interface AlGaN/GaN, sem a necessidade de dopagem convencional do canal, o que resulta em maior mobilidade eletrônica e maior velocidade de operação [7].

1.4 Estado da Arte

Nas últimas décadas, diversos estudos têm investigado o comportamento elétrico de dispositivos HEMT baseados em heteroestruturas AlGaN/GaN, com o objetivo de compreender os mecanismos físicos que governam sua operação e identificar estratégias para melhorar seu desempenho.

Um dos aspectos mais estudados na literatura refere-se à formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG) na interface AlGaN/GaN, responsável pelo canal de condução desses dispositivos.

Esse canal apresenta elevada densidade de portadores e alta mobilidade eletrônica, permitindo a condução eficiente de corrente mesmo em condições de alta frequência e alta potência [6].

Outro tema amplamente investigado refere-se aos mecanismos responsáveis pela corrente de porta em dispositivos HEMT. Diferentes mecanismos de condução podem contribuir para a corrente de fuga observada nesses dispositivos, incluindo emissão termiônica, tunelamento direto, tunelamento Fowler–Nordheim, emissão de Poole–Frenkel e tunelamento assistido por armadilhas [7].

Além disso, diversos trabalhos têm analisado a influência das dimensões geométricas do dispositivo no seu desempenho elétrico. Parâmetros como comprimento de canal (L) e largura de canal (W) podem afetar significativamente a distribuição do campo elétrico, influenciando parâmetros como corrente de dreno, transcondutância e dissipação térmica.

Outro fator relevante refere-se às condições de fabricação dos dispositivos. Variações na metalização da porta, na qualidade das interfaces e na presença de defeitos cristalinos podem alterar a altura da barreira de Schottky e a densidade de armadilhas na estrutura, impactando diretamente o comportamento da corrente de porta.

1.5 Motivação Científica

Apesar dos avanços significativos na tecnologia de dispositivos semicondutores, os transistores HEMT baseados em heteroestruturas AlGaIn/GaN ainda apresentam desafios relacionados ao seu desempenho elétrico e à confiabilidade em condições de operação severas. Entre esses desafios, destaca-se o comportamento das correntes de fuga e a influência dos efeitos térmicos no funcionamento do dispositivo, especialmente em aplicações de alta potência e altas frequências.

Em dispositivos HEMT, o aumento da densidade de potência e da temperatura de operação pode afetar diretamente parâmetros elétricos importantes, como corrente de dreno, corrente de porta, mobilidade dos portadores e transcondutância. Além disso, variações na geometria do dispositivo, como o comprimento e a largura do canal, podem influenciar significativamente a distribuição de campo elétrico e os mecanismos de condução predominantes.

Outro aspecto relevante está relacionado aos processos tecnológicos utilizados na fabricação desses dispositivos. Diferenças na metalização da porta, na qualidade das interfaces semicondutoras e na presença de defeitos cristalinos podem modificar a altura da barreira de Schottky e a densidade de armadilhas presentes na estrutura, influenciando diretamente os mecanismos responsáveis pela corrente de fuga [6, 7].

Dessa forma, a compreensão detalhada do comportamento elétrico e térmico de dispositivos HEMT torna-se fundamental para o desenvolvimento de tecnologias semicondutoras mais eficientes e confiáveis. Estudos experimentais que investiguem a influência de parâmetros geométricos, térmicos e tecnológicos no desempenho desses dispositivos são essenciais para aprimorar modelos físicos e orientar o projeto de dispositivos de próxima geração.

Nesse contexto, a análise experimental de dispositivos HEMT fabricados em centros de pesquisa avançados, como o Centro Interuniversitário de Microeletrônica (Imec), torna possível obter informações relevantes sobre o comportamento real desses dispositivos e sobre os mecanismos físicos que governam sua operação. Assim, este trabalho busca contribuir para o entendimento do comportamento elétrico e térmico de transistores HEMT baseados em AlGaIn/GaN, investigando a influência das dimensões de canal e das condições de fabricação sobre o desempenho dos dispositivos. Espera-se que os resultados obtidos possam auxiliar no desenvolvimento de dispositivos com melhor desempenho elétrico, maior eficiência energética e maior confiabilidade para aplicações em eletrônica de potência e sistemas de alta frequência.

1.6 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho térmico de transistores HEMTs baseados em heteroestruturas AlGaIn/GaN, com foco na análise da influência das dimensões do canal e das condições de fabricação sobre o comportamento elétrico dos dispositivos.

A análise será realizada com base em dados experimentais obtidos no Centro Interuniversitário de Microeletrônica (Imec), localizado na cidade de Leuven, Bélgica, instituição reconhecida internacionalmente por suas pesquisas avançadas na área de microeletrônica e tecnologias semicondutoras.

O estudo aborda aspectos relacionados à estrutura e ao princípio de funcionamento dos HEMTs de AlGaIn/GaN, à influência das variações dimensionais do canal sobre o comportamento elétrico e térmico dos dispositivos e ao impacto dos parâmetros de fabricação no desempenho observado. Dessa forma, pretende-se fornecer subsídios técnicos para o desenvolvimento de dispositivos semicondutores mais eficientes e confiáveis.

1.7 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em quatro capítulos, além desta introdução e das referências bibliográficas, conforme descrito a seguir.

O **Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica** apresenta os conceitos essenciais para a compreensão do comportamento elétrico dos transistores HEMT de AlGaIn/GaN. São discutidos a estrutura e o princípio de funcionamento desses dispositivos, a formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG), os principais mecanismos de condução de corrente e os fenômenos térmicos que influenciam o desempenho elétrico.

O **Capítulo 3 – Resultados e Discussões** apresenta os resultados experimentais obtidos a partir das medições elétricas realizadas em dispositivos AlGaIn/GaN fabricados no Centro Interuniversitário de Microeletrônica (Imec). São analisadas as curvas de corrente de dreno (I_D) e corrente de porta (I_G) em função da tensão para diferentes temperaturas, larguras de canal (W) e comprimentos de canal (L), além da variação da transcondutância (g_m). Também são discutidos os mecanismos de condução dominantes e a influência dos processos de fabricação e da metalização da porta.

Por fim, o **Capítulo 4 – Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros** apresenta as principais conclusões obtidas a partir das análises realizadas, bem como sugestões de continuidade do estudo, incluindo investigações em faixas de temperatura mais amplas, novas metalizações de porta e aprimoramentos em modelos analíticos e numéricos para a descrição do comportamento dos dispositivos.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons (High Electron Mobility (Transistors HEMTs), com ênfase nos dispositivos baseados na heteroestrutura AlGaIn/GaN utilizados nesta pesquisa. Inicialmente, são discutidos os fundamentos físicos dessa tecnologia, sua estrutura e seu princípio de funcionamento. Em seguida, são abordadas suas principais aplicações e os parâmetros elétricos mais relevantes para a caracterização do dispositivo. Por fim, são descritos os principais mecanismos físicos associados à corrente de fuga de porta, os quais são essenciais para a interpretação dos resultados experimentais discutidos nos capítulos posteriores.

2.1 Tecnologia HEMTs

O Transistor de Alta Mobilidade de Elétrons (HEMT) é um dispositivo semicondutor amplamente utilizado em aplicações de alta frequência e alta potência, como sistemas de comunicação sem fio, radares, satélites e redes celulares [5]. Seu destaque decorre da elevada mobilidade eletrônica no canal de condução, o que possibilita altas velocidades de operação, elevada densidade de corrente e bom desempenho em condições severas de campo elétrico e temperatura.

A origem conceitual do HEMT remonta a 1963, quando foi proposta a utilização de uma heterojunção entre semicondutores com diferentes larguras de banda proibida para favorecer o transporte de elétrons em alta velocidade [5]. Entretanto, a consolidação do conceito moderno desses dispositivos ocorreu somente a partir da década de 1970, impulsionada pelo avanço dos estudos com semicondutores compostos, como o arseneto de gálio (GaAs) e o arseneto de alumínio e gálio (AlGaAs) [6].

Em 1980, Takashi Mimura, da Fujitsu Laboratories, desenvolveu o primeiro HEMT funcional com base na heteroestrutura GaAs/AlGaAs [7]. Essa arquitetura permitiu obter mobilidade eletrônica significativamente superior à observada em transistores convencionais, resultando em frequências de operação mais elevadas.

Desde então, os HEMTs passaram por contínuo aprimoramento, motivado pelos avanços nos materiais semicondutores, nas técnicas de crescimento epitaxial e

nos processos de fabricação em escala nanométrica. A introdução de materiais de banda larga, como o nitreto de gálio (GaN), ampliou ainda mais o potencial desses dispositivos, permitindo operação em frequências mais altas, maior robustez elétrica e melhor eficiência energética [6].

Atualmente, os HEMTs desempenham papel central em aplicações de radiofrequência, telecomunicações, sistemas aeroespaciais e equipamentos militares [7]. Entre as diferentes tecnologias disponíveis, os HEMTs baseados na heteroestrutura AlGaIn/GaN destacam-se por sua capacidade de operar em condições extremas, combinando alta potência, alta frequência e estabilidade térmica.

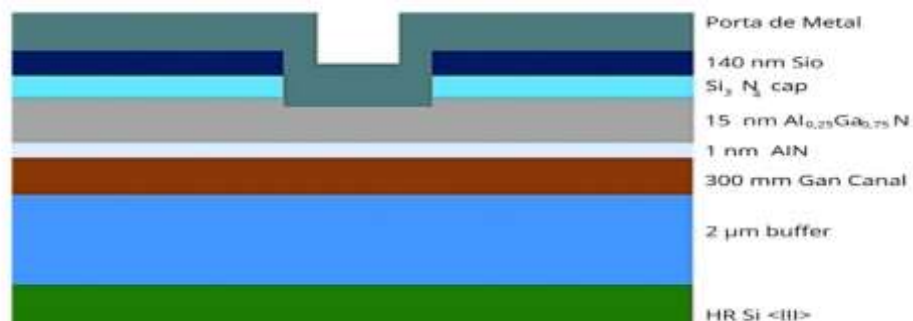
A principal vantagem da heteroestrutura AlGaIn/GaN está na formação de um gás bidimensional de elétrons (two-dimensional electron gas – 2DEG) na interface entre os materiais. Esse canal eletrônico apresenta alta densidade de portadores e elevada mobilidade, sendo responsável pela baixa resistência de condução e pelo excelente desempenho dinâmico do dispositivo.

Diferentemente de transistores convencionais, nos quais a condução depende fortemente da dopagem, nos HEMTs AlGaIn/GaN o canal é formado predominantemente em razão dos efeitos de polarização espontânea e piezoelétrica, característicos dos nitretos do grupo III. Como consequência, a condução pode ocorrer sem necessidade de dopagem intencional do canal, reduzindo o espalhamento por impurezas ionizadas e favorecendo o transporte eletrônico em altas frequências.

O GaN é um material de banda proibida larga, com valor em torno de 3,4 eV, elevada rigidez dielétrica e boa condutividade térmica. Essas propriedades tornam os HEMTs de GaN adequados para operação sob altas tensões, elevadas temperaturas e intensos campos elétricos. Além disso, esses dispositivos apresentam comutação rápida e baixas perdas, superando, em diversas aplicações, dispositivos baseados em silício e, em alguns casos, em carbeto de silício.

Embora o custo de fabricação ainda seja um fator limitante, o avanço das técnicas de crescimento epitaxial por MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) e o uso de substratos de silício de alta resistividade têm contribuído para a redução desses custos e para a expansão do uso da tecnologia. A estrutura esquemática do dispositivo estudado é apresentada na Figura 2.

Figura 2: Estrutura de um transistor HEMT de Nitreto de Gálio-Alumínio / Nitreto de Gálio (AlGaN/GaN).



Fonte: Autor.

A Figura 2 apresenta a seção transversal de um transistor HEMT baseado na tecnologia AlGaN/GaN fabricado sobre substrato de silício de alta resistividade (HR-Si). Cada camada representada corresponde a uma região com função específica no desempenho elétrico e estrutural do dispositivo.

A porta metálica constitui o eletrodo responsável pelo controle eletrostático do canal 2DEG. Essa região é formada após a abertura do óxido, de modo a estabelecer contato com a região ativa do dispositivo e modular a densidade de elétrons no canal.

A camada de 140 nm de SiO₂ atua como dielétrico de isolamento relativamente espesso, contribuindo para a redução de correntes parasitas, para o isolamento elétrico lateral e para a proteção mecânica da estrutura. Em conjunto com a camada de SiN, essa região também participa da passivação do dispositivo.

A camada de Si₃N₄ corresponde à camada de passivação de nitreto de silício, cuja função é reduzir os efeitos de armadilhas superficiais, minimizar colapso de corrente e melhorar a estabilidade da tensão de limiar, o que é particularmente importante em aplicações de radiofrequência e potência.

A camada de 15 nm de Al_{0,25}Ga_{0,75}N constitui a barreira do dispositivo. Trata-se de uma região crítica, pois é responsável pela indução do 2DEG devido aos fortes efeitos de polarização. A fração molar de alumínio influencia diretamente a densidade de elétrons do canal, a tensão de limiar e a resistência em folha, sendo essa camada usualmente não dopada.

A camada interfacial de 1 nm, localizada entre o AlGaIn e o GaN, contribui para a melhoria da qualidade da interface e para o confinamento eletrônico, podendo também reduzir o espalhamento de portadores associado à rugosidade interfacial.

A camada de 300 nm de GaN corresponde à região do canal onde o 2DEG é formado. Essa camada apresenta elevada mobilidade eletrônica e suporta alta densidade de corrente, sendo a principal região ativa de condução do dispositivo.

A camada de 2 μ m de GaN buffer atua como região de acomodação das tensões mecânicas entre o GaN e o substrato de silício, reduzindo deslocamentos cristalinas e minimizando a corrente de fuga em direção ao substrato. Essa camada é fundamental para aplicações de alta potência.

Por fim, o substrato HR-Si <111>; é composto de silício de alta resistividade com orientação cristalográfica <111>, sendo empregado devido às menores perdas dielétricas em aplicações de radiofrequência e ao potencial de redução de custo em comparação com outros substratos.

2.1.1 Aplicações dos Transistores HEMTs.

Os transistores HEMTs são amplamente empregados em diferentes áreas tecnológicas devido à sua elevada frequência de operação, alta eficiência e robustez térmica [8].

Na comunicação sem fio, são utilizados em sistemas de telefonia celular, redes Wi-Fi, enlaces de micro-ondas e comunicações via satélite. Nesses sistemas, são aplicados em amplificadores de baixo ruído, amplificadores de potência e chaves de alta frequência, contribuindo para maior eficiência, estabilidade e qualidade do sinal [8].

Em radares e sistemas de sensoriamento remoto, os HEMTs são empregados em módulos de transmissão e recepção, incluindo radares meteorológicos, de vigilância e de navegação, além de sistemas de observação por satélite e sensores ambientais. Nessas aplicações, destacam-se pela sensibilidade, estabilidade e capacidade de operação sob condições severas [9].

Nos setores espacial e de defesa, os HEMTs são utilizados em sistemas de comunicação embarcada, equipamentos de navegação, radares de alta resolução e sistemas de guerra eletrônica. Sua robustez elétrica e térmica torna essa tecnologia especialmente apropriada para missões críticas [10].

Em sistemas ópticos, os HEMTs podem ser empregados em circuitos de alta velocidade associados a fotodetectores e amplificadores ópticos, possibilitando o tratamento de sinais de baixa intensidade com reduzida degradação [11].

Na eletrônica de potência, os HEMTs de GaN vêm sendo explorados em conversores de alta eficiência, inversores e sistemas de transmissão sem fio de energia, apresentando vantagens importantes em relação aos dispositivos convencionais de silício. A combinação entre alta velocidade de comutação e baixa perda de condução torna possível a implementação de sistemas mais compactos e eficientes [12]. Dessa forma, os HEMTs AlGaN/GaN consolidam-se como uma tecnologia estratégica em aplicações que exigem elevado desempenho, confiabilidade e eficiência energética.

2.1.2 Heterojunção

As heterojunções formadas entre AlGaN e GaN são essenciais para o funcionamento dos HEMTs, pois viabilizam a formação de um canal bidimensional de elétrons (2DEG) na interface entre esses materiais [13]. Essa região de alta densidade eletrônica é responsável pela condução de corrente com elevada mobilidade, característica que distingue os HEMTs de outros dispositivos semicondutores.

A formação do 2DEG decorre da combinação entre a descontinuidade de banda na interface AlGaN/GaN e os intensos efeitos de polarização espontânea e piezoelétrica presentes nesses materiais.

Esses efeitos induzem o aparecimento de cargas de polarização que geram um campo elétrico interno, levando ao acúmulo e confinamento de elétrons na interface. Como esses elétrons permanecem espacialmente separados de impurezas ionizadas, a mobilidade resultante tende a ser elevada [14].

A condução no 2DEG ocorre, portanto, em um canal extremamente fino e com reduzido espalhamento por impurezas, o que favorece altas densidades de corrente, baixa resistência de condução e menor ruído eletrônico [15]. Além disso, a ampla banda proibida do GaN, associada à elevada rigidez dielétrica e à boa condutividade térmica, permite que essas heteroestruturas sejam empregadas em aplicações de alta potência e alta temperatura [16].

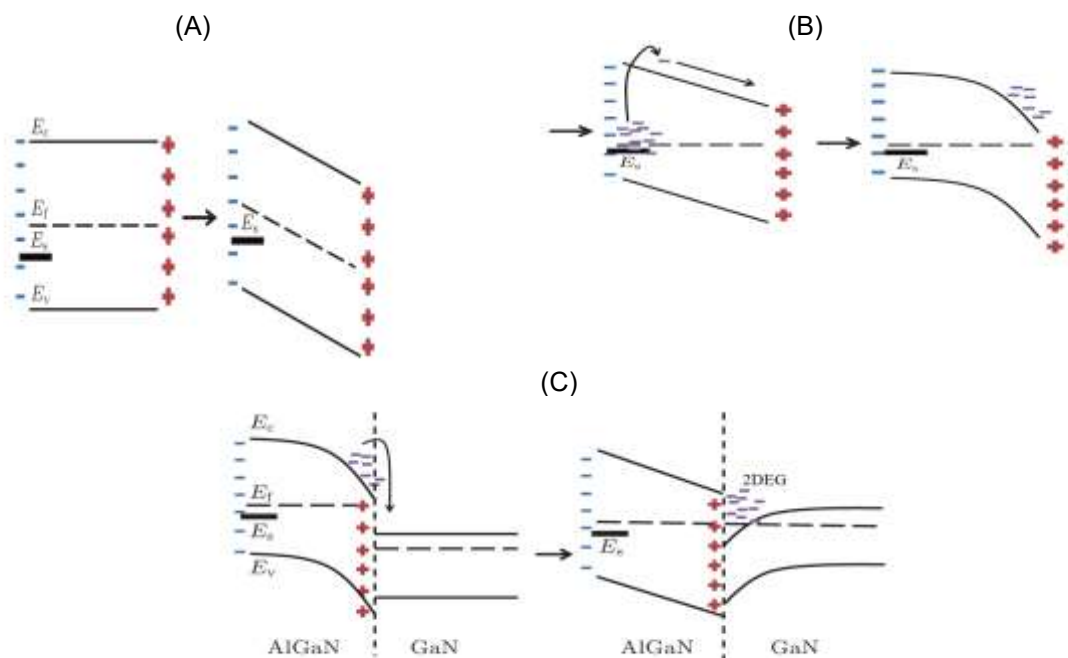
2.1.3 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do transistor HEMT baseia-se na modulação da densidade de elétrons do canal 2DEG por meio da tensão aplicada à porta. A heteroestrutura semicondutora cria um poço de potencial na interface AlGaIn/GaN, no qual os elétrons ficam confinados, formando o canal condutor [17].

A estrutura típica de um HEMT é composta por camadas semicondutoras com diferentes larguras de banda proibida. O material da barreira, normalmente o AlGaIn, possui banda proibida maior que a do GaN. Essa diferença, em conjunto com os efeitos de polarização, provoca a curvatura das bandas e a formação de um poço de potencial triangular no lado do GaN, no qual os elétrons se acumulam, originando o 2DEG [18].

As Figuras 3(A), 3(B) e 3(C) ilustram o processo de formação do canal eletrônico bidimensional na heterojunção AlGaIn/GaN.

Figura 3: (A) Representação esquemática da formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG) em uma heterojunção AlGaIn/GaN. (B) Bandas de Energia de um HEMT de AlGaIn em aproximação antes do contato da heterojunção. (C) Bandas de Energia de um HEMT de AlGaIn após o contato da heterojunção.



Fonte: Elprocus.

A Figura 3(A) representa as camadas de AlGaIn e GaN antes do contato, quando os níveis de energia ainda não se encontram alinhados. Nessa condição, existe tendência de redistribuição eletrônica em direção ao material energeticamente mais favorável.

A Figura 3(B) mostra a aproximação das bandas antes da formação da heterojunção. Nessa etapa, começa a ocorrer curvatura das bandas em razão da diferença de energia e dos efeitos de polarização entre AlGaIn e GaN.

A Figura 3(C) representa a situação após a formação da heterojunção, quando os níveis de Fermi se alinham. Como consequência, a banda de condução sofre curvatura acentuada na região do GaN, formando um poço quântico triangular. Os elétrons acumulados nesse poço constituem o 2DEG, responsável pela elevada mobilidade característica do HEMT.

A tensão aplicada à porta, V_G , controla a densidade de elétrons nesse canal. Quando a tensão de porta é suficientemente negativa, o canal é depletado e a corrente de dreno é reduzida até o regime de corte. À medida que V_G se torna menos negativa, ou mais positiva, dependendo da estrutura do dispositivo, a densidade de elétrons do canal aumenta, permitindo o fluxo de corrente entre fonte e dreno [19].

Uma das principais vantagens dos HEMTs reside no fato de o canal de condução não depender de dopagem convencional, o que reduz o espalhamento por impurezas ionizadas e possibilita mobilidade eletrônica elevada. Além disso, a elevada velocidade de saturação dos elétrons no GaN, associada à baixa resistência série, favorece altos valores de transcondutância e excelente desempenho em micro-ondas e radiofrequência [20, 21].

Assim, o funcionamento do HEMT combina os princípios dos transistores de efeito de campo com as vantagens físicas das heteroestruturas semicondutoras, resultando em dispositivos de alta velocidade, elevada eficiência e boa estabilidade térmica.

2.2 Parâmetros Analisados

2.2.1 Corrente de Porta (I_G)

Apesar das vantagens oferecidas pelos HEMTs de AlGaIn/GaN, a corrente de fuga no terminal de porta (I_G) ainda constitui um dos principais desafios tecnológicos, uma vez que podem degradar o desempenho do dispositivo, aumentar o consumo de potência e comprometer sua confiabilidade em longo prazo [6,7].

O comportamento de I_G é fortemente influenciado pelo metal de porta empregado, pela função trabalho associada, pelas condições de processamento e pela qualidade da interface metal/barreira. Essas variáveis podem modificar a altura da barreira Schottky, a densidade de defeitos e os caminhos preferenciais de condução da corrente [13–15].

Dependendo da temperatura, do campo elétrico aplicado e da densidade de armadilhas, diferentes mecanismos físicos podem contribuir para a corrente de porta, entre eles a emissão termiônica (TE), o tunelamento direto (DT), o tunelamento de Fowler–Nordheim (FN), a emissão de Poole–Frenkel (PF) e o tunelamento assistido termicamente (TAT) [16–19].

O mecanismo predominante pode variar conforme a polarização e a temperatura, sendo necessária a correlação entre resultados experimentais e modelos teóricos para sua identificação.

Estudos anteriores mostram que técnicas de processamento, como passivação com grafeno fluorado ou recozimento da porta, podem alterar significativamente o mecanismo dominante de fuga, por modificarem o perfil de armadilhas e as propriedades interfaciais [20–22]. Em determinadas condições, os mecanismos TE e PF tendem a predominar sob polarização reversa, enquanto o mecanismo FN pode ser limitado quando o campo elétrico na barreira não é suficientemente intenso [16].

Além disso, o recozimento da porta pode reduzir a corrente de fuga e melhorar o desempenho em corrente contínua e radiofrequência [21,22].

Neste trabalho, investiga-se a influência de diferentes metais de porta sobre as características de fuga em HEMTs AlGaIn/GaN, com ênfase no comportamento térmico e na identificação dos mecanismos de condução dominantes. A corrente de porta pode ser descrita por [23].

$$I_G = I_S \left(e^{\frac{qV_{GS}}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Sendo: I_S a corrente de saturação da junção; V_{GS} a tensão entre porta e fonte; q a carga do elétron; n o fator de idealidade (tipicamente entre 1 e 2); k a constante de Boltzmann; T a temperatura absoluta (Kelvin).

2.2.2 Corrente de Dreno (I_D)

A corrente de dreno (I_D) é um dos parâmetros centrais na análise dos HEMTs, pois representa a corrente elétrica que flui entre os terminais de dreno e fonte. Nos dispositivos AlGaIn/GaN, essa corrente é controlada pela tensão aplicada à porta, de modo análogo ao observado em outros transistores de efeito de campo, porém com mecanismos físicos específicos associados à formação do 2DEG.

Os HEMTs baseados em heteroestruturas AlGaIn/GaN exploram os efeitos de polarização espontânea e piezoelétrica na interface entre os materiais, promovendo o acúmulo de elétrons altamente móveis em uma região extremamente fina [24].

Esse canal bidimensional apresenta baixa resistência, permitindo transporte eficiente de portadores e correntes de dreno elevadas.

A corrente de dreno é fortemente dependente da tensão de porta. Quando a polarização de porta favorece a presença do 2DEG, o canal permanece disponível para condução, permitindo o fluxo de elétrons entre dreno e fonte. Com a elevação da tensão, a corrente cresce até atingir a condição de saturação. Em razão das propriedades do GaN e da elevada densidade do 2DEG, os HEMTs podem manter altos níveis de corrente mesmo sob condições extremas de temperatura e campo elétrico.

A seguir é apresentada a equação (2) da corrente de dreno em função da densidade eletrônica do canal pode ser expressa pela equação 2 [25].

$$I_D = q \cdot n_s \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \cdot V_{DS} \quad (2)$$

Sendo: I_D a corrente de dreno; μ_n a mobilidade dos elétrons no canal; n_s a densidade de elétrons no canal; W a largura do canal; L o comprimento do canal; V_{DS} a tensão dreno e fonte.

2.2.3 Transcondutância (g_m)

A transcondutância (g_m) é um dos parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho elétrico de HEMTs, pois está diretamente relacionada ao ganho do transistor. Ela é definida como a taxa de variação da corrente de dreno em relação à tensão de porta, sob tensão de dreno constante, refletindo a eficiência com que o dispositivo converte variações de tensão de entrada em variações de corrente de saída.

O valor de g_m depende de diversos parâmetros físicos e geométricos, como a mobilidade dos portadores, a densidade eletrônica do canal, a largura e o comprimento da porta, além do acoplamento eletrostático entre a porta e o 2DEG [26]. Em HEMTs AlGaIn/GaN, a elevada densidade e mobilidade do 2DEG favorecem valores expressivos de transcondutância, frequentemente superiores aos observados em transistores MOS convencionais [27].

A equação 3 simplificada para g_m é dada por [38];

$$g_m = q \cdot n_s \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \quad (3)$$

em que q é a carga do elétron, n_s é a densidade de elétrons na camada 2DEG, μ_n é a mobilidade dos elétrons, W é a largura do canal e L é o comprimento do canal.

A transcondutância está diretamente associada à capacidade do dispositivo de operar com elevado ganho, alta velocidade e bom controle de corrente, sendo, portanto, um parâmetro-chave em aplicações analógicas, de potência e radiofrequência [28].

2.2.4 Tensão de Limiar (V_T)

A tensão de limiar (V_T) é um parâmetro fundamental na caracterização dos HEMTs, pois define a condição na qual o canal passa a conduzir corrente de maneira significativa. Em termos físicos, corresponde ao valor da tensão de porta necessário para controlar a densidade do 2DEG e estabelecer a condição de condução entre fonte e dreno [29].

Nos HEMTs convencionais de AlGaIn/GaN, a presença do 2DEG em repouso faz com que o dispositivo apresente comportamento normalmente ligado (normally-on), característico de dispositivos do tipo depleção. Nessa condição, é necessária a aplicação de uma tensão negativa na porta para reduzir a densidade de elétrons do canal e interromper a condução [30].

Diversas estratégias têm sido investigadas para deslocar V_T em direção a valores positivos, viabilizando dispositivos normalmente desligados (normally-off), mais adequados para aplicações de potência. Entre essas estratégias, destacam-se a redução da espessura da barreira de AlGaIn, a utilização de estruturas MIS-HEMT, a inserção de p-GaN sob a porta e a remoção parcial da barreira [31–32]. Essas abordagens modificam o campo elétrico local e a densidade de portadores na interface, alterando a condição de formação do canal.

A tensão de limiar também é influenciada pela temperatura e pela presença de armadilhas interfaciais, as quais podem induzir deslocamentos temporários ou permanentes de durante a operação [33]. Por esse motivo, o controle desse parâmetro é essencial para garantir estabilidade, segurança operacional e confiabilidade [34].

A tensão de limiar pode ser expressa na equação 4 [35],

$$V_T = \phi_m - \chi - \frac{E_g}{q} - \Delta E_c - \frac{qn_s d}{\varepsilon} \quad (4)$$

em que ϕ_m é a função trabalho do metal de porta, χ é a afinidade eletrônica do semicondutor, E_g é a banda proibida do material do canal, ΔE_c é o desnível de banda de condução entre AlGaIn e GaN, n_s é a densidade de carga do 2DEG, d é a espessura da barreira e ε é a permissividade elétrica efetiva da barreira.

2.2.5 Inclinação Subliminar (SS)

A inclinação de subliminar (SS) é um parâmetro essencial para avaliar a eficiência do controle eletrostático da porta sobre o canal, especialmente na região abaixo da tensão de limiar [36]. Esse parâmetro indica a variação necessária na tensão de porta para que a corrente de dreno aumente em uma década, sendo, portanto, uma medida da abruptidade da transição entre os regimes de corte e condução.

Valores menores de SS indicam melhor acoplamento eletrostático entre porta e canal, favorecendo comutação mais rápida e menor dissipação dinâmica [37]. Em contrapartida, valores elevados de SS podem indicar maior influência de armadilhas interfaciais, defeitos estruturais ou deficiência no controle eletrostático.

Nos HEMTs AlGaIn/GaN, a inclinação de subliminar é influenciada pela espessura e pela composição da barreira, pela qualidade do dielétrico de porta e pela densidade de defeitos e armadilhas na superfície e na interface AlGaIn/GaN [38]. Além disso, a temperatura exerce influência direta sobre esse parâmetro, pois a ativação térmica de armadilhas e a redistribuição de cargas tendem a degradar o valor de com a elevação da temperatura [39].

Assim, a análise da inclinação de sublimiar fornece informações importantes sobre a qualidade da interface, a densidade de armadilhas e a estabilidade operacional do dispositivo [40]. Sua expressão é dada na equação 5 [41],

$$SS = \frac{kT}{q} \ln(10) \cdot \left(1 + \frac{C_{it} + C_{ch}}{C_g}\right) \quad (5)$$

em que C_{it} é a capacitância associada aos estados de interface, C_{ch} é a capacitância do canal e C_g é a capacitância total da porta.

2.3 Efeitos Físicos: Mecanismos de Condução

Nos transistores HEMTs baseados na heteroestrutura AlGaIn/GaN, a corrente de fuga na porta (I_G) resulta da combinação de diferentes mecanismos físicos, fortemente influenciados pelo campo elétrico, pela temperatura e pelas propriedades da barreira de potencial entre os materiais. Essa corrente indesejada pode comprometer o desempenho elétrico e a confiabilidade do dispositivo [33].

Diversos mecanismos de condução podem contribuir para essa corrente. Entre eles, destaca-se o tunelamento direto (DT), no qual elétrons atravessam a barreira de potencial por efeito quântico, mesmo sem energia suficiente para superá-la. Sob campos elétricos elevados, o tunelamento de Fowler–Nordheim (FN) torna-se predominante [35].

Além disso, a emissão termiônica (TE) ocorre quando os elétrons adquirem energia térmica suficiente para vencer a barreira de potencial. A emissão de Poole–Frenkel (PF), por sua vez, está associada à liberação de elétrons aprisionados em armadilhas, sendo dependente tanto da temperatura quanto do campo elétrico. Já o tunelamento assistido termicamente (TAT) combina efeitos térmicos e quânticos, permitindo a condução via estados intermediários de energia.

A identificação do mecanismo dominante depende das condições de operação, como polarização e temperatura, bem como da estrutura do dispositivo. Dessa forma, a compreensão desses fenômenos é essencial para a otimização dos HEMTs, visando à redução da corrente de fuga e ao aumento da confiabilidade.

2.3.1 Emissão Termiônica (TE)

A emissão termiônica é um mecanismo de transporte no qual elétrons adquirem energia térmica suficiente para superar a barreira de potencial presente em uma interface metal-semicondutor ou semicondutor-semicondutor [34]. Esse processo é descrito pela lei de Richardson–Dushman, dada pela equação (6) [42],

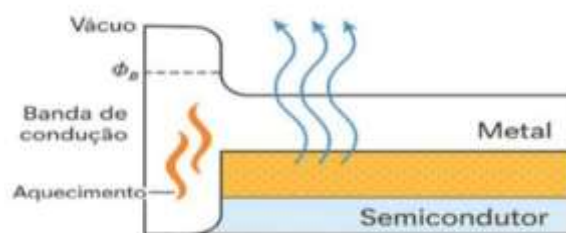
$$J_{TE} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{KT}\right) \quad (6)$$

onde J_{TE} é a densidade de corrente por emissão termiônica, A^* é a constante de Richardson dependente do material, T é a temperatura absoluta, q é a carga elementar, ϕ_B é a altura da barreira de potencial e k é a constante de Boltzmann.

A equação indica que a densidade de corrente aumenta exponencialmente com a temperatura, refletindo a elevação do número de elétrons capazes de superar a barreira. Assim, esse mecanismo torna-se dominante em condições de alta temperatura.

Nos dispositivos semicondutores, a emissão termiônica é particularmente relevante em contatos Schottky, onde contribui significativamente para o transporte de carga em determinadas condições de polarização [37]. Diferentemente dos mecanismos de tunelamento, a emissão termiônica é predominantemente térmica, sendo pouco sensível ao campo elétrico. A Figura 4 ilustra o processo de emissão termiônica. A elevação da temperatura fornece energia aos elétrons, permitindo que superem a barreira de potencial ϕ_B e se desloquem para a região metálica.

Figura 4: Representação esquemática do processo de emissão termiônica em uma barreira metal-semicondutor.



Fonte: Autor

2.3.2 Tunelamento Direto (DT)

O tunelamento direto é um fenômeno quântico no qual elétrons atravessam uma barreira de potencial estreita sem a necessidade de energia térmica adicional. Esse mecanismo é típico de dispositivos com barreiras finas e torna-se relevante em escalas nanométricas [38].

A densidade de corrente associada ao tunelamento direto pode ser descrita pela equação (7) [43].

$$J_{DT} = AE^2 \exp\left(\frac{4\sqrt{2}m^*}{3\hbar qE} \phi^{3/2}\right) \quad (7)$$

Sendo que J_{DT} é a densidade de corrente de tunelamento, A^* é a constante de Richardson; E é o campo elétrico na barreira, m^* é a massa efetiva do portador, $\hbar$ é a constante de Planck reduzida, q é a carga eletrônica e ϕ é a altura da barreira.

A Figura 5 demonstra o mecanismo de tunelamento direto, onde elétrons atravessam a barreira do AlGaIn diretamente em direção ao canal de GaN. Esse mecanismo torna-se mais significativo com a redução da espessura da barreira, sendo particularmente relevante em dispositivos altamente escalados.

Embora contribua para correntes de fuga indesejadas, o tunelamento direto também pode ser explorado na engenharia de dispositivos, permitindo otimizações na velocidade de operação e no desempenho geral [44].

Figura 5: Representação esquemática do tunelamento direto em um transistor HEMT.

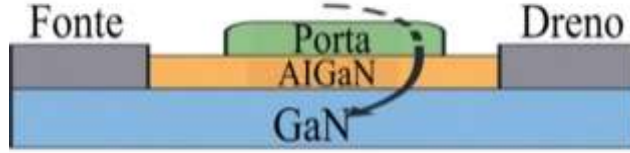


Fonte: Autor.

2.3.3 Tunelamento Fowler-Nordheim (FN)

O tunelamento de Fowler–Nordheim ocorre sob campos elétricos intensos, quando a barreira de potencial se torna suficientemente estreita e triangular para permitir tunelamento eletrônico [33]. A Figura 6 ilustra esse mecanismo.

Figura 6: Representação esquemática do tunelamento Fowler–Nordheim em um transistor HEMT.



Fonte: Autor.

A densidade de corrente pode ser expressa pela equação 8,

$$J_{FN} \propto \frac{E^2}{\phi_B} \exp\left(-\frac{B \cdot \phi_B^{3/2}}{E}\right) \quad (8)$$

sendo que J_{FN} representa a densidade de corrente de tunelamento, E é o campo elétrico aplicado, Φ_B é a altura da barreira de potencial e B é uma constante que depende de parâmetros físicos como a massa efetiva do elétron e a constante de Planck [41]. Esse mecanismo é típico de condições de alta polarização reversa, sendo uma importante fonte de corrente de fuga em HEMTs operando em altas tensões [43]. Apesar de indesejado, seu controle pode ser obtido por meio da engenharia de materiais e da otimização da estrutura do dispositivo. [42, 43].

2.3.4 Emissão Poole-Frenkel (PF)

A emissão de Poole–Frenkel está associada à liberação térmica de elétrons aprisionados em armadilhas, processo facilitado pela presença de campo elétrico [41]. Esse campo reduz a barreira coulombiana em torno da armadilha, aumentando a probabilidade de emissão para a banda de condução.

A densidade de corrente correspondente pode ser expressa por [46].

$$J_{PF} = J_0 \exp\left(-\frac{q(\Phi_t - \beta\sqrt{E})}{kT}\right) \quad (9)$$

sendo que Φ_t representa a profundidade da armadilha (energia necessária para liberar o elétron), β é o coeficiente de Poole–Frenkel, E é o campo elétrico aplicado, q é a carga do elétron, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta. A equação demonstra que o aumento do campo elétrico reduz a barreira de potencial efetiva, o que intensifica a emissão de elétrons e, portanto, a corrente de fuga.

A Figura 7 mostra a liberação de elétrons previamente aprisionados em armadilhas na presença de temperatura e campo elétrico, contribuindo para a corrente de fuga. Esse mecanismo é particularmente importante em estruturas MIS-HEMT ou em dispositivos com maior densidade de defeitos em dielétricos e interfaces [42,47,48].

Figura 7: Representação esquemática da emissão de Poole–Frenkel em um transistor HEMT de AlGaIn/GaN.



Fonte: Autor.

2.3.5 Tunelamento Assistido Termicamente (TAT)

O tunelamento assistido termicamente é um mecanismo intermediário entre a emissão termiônica e o tunelamento direto. Nesse caso, os elétrons recebem energia térmica suficiente para alcançar estados intermediários associados a armadilhas e, a partir deles, atravessam a barreira por tunelamento [47].

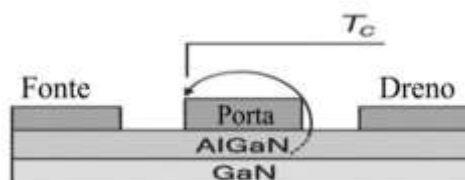
Esse processo torna-se relevante em temperaturas moderadas e em dispositivos que apresentam defeitos ou estados localizados no dielétrico, na barreira ou nas interfaces. Em HEMTs, o TAT pode contribuir significativamente para a corrente de fuga de porta e para a instabilidade dos parâmetros elétricos, especialmente sob variações de temperatura e em regime de alta potência [47,48].

A Figura 8 ilustra a atuação conjunta da energia térmica e do tunelamento por estados intermediários, resultando em corrente de fuga adicional.

Técnicas de caracterização como DLTS (Espectroscopia Transientes de Níveis Profundo), espectroscopia de capacitância e medições de corrente em função da temperatura são amplamente utilizadas para investigar a relevância desse mecanismo e a distribuição energética das armadilhas [47].

Em síntese, o TAT constitui um mecanismo importante para a compreensão da corrente de fuga em HEMTs, sobretudo em dispositivos sujeitos a operação térmica variável e que demandam elevada confiabilidade.

Figura 8: Representação esquemática do tunelamento assistido termicamente em transistor HEMT de AlGaIn/GaN .



Fonte: Autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos resultados experimentais da caracterização elétrica de dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN. Todos os dispositivos analisados foram fabricados e caracterizados eletricamente no Interuniversity Microelectronics Center (IMEC), localizado em Leuven, Bélgica.

Os dispositivos foram comparados considerando a variação das dimensões, das condições de polarização e da faixa de temperatura utilizada nas medições. Por fim, são discutidos os efeitos dos diferentes processos tecnológicos no comportamento elétrico e na corrente de fuga de porta.

3.1 Lâminas e Dispositivos

Os dispositivos analisados neste trabalho foram fabricados no Centro Interuniversitário de Microeletrônica (Imec) e apresentam diferentes processos de metalização da porta e condições de fabricação.

Para fins de comparação, os dispositivos foram identificados como γ , β , α e Ω , representando diferentes condições tecnológicas de fabricação. Essas variações incluem diferenças na pilha metálica de porta e nas condições de recozimento dos contatos ôhmicos e em etapas específicas do fluxo de fabricação.

A análise comparativa desses dispositivos torna possível avaliar como variações nas etapas de fabricação influenciam os parâmetros elétricos fundamentais, como corrente de dreno, corrente de porta e estabilidade térmica [23].

A Tabela 1 resume as principais diferenças estruturais e de processamento. O dispositivo Alpha (α) apresenta uma pilha de porta composta por 40 nm de TiN, 250 nm de AlCu e 60 nm de revestimento antirreflexo (ARC). O recozimento dos contatos ôhmicos foi realizado a 798,15 K (525 °C) durante 90 segundos. Essa configuração foi projetada para otimizar o desempenho elétrico do dispositivo [25].

O dispositivo Beta (β) passou por uma etapa de recozimento pós-implantação destinada a melhorar a qualidade cristalina e a uniformidade da dopagem. Em seguida, foi submetido a um recozimento ôhmico em duas etapas: a primeira a 973,15 K (700 °C) e a segunda a 823,15 K (550 °C), ambas com duração de 90 segundos. Esse procedimento visa aprimorar a qualidade dos contatos ôhmicos e a eficiência de injeção de portadores [46].

O dispositivo Gama (γ) foi fabricado por meio de dupla implantação iônica, técnica que possibilita o controle preciso dos perfis de dopagem. Após a implantação, realizou-se um recozimento térmico para ativar os dopantes e formar contatos ôhmicos de baixa resistência. Essa abordagem resulta em maior densidade de portadores e melhora o transporte de corrente [49].

O dispositivo Ômega (Ω) foi produzido seguindo um fluxo tecnológico padrão, utilizando uma pilha de porta constituída por 40 nm de TiN implantado, 250 nm de AlCu e 60 nm de ARC TiN. O recozimento ôhmico foi realizado a 838,15 K (565 °C) por 90 segundos [51]. Todos os dispositivos foram caracterizados em uma faixa de temperatura de 238,15 K a 473,15 K, e as curvas de corrente de porta (I_G) em função da tensão de porta (V_G) foram obtidas para avaliar a influência das variações de processamento nos mecanismos de fuga. Essas modificações estruturais e térmicas constituem a base para uma análise detalhada do comportamento da corrente de fuga sob diferentes condições de polarização e temperatura, conforme discutido nas seções subsequentes [50]. O dispositivo Ω pode ser considerado como referência.

Tabela 1 :Detalhes estruturais e de processamento dos dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN (γ , β , α e Ω), incluindo a composição do metal de porta e os parâmetros de recozimento ôhmico.

Dispositivo Lâmina	Características
γ - Gamma	Divisão do Processo: Duas implantações iônicas ativas (um método sofisticado de implantação iônica usado para formar camadas de dopagem precisas). Recozimento Ôhmico/Ativo: Um processo de tratamento térmico projetado para formar contatos ôhmicos e ativar o dispositivo.
β - Beta	Divisão do Processo: Recozimento pós-ativação (tratamento térmico para refinar a dopagem e a estrutura cristalina após a implantação iônica). Recozimento Ôhmico/Ativo: 973,15 K por 90 segundos; 823,15 K por 90 segundos (Duas etapas de recozimento ôhmico para garantir a ativação adequada da dopagem).
α - Alpha	Divisão do Processo: 40 nm de TiN / 250 nm de AlCu / 60 nm de ARC TiN (para aprimorar as características elétricas e ópticas). Recozimento Ôhmico/Ativo: 798,15 K por 90 segundos.
Ω - Ômega	Divisão do Processo: 40 nm de TiN por IMP, 250 nm de AlCu / 60 nm de ARC com TiN. Recozimento Ôhmico / Recozimento Ativo: 565 K por 90 segundos (padrão). Repetição sem Ti conforme POR (POR = Process of Record, ou seja, processo padrão/documentado).

Fonte: Autor.

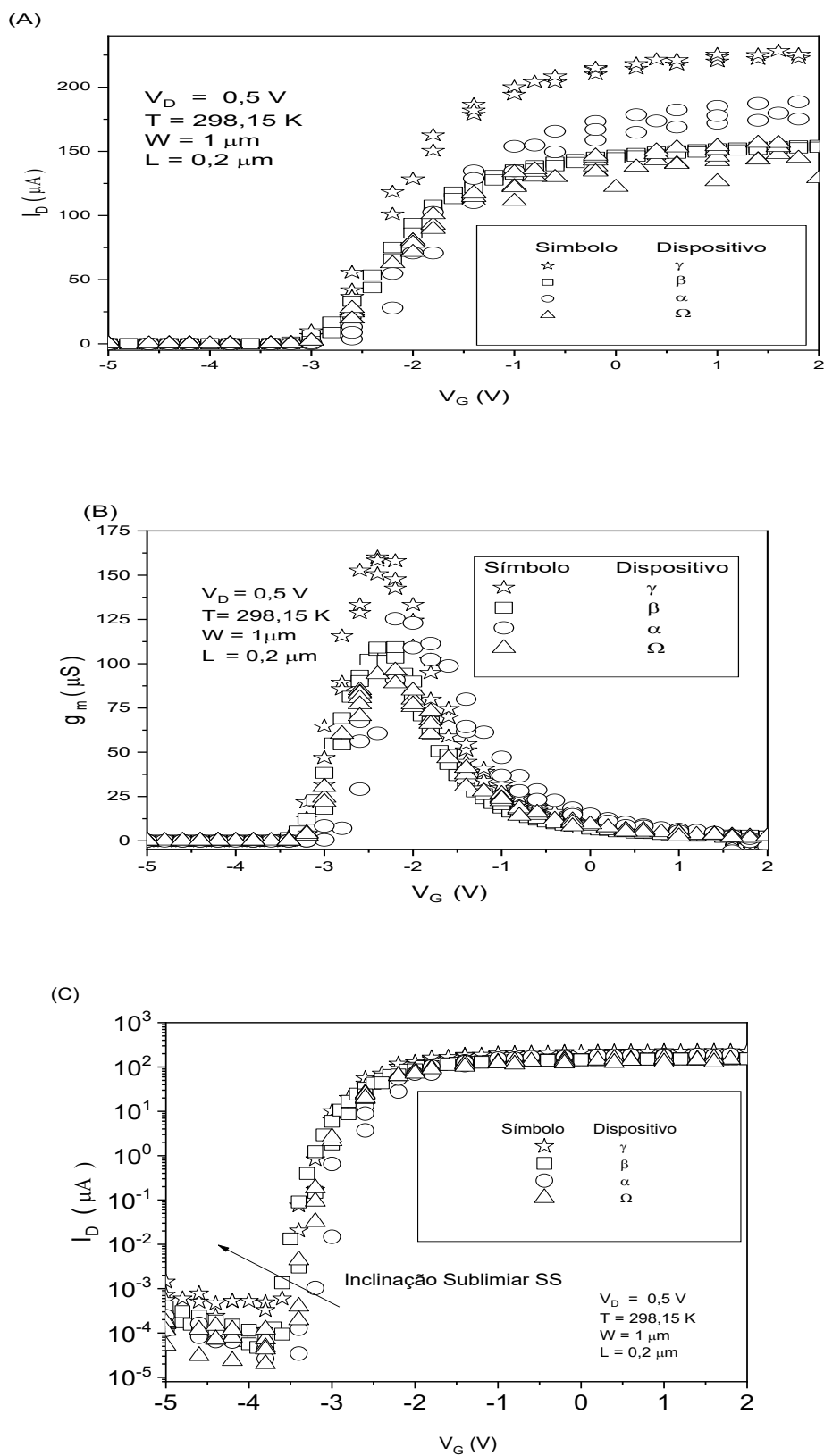
3.2 Caracterização Elétrica Inicial dos Dispositivos a Ambiente

A análise elétrica em temperatura ambiente (298,15 K) é fundamental para compreender o comportamento inicial dos dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN fabricados com diferentes variações de processo e metais de porta. Nesta seção, são apresentadas as características de transferência, transcondutância e corrente de fuga na porta dos dispositivos γ , β , α e Ω , permitindo comparar o desempenho e os efeitos tecnológicos associados a cada fluxo de fabricação.

3.2.1 Desempenho dos Dispositivos HEMTs com $L=0,2 \mu\text{m}$ ($W=1 \mu\text{m}$)

A Figura 9 apresenta as curvas de transferência (I_D em função de V_G), a curva de transcondutância (g_m) e I_D em escala log dos dispositivos γ , β , α e Ω . Já a Figura 10 mostra as curvas de corrente de fuga na porta (I_G em função de V_G) sob diferentes condições de polarização de dreno.

Figura 9: (A) I_D vs. V_G , (B) g_m vs. V_G , e (C) Inclinação de Sublimiar em função de V_G para dispositivos HEMTs γ , β , α e Ω .



Fonte: Autor.

O dispositivo γ registra a maior corrente de dreno (I_D) e os maiores valores de transcondutância (g_m), o que indica uma condução de canal mais eficiente e maior desempenho elétrico. Esse resultado pode ser atribuído ao seu processamento avançado, que inclui dupla implantação iônica e tratamento térmico otimizado. Esses procedimentos melhoram a qualidade da interface e favorecem a formação do 2DEG, reduzem a resistência de contato e aumentam a densidade de portadores, favorecendo a condução e o ganho em transcondutância. Em contrapartida, verifica-se que o mesmo dispositivo apresenta uma corrente de fuga na porta (I_G) mais elevada, indicando a existência de um compromisso entre desempenho elétrico e confiabilidade do dispositivo. Esse comportamento é típico de estruturas com barreiras mais finas ou interfaces metal–semicondutor menos uniformes, que facilitam o tunelamento de elétrons através da barreira de AlGaIn.

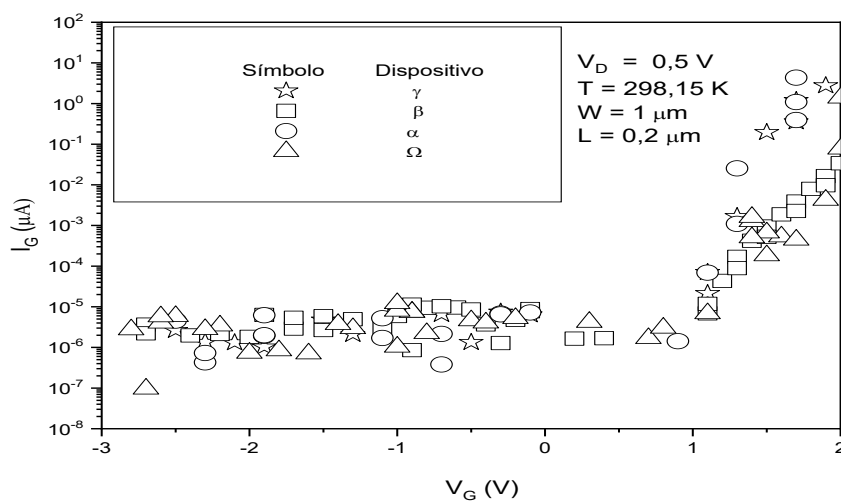
O dispositivo β apresenta um comportamento intermediário, com corrente de dreno moderada e valores de g_m equilibrados, o que sugere uma relação mais estável entre desempenho e controle de fuga de corrente. Esse equilíbrio pode ser explicado pelo seu fluxo de fabricação, que inclui recozimento ôhmico em duas etapas, realizado a 973,15 K e 823,15 K. Essa sequência contribui para uma ativação mais eficiente dos dopantes e formação de contatos ôhmicos estáveis, sem comprometer o isolamento da região de porta.

O dispositivo α registra características semelhantes ao γ , mas com uma corrente de fuga menor, evidenciando que o empilhamento metálico de TiN e AlCu, 56 combinados ao recozimento a 798,15 K, proporciona uma barreira de Schottky mais robusta. Essa configuração reduz o número de trajetórias de tunelamento e resulta em um desempenho mais equilibrado, com boa condução e menor fuga de corrente.

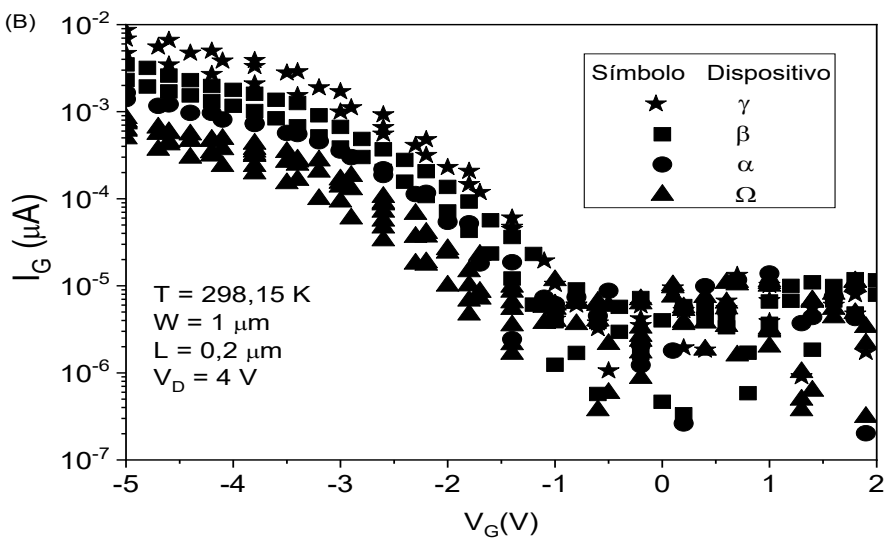
O dispositivo Ω , por outro lado, apresenta a menor corrente de dreno (I_D) e um valor de I_G relativamente elevado à temperatura ambiente (Figura 10). Esse comportamento está relacionado à ausência da etapa de repetição do Ti-POR durante o processo de fabricação e à menor eficiência da barreira de AlGaIn. Como consequência, o campo elétrico na região de porta se intensifica, aumentando a probabilidade de tunelamento e, portanto, a fuga de corrente. Esses resultados demonstram que variações no processo de fabricação influenciam significativamente o comportamento elétrico e os mecanismos de condução dos dispositivos HEMTs.

Figura 10 : I_G vs. V_G for (A) $V_D = 0,5$ V, (B) $V_D = 4$ V, e (C) $V_D = 0,5$ V e 4 V a 298,15 K para dispositivos HEMTs γ , β , α , e Ω .

(A)



(B)



Fonte: Autor.

Adicionalmente, na Figura 10 observa-se que, para tensões de dreno mais elevadas, ocorre um aumento acentuado em I_G , sugerindo que o campo elétrico induzido pelo dreno intensifica o tunelamento de portadores através da barreira. Esse comportamento é coerente com os mecanismos de tunelamento direto (DT) ou, mais provavelmente, de tunelamento de Fowler–Nordheim (FN).

À temperatura ambiente, os dispositivos γ e α apresentam as maiores correntes I_G sob polarização direta (Figuras 10A e 10B). Isso reforça a interpretação de que processos de fabricação mais agressivos, embora melhorem o desempenho elétrico, também aumentam a probabilidade de tunelamento.

A análise das Figuras 9 e 10 mostraram que o comportamento elétrico dos dispositivos AlGaIn/GaN HEMTs é fortemente dependente das condições de fabricação, do tipo de metal de porta e dos tratamentos térmicos aplicados. O dispositivo γ destaca-se pela alta condutância e elevada corrente de dreno. O dispositivo β apresenta desempenho equilibrado e estabilidade razoável, enquanto o Ω revela limitações associadas a uma barreira menos eficiente. Esses resultados confirmam que o controle do processo e a engenharia dos materiais são fatores determinantes para a otimização simultânea da performance e da confiabilidade dos dispositivos HEMTs.

3.2.2 Influência das Dimensões de Canal na Corrente de Dreno

A Figura 11 apresenta as curvas lineares $I_D V_G$ dos dispositivos γ , β , α e Ω , permitindo avaliar o impacto das dimensões do canal no comportamento de condução. As medições foram realizadas variando-se a largura (W) e o comprimento (L) do canal na temperatura de 298,15 K, com o objetivo de identificar como a geometria influencia a corrente de dreno (I_D) e a resposta à tensão de porta (V_G).

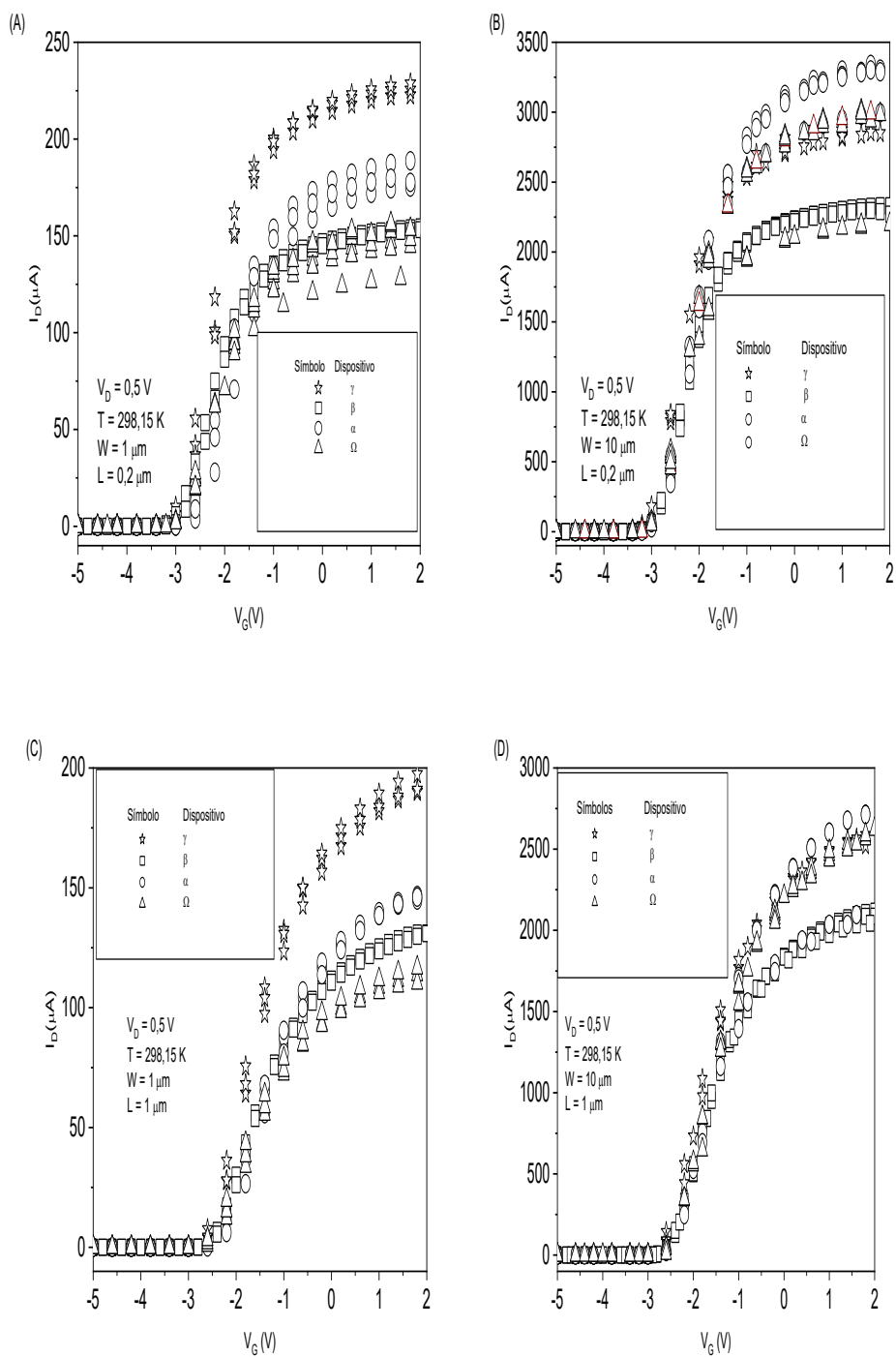
Nos gráficos 12(A) e 11(B), o comprimento é fixado em $L = 0,2 \mu\text{m}$, enquanto a largura varia de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. Em 11(A), a corrente de dreno começa a aumentar a partir de V_G aproximadamente igual a $-2,5 \text{ V}$, variando de cerca de $100 \mu\text{A}$ até $250 \mu\text{A}$. Em 11(B), a variação inicia em V_G próximo de -3 V , atingindo valores entre $0,000002 \text{ mA}$ e $0,000003,5 \text{ mA}$. O aumento da largura de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$ resulta em um incremento aproximado de 14 vezes na corrente, evidenciando a relação direta entre a largura do canal e a condutância total do dispositivo.

Nos gráficos 11(C) e 11(D), o comprimento é fixado em $L = 1 \mu\text{m}$, novamente para larguras de $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 12(C), a corrente varia de 0,1 mA a 0,2 mA, enquanto em 11(D) os valores variam de 0,000002 mA a 0,0000025 mA. Nesse caso, o aumento da largura proporcionou um incremento de aproximadamente 12 vezes na corrente.

A comparação entre 11(A) e 11(C), ambos com $W = 1 \mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento de 0,2 μm para 1 μm não alterou significativamente a corrente de dreno, indicando que, nessa faixa de dimensões, a resistência do canal ainda não é dominante. Em contraste, a comparação entre 11(B) e 11(D), ambos com $W = 10 \mu\text{m}$, evidencia que o aumento do comprimento reduz a corrente de dreno devido ao aumento da resistência intrínseca do canal. Em síntese, a Figura 11 demonstra que a largura do canal amplia a condutância e, consequentemente, a corrente de dreno, enquanto o aumento do comprimento eleva a resistência e reduz a corrente.

A análise das curvas $I_D V_G$ para diferentes dimensões de canal permite avaliar o impacto da geometria do dispositivo no transporte de portadores. Em dispositivos com menor comprimento de canal, verifica-se maior corrente de dreno, resultado da redução da resistência do canal e do aumento do campo elétrico efetivo. Por outro lado, dispositivos com maior largura de canal apresentam maior capacidade de condução de corrente devido ao aumento da área efetiva de transporte.

Figura 11 : $I_D V_G$ em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

3.2.3 Análise da Transcondutância

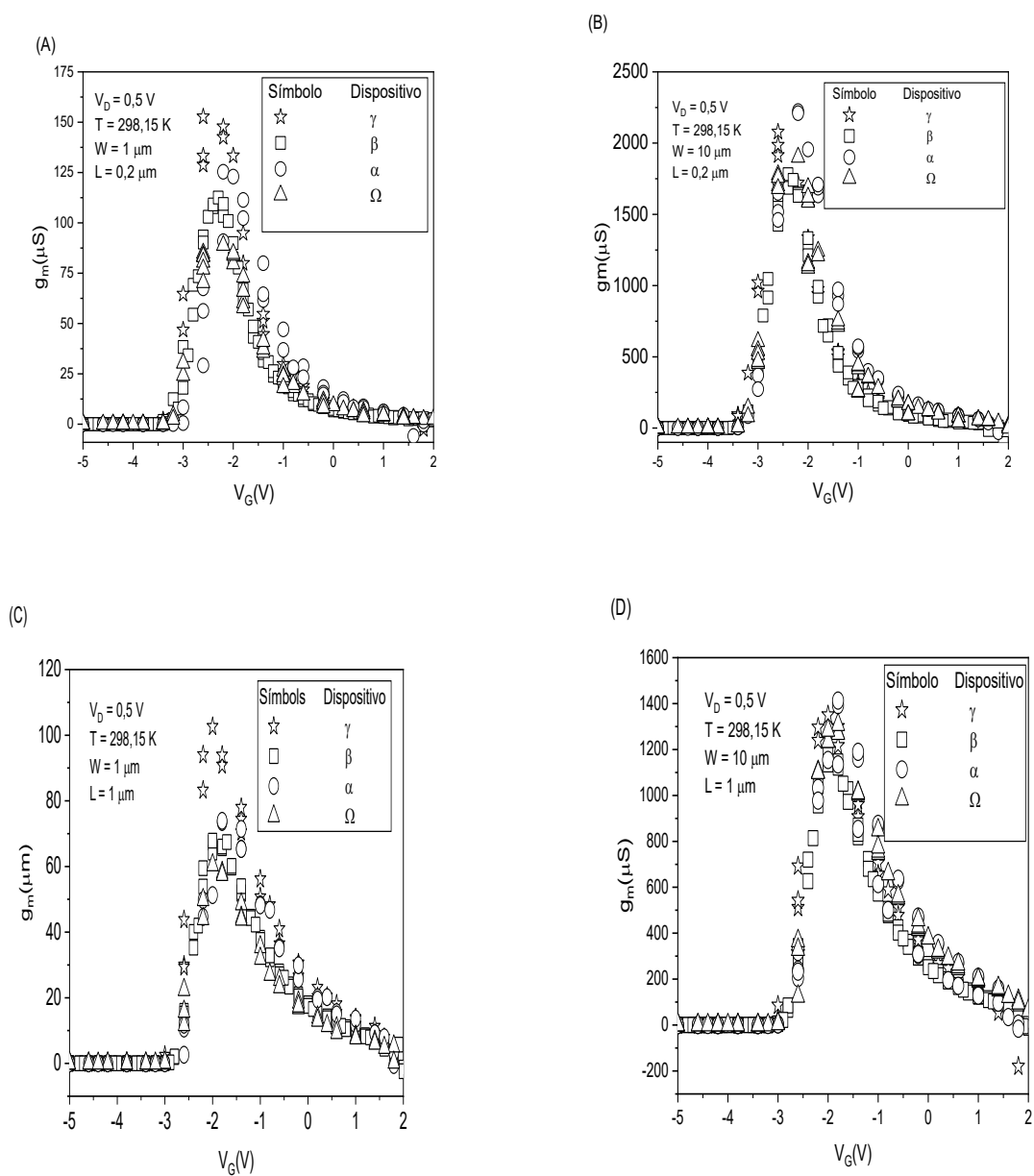
A transcondutância (g_m) representa a capacidade do dispositivo de converter variações na tensão de porta em variações na corrente de dreno. Esse parâmetro é diretamente relacionado à mobilidade dos portadores no canal e à eficiência do controle eletrostático exercido pelo eletrodo de porta. Valores mais elevados de transcondutância indicam melhor desempenho do dispositivo, sendo desejáveis em aplicações de alta frequência e amplificação de sinais.

A Figura 12 fornece as curvas de g_m em função da tensão de porta para os dispositivos HEMTs γ , β , α e Ω medidos a 298,15 K. Verifica-se que os dispositivos γ exibem os maiores valores de g_m , o que indica uma modulação de canal mais eficiente e melhor acoplamento capacitivo entre a porta e a camada bidimensional de elétrons (2DEG). Esse resultado está relacionado ao etapas de fabricação que utiliza dupla implantação iônica e tratamento térmico otimizado, promovendo maior densidade de portadores e menor resistência de contato.

Os dispositivos β e α apresentam valores intermediários de g_m e comportamento estável nas curvas, sugerindo uma boa relação entre desempenho elétrico e estabilidade operacional. O dispositivo Ω demonstra os menores valores de g_m , comportamento atribuído à menor eficiência da barreira de AlGaIn e à ausência da repetição do processo de Ti-POR durante a fabricação, o que limita a densidade do 2DEG e reduz a resposta do canal.

Esses resultados demonstram que as diferenças no processo de fabricação e na metalização da porta influenciam diretamente a transcondutância e o ganho do dispositivo. O controle adequado do processo tecnológico é, portanto, essencial para otimizar a eficiência e o desempenho dos transistores HEMTs.

Figura 12 : g_m versus V_G em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

3.2.4 Análise do Gráfico I_D versus V_G Variando V_D em Todos os Dispositivos

A análise dos gráficos I_D em função de V_G para diferentes valores de tensão de dreno ($V_D = 0,5$ V e 4 V) torna possível compreender como a variação do campo elétrico no canal influencia a corrente de dreno (I_D) em função das dimensões geométricas dos dispositivos. As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados para os quatro tipos de dispositivos (γ , β , α e Ω), considerando diferentes larguras (W) e comprimentos (L) de canal, sob temperatura ambiente (298,15 K).

Em todos os casos, verifica-se que a tensão de porta (V_G) inicia sua influência na corrente de dreno em torno de -3 V a -2,5 V, dependendo da geometria e do dispositivo analisado.

Nas Figuras 13 (A) e 13 (B), a comparação entre os dispositivos com W igual a 1 μm e W igual a 10 μm , ambos com L de 0,2 μm , evidencia o efeito direto da largura sobre a corrente de dreno. Para $W = 1$ μm , a corrente I_D varia de aproximadamente 0,1 mA a 0,2 mA para $V_D = 0,5$ V e de 0,6 mA a 0,8 mA para $V_D = 4$ V.

Já para $W = 10$ μm , a corrente aumenta de 2 mA a 3 mA em $V_D = 0,5$ V e de 10 mA a 12 mA em $V_D = 4$ V. O aumento da largura de 1 μm para 10 μm provocou um acréscimo de cerca de quinze vezes na corrente de dreno, mantendo a tensão de início de condução constante em -3 V. Esse comportamento confirma que a corrente I_D é diretamente proporcional à largura do canal, refletindo a maior área de condução e, conseqüentemente, o aumento do número de portadores disponíveis.

Nas Figuras 13 (C) e 13 (D), o comprimento é mantido em 1 μm , com variação de largura de 1 μm para 10 μm . Em ambas as geometrias, a tensão V_G começa a atuar em torno de -2,5 V. Para $W = 1$ μm , a corrente I_D varia entre 0,1 mA e 0,2 mA em $V_D = 0,5$ V e entre 0,5 mA e 0,6 mA em $V_D = 4$ V. Para $W = 10$ μm , os valores aumentam para 1,5 mA a 2 mA em $V_D = 0,5$ V e 8 mA a 10 mA em $V_D = 4$ V.

O aumento de W resultou em um incremento de aproximadamente dez vezes na corrente de dreno, comportamento coerente com a proporcionalidade entre largura e condutância. A tensão de limiar manteve-se estável em -2,5 V, embora o dispositivo mais estreito tenha iniciado a variação ligeiramente antes, indicando maior controle de porta em geometrias menores.

A comparação entre as Figuras 13 (A) e 13 (C), ambas com W igual a $1\ \mu\text{m}$, mostra o efeito do aumento do comprimento de canal de $0,2\ \mu\text{m}$ para $1\ \mu\text{m}$. Para $V_D = 0,5\ \text{V}$, as correntes se mantiveram entre $0,1\ \text{mA}$ e $0,2\ \text{mA}$, sem variação significativa. Em $V_D = 4\ \text{V}$, houve leve redução da corrente, passando de aproximadamente $0,8\ \text{mA}$ para $0,6\ \text{mA}$. Esse comportamento evidencia que o aumento de L eleva a resistência do canal, reduzindo a corrente de dreno em regime de saturação, ainda que de forma moderada. Além disso, a tensão de porta começa a atuar mais cedo no dispositivo com L maior, ocorrendo em torno de $-2,5\ \text{V}$, o que sugere um controle de porta mais uniforme ao longo do canal.

Ao comparar as Figuras 13 (B) e 13 (D), ambas com W igual a $10\ \mu\text{m}$, observa-se que o aumento do comprimento de $0,2\ \mu\text{m}$ para $1\ \mu\text{m}$ resulta em uma leve diminuição da corrente I_D para ambos os valores de V_D , embora as ordens de grandeza sejam preservadas. Para $V_D = 0,5\ \text{V}$, a corrente cai de aproximadamente $3\ \text{mA}$ para $2\ \text{mA}$, e para $V_D = 4\ \text{V}$, de cerca de $12\ \text{mA}$ para $10\ \text{mA}$. A tensão V_G e V_T desloca-se de $-3\ \text{V}$ para $-2,5\ \text{V}$, o que confirma que canais mais longos exigem menor campo elétrico para início da modulação de carga. De modo geral, observa-se que o comprimento do canal afeta menos a corrente em baixos V_D , tornando-se mais perceptível em altos campos.

A Figura 13, portanto, demonstra que o aumento da largura do canal promove amplificação quase linear na corrente de dreno, enquanto o aumento do comprimento causa uma leve redução, principalmente sob altas tensões de dreno. A tensão de limiar permanece praticamente constante, variando entre $-3\ \text{V}$ e $-2,5\ \text{V}$, dependendo da geometria.

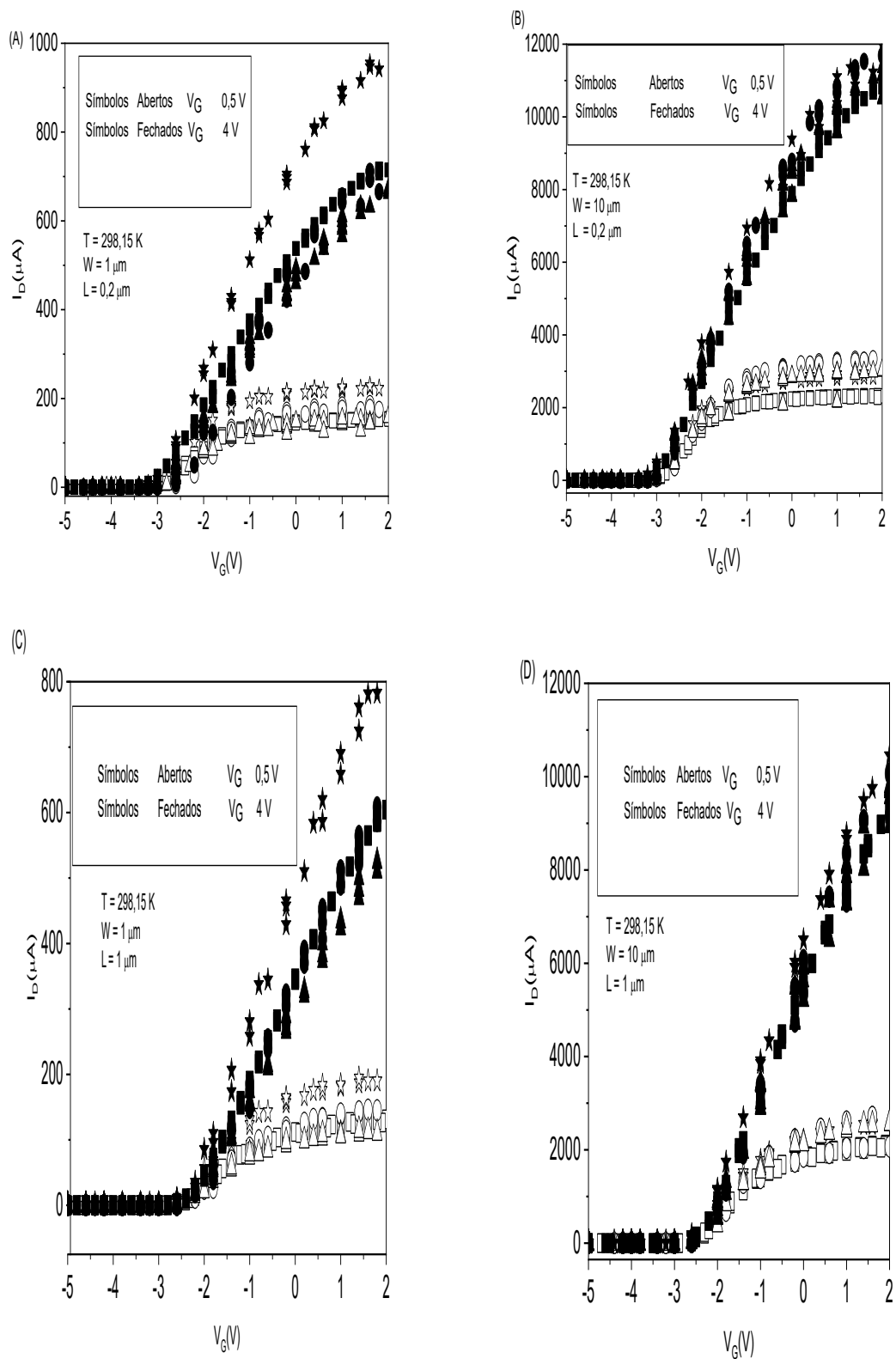
Na Figura 14, o mesmo comportamento é verificado em escala logarítmica, reforçando a relação entre as dimensões do canal e o comportamento da corrente de dreno. As Figuras 14 (A) e 14 (B) apresentam dispositivos com $L = 0,2\ \mu\text{m}$ e larguras de $1\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$, respectivamente. Em ambos, a tensão V_G inicia sua atuação em $-3,5\ \text{V}$. Para $W = 1\ \mu\text{m}$, a corrente é de aproximadamente $0,1\ \text{mA}$ para $V_D = 0,5\ \text{V}$ e de $1\ \text{mA}$ para $V_D = 4\ \text{V}$. Para $W = 10\ \mu\text{m}$, os valores aumentam para $1\ \text{mA}$ e $10\ \text{mA}$, respectivamente, caracterizando um aumento de dez vezes na corrente de dreno. O mesmo ponto de início de condução (V_T) confirma que o aumento da largura altera a magnitude da corrente sem modificar o campo elétrico de ativação.

Nas Figuras 14 (C) e 14 (D), o comprimento é aumentado para 1 μm , e o mesmo comportamento é observado. Em ambas as geometrias, a tensão V_G começa a atuar em torno de -3 V. Para $W = 1 \mu\text{m}$, a corrente é de 100 μA em $V_D = 0,5 \text{ V}$ e 1 mA em $V_D = 4 \text{ V}$; para $W = 10 \mu\text{m}$, as correntes aumentam para 1mA e 10 mA, respectivamente. Assim, o aumento de largura provoca ampliação linear da corrente de dreno, confirmando a dependência direta com a área de condução. A tensão de linear permanece em -3 V, indicando que o processo de controle da barreira é independente de W .

Comparando as Figuras 14 (A) e 14 (C), ambas com W igual a 1 μm , nota-se que o aumento do comprimento de 0,2 para 1 μm não altera significativamente os valores de corrente, permanecendo em torno de 0,1 mA em $V_D = 0,5 \text{ V}$ e 1 mA em $V_D = 4 \text{ V}$. O mesmo ocorre nas Figuras 14 (B) e 14 (D), com W igual a 10 μm , nas quais a corrente mantém valores de 1 mA e 10 mA para $V_D = 0,5 \text{ V}$ e 4 V, respectivamente. O principal efeito do aumento de L é o leve deslocamento da tensão de limiar para valores mais positivos, em torno de -3 V, mostrando que o canal mais longo fornece controle de porta mais antecipado e homogêneo.

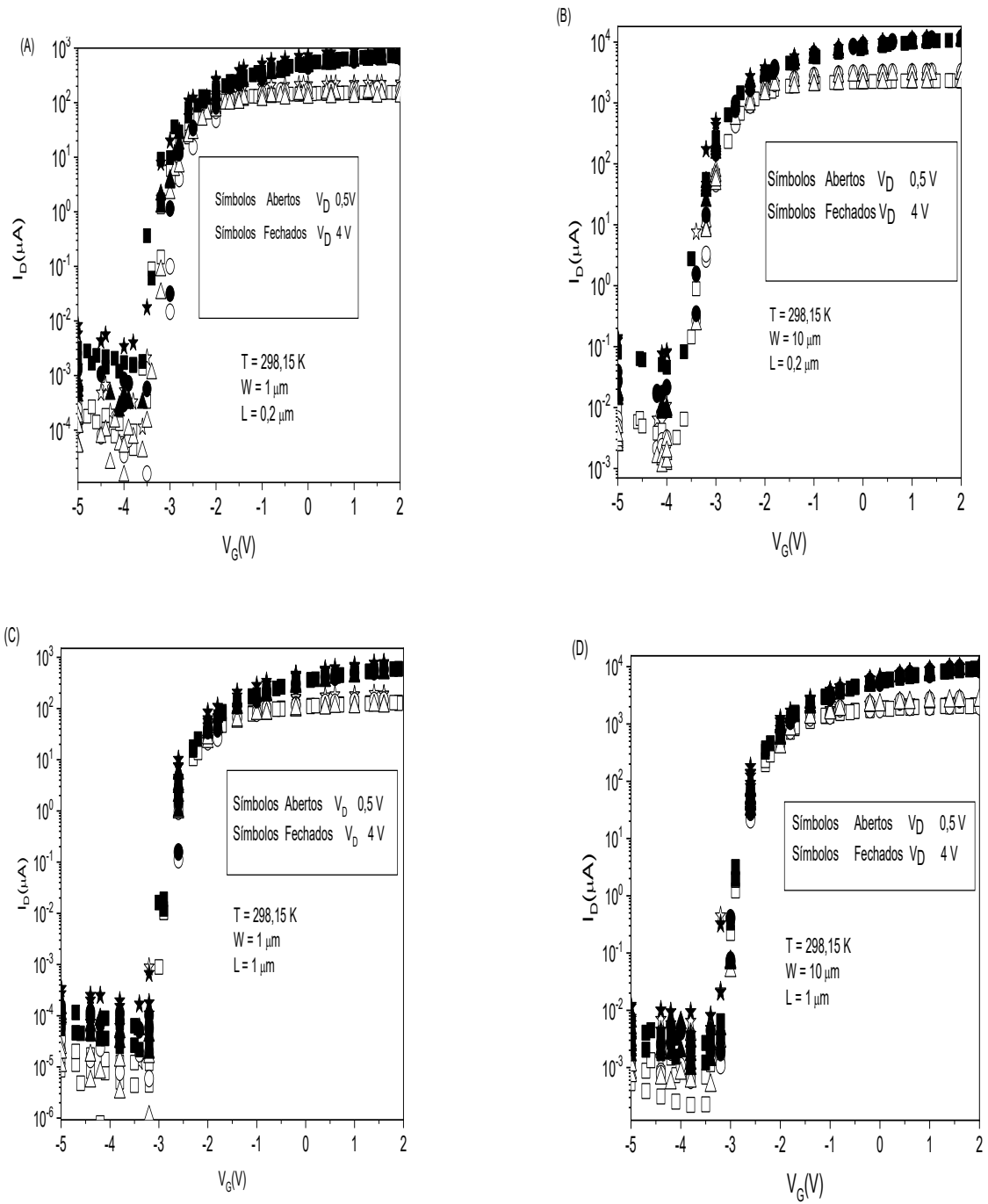
Os resultados consolidados das Figuras 13 e 14 demonstram que, para todos os dispositivos, a corrente de dreno cresce linearmente com a largura do canal e decresce suavemente com o aumento do comprimento, comportamento típico de dispositivos de efeito de campo. A tensão de dreno mais elevada ($V_D = 4 \text{ V}$) intensifica o campo elétrico no canal, ampliando a corrente I_D em até uma ordem de grandeza em relação à condição de baixa tensão. A tensão de linear (entre $V_G \approx -3 \text{ V}$ a $-2,5 \text{ V}$) se mantém praticamente constante entre as diferentes geometrias, indicando estabilidade estrutural e boa uniformidade nas etapas de fabricação.

Figura 13: Gráfico Linear $I_D V_G$ $V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

Figura 14: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ $V_D = 0,5 \text{ V}$ e $V_D = 4 \text{ V}$ em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

3.2.5 Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G Variando V_D em Todos os Dispositivos.

A análise da corrente de porta (I_G) é fundamental para compreender os mecanismos de condução responsáveis pela corrente de fuga nos dispositivos HEMT. Idealmente, a corrente de porta deve permanecer mínima, uma vez que correntes elevadas podem comprometer a eficiência e a confiabilidade do dispositivo.

As curvas $I_G V_G$ obtidas experimentalmente indicam diferenças significativas entre os dispositivos analisados, sugerindo que o material de metalização da porta e as condições de fabricação influenciam diretamente a altura da barreira de Schottky e a densidade de estados de armadilha presentes na interface metal–semicondutor.

A análise das curvas logarítmicas I_G versus V_G para diferentes tensões de dreno ($V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V) em todos os dispositivos permite compreender como a corrente de fuga na porta se comporta sob diferentes condições de polarização e geometrias. As medições foram realizadas à temperatura ambiente (298,15 K), e as Figuras 15 (A) a 15 (D) apresentam as variações de I_G em função da tensão de porta, para larguras (W) e comprimentos (L) distintos. Em todas as geometrias, a variação de V_G ocorre de -2,5 V até 2 V, abrangendo a região de bloqueio até o início da condução direta da barreira Schottky.

Nas Figuras 15 (A) e 15 (B), o comprimento do canal é mantido em L igual a 0,2 μm , enquanto a largura varia de W igual a 1 μm para W igual a 10 μm . Em ambas as geometrias, a tensão de porta varia entre -2 V e 2 V para as duas condições de tensão de dreno ($V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V). Na Figura 15 (A), para $W = 1$ μm , observa-se uma corrente de porta de aproximadamente 10 μA para $V_D = 0,5$ V e de 10 nA para $V_D = 4$ V. Já na Figura 15 (B), para $W = 10$ μm , as correntes são de cerca de 0,1 mA para $V_D = 0,5$ V e de 10 pA para $V_D = 4$ V. O aumento da largura do canal resultou em uma elevação de dez vezes na corrente I_G para a mesma tensão de dreno, o que está em conformidade com o comportamento esperado, uma vez que o aumento de W amplia a área de contato da porta, favorecendo o fluxo de portadores.

Nas Figuras 15 (C) e 15 (D), o comprimento do canal é aumentado para L igual a $1\text{ }\mu\text{m}$, mantendo as larguras de W igual a $1\text{ }\mu\text{m}$ e W igual a $10\text{ }\mu\text{m}$. Em ambas as figuras, a tensão de porta varia de -2 V a 2 V . Na Figura 15 (C), para $W = 1\text{ }\mu\text{m}$, a corrente I_G é de aproximadamente $0,010\text{ mA}$ para $V_D = 0,5\text{ V}$ e de 10 pA para $V_D = 4\text{ V}$. Já na Figura 15 (D), para $W = 10\text{ }\mu\text{m}$, as correntes atingem valores próximos de $0,0001\text{ mA}$ para $V_D = 0,5\text{ V}$ e 1 nA para $V_D = 4\text{ V}$. O aumento de W de $1\text{ }\mu\text{m}$ para $10\text{ }\mu\text{m}$ provocou novamente uma elevação de cerca de dez vezes na corrente de porta, mantendo-se inalterada a faixa de variação de V_G . Esse comportamento confirma que a corrente I_G depende linearmente da largura do canal.

A comparação entre as Figuras 15 (A) e 15 (C), ambas com W igual a $1\text{ }\mu\text{m}$, possibilita observar o efeito do aumento do comprimento do canal de $0,2\text{ }\mu\text{m}$ para $1\text{ }\mu\text{m}$. Em ambas as condições de tensão de dreno, a corrente I_G permanece praticamente constante, com valores próximos de $10\text{ }\mu\text{A}$ para $V_D = 0,5\text{ V}$ e 10 nA para $V_D = 4\text{ V}$. Isso sugere que o aumento de L não altera significativamente a corrente de fuga na porta, uma vez que o processo dominante é o tunelamento direto, controlado pelo campo elétrico na interface metal-semicondutor, e não pelo transporte ao longo do canal. Verifica-se, no entanto, que o dispositivo com L maior apresenta leve deslocamento da tensão V_G para valores menos negativos.

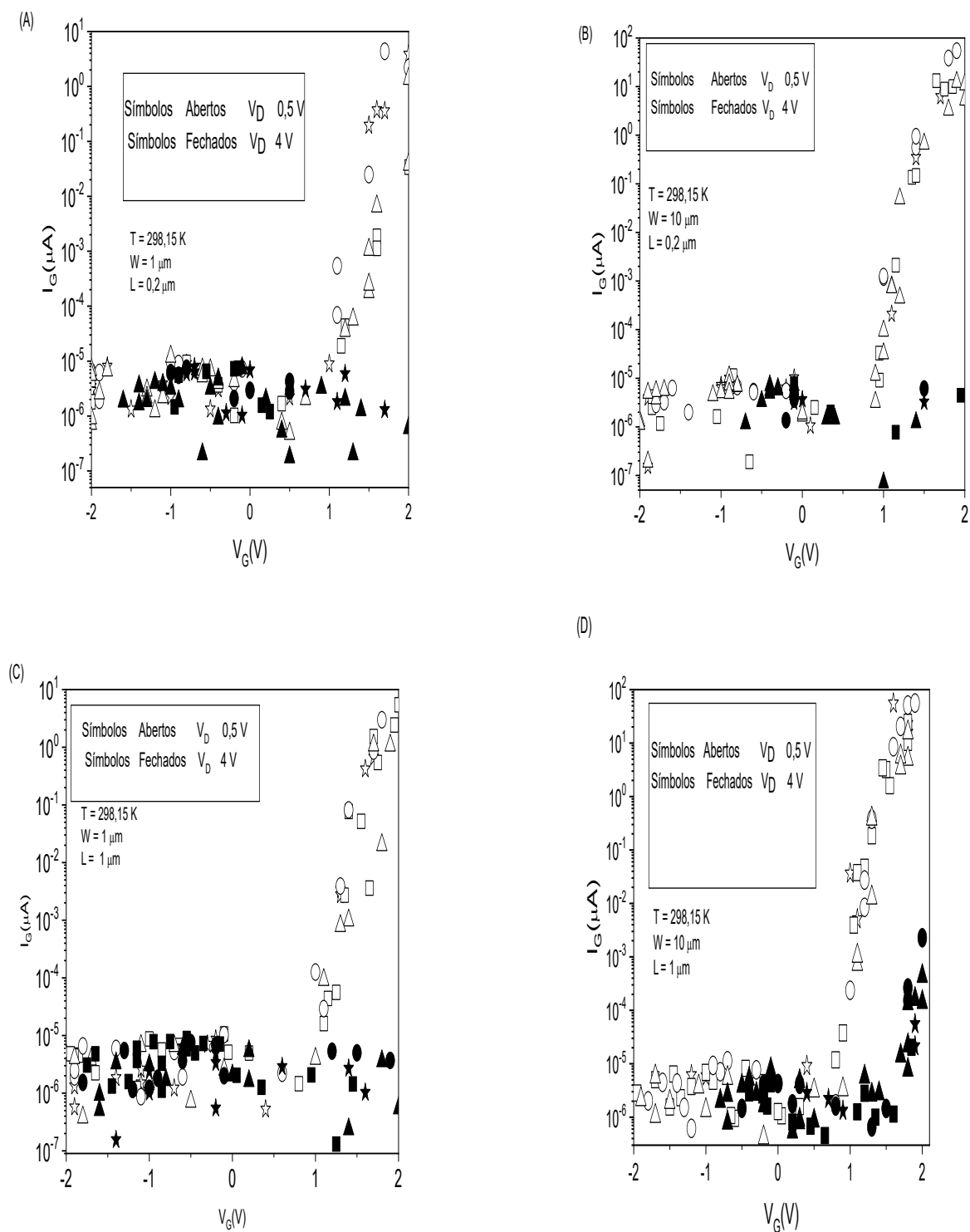
De forma análoga, a comparação entre as Figuras 15 (B) e 15 (D), ambas com W igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento de $0,2\text{ }\mu\text{m}$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não alterou de maneira expressiva os valores de corrente I_G . Em $V_D = 0,5\text{ V}$, a corrente manteve-se na faixa de $0,1\text{ mA}$ para o dispositivo mais curto e de $0,0001\text{ mA}$ para o mais longo, enquanto em $V_D = 4\text{ V}$, ambas as geometrias apresentaram valores próximos de 100 pA a 1 nA . Embora as variações sejam pequenas, verifica-se que o dispositivo com L igual a $1\text{ }\mu\text{m}$ demonstra início de condução ligeiramente antecipado, o que pode ser atribuído à menor concentração de campo elétrico próximo à borda da porta, reduzindo a energia necessária para a emissão de portadores.

De modo geral, os resultados apresentados na Figura 15 mostram que a corrente I_G aumenta proporcionalmente à largura do canal e é praticamente independente do comprimento, enquanto a tensão de dreno influencia a magnitude de I_G apenas em altos campos elétricos. A variação de I_G com V_D (4V) sugere que o campo elétrico no dreno modifica a distribuição de potencial ao longo da barreira, influenciando os mecanismos de condução na interface metal–semicondutor.

A tensão V_G fornece o mesmo intervalo de variação em todas as estruturas analisadas, variando de -2 V a 2 V, o que confirma a estabilidade estrutural e elétrica dos dispositivos sob diferentes condições de operação. Esses resultados demonstram que, à temperatura ambiente, os mecanismos de condução da corrente de porta são dominados pelo tunelamento direto, com pequena influência de efeitos térmicos ou de campo de dreno.

A variação geométrica impacta principalmente a intensidade absoluta de I_G , sem alterar significativamente os pontos de início de condução. Isso indica boa uniformidade da barreira metal-semicondutor e estabilidade do processo de fabricação entre as diferentes estruturas analisadas.

Figura 15: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ com $V_D = 0,5 \text{ V}$ e $V_D = 4 \text{ V}$ em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

3.3 Análise das Características Elétricas em Diferentes Temperaturas

A análise do comportamento dos dispositivos em diferentes temperaturas permite identificar os mecanismos físicos responsáveis pela condução da corrente de fuga.

Em geral, o aumento da temperatura tende a favorecer mecanismos termicamente ativados, como a emissão termiônica e a emissão de Poole–Frenkel. Por outro lado, mecanismos dominados por tunelamento quântico, como o tunelamento direto e o tunelamento Fowler–Nordheim, apresentam dependência mais fraca da temperatura.

3.3.1 Análise do gráfico Linear $I_D V_G$ no dispositivo Gamma variando W e L

A análise das curvas $I_D V_G$ para o dispositivo Gamma (γ) permite avaliar a influência das dimensões do canal e da temperatura sobre o comportamento de condução. As medidas foram realizadas em duas temperaturas, 273,15 K e 298,15 K, variando a largura (W) e o comprimento (L) do canal, com o objetivo de identificar o impacto geométrico e térmico na corrente de dreno (I_D).

A Figura 16 apresenta as curvas lineares de I_D em função da tensão de porta (V_G) para quatro combinações de dimensões do canal. Em todas as medições, verifica-se o comportamento típico de transistores HEMTs, nos quais a corrente de dreno começa a aumentar quando a tensão de porta se torna menos negativa, em torno de -3 V.

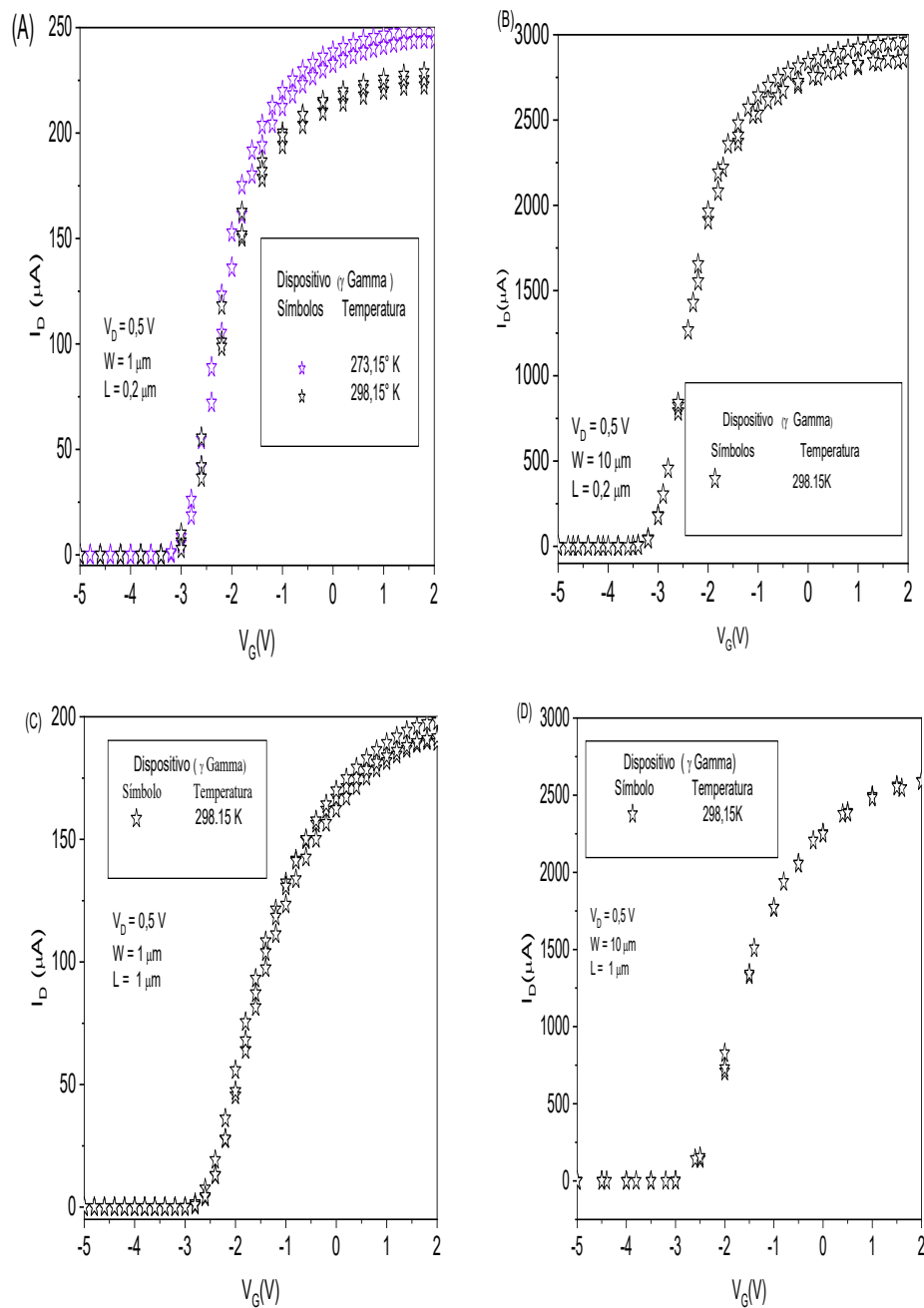
Nos gráficos 16 (A) e 16 (B), o comprimento do canal é mantido em $L = 0,2 \mu\text{m}$, e a largura varia entre $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 16(A), a corrente de dreno atinge valores de aproximadamente 0,25 mA a 273,15 K e 0,225 mA a 298,15 K. Quando a largura é aumentada para $10 \mu\text{m}$, conforme mostrado em 16 (B), a corrente cresce significativamente, atingindo cerca de 1 mA a 273,15 K e 3 mA a 298,15 K. Esses resultados confirmam que a corrente de dreno é proporcional à largura do canal, pois uma área de condução maior viabiliza maior fluxo de portadores.

Nos gráficos 16 (C) e 16 (D), o comprimento do canal é aumentado para $L = 1 \mu\text{m}$, mantendo-se as larguras de $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 16 (C), a corrente de dreno começa a aumentar a partir de $V_G \approx -2,5 \text{ V}$, atingindo cerca de $0,2 \text{ mA}$ a $298,15 \text{ K}$. Em 16(D), a corrente alcança aproximadamente $2,5 \text{ mA}$ na mesma temperatura. Assim como nos casos anteriores, o aumento da largura aumenta significativamente a corrente, enquanto o aumento do comprimento do canal reduz os valores de I_D .

A comparação entre os gráficos 16 (A) e 16 (C), ambos com $W = 1 \mu\text{m}$, demonstra que a corrente é maior para o canal mais curto ($L = 0,2 \mu\text{m}$), o que se deve à menor resistência de canal e à maior eficiência de transporte dos portadores. De forma análoga, ao comparar 16 (B) e 16 (D), ambos com $W = 10 \mu\text{m}$, nota-se que a corrente diminui com o aumento de L , comportamento esperado em função do aumento da resistência total.

Em todas as condições analisadas, a elevação da temperatura de $273,15 \text{ K}$ para $298,15 \text{ K}$ causa uma leve redução na corrente de dreno, indicando que a mobilidade dos portadores diminui com o aumento da agitação térmica. Esse comportamento confirma a dependência térmica moderada do transporte eletrônico em dispositivos de canal curto.

Figura 16: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Gamma, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

A Figura 17 demonstra as curvas logarítmicas $I_D V_G$ para o dispositivo Gamma nas mesmas condições dimensionais, evidenciando a variação da corrente em baixas tensões de porta.

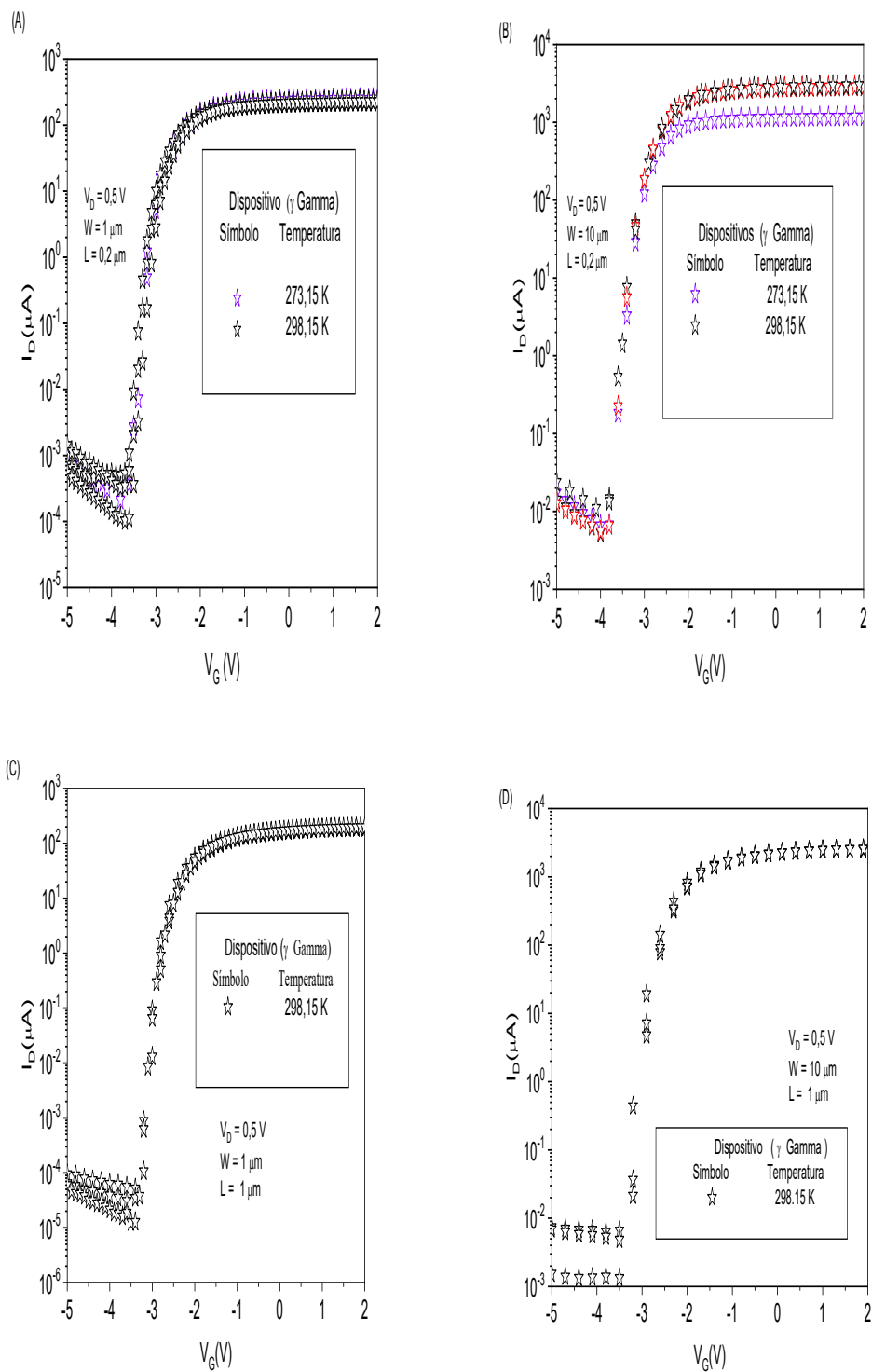
Nos gráficos 17 (A) e 17 (B), o comprimento é mantido em $L = 0,2 \mu\text{m}$, enquanto a largura varia de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. Em 17 (A), a corrente de dreno atinge cerca de $0,1 \text{ mA}$ a $273,15 \text{ K}$ e $0,1 \text{ mA}$ a $298,15 \text{ K}$. Em 17 (B), a corrente aumenta expressivamente, alcançando aproximadamente 1 mA a $273,15 \text{ K}$ e $3,16 \text{ mA}$ a $298,15 \text{ K}$. O aumento de W de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$ resulta em um incremento de quase dez vezes na corrente, demonstrando a relação direta entre a largura do canal e a condutância total do dispositivo.

Nos gráficos 17 (C) e 17 (D), o comprimento é $L = 1 \mu\text{m}$, com larguras de $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 17 (C), a corrente é de cerca de 1 mA a $298,15 \text{ K}$, enquanto em 17 (D) atinge aproximadamente $1,25 \text{ mA}$. O aumento da largura nesse caso proporcionou um acréscimo pequeno, de cerca de 25% , indicando que em canais mais longos a influência de W é atenuada pela resistência interna do canal.

A comparação entre 17 (A) e 17 (C), ambos com $W = 1 \mu\text{m}$, demonstra que o aumento de L de $0,2 \mu\text{m}$ para $1 \mu\text{m}$ não alterou significativamente a corrente, permanecendo próxima de $0,1 \text{ mA}$ nas duas temperaturas. Por outro lado, a comparação entre 17 (B) e 17 (D), ambos com $W = 10 \mu\text{m}$, demonstra que o aumento de L reduz a corrente de dreno pela metade, resultado da maior resistência associada ao canal mais longo.

Os resultados obtidos em escala logarítmica confirmam as tendências observadas na análise linear, mas com maior sensibilidade às variações nas regiões de baixas correntes e menores as altas correntes. A largura do canal é o principal fator determinante do nível de corrente, enquanto o comprimento afeta a resistência e a tensão de limiar. Esse comportamento é consistente com a física de transporte em dispositivos de AlGaIn/GaN, nos quais o campo elétrico e o confinamento do 2DEG controlam a condutividade do canal.

Figura 17: Gráfico Linear $I_D V_G(C)$ ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$). dispositivo Gamma, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.3.2 Análise do Gráfico I_D – V_G do Dispositivo Beta Variando W e L

A análise das curvas $I_D V_G$ do dispositivo Beta (β) viabiliza compreender o impacto das dimensões do canal e da temperatura sobre o comportamento de condução. Assim como no dispositivo Gamma, as medições foram realizadas variando a largura (W) e o comprimento (L) do canal, nas temperaturas de 253,15 K, 273,15 K, 298,15 K e 373,15 K. O objetivo é identificar o efeito da geometria na corrente de dreno (I_D) e na resposta da porta (V_G) sob diferentes condições térmicas.

A Figura 18 evidencia as curvas lineares $I_D V_G$ do dispositivo Beta, obtidas para quatro combinações de largura e comprimento de canal. Em todos os casos, observa-se o comportamento característico dos transistores HEMTs, com a corrente de dreno aumentando progressivamente quando a tensão de porta se torna menos negativa, em torno de -3 V.

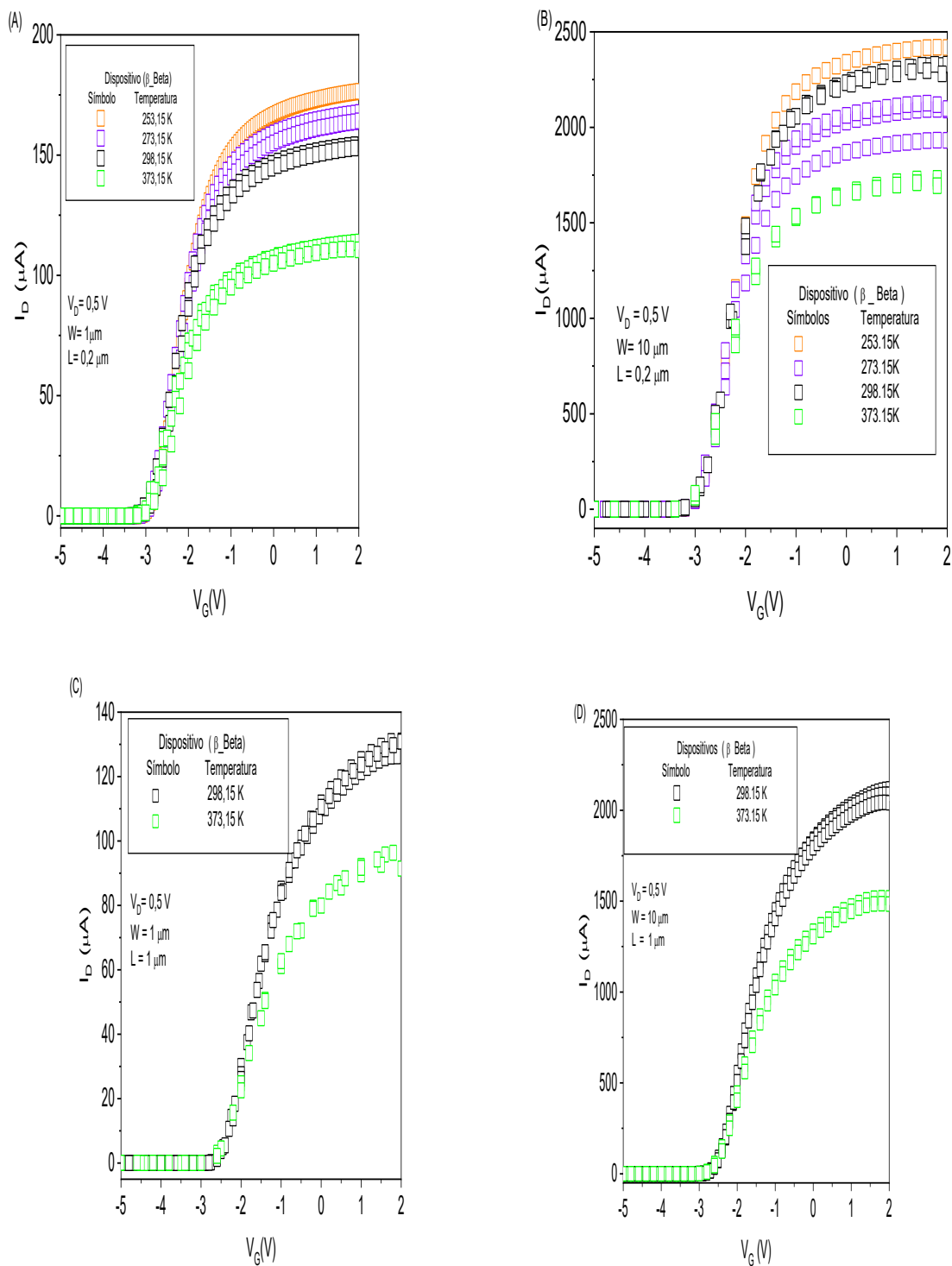
Nos gráficos 18 (A) e 18 (B), o comprimento do canal é mantido em $L = 0,2 \mu\text{m}$, e a largura varia de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. Em ambos, a tensão de limiar começa a atuar na mesma faixa de -3 V, indicando que a variação de W não altera significativamente a tensão de limiar do dispositivo. No entanto, o aumento da largura causa um acréscimo expressivo na corrente de dreno. Em 18 (A), os valores de I_D são aproximadamente 0,18 mA a 253,15 K, 0,17 mA a 273,15 K, 0,15 mA a 298,15 K e 0,11 mA a 373,15 K. Já em 18 (B), os valores aumentam para cerca de 2,5 mA, 2,25 mA, 2mA e 1mA nas mesmas temperaturas, respectivamente. Esses resultados mostram que o aumento da largura do canal amplia a área de condução, elevando proporcionalmente a corrente de dreno.

Nos gráficos 18 (C) e 18 (D), o comprimento do canal é aumentado para $L = 1 \mu\text{m}$, com larguras de $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 18 (C), a corrente de dreno começa a aumentar em torno da tensão de limiar $V_G = -2,5$ V, atingindo cerca de 0,14 mA a 298,15 K e 0,09 mA a 373,15 K. Em 18 (D), a tensão de porta inicia a variação no mesmo ponto, e a corrente alcança aproximadamente 1,50 mA a 298,15 K e 2,25 mA a 373,15 K. A ampliação da largura do canal provoca um aumento de quase dez vezes em I_D , confirmando a dependência direta da corrente em relação à largura do canal.

A comparação entre as Figuras 18 (A) e 18 (C), ambas com $W = 1 \mu\text{m}$ e diferentes comprimentos, demonstra que o aumento de L de $0,2 \mu\text{m}$ para $1 \mu\text{m}$ reduz levemente a corrente e antecipa o ponto de atuação da tensão de porta. De forma semelhante, a comparação entre 18 (B) e 18 (D), ambas com $W = 10 \mu\text{m}$, revela que o aumento do comprimento do canal reduz a corrente de dreno e faz com que a tensão V_G comece a influenciar o dispositivo em valores menos negativos.

A elevação da temperatura provoca uma redução gradual na corrente de dreno em todas as geometrias, evidenciando o efeito da diminuição da mobilidade dos portadores em temperaturas mais altas. Esse comportamento é típico de dispositivos com transporte limitado pela dispersão de elétrons, característico de estruturas AlGaN/GaN.

Figura 18: Gráfico Linear $I_D V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

A Figura 19 evidencia as curvas logarítmicas $I_D V_G$ do dispositivo Beta para as mesmas combinações de dimensões, permitindo observar a tensão de limiar e o comportamento sublinear em baixas tensões de porta. Essa abordagem complementa a análise anterior, evidenciando diferenças sutis entre as amostras.

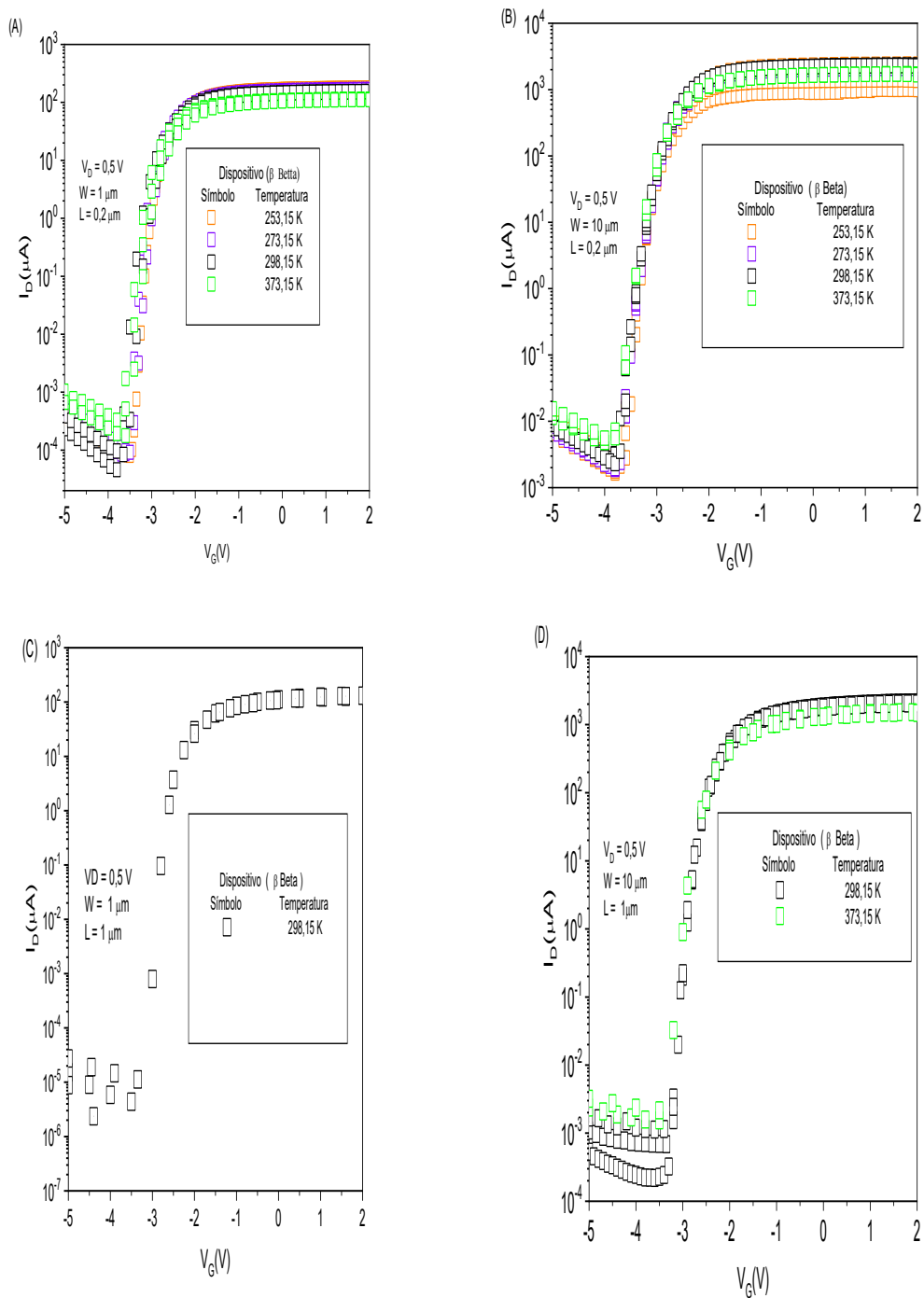
Nas Figuras 19 (A) e 19 (B), o comprimento é constante em $L = 0,2 \mu\text{m}$, enquanto a largura varia de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. A tensão de limiar inicia a variação em torno de $-3,5 \text{ V}$ em ambas. Em 19 (A), a corrente de dreno permanece próxima de $0,1 \text{ mA}$ nas quatro temperaturas analisadas, enquanto em 19 (B) ela é cerca de dez vezes maior, atingindo aproximadamente 1 mA nas mesmas condições. O aumento da largura de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$ eleva a corrente de dreno em uma ordem de grandeza, confirmando a proporcionalidade direta entre I_D e W .

Nas Figuras 19 (C) e 19 (D), o comprimento é $L = 1 \mu\text{m}$ e as larguras variam de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. A tensão de porta inicia a atuação em torno de $-3,5 \text{ V}$ em ambos os casos. Em 19 (C), a corrente é de aproximadamente $100 \mu\text{A}$ a $298,15 \text{ K}$ e $100 \mu\text{A}$ a $373,15 \text{ K}$, enquanto em 19 (D) os valores chegam a 1 mA , mantendo a razão de dez vezes entre as larguras. A temperatura não provocou variações expressivas nesse conjunto, indicando boa estabilidade térmica na região de sublimar.

A comparação entre 19 (A) e 19 (C), ambos com $W = 1 \mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento de canal de $0,2 \mu\text{m}$ para $1 \mu\text{m}$ reduz a corrente em aproximadamente uma ordem de grandeza, confirmando a relação inversa entre I_D e L . Já entre 19 (B) e 19 (D), ambos com $W = 10 \mu\text{m}$, a corrente permanece praticamente constante, sugerindo que, para canais largos, o aumento de comprimento tem efeito reduzido devido à predominância da condutância lateral.

Esses resultados confirmam que a largura do canal exerce o papel mais significativo na condução total, enquanto o comprimento influencia principalmente a resistência e o ponto de transição entre as regiões de corte e condução. A análise em escala logarítmica também demonstra que o dispositivo Beta demonstra boa uniformidade de comportamento térmico, com variações de corrente moderadas entre as temperaturas avaliadas.

Figura 19: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor

3.3.3 Análise do Gráfico I_D – V_G do Dispositivo Alpha Variando W e L

Analisando as curvas das figuras 20 (A) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$) e 20 (B) ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$), onde variamos apenas a largura W , observamos que em ambas a tensão de limiar (V_G) começa a variar a partir de $-2,5 \text{ V}$. Os valores de I_D em 20 (A) são, $I_D = 0,19 \text{ mA}$ na temperatura $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 0,13 \text{ mA}$ para temperatura $373,15 \text{ K}$.

Já na figura 20 (B), os valores são, $I_D = 3,45 \text{ nA}$ na temperatura de $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 2,10 \text{ nA}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$. Isso demonstra que, com W maior $10 \mu\text{m}$ ao aumentar W de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$, I_D aumenta cerca de 18 vezes, mostrando forte dependência da largura na condução de corrente.

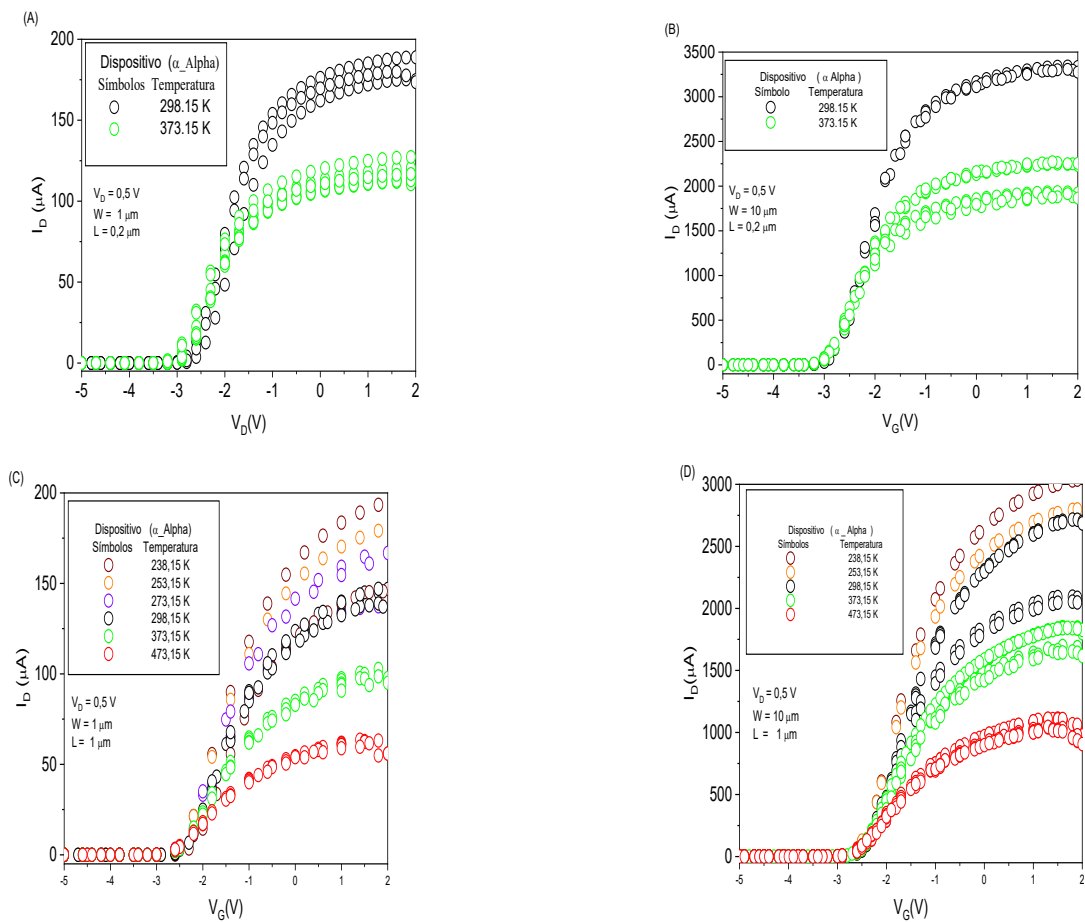
Comparando agora as curvas 20 (C) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$) e 20 (D) ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$), novamente variando apenas W , vemos que em ambas a V_G começa a atuar a partir de $-2,5 \text{ V}$. Os valores de I_D para 20 (C) são, $I_D = 175 \mu\text{A}$ para temperatura de $238,15 \text{ K}$, e $I_D = 175 \mu\text{A}$ para temperatura de $253,15 \text{ K}$ e $I_D = 170 \mu\text{A}$ para temperatura de $273,15 \text{ K}$ e I_D de $100 \mu\text{A}$ para temperatura de $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 70 \mu\text{A}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$. Na figura 20 (D), temos, $I_D = 3 \text{ mA}$ para temperatura de $238,15 \text{ K}$ e $I_D = 3 \text{ mA}$, e $I_D = 2,80 \text{ nA}$ para temperatura de $253,15 \text{ K}$, e $I_D = 2,75 \text{ mA}$ para temperatura de $273,15 \text{ K}$, e $I_D = 2,20 \text{ mA}$ para temperatura de $298,15 \text{ K}$, e $I_D = 1,90 \text{ mA}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$, e $I_D = 1,25 \text{ mA}$ para temperatura de $473,15 \text{ K}$. Com aumento de W , I_D é até 16 vezes maior, reforçando a forte influência da largura sobre a corrente, mesmo com L fixo.

Agora, comparando as curvas 20 (A) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$) com 20 (C) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$), ou seja, mantendo a largura e variando apenas o comprimento L , notamos que em ambas a V_G começa a atuar a partir de $-2,5 \text{ V}$. Os valores de I_D em 20 (A) são, $I_D = 190 \mu\text{A}$ para temperatura de $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 130 \mu\text{A}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$. Já em 20 (C), temos, $I_D = 175 \mu\text{A}$ para temperatura de $238,15 \text{ K}$, e $I_D = 175 \mu\text{A}$ para temperatura de $253,15 \text{ K}$ e $I_D = 170 \mu\text{A}$ para temperatura de $273,15 \text{ K}$ e I_D de $100 \mu\text{A}$ para temperatura de $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 70 \mu\text{A}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$. Aumentar o comprimento de $L = 0,2 \mu\text{m}$ para $L = 1 \mu\text{m}$ reduz a corrente quase pela metade, indicando que L tem impacto direto na resistência do canal.

Por fim, comparando as curvas 20 (B) ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$) e 20 (D) ($W = 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$), mantendo a largura constante e variando o comprimento, vemos que em ambas V_G começa a atuar a $-2,5 \text{ V}$. Os valores de I_D em 20 (B) são, $I_D = 3,45 \text{ mA}$ na temperatura de $298,15 \text{ K}$ e $I_D = 2,10 \text{ mA}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$.

Na figura 20 (D), temos, $I_D = 3 \text{ mA}$ para temperatura de $238,15 \text{ K}$ e $I_D = 3 \text{ mA}$, e $I_D = 2,80 \text{ mA}$ para temperatura de $253,15 \text{ K}$, e $I_D = 2,75 \text{ mA}$ para temperatura de $273,15 \text{ K}$, e $I_D = 2,20 \text{ mA}$ para temperatura de $298,15 \text{ K}$, e $I_D = 1,90 \text{ mA}$ para temperatura de $373,15 \text{ K}$, e $I_D = 1,25 \text{ mA}$ para temperatura de $473,15 \text{ K}$. Com L maior, a corrente I_D diminui significativamente, principalmente em temperaturas mais baixas. A diferença se atenua em altas temperaturas, mas ainda é perceptível.

Figura 20: Gráfico Linear IDVG dispositivo Alpha, (A) ($W=1 \mu\text{m}$; $L=0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W=10 \mu\text{m}$; $L=0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W=1 \mu\text{m}$; $L=1 \mu\text{m}$) e (D) ($W=10 \mu\text{m}$; $L=1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

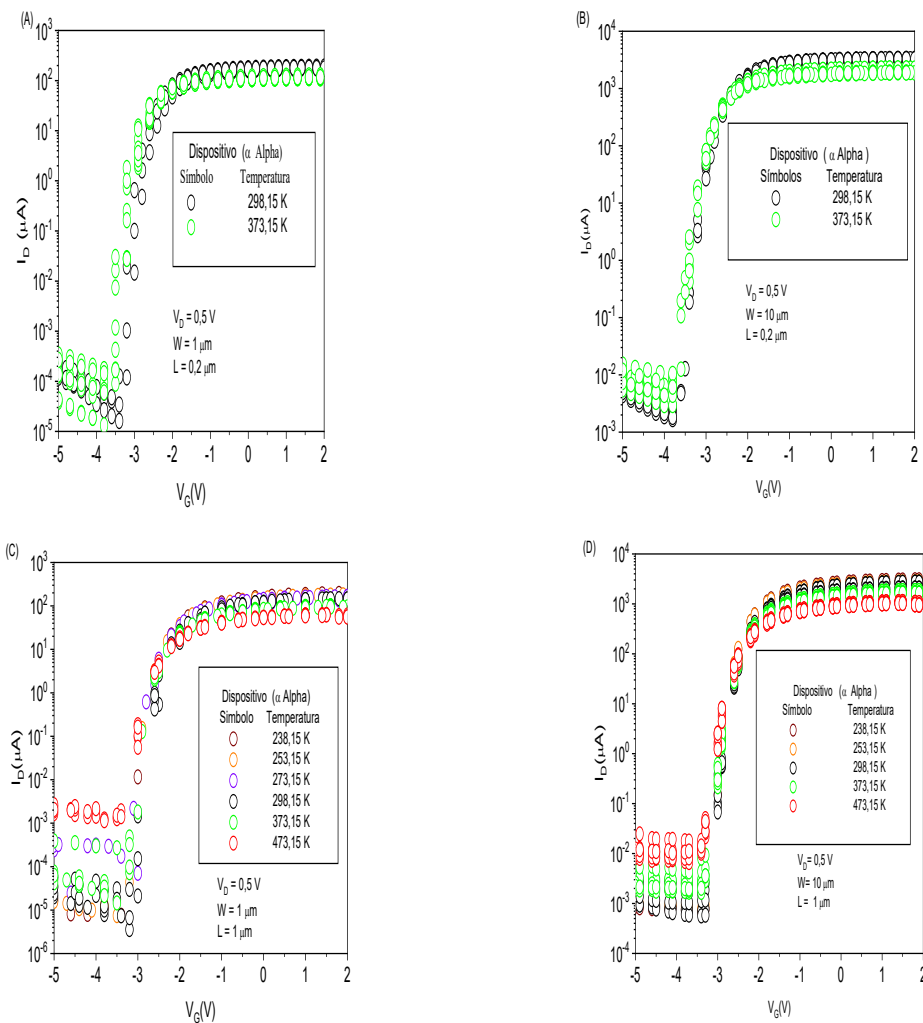
Analisando a curva da figuras 21 (A) $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$, com a curva 21 (B) $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$, variando somente o W , nas figuras 21 (A) e 21 (B) a tensão V_G começa a variar a partir $-3,5 \text{ V}$, tendo os valores de I_D para 21 (A), na temperatura de $298,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, e na temperatura de $373,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, e os valores de I_D para 21 (B), na temperatura de $298,15 \text{ K}$, $I_D = 1 \text{ mA}$, e na temperatura de $373,15 \text{ K}$, $I_D = 1 \text{ mA}$, e na temperatura de $298,15 \text{ K}$, $I_D = 1 \text{ mA}$, e na temperatura de $373,15 \text{ K}$, $I_D = 1 \text{ mA}$. Ao aumentar a largura do canal de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$, a corrente de dreno aumenta 10 vezes, como esperado. A tensão V_G também começa a variar um pouco antes no dispositivo com W maior.

Comparando as curvas das figuras 21 (C) $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, com a curva 21 (D) $W = 10 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, variando somente o W , nas figuras 21 (C) e 21 (D) a tensão V_G começa variar na tensão de -3 V , tendo as seguintes valores de I_D para 21 (C), na temperatura de $238,15 \text{ K}$, $I_G = 100 \mu\text{A}$, e na temperatura de $253,15 \text{ K}$, $I_G = 100 \mu\text{A}$, e na temperatura $273,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, e na temperatura $298,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, e na temperatura $373,15 \text{ K}$; $I_D = 50 \mu\text{A}$, e na temperatura $473,15 \text{ K}$, $I_D = 100 \mu\text{A}$, e os valores de I_D para figura, 21 (D), na temperatura $238,15 \text{ K}$; $I_G = 1,5 \mu\text{A}$, na temperatura $253,15 \text{ K}$, $I_G = 1,5 \text{ mA}$, na temperatura $298,15 \text{ K}$, $I_D = 1 \text{ mA}$, na temperatura $373,15 \text{ K}$; $I_D = 1 \text{ mA}$, na temperatura $473,15 \text{ K}$, $I_D = 0,5 \text{ mA}$. Ao aumentar a largura do canal (W) de $1 \mu\text{m}$ para $10 \mu\text{m}$, a corrente de dreno também aumenta aproximadamente 10 vezes. A tensão V_G de início permanece igual em ambos.

Analisando a figura 21 (A), $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 0,2 \mu\text{m}$, com a figura 21 (C) $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$, variando somente o L , nas figuras 22 (A) tensão V_G começa a variar em $-3,5 \text{ V}$, e na figura 21 (B) começa a variar em -3 V , sendo a I_G na figura 21 (A) será, $298,15 \text{ K}$, $I_D = 100 \mu\text{A}$, na temperatura de $373,15 \text{ K}$, $I_D = 100 \mu\text{A}$, e na figura 21 (C), $238,15 \text{ K}$; $I_G = 100 \mu\text{A}$, $253,15 \text{ K}$; $I_G = 100 \mu\text{A}$, na temperatura de $273,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, na temperatura de $298,15 \text{ K}$; $I_D = 100 \mu\text{A}$, na temperatura de $373,15 \text{ K}$; $I_D = 50 \mu\text{A}$, e na temperatura de $473,15 \text{ K}$; $I_D = 10 \mu\text{A}$. Ao aumentar o comprimento do canal de $0,2 \mu\text{m}$ para $1 \mu\text{m}$ (5 vezes maior), a corrente de dreno permanece praticamente constante, exceto em altas temperaturas, onde ocorre uma redução significativa, 10 vezes menor em $473,15 \text{ K}$. A tensão V_G inicial é levemente menor no dispositivo com L maior.

Comparando as curvas das figuras 21 (B) $W=10\text{ }\mu\text{m}$, $L=0,2\text{ }\mu\text{m}$, e 21 (D) $W=10\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$, variando o L , na figura 21(B) a tensão V_G começa a variar em $-3,5\text{ V}$, já na figura 21 (D) a tensão V_G é de 3 V , sendo que I_D para figura 21 (B), na temperatura $298,15\text{ K}$; $I_D = 1\text{ mA}$, e na temperatura $373,15\text{ K}$; $I_D = 1\text{ mA}$. sendo que na figura 21 (D), na temperatura $238,15\text{ K}$, $I_D = 1,5\text{ mA}$, e na temperatura $258,15\text{ K}$; $I_D = 1,5\text{ mA}$, na temperatura $298,15\text{ K}$; $I_D = 1\text{ mA}$, na temperatura $373,15\text{ K}$; $I_D = 1\text{ mA}$, na temperatura $473,15\text{ K}$; $I_D = 500\text{ }\mu\text{A}$. Aumentando o comprimento de $0,2\text{ }\mu\text{m}$ para $1\text{ }\mu\text{m}$, a corrente de dreno se mantém praticamente a mesma em temperaturas mais baixas, mas diminui em altas temperaturas (como em $473,15\text{ K}$). A tensão V_G inicial é mais negativa no dispositivo com L menor, indicando uma variação mais precoce.

Figura 21: Gráfico Logarítmico $I_D V_G$ dispositivo Alpha, (A) ($W=1\text{ }\mu\text{m}$; $L=0,2\text{ }\mu\text{m}$), (B) ($W=10\text{ }\mu\text{m}$; $L=0,2\text{ }\mu\text{m}$), (C) ($W=1\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$) e (D) ($W=10\text{ }\mu\text{m}$; $L=1\text{ }\mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.3.4 Análise do Gráfico I_D versus V_G do Dispositivo Ômega Variando W e L

A análise das curvas I_D versus V_G do dispositivo Ômega (Ω) possibilita avaliar a influência da largura W e do comprimento L do canal sobre a condução, assim como os efeitos de temperatura nas diferentes geometrias. O dispositivo Ômega é particularmente útil para evidenciar limitações impostas pela barreira AlGaIn quando o processo de porta é menos eficiente, o que costuma resultar em correntes de dreno menores em comparação com outras divisões de processo.

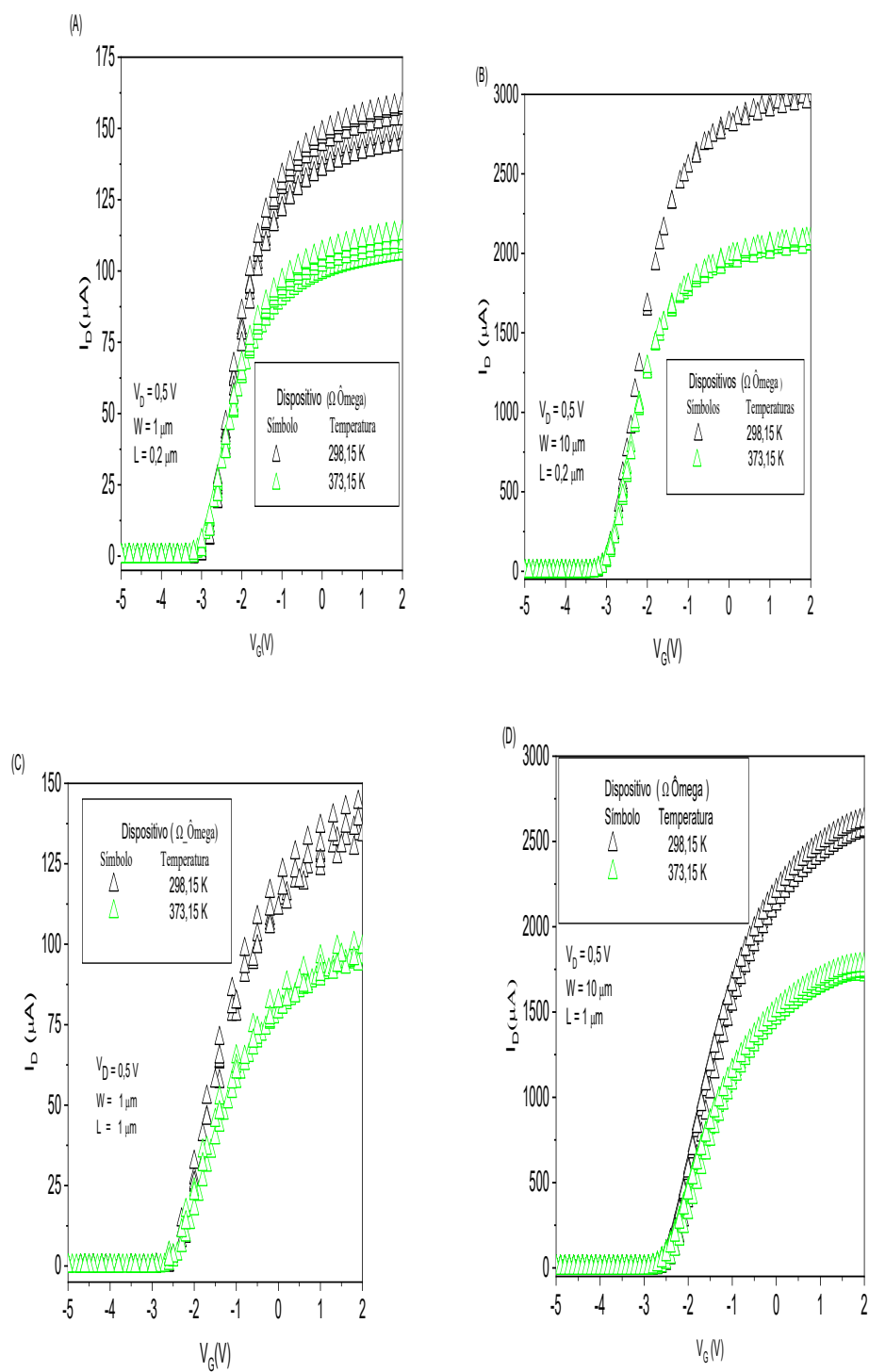
A Figura 22 demonstra as curvas lineares de I_D em função de V_G para quatro combinações geométricas. Em todas as configurações, a corrente de dreno cresce de forma acentuada quando V_G se torna menos negativa, com tensão de limiar entre aproximadamente menos 3 volts e menos 2,5 volts.

Nas Figuras 22(A) e 22(B), o comprimento do canal é mantido em L igual a 0,2 μm e a largura varia de $W = 1 \mu\text{m}$ para $W = 10 \mu\text{m}$. Em 22(A), I_D é da ordem de 150 μA a 298,15 K e 110 μA a 373,15 K. Em 22(B), I_D cresce de forma expressiva, alcançando cerca de 3 mA a 298,15 K e 2 mA a 373,15 K. O aumento de W de 1 para 10 μm eleva a corrente em até vinte vezes, evidenciando a forte dependência de I_D com a largura do canal.

Nas Figuras 22 (C) e 22 (D), o comprimento do canal é $L = 1 \mu\text{m}$, com larguras de $W = 1 \mu\text{m}$ e $W = 10 \mu\text{m}$. Em 22 (C), I_D é cerca de 0,15 mA a 298,15 K e 0,1 mA a 373,15 K. Em 22(D), a corrente atinge aproximadamente 2,5 mA a 298,15 K e 1,75 mA a 373,15 K. O aumento da largura provoca ganho significativo de I_D , entre dezesseis e dezessete vezes, mantendo o ponto de início de condução levemente antecipado para a geometria mais larga.

A comparação entre 22(A) e 22(C), ambas com $W = 1 \mu\text{m}$, demonstra que aumentar L de 0,2 para 1 μm reduz levemente a corrente de dreno, ao mesmo tempo em que antecipa o ponto em que V_G passa a modular I_D de modo perceptível. De forma análoga, a comparação entre 22(B) e 22(D), ambas com W igual a 10 μm , confirma que o aumento do comprimento reduz a corrente de dreno entre aproximadamente vinte e vinte e cinco por cento, com início de atuação da porta ocorrendo em magnitude de V_G um pouco menos negativa.

Figura 22: Gráfico Linear I_D V_G dispositivo Ômega, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

A Figura 23 apresenta as curvas logarítmicas de I_D em função de V_G para o dispositivo Ômega nas mesmas combinações de W e L . Essa representação destaca a evolução de I_D em baixas correntes e o início da tensão de limiar.

Nas Figuras 23 (A) e 23 (B), com L igual a $0,2\ \mu\text{m}$ e larguras de 1 e $10\ \mu\text{m}$, a atuação de V_G inicia por volta de menos $3,5$ volts. Em 23 (A), I_D se mantém próxima de $0,1\ \text{mA}$ nas temperaturas de $298,15\ \text{K}$ e $373,15\ \text{K}$. Em 23(B), I_D é aproximadamente quinze vezes maior, em torno de $1,5\ \text{mA}$ nas mesmas temperaturas. O aumento de W gera, portanto, ganhou quase proporcional de corrente, sem alterar significativamente a tensão de início.

Nas Figuras 23 (C) e 23 (D), com L igual a $1\ \mu\text{m}$ e W de 1 e $10\ \mu\text{m}$, a variação de V_G começa ao redor de menos 3 volts. Em 23 (C), I_D permanece em torno de $0,1\ \text{mA}$ a $298,15\ \text{K}$ e $373,15\ \text{K}$. Em 23 (D), a corrente é da ordem de $1,5\ \text{mA}$ nas mesmas temperaturas. O crescimento de W de 1 para $10\ \mu\text{m}$ eleva I_D em cerca de quinze vezes, mantendo a tensão de início de modulação de porta.

A comparação entre 23 (A) e 23 (C), ambas com W igual a $1\ \mu\text{m}$, indica que aumentar o comprimento de $0,2$ para $1\ \mu\text{m}$ não altera de modo relevante a corrente na região de baixa condução para as temperaturas analisadas, sugerindo que o efeito da resistência adicional é mais perceptível na região linear de maior condução. Já entre 23 (B) e 23 (D), ambas com W igual a $10\ \mu\text{m}$, as correntes são muito semelhantes nas duas temperaturas avaliadas, o que reforça que, nessa faixa de operação em baixa corrente, o aumento de L tem impacto reduzido quando a largura é grande.

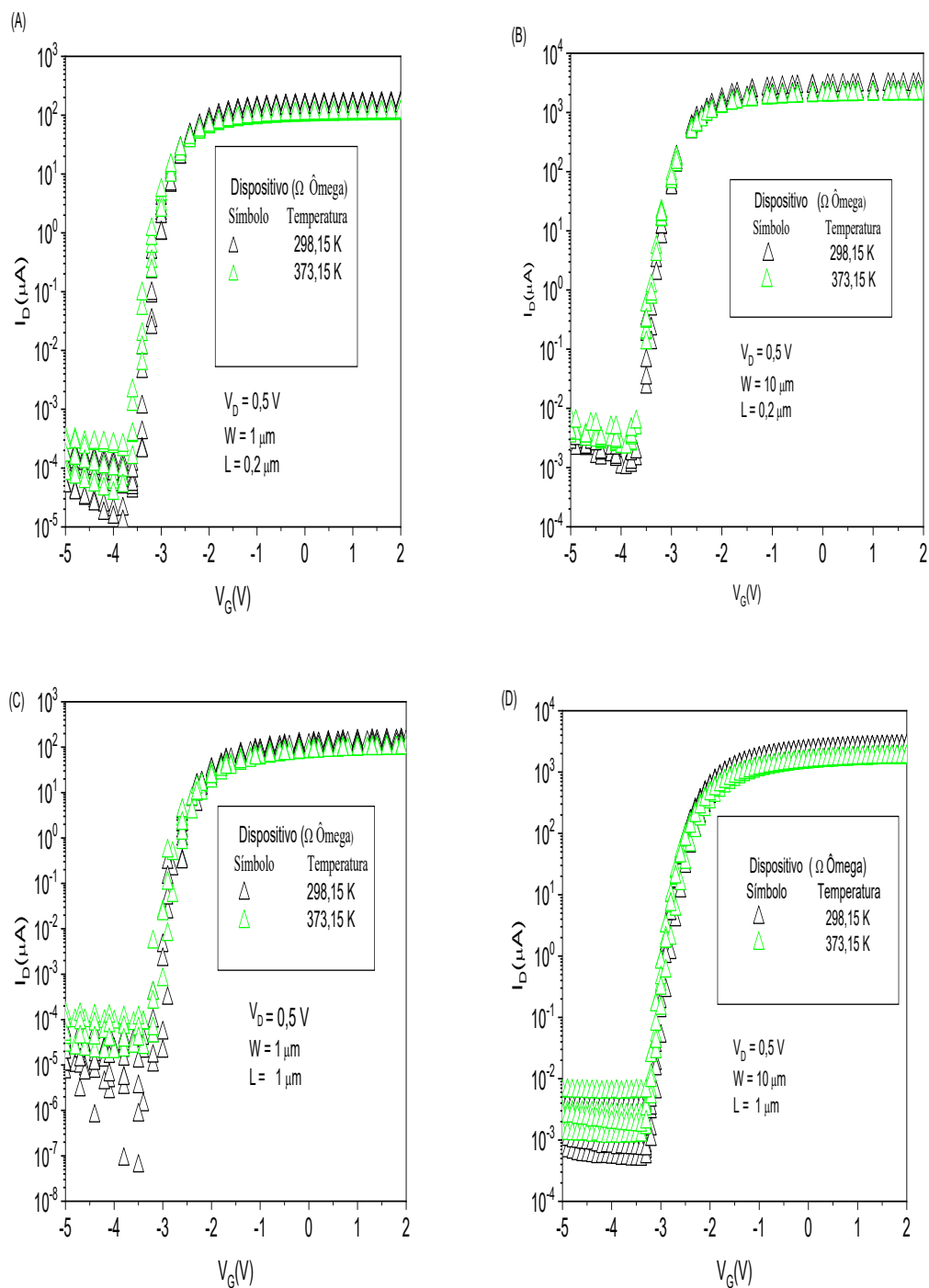
Analisando a curva da figuras 23 (A) $W=1\ \mu\text{m}$, $L=0,2\ \mu\text{m}$, com a curva 23 (B) $W=10\ \mu\text{m}$, $L=0,2\ \mu\text{m}$, variando somente o W , nas figuras 23 (A) e 23 (B) a tensão V_G começa a variar a partir $-3,5\ \text{V}$, tendo os valores I_D para 23 (A), na temperatura $298,15\ \text{K}$; $I_D=100\ \mu\text{A}$, e na temperatura $373,15\ \text{K}$; $I_D=100\ \mu\text{A}$, e os valores de I_D para 23 (B), na temperatura de $298,15\ \text{K}$; $I_D=1,5\ \text{mA}$, e na temperatura de $373,15\ \text{K}$; $I_D=1,5\ \text{mA}$. Ao aumentar a largura do canal de $1\ \mu\text{m}$ para $10\ \mu\text{m}$, a corrente de dreno aumentou 10 vezes (de $0,1\ \text{mA}$ para $1\ \text{mA}$).

Comparando as curvas das figuras 23 (C) $W=1\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$, com a curva 23(D) $W=10\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$, variando somente o W , nas figuras 23 (C) e 23 (D) a tensão V_G começa variar no limiar de -3 V , tendo as seguintes valores de I_D para 23 (C), na temperatura de $298,15\text{ K}$; $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$, e na temperatura de $373,15\text{ K}$; $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$, e os valores de I_D para figura, 23(D), na temperatura de $298,15\text{ K}$; $I_D=1,5\text{ mA}$, na temperatura de $373,15\text{ K}$; $I_D=1,50\text{ mA}$. Ao aumentar W de $1\text{ }\mu\text{m}$ para $10\text{ }\mu\text{m}$, a corrente de dreno aumentou 15 vezes. A tensão de limiar permaneceu igual para ambos os dispositivos (-3 V).

Analisando a figura 23 (A), $W=1\text{ }\mu\text{m}$, $L=0,2\text{ }\mu\text{m}$, com a figura 23(C) $W=1\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$, variando somente o L , na figura 24 (A) a tensão de limiar começa a variar em $-3,5\text{V}$, já na figura 23 (B) a tensão de limiar começa a variar em -3 V , sendo que I_G na figura 23 (A), na temperatura de $298,15\text{ K}$; $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$, e na temperatura de $373,15\text{ K}$; $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$, e na figura 23(C), na temperatura de $298,15\text{ K}$, $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$, e na temperatura de $373,15\text{ K}$, $I_D=100\text{ }\mu\text{A}$. Verificou-se que, aumentando o L cinco vezes não terá alteração na Corrente I_G .

Comparando as curvas das figuras 23(B) $W=10\text{ }\mu\text{m}$, $L=0,2\text{ }\mu\text{m}$, e 24(D) $W=10\text{ }\mu\text{m}$, $L=1\text{ }\mu\text{m}$, variando o L , na figura 23 (B) a tensão de limiar começa a variar em $-3,5\text{ V}$, já na figura 23 (D) a tensão de limiar é de -3 V , sendo I_D na figura 23 (B), na temperatura $298,15\text{ K}$; $I_D=1,5\text{ mA}$, e na temperatura $373,15\text{ K}$; $I_D=1,5\text{ mA}$. sendo que na figura 23(D), na temperatura $298,15\text{ K}$; $I_D=1,5\text{ mA}$, na temperatura $373,15\text{ K}$; $I_D=1,5\text{ mA}$. Verificou-se que, aumentando o L cinco vezes não terá alteração na Corrente I_G .

Figura 23: Gráficos logarítmicos $I_D V_G$ dispositivo $\hat{\Omega}$ mega, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) $W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$, (C) $W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$ e (D) $W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$.



Fonte: Autor.

3.3.5 Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Gamma

Variando W e L

A análise das curvas logarítmicas I_G versus V_G do dispositivo Gamma (γ) viabiliza compreender como as dimensões do canal influenciam a corrente de fuga na porta, especialmente sob condições de polarização direta. Esse estudo é importante porque revela a estabilidade da barreira de Schottky e a eficiência do processo de metalização de porta, fatores determinantes para a confiabilidade do dispositivo. A Figura 24 evidencia as curvas de I_G em função de V_G para quatro geometrias distintas, variando a largura (W) e o comprimento (L) do canal, nas temperaturas de 273,15 K e 298,15 K. Identifica-se que, em todas as amostras, a corrente de fuga começa a aumentar quando a tensão de porta ultrapassa aproximadamente 1 V, faixa típica de condução direta na região de porta.

Nas Figuras 24 (A) e 24 (B), o comprimento do canal é mantido em L igual a 0,2 μm , enquanto a largura varia de W igual a 1 μm para W igual a 10 μm . Em ambas as geometrias, a tensão de porta inicia a atuação em torno de 1 V. Na Figura 24 (A), a corrente de fuga é de aproximadamente 10 μA nas temperaturas de 273,15 K e 298,15 K. Já na Figura 24(B), a corrente aumenta para cerca de 0,1 mA, representando um acréscimo de uma ordem de grandeza em relação ao dispositivo mais estreito. Esse resultado demonstra que o aumento da largura do canal amplia a área efetiva da junção metal-semicondutor, favorecendo o tunelamento de elétrons e aumentando proporcionalmente a corrente I_G . Além disso, a tensão de início de condução da porta não se altera, permanecendo constante em 1 V para ambas as larguras.

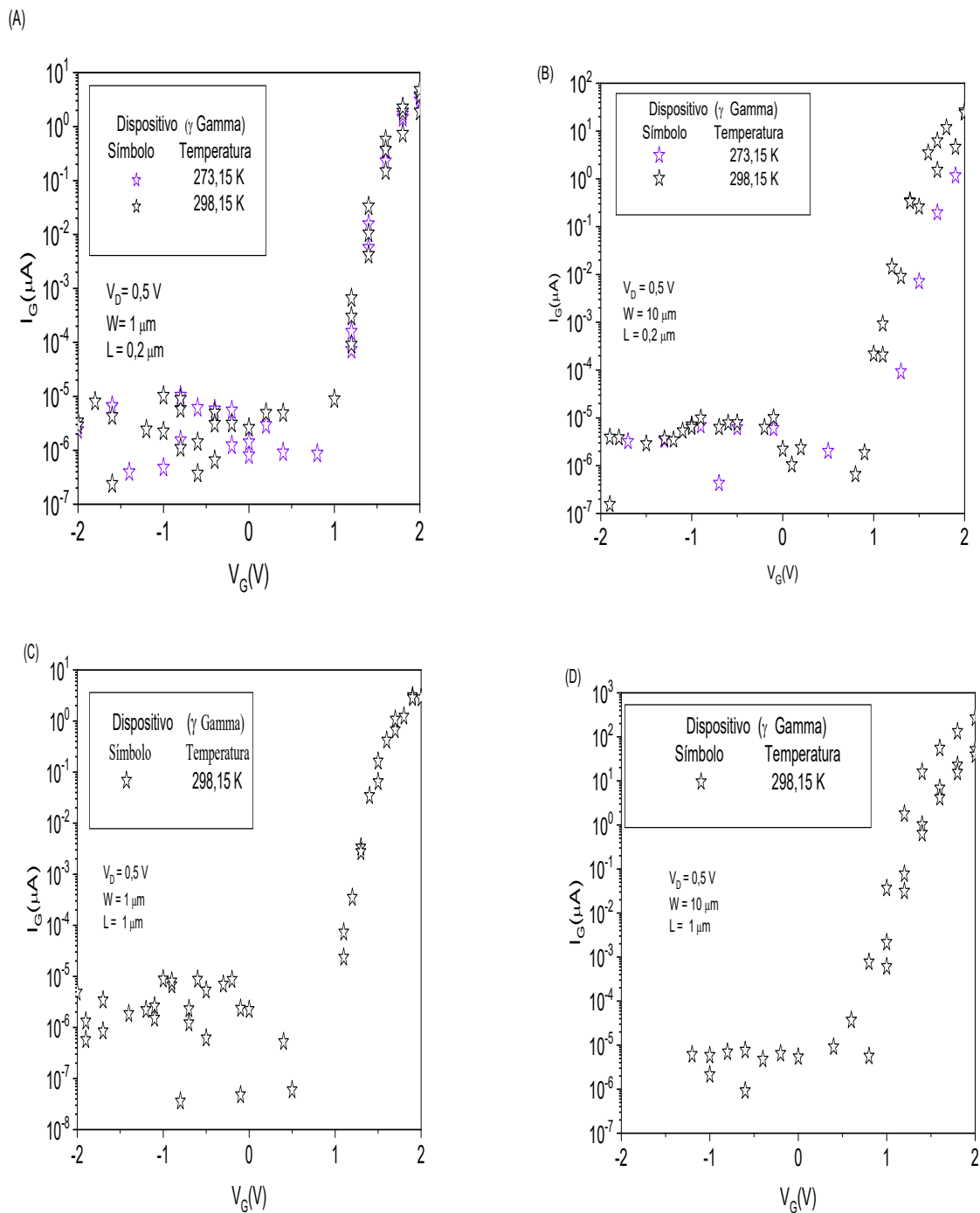
Nas Figuras 24 (C) e 24 (D), o comprimento do canal é aumentado para L igual a 1 μm , mantendo as larguras de W igual a 1 e 10 μm . Em 24 (C), a corrente de fuga é da ordem de 10 μA a 298,15 K, enquanto em 24 (D) atinge cerca de 100 μA . O aumento de W de 1 para 10 μm provoca um acréscimo de dez vezes na corrente I_G .

A comparação entre as Figuras 24 (A) e 24 (C), ambas com W igual a $1\text{ }\mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento do canal de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não altera significativamente a corrente de porta, que se mantém em torno de $10\text{ }\mu\text{A}$. Isso indica que o comprimento não influencia de forma relevante o mecanismo de condução da corrente I_G , já que este depende majoritariamente do campo elétrico na interface metal-semicondutor e não do transporte lateral. Por outro lado, comparando as Figuras 24 (B) e 24 (D), ambos com $W = 10\text{ }\mu\text{m}$ e $W = 1\text{ }\mu\text{m}$, observa-se que a corrente de fuga aumenta ligeiramente com o aumento do comprimento, alcançando até $0,1\text{ mA}$ em 24 (D) a $298,15\text{ K}$. Esse aumento pode estar associado ao acúmulo de portadores sob a porta, que favorece o tunelamento assistido por campo, embora o efeito observado seja de pequena magnitude. Em ambos os casos, a tensão de início de condução da porta permanece inalterada em torno de 1 V .

Os resultados mostram que a corrente de fuga I_G é fortemente dependente da largura do canal e pouco sensível ao comprimento. O aumento de W eleva a corrente aproximadamente em uma ordem de grandeza, enquanto a variação de L não provoca mudanças expressivas. A tensão de limiar é praticamente constante para todas as geometrias, evidenciando que o campo elétrico crítico necessário ao tunelamento não é alterado pela geometria. As variações de temperatura entre $273,15\text{ K}$ e $298,15\text{ K}$ também não afetam significativamente os valores de I_G , o que indica predominância do mecanismo de tunelamento direto, que depende principalmente do campo elétrico e da espessura da barreira, e não da energia térmica dos portadores.

Assim, pode-se concluir que o dispositivo Gamma (dependendo da região da curva) apresenta a corrente de porta proporcional à largura do canal e estável frente a variações de temperatura e comprimento, o que confirma a boa uniformidade do processo de metalização de porta e da barreira de AlGaIn. Esse comportamento é típico de dispositivos com interfaces bem controladas, em que o tunelamento direto é o principal mecanismo de condução na região de polarização direta.

Figura 24: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo Gamma, (A) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W= 1 \mu\text{m}$, $L= 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W= 10 \mu\text{m}$; $L= 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.3.6 Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Beta

Variando W e L

A análise das curvas logarítmicas I_G versus V_G do dispositivo Beta (β) torna possível avaliar a influência das dimensões geométricas e da temperatura sobre a corrente de fuga na porta. Esse tipo de análise é essencial para compreender os mecanismos de tunelamento através da barreira de AlGaIn e o impacto das variações dimensionais na estabilidade elétrica do dispositivo. A Figura 26 exibe as curvas de I_G em função de V_G para quatro geometrias diferentes, obtidas nas temperaturas de 253,15 K, 273,15 K, 298,15 K e 373,15 K. Em todas as configurações, observa-se que a condução na porta se inicia em torno de V_G igual a 1V, indicando comportamento consistente entre os dispositivos.

Nas Figuras 25 (A) e 25 (B), o comprimento do canal é mantido em L igual a 0,2 μm , enquanto a largura varia de W igual a 1 μm para W igual a 10 μm . Em ambas as geometrias, a tensão de porta começa a atuar em torno de 1 volt. Na Figura 25(A), a corrente de fuga é de aproximadamente 1 nA a 253,15 K, 10 nA a 273,15 K e 298,15 K, e atinge 1 μA a 373,15 K. Na Figura 25 (B), a corrente é consideravelmente maior, com valores de cerca de 10 nA a 253,15 K e 273,15 K, 100 μA a 298,15 K e 373,15 K. O aumento de W de 1 para 10 μm resultou em um acréscimo de até duas ordens de grandeza na corrente de porta, efeito mais acentuado nas temperaturas elevadas. A tensão de início da condução, no entanto, manteve-se constante em 1V, demonstrando que a largura altera a magnitude da corrente, mas não o campo elétrico crítico necessário ao início da condução.

Nas Figuras 25(C) e 25(D), o comprimento do canal é aumentado para L igual a 1 μm , mantendo-se as larguras. Em 25(C), a corrente de porta é aproximadamente 10 μA a 298,15 K e 10 μA a 373,15 K. Em 25 (D), com largura de 10 μm , a corrente atinge cerca de 100 μA nas duas temperaturas. O aumento da largura do canal de 1 para 10 μm eleva a corrente de fuga em cerca de dez vezes, enquanto a tensão de porta permanece constante em torno de 1V. Essa proporção direta entre W e I_G confirma que a largura é o principal fator geométrico que influencia a intensidade da corrente de fuga.

A comparação entre as Figuras 25(A) e 25(C), ambas com W igual a $1\text{ }\mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento do canal de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ provoca um acréscimo na corrente de porta, que passa de aproximadamente 10 nA para cerca de $10\text{ }\mu\text{A}$, representando um aumento de até mil vezes. Esse comportamento sugere que o comprimento do canal influencia a distribuição do campo elétrico sob a porta, podendo intensificar o tunelamento em regiões mais longas devido ao acúmulo de carga e à redução da espessura efetiva da barreira. Além disso, a corrente de porta começa a variar levemente antes no dispositivo com canal mais longo, indicando que o campo de atuação é estabelecido de forma mais uniforme ao longo da região de porta.

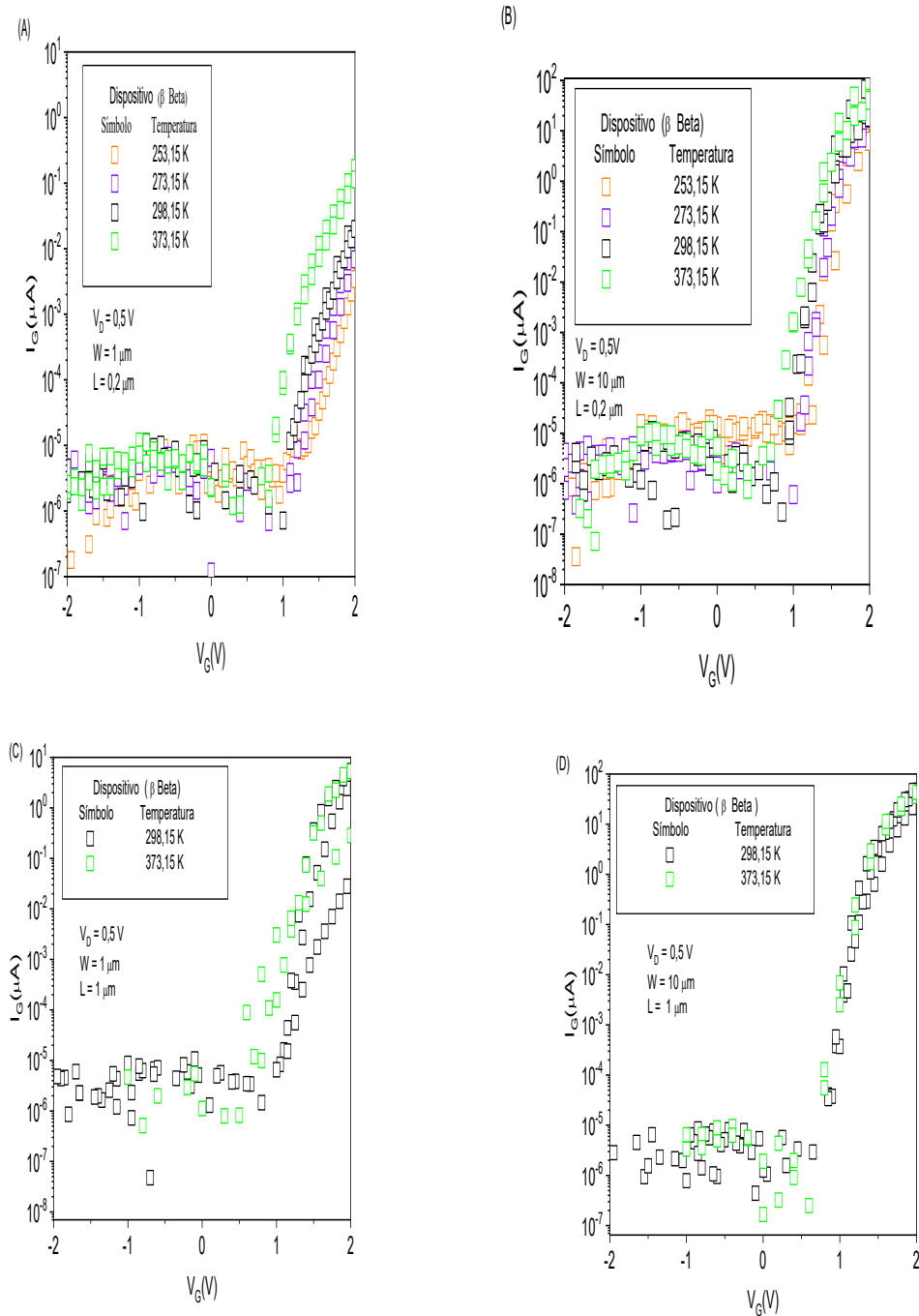
Comparando as Figuras 25 (B) e 25 (D), ambas com W igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, identifica-se que a corrente de porta também inicia a atuação em torno de 1 A . Em 25 (B), as correntes de porta são de aproximadamente $10\text{ }\mu\text{A}$ a $253,15\text{ K}$ e $273,15\text{ K}$, e 100 nA a $298,15\text{ K}$ e $373,15\text{ K}$. Em 25(D), os valores permanecem próximos de 100 nA nas mesmas temperaturas, indicando que, nesse caso, o aumento do comprimento de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não altera significativamente a corrente. Essa estabilidade sugere que, para larguras elevadas, o efeito do comprimento é compensado pela maior área de condução, mantendo o fluxo total de portadores praticamente constante.

Os resultados obtidos mostram que o dispositivo Beta apresenta corrente de porta proporcional à largura do canal e com dependência variável em relação ao comprimento, dependendo da faixa dimensional e da temperatura. A tensão de início de condução ($V_G \approx 1\text{ V}$) se manteve constante para todas as geometrias, evidenciando que o campo elétrico necessário ao tunelamento é determinado principalmente pelas propriedades da barreira e do metal de porta, e não pela geometria do canal, o que indica participação do tunelamento assistido termicamente em temperaturas acima de 300 K .

De modo geral, a corrente I_G nos dispositivos Beta é dominada pelo tunelamento direto em baixas temperaturas e pelo tunelamento assistido pelo campo em temperaturas mais altas. A proporcionalidade entre a largura e a corrente confirma que a área de contato da porta tem papel fundamental no controle da fuga, enquanto o comprimento influencia o gradiente de potencial na região de barreira.

Esses resultados mostram que as etapas de fabricação do dispositivo Beta confere boa estabilidade elétrica, mantendo baixos níveis de corrente de fuga e comportamento reprodutível entre as diferentes geometrias.

Figura 25: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo Beta, (A) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W= 1 \mu\text{m}$, $L= 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W= 10 \mu\text{m}$; $L= 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.3.7 Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Alpha Variando W e L

A análise das curvas logarítmicas I_G versus V_G do dispositivo Alpha (α) tem como objetivo compreender como as dimensões geométricas do canal influenciam a

corrente de fuga na porta e o comportamento da barreira Schottky sob diferentes temperaturas. Esse estudo é essencial para avaliar a estabilidade elétrica e a eficiência do processo de metalização de porta. A Figura 26 exibe as curvas de I_G em função de V_G para quatro combinações de largura (W) e comprimento (L) do canal, obtidas em temperaturas que variam de 238,15 K a 473,15 K. Em todas as geometrias, observa-se que a corrente de porta começa a aumentar de forma significativa quando a tensão V_G atinge aproximadamente 1 V, o que indica o início da condução direta na região da junção metal-semicondutor.

Nas Figuras 26 (A) e 26 (B), o comprimento do canal é mantido constante em L igual a 0,2 μm , enquanto a largura varia de W igual a 1 μm para W igual a 10 μm . Em ambos os casos, a tensão de porta começa a atuar em torno de 1 V. Na Figura 26 (A), a corrente de porta é da ordem de 10 μA tanto a 298,15 K quanto a 373,15 K. Na Figura 26 (B), a corrente aumenta para cerca de 100 μA nas mesmas temperaturas, o que representa um acréscimo proporcional à largura do canal. O aumento de W de 1 para 10 μm provoca, portanto, um aumento de dez vezes em I_G , mantendo-se a tensão de início de condução.

Nas Figuras 26(C) e 26(D), o comprimento do canal é aumentado para L igual a 1 μm , com larguras de W igual a 1 μm e W igual a 10 μm , respectivamente. Em 26 (C), a corrente de porta varia de 0,1 μA nas temperaturas mais baixas (238,15 K e 253,15 K) até cerca de 10 μA em temperaturas elevadas (373,15 K e 473,15 K). Em 26(D), a corrente é cerca de dez vezes maior para todas as temperaturas, atingindo aproximadamente 100 μA a 298,15 K e 373,15 K. Essa proporção linear entre W e I_G se mantém ao longo de toda a faixa térmica analisada, indicando que o aumento da largura amplia a corrente de fuga de forma previsível, sem alterar a tensão de início da condução, que permanece próxima de 1 V.

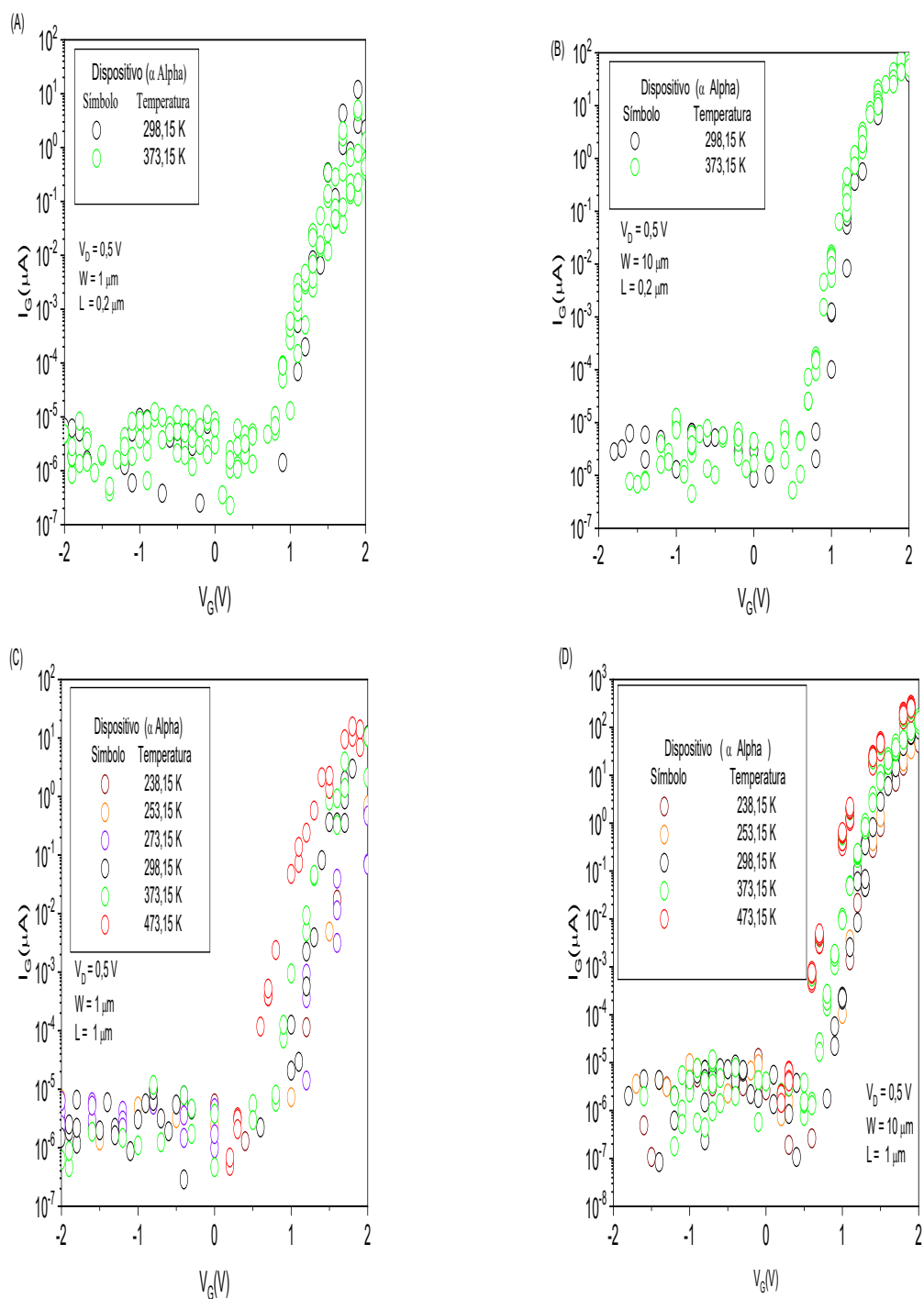
A comparação entre as Figuras 26 (A) e 26 (C), ambas com W igual a 1 μm , demonstra que o aumento do comprimento do canal de 0,2 para 1 μm reduz a corrente de fuga nas temperaturas mais baixas, mas mantém valores próximos de 10 μA em temperaturas mais altas. Em temperaturas elevadas, a corrente tende a se estabilizar devido ao aumento da energia térmica disponível, o que reduz a sensibilidade de I_G ao comprimento do canal. Além disso, observa-se que a tensão de porta começa a variar levemente antes no dispositivo com L igual a 1 μm .

A comparação entre as Figuras 26 (B) e 26 (D), ambas com W igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não altera de forma expressiva a corrente em temperaturas mais altas, permanecendo próxima de $100\text{ }\mu\text{A}$ a $298,15\text{ K}$ e $373,15\text{ K}$. Entretanto, em temperaturas mais baixas, nota-se uma leve redução da corrente no dispositivo de canal mais longo, o que indica maior sensibilidade térmica. Isso pode estar relacionado a uma menor densidade de portadores e à distribuição de potencial mais homogênea, que reduzem a probabilidade de tunelamento em temperaturas reduzidas. Em ambos os casos, a tensão de início de condução permanece em 1 V , evidenciando estabilidade no comportamento da barreira Schottky.

Os resultados obtidos mostram que a corrente I_G no dispositivo Alpha é proporcional à largura do canal e apresenta uma dependência mais sutil em relação ao comprimento, que se manifesta principalmente em baixas temperaturas. O campo elétrico crítico responsável pelo início da condução é praticamente constante para todas as geometrias, o que demonstra que a espessura e a composição da barreira de AlGaIn são os principais fatores determinantes da condução.

Esses resultados indicam que o dispositivo Alpha possui comportamento previsível e estável sob variações geométricas e térmicas, apresentando boa uniformidade da barreira de porta e baixo nível de corrente de fuga. Essa estabilidade reforça a qualidade do processo de metalização TiN/AlCu e a integridade da interface metal-semicondutor, fatores essenciais para aplicações de alta confiabilidade em dispositivos HEMTs.

Figura 26: Gráfico Log $I_G V_G$ dispositivo Alpha, (A) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W = 1 \mu\text{m}$; $L = 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W = 1 \mu\text{m}$, $L = 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W = 10 \mu\text{m}$; $L = 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.3.8 Análise do Gráfico Logarítmico I_G versus V_G do Dispositivo Ômega

Variando W e L

A análise das curvas logarítmicas I_G versus V_G do dispositivo Ômega (Ω) permite compreender o comportamento da corrente de fuga na porta sob diferentes geometrias e temperaturas. Esse estudo é essencial para avaliar a estabilidade da barreira de Schottky e a eficiência do processo de porta em dispositivos com diferentes larguras e comprimentos de canal. A Figura 28 apresenta as curvas de I_G em função de V_G para quatro combinações geométricas, nas temperaturas de 298,15 K e 373,15 K. Identifica-se que, em todas as configurações, a corrente de porta começa a aumentar a partir de aproximadamente 0,5 V, indicando o início da condução direta da barreira metal-semicondutor.

Nas Figuras 27 (A) e 27 (B), o comprimento do canal é mantido em L igual a 0,2 μm , enquanto a largura varia de W igual a 1 μm para W igual a 10 μm . Em ambos os casos, a tensão de porta inicia sua variação em torno de 0,5 V. Na Figura 27 (A), a corrente I_G é da ordem de 0,001 mA a 298,15 K e se mantém nesse valor a 373,15 K. Na Figura 27 (B), a corrente aumenta significativamente, atingindo cerca de 0,1 mA nas mesmas temperaturas. O aumento de W de 1 para 10 μm resultou em uma elevação de dez vezes na corrente de porta, demonstrando que a largura tem influência direta sobre a magnitude de I_G , uma vez que o aumento da área de contato favorece o fluxo de portadores por tunelamento. A tensão de início de condução, entretanto, permanece constante em 0,5 V para ambas as larguras.

Nas Figuras 27(C) e 27(D), o comprimento do canal é aumentado para L igual a 1 μm , mantendo as larguras de W igual a 1 e 10 μm . Em ambas as geometrias, a tensão de porta inicia a condução em aproximadamente 0,5 V. Na Figura 27(C), a corrente I_G é da ordem de 0,01 mA tanto a 298,15 K quanto a 373,15 K. Na Figura 27 (D), a corrente atinge cerca de 0,1 mA para as mesmas temperaturas. O aumento de W de 1 para 10 μm produz novamente um aumento de dez vezes na corrente de porta, confirmando a proporcionalidade direta entre a largura do canal e I_G , e mantendo inalterada a tensão de início da condução.

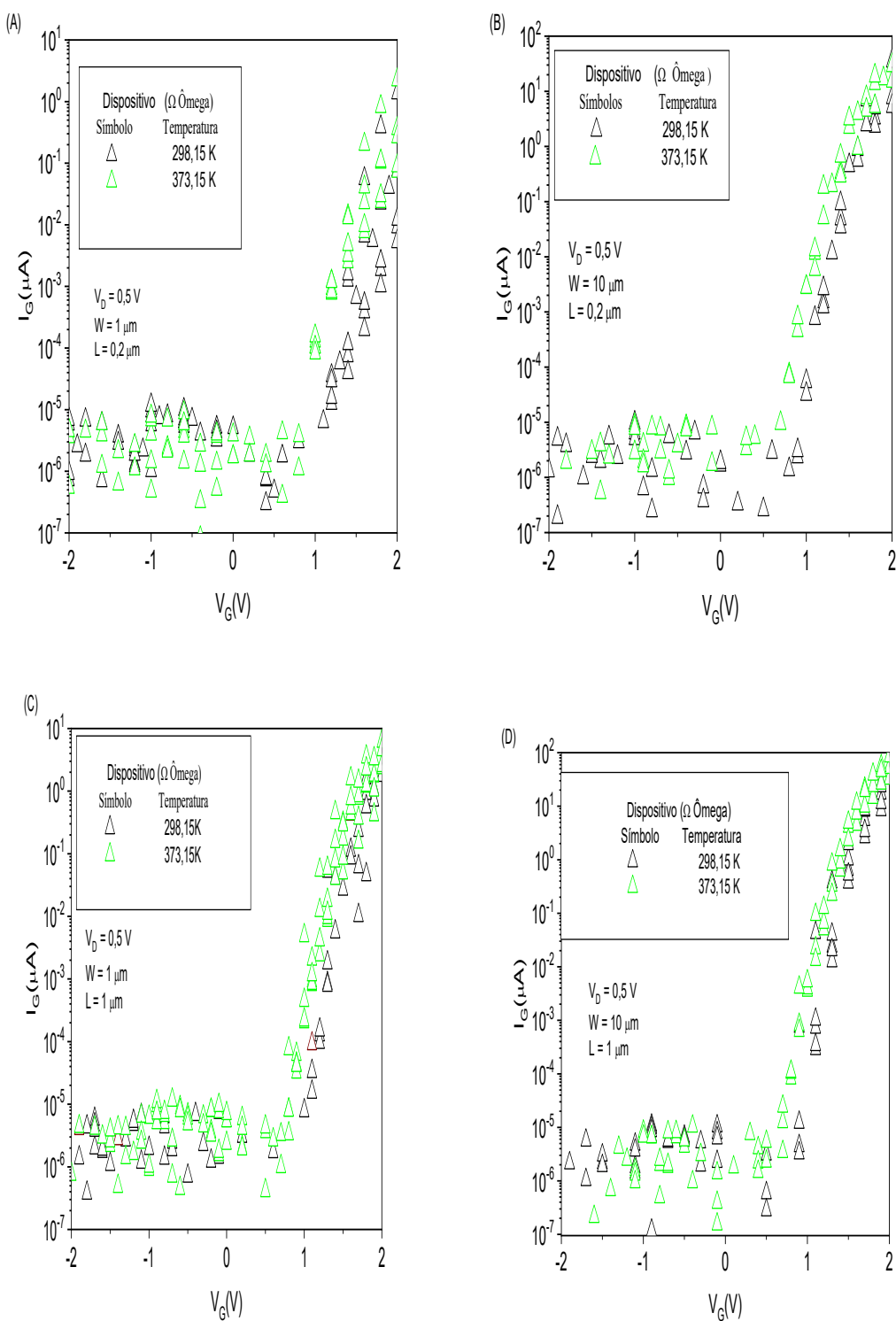
A comparação entre as Figuras 27 (A) e 27 (C), ambas com W igual a $1\text{ }\mu\text{m}$, demonstra que o aumento do comprimento do canal de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não alterou significativamente a corrente de porta, que se manteve constante em $1\text{ }\mu\text{A}$ a $298,15\text{ K}$ e $373,15\text{ K}$. Esse comportamento indica que o comprimento do canal exerce influência mínima sobre a corrente I_G , sugerindo que o mecanismo predominante de condução é o tunelamento direto, controlado essencialmente pelo campo elétrico perpendicular à interface metal-semicondutor, e não pelo transporte lateral.

Da mesma forma, ao comparar as Figuras 27 (B) e 27 (D), ambas com W igual a $10\text{ }\mu\text{m}$, observa-se que o aumento do comprimento de $0,2$ para $1\text{ }\mu\text{m}$ não alterou a corrente de porta, que permaneceu em torno de $100\text{ }\mu\text{A}$ para ambas as temperaturas. Esse resultado reforça que, para dispositivos com grandes larguras, a contribuição da resistência de canal é praticamente desprezível para a corrente de fuga na porta, uma vez que a condução ocorre de forma dominante pela barreira Schottky. A tensão de início de condução, em torno de $0,5\text{ V}$, também permaneceu constante, demonstrando estabilidade do comportamento elétrico.

Os resultados obtidos mostram que a corrente I_G no dispositivo Ômega é fortemente dependente da largura e praticamente independente do comprimento do canal. O aumento de W amplia linearmente a corrente, enquanto a variação de L não altera significativamente o valor de I_G . A tensão de início de condução é a mesma em todas as geometrias analisadas, evidenciando que o campo elétrico crítico necessário ao início do tunelamento é determinado pelas propriedades intrínsecas da barreira de AlGaIn, e não pela dimensão do canal. As medições em diferentes temperaturas mostram que a corrente de fuga se mantém estável, o que sugere predominância do mecanismo de tunelamento direto, pouco sensível à temperatura na faixa de operação analisada.

De forma geral, o dispositivo Ômega exibe comportamento previsível e coerente com as demais divisões de processo, embora com correntes de fuga relativamente mais elevadas devido à menor eficiência da barreira Schottky associada ao seu fluxo de fabricação. A estabilidade térmica e a linearidade entre a largura do canal e a corrente I_G demonstram boa uniformidade do processo e indicam que o dispositivo mantém características reproduzíveis sob diferentes condições geométricas e térmicas.

Figura 27: Gráfico Logarítmico $I_G V_G$ dispositivo $\hat{\Omega}$ mega, (A) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (B) ($W= 1 \mu\text{m}$; $L= 0,2 \mu\text{m}$), (C) ($W= 1 \mu\text{m}$, $L= 1 \mu\text{m}$) e (D) ($W= 10 \mu\text{m}$; $L= 1 \mu\text{m}$).



Fonte: Autor.

3.4 Análise das Características Elétricas em função da Temperatura

3.4.1 Análise da Corrente de Dreno (I_D) em Todos os Dispositivos

A variação da corrente de dreno com a temperatura está associada principalmente à mobilidade dos portadores no canal e aos processos de espalhamento eletrônico. À medida que a temperatura aumenta, o espalhamento por fônons torna-se mais significativo, podendo reduzir a mobilidade efetiva dos elétrons no gás bidimensional de elétrons (2DEG).

As Figuras 28 (A) a 28 (D) apresentam a comparação entre os quatro tipos de dispositivos, Gamma, Beta, Alpha e Ômega, para diferentes combinações geométricas de largura (W) e comprimento (L) do canal. Em todas as configurações analisadas, observa-se que o aumento da temperatura provoca a diminuição progressiva de I_D , comportamento característico de dispositivos de efeito de campo, associado à redução da mobilidade dos elétrons e ao aumento da resistência série.

Nos dispositivos com $W = 1 \mu\text{m}$ e $L = 0,2 \mu\text{m}$ (Figura 28 A), o Gamma apresenta I_D de $250 \mu\text{A}$ a $273,15 \text{ K}$ e $230 \mu\text{A}$ a $298,15 \text{ K}$, mantendo o maior desempenho entre os quatro. O Beta demonstra $180 \mu\text{A}$ a $253,15 \text{ K}$, $160 \mu\text{A}$ a $273,15 \text{ K}$ e $100 \mu\text{A}$ a $373,15 \text{ K}$, indicando sensibilidade térmica mais acentuada. O Alpha exibe $190 \mu\text{A}$ a $298,15 \text{ K}$ e $130 \mu\text{A}$ a $373,15 \text{ K}$, enquanto o Ômega registra $150 \mu\text{A}$ a $298,15 \text{ K}$ e $100 \mu\text{A}$ a $373,15 \text{ K}$. Nessa condição, o Gamma mostra-se o mais eficiente, seguido de Alpha, Beta e Ômega, evidenciando influência direta das diferenças de processo e da qualidade da barreira de condução.

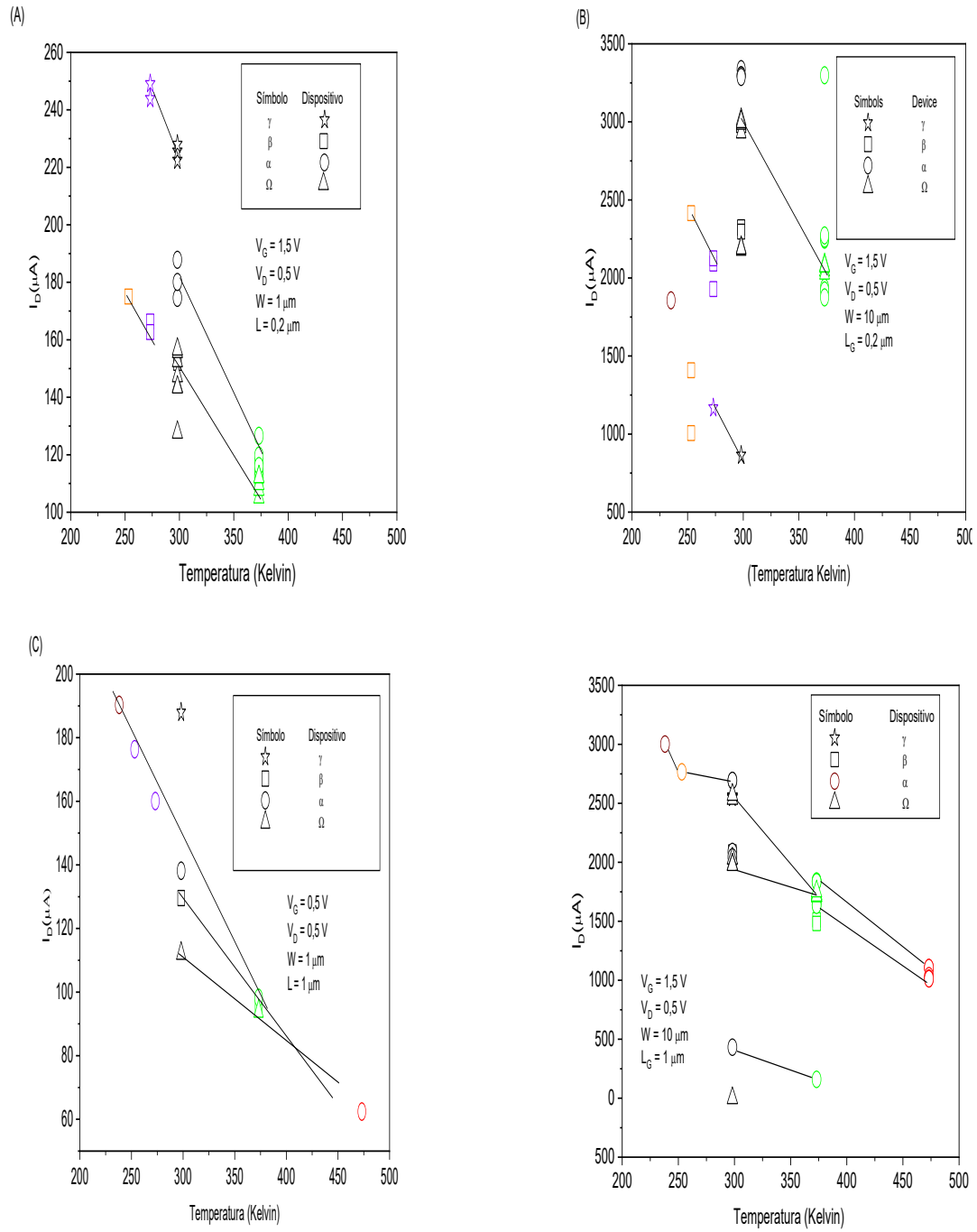
Com o aumento da largura do canal para $10 \mu\text{m}$ e comprimento fixo em $0,2 \mu\text{m}$ (Figura 28 B), ocorre crescimento expressivo da corrente de dreno em todos os dispositivos. O Gamma atinge $1,20 \text{ mA}$ a $273,15 \text{ K}$ e $750 \mu\text{A}$ a $298,15 \text{ K}$. O Beta exibe $2,40 \text{ mA}$ a $253,15 \text{ K}$, 2 mA a $273,15 \text{ K}$, $2,20 \text{ mA}$ a $298,15 \text{ K}$ e 2 mA a $373,15 \text{ K}$. O Alpha apresenta $3,25 \text{ mA}$ a $298,15 \text{ K}$ e $2,25 \text{ mA}$ a $373,15 \text{ K}$, enquanto o Ômega atinge 3 mA a $298,15 \text{ K}$ e 2 mA a $373,15 \text{ K}$. O aumento da largura do canal eleva quase linearmente a corrente de dreno, confirmando a proporcionalidade entre I_D e W . O Alpha exibe os maiores valores de corrente, seguido do Ômega e do Beta, enquanto o Gamma mantém desempenho estável e controlado.

Na configuração com $W = 1 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$ (Figura 28 C), a ampliação do comprimento do canal reduz a corrente de dreno em todos os dispositivos. O Gamma exibe 0,19 mA a 298,15 K, o Beta 0,13 mA a 253,15 K e 0,1 mA a 273,15 K, o Alpha 0,14 mA a 298,15 K e o Ômega 0,110 mA a 298,15 K e 0,090 mA a 373,15 K. O aumento de L provoca maior resistência no canal, restringindo o fluxo de portadores, embora o Gamma continue apresentando a melhor estabilidade térmica.

Para $W = 10 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$ (Figura 28 D), o comportamento é semelhante, mas com correntes significativamente maiores. O Gamma alcança 2,50 mA a 298,15 K, o Beta 2 mA a 298,15 K e 1,50 mA a 373,15 K. O Alpha registra 3 mA a 253,15 K, 2,50 mA a 298,15 K, 1,50 mA a 373,15 K e 1 mA a 473,15 K. O Ômega, por sua vez, apresenta as correntes mais elevadas, atingindo 25 mA a 298,15 K e 17 mA a 373,15 K, possivelmente devido a uma barreira de porta menos eficiente ou a características de metalização distintas. Em todas as estruturas, o aumento da temperatura reduz a corrente de dreno, reforçando a dominância dos efeitos de mobilidade e de resistência série.

de maneira geral, as curvas das Figuras 28 (A) a 28 (D) demonstram que a corrente de dreno cresce proporcionalmente à largura do canal e diminui com o aumento do comprimento e da temperatura. O comportamento térmico é consistente entre todos os dispositivos. O Gamma exibe desempenho estável e previsível, enquanto o Ômega, embora forneça correntes mais elevadas, é o mais sensível à temperatura. Essa diferença decorre das particularidades do processo de fabricação e das propriedades das barreiras de AlGaIn em cada tipo de HEMT.

Figura 28: I_D versus temperatura em todos os dispositivos (γ , β , α , Ω).



Fonte: Autor.

3.4.2 Análise da I_G em todos os dispositivos

A corrente de porta é um importante indicador da qualidade da barreira de Schottky e do isolamento do canal em dispositivos HEMTs. A análise da variação de I_G em função da temperatura viabiliza identificar os mecanismos predominantes de condução através da barreira e a eficiência dos processos de fabricação. As Figuras 29(A) a 29(D) apresentam o comportamento da corrente de porta nos quatro dispositivos estudados, Gamma, Beta, Alpha e Ômega, para diferentes dimensões de largura e comprimento do canal, em uma faixa de temperatura de 238,15 K a 473,15 K.

Nos dispositivos com $W = 1 \mu\text{m}$ e $L = 0,2 \mu\text{m}$, verifica-se que o Gamma demonstra correntes de porta de 100 nA a 273,15 K e 500 nA a 298,15 K. O Beta mostra valores de 10 nA a 253,15 K e 273,15 K, aumentando para 150 nA a 298,15 K. O Alpha apresenta I_G de 25 nA a 298,15 K e 150 μA a 373,15 K, indicando maior sensibilidade térmica. O Ômega, por sua vez, apresenta 0,0001 mA a 298,15 K e 150 μA a 373,15 K, comportamento que evidencia forte aumento de fuga em altas temperaturas. Nesta geometria, o crescimento de I_G com a temperatura sugere a presença de mecanismos de emissão assistida termicamente, predominantes nas estruturas Alpha e Ômega.

Com o aumento da largura do canal para $W = 10 \mu\text{m}$ e $L = 0,2 \mu\text{m}$, a corrente de porta tende a crescer em todos os dispositivos. O Gamma apresenta I_G de 200 nA a 298,15 K. O Beta exibe 200 nA a 238,15 K e 1 μA a 298,15 K. O Alpha mostra 1,5 μA a 238,15 K, 5 μA a 298,15 K e 4 μA a 373,15 K, mantendo valores mais elevados entre os quatro. O Ômega apresenta 1 μA a 298,15 K e 5 μA a 373,15 K. O aumento da largura do canal eleva a corrente de fuga proporcionalmente à área de contato metálico, além de intensificar o efeito da temperatura sobre a barreira de condução.

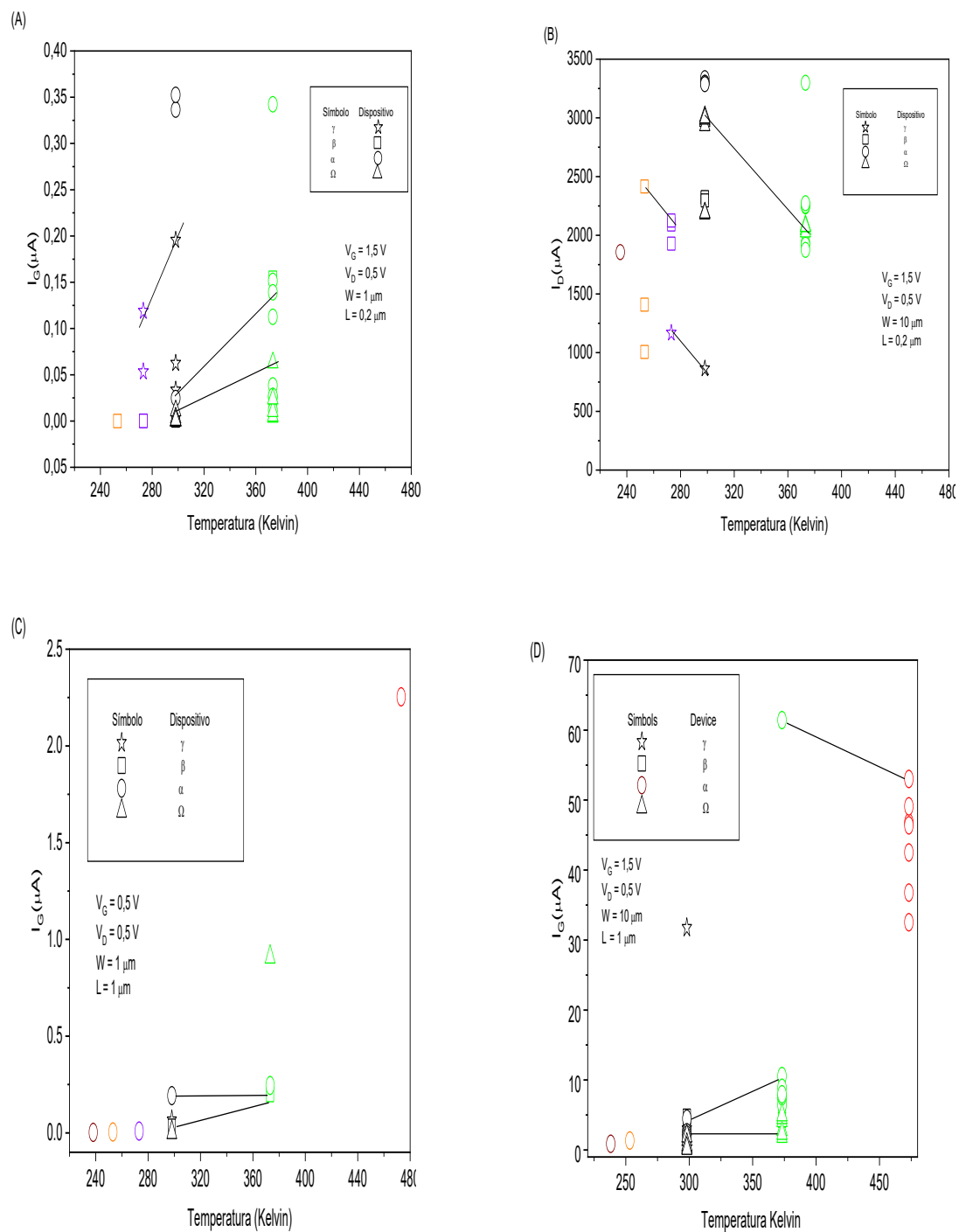
Nos dispositivos com $W = 1 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$, identifica-se uma significativa redução da corrente de porta, reflexo da maior resistência e do aumento do caminho de tunelamento. O Gamma apresenta I_G de 1 nA a 298,15 K, enquanto o Beta apresenta o mesmo valor nessa temperatura e 10 nA a 373,15 K. O Alpha mostra valores praticamente nulos até 273,15 K, atingindo 1 nA a 298,15 K e 10 nA a 373,15 K. O Ômega mantém I_G nula até 298,15 K e passa a 1 μA a 373,15 K.

Essa diminuição de I_G em estruturas com maior comprimento indica melhor controle da barreira e menor densidade de defeitos responsáveis por condução por armadilhas.

Na configuração com $W = 10 \mu\text{m}$ e $L = 1 \mu\text{m}$, a corrente de porta mantém-se em níveis baixos, com leve aumento em temperaturas mais altas. O Gamma apresenta I_G de 300 nA a 298,15 K. O Beta apresenta 500 nA a 298,15 K e 100 nA a 373,15 K. O Alpha mostra 500 nA a 298,15 K, 100 nA a 373,15 K e 500 nA a 473,15 K. O Ômega apresenta 500 nA a 298,15 K e 100 nA a 373,15 K. De modo geral, o aumento da largura tende a ampliar levemente a corrente de porta, mas a influência da temperatura permanece o fator dominante no comportamento de I_G .

Os resultados das Figuras 29 (A) a 29 (D) mostram que a corrente de porta aumenta com a temperatura em todas as estruturas, refletindo a ativação de portadores por emissão termiônica e tunelamento assistido termicamente. Entre os dispositivos, o Gamma mantém os menores níveis de fuga, demonstrando melhor estabilidade térmica e qualidade de barreira, enquanto o Ômega apresenta os maiores valores de I_G , possivelmente em função de imperfeições na metalização da porta ou a diferenças no alinhamento da banda de energia na interface metal/AlGaIn.

Figura 29: I_G versus temperatura em todos os dispositivos, (γ , β , α , Ω).



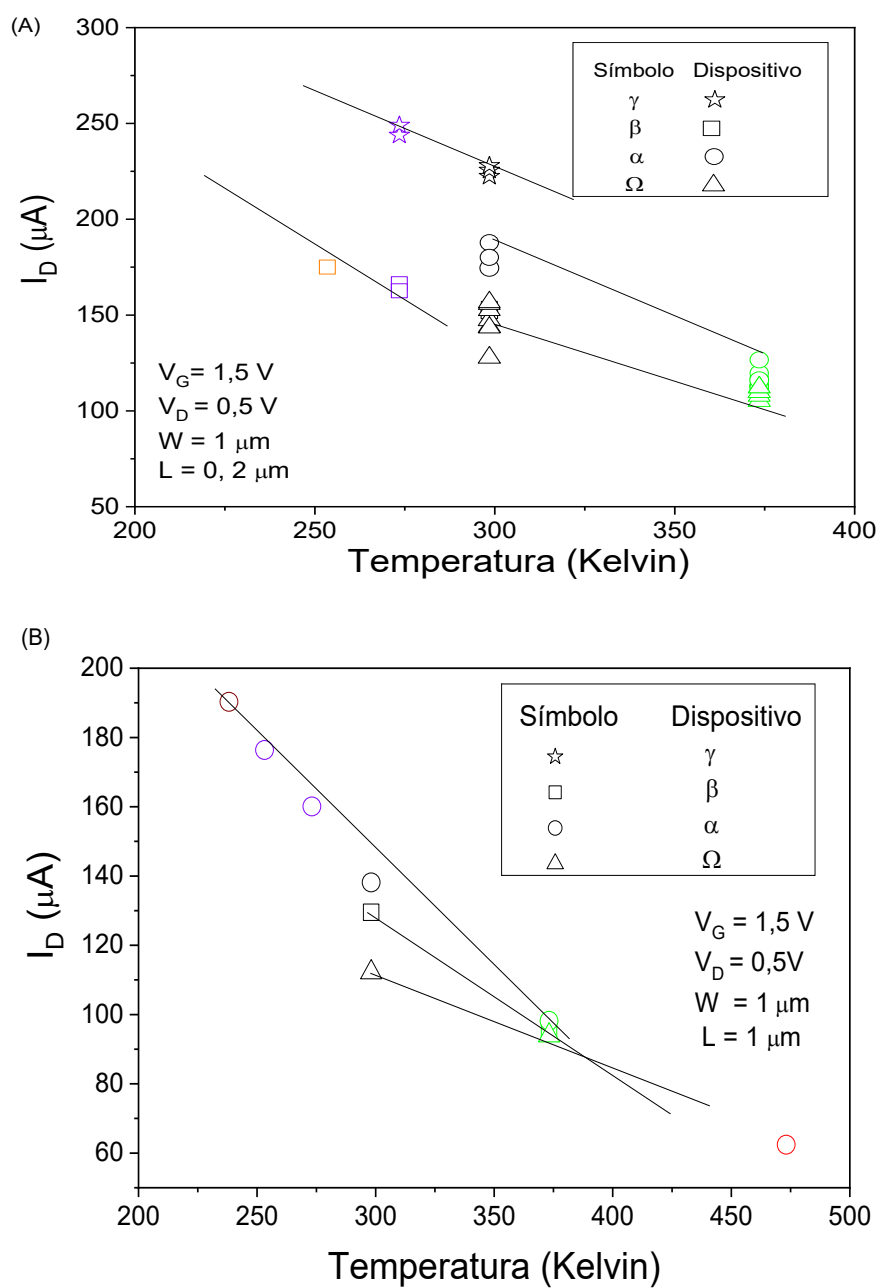
Fonte: Autor.

3.5 Análise de temperatura dependente de I_D por dispositivo variando L

A Figura 30 apresenta a dependência da corrente de dreno (I_D) com a temperatura para os dispositivos com comprimentos de porta de 0,2 μm e 1 μm . Constata-se que a corrente I_D diminui progressivamente com o aumento da temperatura, resultado esperado em dispositivos HEMTs devido ao espalhamento de fônons [52], que reduz a mobilidade dos portadores no canal bidimensional (2DEG) [53]. Essa redução é mais pronunciada em dispositivos com maior comprimento de canal, nos quais a resistência série tem papel mais significativo [54].

A queda de I_D com a elevação da temperatura confirma que o transporte eletrônico é fortemente influenciado por mecanismos de dispersão térmica, evidenciando a predominância da mobilidade limitada por fônons. De forma geral, todos os dispositivos apresentam o mesmo comportamento qualitativo, independentemente da geometria, o que demonstra a consistência dos resultados e a estabilidade térmica das heteroestruturas AlGaIn/GaN analisadas.

Figura 30: Temperatura dependente da I_D por dispositivos com (A) $L = 0.2 \mu\text{m}$ e (B) $L = 1 \mu\text{m}$.



Fonte: Autor.

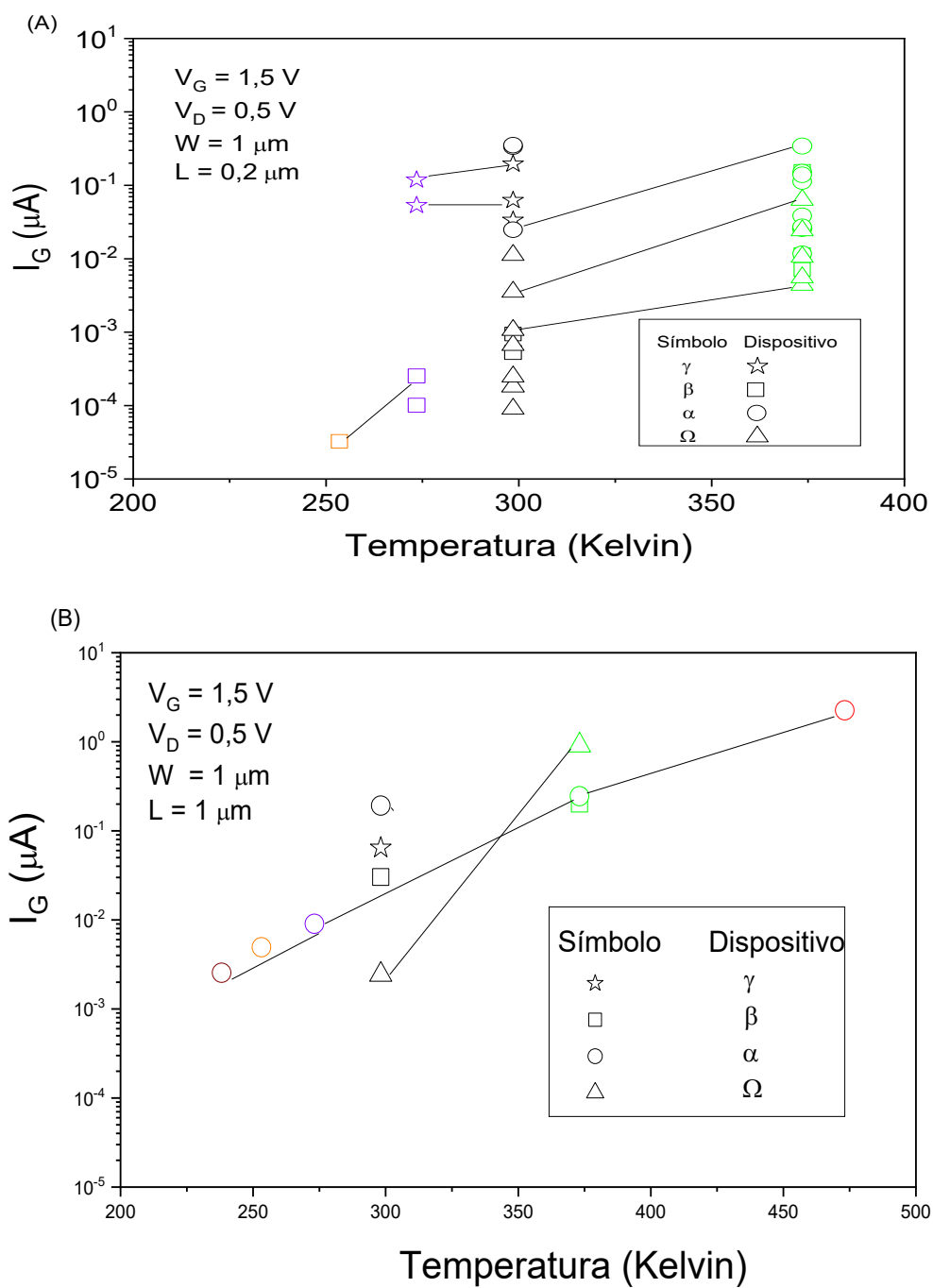
3.5.1 Análise de temperatura dependente de I_G por dispositivo variando L

A Figura 31 apresenta a variação da corrente de porta (I_G) com a temperatura nos dispositivos com diferentes comprimentos de canal. Em contraste com a corrente de dreno, a corrente I_G aumenta com a elevação da temperatura, indicando a presença de mecanismos de condução termicamente ativados. Além do tunelamento direto (DT), mecanismos como emissão termiônica (TE), condução de Frenkel–Poole (PF) e tunelamento assistido por armadilhas (TAT) tornam-se mais relevantes em temperaturas elevadas [55].

Esse aumento é explicado pela energia térmica adicional que permite aos portadores superar ou atravessar a barreira da junção metal–semicondutor, ampliando a fuga de corrente pela porta. O crescimento de I_G é mais acentuado nos dispositivos α (Alpha) e γ (Gamma), enquanto os dispositivos β (Beta) e Ω (Ômega) mantêm valores mais baixos de fuga, refletindo barreiras mais eficientes e menor densidade de armadilhas. Além disso, os dois comprimentos de canal (0,2 μm e 1 μm) exibem o mesmo comportamento qualitativo, o que reforça a robustez dos mecanismos observados.

Esses resultados evidenciam que a condução de corrente de porta não é dominada por um único processo, mas por uma combinação de mecanismos dependentes da temperatura e do campo elétrico aplicado, cuja predominância varia conforme a estrutura e a densidade de defeitos do dispositivo.

Figura 31: Temperatura dependente de I_G por dispositivo com (A) $L = 0.2 \mu\text{m}$ e (B) $L = 1 \mu\text{m}$.



Fonte: Autor.

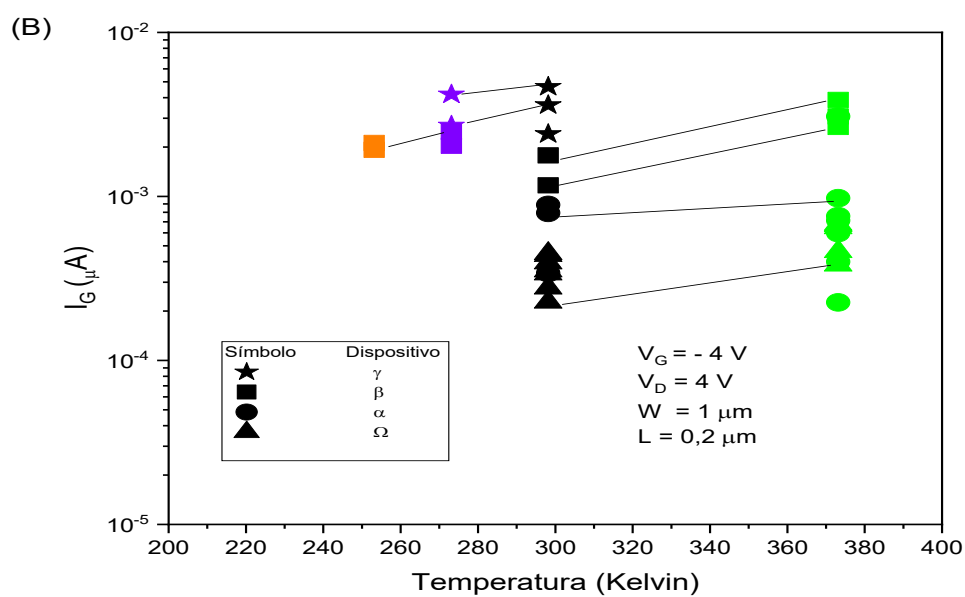
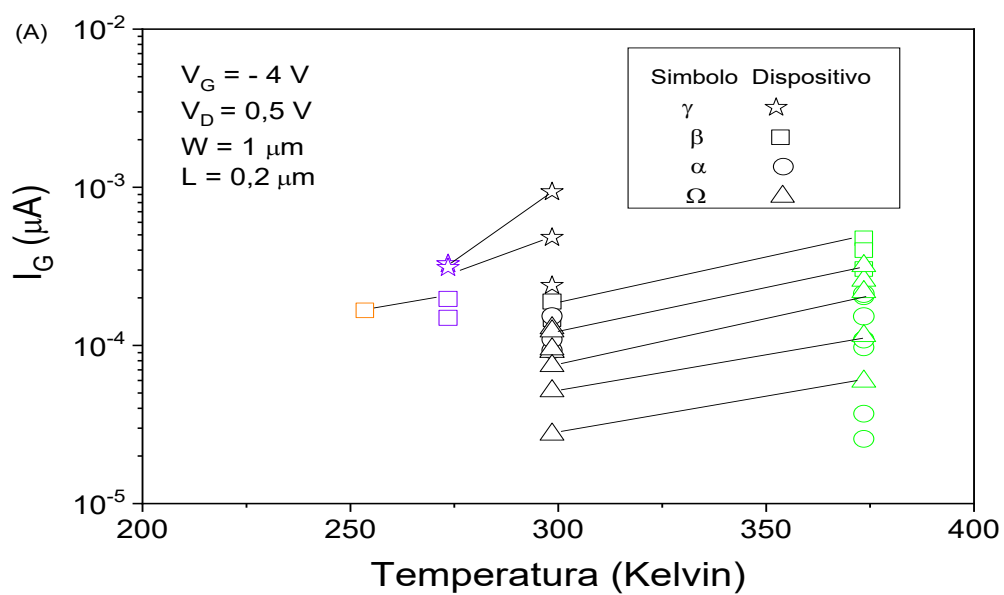
3.5.2 Análise de I_G em função da temperatura variando V_D em todos os dispositivos

A Figura 32 aprofunda a análise do comportamento da corrente de porta sob duas condições de polarização de dreno: $V_D = 0,5$ V e $V_D = 4$ V, com a porta mantida em $V_G = -4$ V. Em baixas temperaturas e baixos campos ($V_D = 0,5$ V), a corrente I_G apresenta fraca dependência com a temperatura, o que é consistente com o tunelamento direto (DT) através da barreira de AlGaIn sob campos moderados. À medida que a temperatura aumenta, I_G cresce de forma mais acentuada, indicando o surgimento da emissão termiônica (TE) como mecanismo dominante.

Sob condições de campo mais intenso ($V_D = 4$ V), o afinamento da barreira devido ao campo elétrico favorece o tunelamento de Fowler–Nordheim (FN), identificado pela inclinação característica das curvas de fuga. Além disso, observa-se a contribuição da emissão de Poole–Frenkel (PF) em dispositivos com maior densidade de armadilhas, onde a condução assistida por defeitos se torna relevante em temperaturas e campos intermediários.

Esses resultados indicam que múltiplos mecanismos de condução coexistem nos dispositivos estudados: o DT domina em baixas temperaturas e baixos campos, a TE se intensifica com a elevação da temperatura, o FN predomina sob polarizações reversas elevadas, e o TAT/PF atua de forma significativa em estruturas com armadilhas intermediárias. Essa análise abrangente torna possível correlacionar os resultados experimentais com os modelos teóricos, fornecendo uma compreensão detalhada do comportamento térmico e elétrico das correntes de fuga em HEMTs de AlGaIn/GaN.

Figura 32: I_G vs. temperatura sobre polarização de porta $V_G = -4$ V para (A) $V_D = 0,5$ V e (B) $V_D = 4$ V no γ , β , α , e Ω HEMTs com $L = 0,2$ μm .



Fonte: Autor.

3.5.3 Discussão dos Mecanismos de Condução

A análise conjunta das correntes de dreno (I_D) e de porta (I_G), obtidas em diferentes temperaturas, tensões de dreno e geometrias de canal, viabiliza identificar os principais mecanismos de transporte e condução presentes nos dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN estudados. As tendências observadas nas curvas experimentais indicam a coexistência de múltiplos fenômenos cuja contribuição depende da temperatura, do campo elétrico aplicado e da qualidade da interface metal–semicondutor.

Em baixas temperaturas, análise foi feita para $T > 250\text{K}$, a corrente de dreno (I_D) é governada predominantemente pelo transporte de elétrons de alta mobilidade no canal bidimensional (2DEG). Nessa faixa, a corrente apresenta valores elevados e estáveis, uma vez que a dispersão por fônons é reduzida. Já a corrente de porta (I_G) mantém-se praticamente constante e de baixa magnitude, caracterizando o regime de tunelamento direto (DT) através da barreira de AlGaIn, em que o transporte ocorre por penetração quântica de elétrons através de uma barreira fina, independentemente da temperatura.

Com a elevação da temperatura, verifica-se uma redução gradual de I_D , atribuída ao aumento da dispersão por fônons ópticos e acústicos, que diminui a mobilidade dos portadores no canal 2DEG. Esse efeito é mais pronunciado em dispositivos com maior comprimento de canal, devido à elevação da resistência série e à redução da velocidade de saturação dos elétrons. A diminuição da condutância e da transcondutância g_m com a temperatura reflete a degradação da mobilidade associada à interação elétron–fônon, confirmando que o transporte eletrônico é fortemente limitado por mecanismos de espalhamento térmico.

Ao mesmo tempo, a corrente de porta (I_G) aumenta com o acréscimo da temperatura, indicando a transição gradual de mecanismos puramente quânticos para processos termicamente ativados. A energia térmica adicional permite que os elétrons superem ou atravessem a barreira de potencial por meio de estados intermediários associados a armadilhas. Nesse regime, constata-se a atuação combinada de diferentes processos.

A emissão termiônica (TE) passa a ser significativa em temperaturas elevadas, quando os elétrons adquirem energia suficiente para ultrapassar a barreira de Schottky, especialmente em dispositivos com barreiras mais finas e interfaces com descontinuidades de potencial. O tunelamento de Fowler–Nordheim (FN) torna-se predominante sob campos elétricos intensos, como em $V_D = 4$ V, quando o campo aplicado afina a barreira, facilitando o tunelamento assistido pelo campo. A condução de Poole–Frenkel (PF) também contribui em dispositivos com maior densidade de defeitos, pois o campo elétrico reduz a profundidade dos poços de potencial e torna possível a emissão de portadores aprisionados. Além disso, o tunelamento assistido por armadilhas (TAT) ocorre quando elétrons utilizam níveis intermediários de energia para atravessar a barreira, combinando características de tunelamento e emissão térmica.

Os resultados mostram que o comportamento de fuga é mais acentuado nos dispositivos α (Alpha) e γ (Gamma), que apresentam processos de fabricação mais agressivos e metalizações que, embora otimizem o desempenho elétrico, reduzem parcialmente a uniformidade da barreira. Já os dispositivos β (Beta) e Ω (Ômega) apresentam correntes de fuga mais estáveis e menores valores de I_G , o que sugere barreiras mais espessas e interfaces com menor densidade de defeitos. Essa diferença entre as amostras reflete diretamente a influência do fluxo de tecnológico de fabricação sobre o equilíbrio entre desempenho e estabilidade.

Em baixas temperaturas e campos fracos, predomina o tunelamento direto (DT). Com o aumento da temperatura, a emissão termiônica (TE) passa a dominar. Sob campos elétricos intensos, prevalece o tunelamento de Fowler–Nordheim (FN). Já em condições intermediárias de temperatura e campo, especialmente em dispositivos com armadilhas, o tunelamento assistido por defeitos ou a emissão de Poole–Frenkel (PF) tornam-se significativos. Essa sobreposição de mecanismos evidencia que o comportamento elétrico e térmico dos HEMTs de AlGaIn/GaN é fortemente dependente da estrutura da barreira, da densidade de defeitos e do campo elétrico aplicado.

A compreensão detalhada desses fenômenos é fundamental para o aprimoramento do processo de fabricação e para a otimização da estabilidade térmica e elétrica dos HEMTs de AlGaIn/GaN, visando aplicações em alta potência e alta frequência, onde a confiabilidade e a redução da corrente de fuga são fatores determinantes para a eficiência dos circuitos eletrônicos baseados em GaN.

4. CONCLUSÕES DO TRABALHO

Este trabalho investigou a dependência térmica da corrente de fuga em dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN, considerando a influência da geometria de canal e das condições de metalização da porta. A análise foi realizada a partir de medições elétricas experimentais, incluindo curvas IDVG e IGVG em diferentes condições de polarização e temperatura.

Os resultados obtidos demonstraram que o desempenho elétrico dos dispositivos está fortemente relacionado ao processo de fabricação. Dispositivos submetidos a técnicas mais avançadas, como dupla implantação iônica e tratamentos térmicos otimizados, apresentaram maior corrente de dreno e maior transcondutância, evidenciando melhor eficiência de condução no canal. No entanto, esses dispositivos também exibiram níveis mais elevados de corrente de fuga na porta, indicando um compromisso entre desempenho e confiabilidade.

Adicionalmente, verificou-se que a geometria do canal exerce influência significativa no comportamento elétrico. O aumento da largura do canal resultou em maior corrente de dreno, devido à ampliação da área efetiva de condução, enquanto o aumento do comprimento contribuiu para a elevação da resistência do canal e consequente redução da corrente.

A análise térmica evidenciou a presença de diferentes mecanismos de condução ao longo das condições de operação. Em regimes de temperatura mais elevada, observou-se predominância de mecanismos termicamente ativados, como emissão termiônica e emissão de Poole–Frenkel. Por outro lado, sob altos campos elétricos, mecanismos de tunelamento, como tunelamento direto e Fowler–Nordheim, tornaram-se mais relevantes, indicando forte dependência do campo elétrico na condução da corrente de fuga.

Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a corrente de fuga em HEMTs AlGaIn/GaN é governada por uma combinação de fatores tecnológicos, geométricos e térmicos, sendo essencial o controle simultâneo desses parâmetros para a otimização do desempenho e da confiabilidade dos dispositivos.

Como contribuição, este trabalho fornece uma análise experimental detalhada da influência do processo de fabricação e da geometria de canal nos mecanismos de condução em HEMTs, contribuindo para o entendimento físico do comportamento da corrente de fuga e para o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes e robustos.

4.1 Perspectivas para Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, recomenda-se expandir as faixas de caracterização térmica e elétrica dos dispositivos, incluindo temperaturas mais extremas, acima e abaixo das avaliadas neste estudo. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais aprofundada das transições entre os mecanismos de condução, como o tunelamento direto, a emissão de Poole–Frenkel e o tunelamento assistido termicamente.

Adicionalmente, sugere-se a realização de análises comparativas entre dispositivos com diferentes arquiteturas, variando o comprimento de porta, o tipo de metal utilizado e os tratamentos térmicos aplicados, com o objetivo de estabelecer correlações quantitativas entre processamento e resposta elétrica.

Por fim, a investigação detalhada da tensão de limiar sob diferentes temperaturas e tensões de dreno poderá evidenciar instabilidades associadas a estados de armadilha e degradação do canal, contribuindo para o desenvolvimento de dispositivos e circuitos mais robustos.

5 PUBLICAÇÕES DO AUTOR

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o autor elaborou e participou da publicação de diversos artigos científicos relacionados ao tema da pesquisa, apresentados em congressos nacionais e internacionais da área de micro e nano eletrônica. A seguir, são listadas as publicações decorrentes deste estudo.

5.1 Artigos publicados em congressos Internacionais

1. **CANDIDO, J.**; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. Impact of Gate Metal Selection on Gate Leakage in AlGaIn/GaN HEMTs. In: **11th Joint EuroSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSOI-ULIS 2025)**, Varsóvia, Polônia, 2025.
2. ANDRADE, M. G. C.; BATISTA JUNIOR, B.; **CANDIDO, J.**; DORIA, R. T.; TREVISOLI, R.; SIMOEN, E. Thermal Effects on AlGaIn/GaN HEMTs: Performance Optimization Through Channel Length. **Anais da INFOS – 24th Conference on Insulating Films on Semiconductors**, Granada, Espanha, 2025.
3. PANZO, E. C.; **CANDIDO, J.**; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. Characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with Different Manufacturing Characteristics. In: **Chip on the Cliffs – SBMicro 2024, 38th Symposium on Microelectronics Technology and Devices**, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2024.

5.2 Artigos Publicados em Congressos Nacionais

4. **CANDIDO, J.**; POMPEO, L. M.; BATISTA JUNIOR, B.; PANZO, E. C.; MARTINS, E.; ANDRADE, M. G. C. Impact of Thermal Effects on the Electrical Performance of AlGaIn/GaN HEMTs. In: **XIX Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC 2025)**, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil, 2025.
5. **CANDIDO, J.**; PANZO, E. C.; MARTINS, E.; ANDRADE, M. G. C. Investigation of AlGaIn/GaN High-Electron Mobility Transistors. In: **XVIII Workshop on**

Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC 2024), São Paulo, Brasil, 2024.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHALLER, R. R. *Moore's law: past, present, and future*. IEEE Spectrum, v. 34, n. 6, p. 52–59, 1997.
- [2] DALLESSASSE, J. M.; KAUFMAN, R. B. *The point contact transistor*. In: *[Título do livro que contém esse capítulo]*. 1. ed. Hoboken: Wiley IEEE Press, 2023. cap. 4, p. 29–41. DOI: 10.1002/9781394202478.ch4.
- [3] ICHI PRO. *A lei de Moore está viva e bem*. Disponível em: <https://ichi.pro/pt/a-lei-de-moore-esta-viva-e-bem-257992683749768>. Acesso em: 11 out. 2025.
- [4] U.K. Mishra, P. Parikh, Y.-F. Wu, *AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications*. Proceedings of the IEEE, v. 90, n. 6, p. 1022–1031, 2002.
- [5] S. Keller, Y.-F. Wu, U.K. Mishra, *GaN-based HEMTs for high power applications*. Journal of Applied Physics, v. 86, n. 10, p. 5850–5857, 1999.
- [6] O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, *Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures*. Journal of Applied Physics, v. 85, n. 6, p. 3222–3233, 1999.
- [7] JIN, D.; AKCAN, A.; LIN, Z.; DEL ALAMO, J. A. *Gate leakage current mechanisms in GaN high-electron mobility transistors*. IEEE Electron Device Letters, v. 33, n. 7, p. 1002–1004, 2012.
- [8] RAPPA-PORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. 2. ed. São Paulo: Pearson Universidades, 2008. 464 p. ISBN 978-8576051985.
- [9] FALTERMEIER, P.; OLBRICH, P.; PROBST, W.; SCHELL, L.; GANICHEV, S. D.; WATANABE, T.; BOUBANGA TOMBET, S. A.; OTSUJI, T. *Helicity sensitive terahertz radiation detection by dual grating gate high electron mobility transistors*. Journal of Applied Physics, v. 118, n. 8, p. 084301, 2015. DOI: 10.1063/1.4928969.
- [10] KIM, J. *A review of Ku-band GaN HEMT power amplifiers development*. Micromachines, Basel, v. 15, art. 1381, 2024. DOI: 10.3390/mi15111381.
- [11] DAS, P.; WU, T. L.; TALLUR, S. *Design and analysis of high electron mobility transistor (HEMT) inspired III–V electro-optic modulator topologies*. Semiconductor Science and Technology, v. 35, n. 9, art. 095028, p. 1–10, set. 2020. DOI: 10.1088/1361-6641/ab9ea9.

- [12] MA, C. T.; GU, Z. H. *Review of GaN HEMT applications in power converters over 500 W*. Electronics, v. 8, n. 12, art. 1401, 2019. DOI: 10.3390/electronics8121401.
- [13] HIGASHIWAKI, M.; SASAKI, K.; KURAMATA, A.; MASUI, T.; YAMAKOSHI, S. *High-temperature electron transport characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs*. Applied Physics Letters, v. 91, n. 17, p. 172106, 2007.
- [14] SHINOHARA, K.; CHOW, D. H.; CHUVAKIN, A. D.; URTEAGA, M.; WETZEL, M. J. *Enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMTs with 10-nm-thin barrier and 2-nm-thin AlN interfacial layer*. IEEE Electron Device Letters, v. 31, n. 2, p. 99–101, 2010.
- [15] LIU, S.; LIU, Z.; LU, L.; WANG, W.; LIU, F. *Gate leakage current suppression in AlGaIn/GaN HEMTs using fluorinated graphene passivation*. Applied Physics Letters, v. 115, n. 23, p. 233503, 2019.
- [16] MAEDA, K.; ITO, H.; YOKOYAMA, M. *Reduction of gate leakage current in AlGaIn/GaN HEMTs by post-gate annealing*. Japanese Journal of Applied Physics, v. 56, n. 3, p. 030303, 2017.
- [17] NOMURA, T.; TANAKA, H.; TANAKA, S. *Enhanced RF performance of AlGaIn/GaN HEMTs by gate annealing and surface passivation*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 63, n. 7, p. 2874–2880, 2016.
- [18] MISHRA, U. K.; SHEN, L.; KAZIOR, T. E.; WU, Y.-F. *GaN-based RF power devices and amplifiers*. Proceedings of the IEEE, v. 96, n. 2, p. 287–305, 2008.
- [19] AKTAS, O. et al. *post-implantation annealing in GaN HEMTs*. Solid-State Electronics, v. 146, p. 38–45, 2018.
- [20] SUN, H. et al. *Influence of dual implantation on GaN HEMTs*. Microelectronics Reliability, v. 98, p. 180–185, 2019.
- [21] HIGASHIWAKI, M. et al. *Design and fabrication of TiN/AlCu gate stacks in GaN HEMTs*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 61, n. 4, p. 1074–1080, 2014.
- [22] CHANG, C. et al. *Temperature-dependent leakage in AlGaIn/GaN HEMTs*. IEEE Electron Device Letters, v. 34, n. 10, p. 1220–1222, 2013.
- [23] SZE, S. M.; NG, K. K. *Physics of semiconductor devices*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2006.
- [24] MISHRA, U. K.; PARIKH, P.; YU, Y. F. *AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications*. Proceedings of the IEEE, v. 90, n. 6, p. 1022–1031, 2002. DOI: 10.1109/JPROC.2002.1021567.

- [25] WU, Y.; LIU, W.; CHOU, H.; KURODA, T. *A physics-based high frequency large-signal model for GaN HEMTs*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 50, n. 3, p. 718–727, mar. 2003.
- [26] ANDRADE, M. G. C.; BATISTA JUNIOR, B.; CANDIDO, J.; DORIA, R. T.; TREVISOLI, R.; SIMOEN, E. *Thermal effects on AlGaIn/GaN HEMTs: performance optimization through channel length*. In: *INFOS – 24th Conference on Insulating Films on Semiconductors*, Granada, Espanha, 2025.
- [27] MISHRA, U. K.; PARIKH, P.; YU, Y. F. *AlGaIn/GaN HEMTs—An overview of device operation and applications*. Proceedings of the IEEE, v. 90, n. 6, p. 1022–1031, 2002. DOI: 10.1109/JPROC.2002.1021567.
- [28] SZE, S. M.; NG, K. *Physics of semiconductor devices*. 3. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007.
- [29] LIMA, J. M. et al. *Modelagem analítica de HEMTs AlGaIn/GaN para aplicações em alta frequência*. In: *Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)*, 2020.
- [30] PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; ANDRADE, M. G. C. *Analysis of results of different types of mobility in AlGaIn/GaN HEMTs transistors*. In: *XVIII Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC 2024)*, São Paulo, 2024.
- [31] HE, J.; TANG, G.; CHEN, K. J. *VTH instability of p-GaN gate HEMTs under static and dynamic gate stress*. IEEE Electron Device Letters, v. 39, n. 10, p. 1576–1579, out. 2018. DOI: 10.1109/LED.2018.2865824.
- [32] ANDRADE, M. G. C.; BERGAMIM, F. L. O.; BATISTA JUNIOR, B.; NOGUEIRA, C. R.; SILVA, F. A.; TAKAKURA, K.; PARVAIS, B.; SIMOEN, E. *Low-frequency noise investigation of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors*. Solid-State Electronics, v. 183, p. 108050, 2021.
- [33] PANZO, E. C.; CANDIDO, J.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. *Characterization of AlGaIn/GaN HEMTs with different manufacturing characteristics*. In: *Chip on the Cliffs – SBMicro 2024, 38th Symposium on Microelectronics Technology and Devices*, João Pessoa, PB, Brasil, 2024.
- [34] TURUVEKERE, S.; KARUMURI, N.; RAHMAN, A. A.; BHATTACHARYA, A.; DAS GUPTA, A.; DASGUPTA, N. *Gate leakage mechanisms in AlGaIn/GaN and AlInN/GaN HEMTs: comparison and modeling*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 60, 2013. DOI: 10.1109/TED.2013.2272700.

- [35] SZE, S. M.; NG, K. *Physics of semiconductor devices*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2006.
- [36] WANG, A.; ZENG, L.; WANG, W. *Simulation of gate leakage current of AlGaN/GaN HEMTs: effects of the gate edges and self-heating*. ECS Journal of Solid-State Science and Technology, v. 6, p. S3025, 2017. DOI: 10.1149/2.0031711jss.
- [37] DUSHMAN, S. *Thermionic emission*. Reviews of Modern Physics, v. 2, p. 381, 1930. DOI: 10.1103/RevModPhys.2.381.
- [38] JENSEN, K. *Richardson–Laue–Dushman equation*. In: *Introduction to the physics of electron emission*. Hoboken: Wiley, 2017. cap. 12. DOI: 10.1002/9781119051794.ch12.
- [39] SARKAR, A. *Investigation of the forward gate leakage current in p-GaN/AlGaIn/GaN HEMTs through TCAD simulations*. Semiconductor Science and Technology, v. 39, p. G5024, 2024. DOI: 10.1088/1361-6641/ad5041.
- [40] JIANG, X.; LI, C.-H.; YANG, S.-X. et al. *Reverse gate leakage mechanism of AlGaIn/GaN HEMTs with Au-free gate*. Chinese Physics B, v. 32, n. 3, p. 037201, 2023. DOI: 10.1088/1674-1056/ac8735.
- [41] HIGASHIWAKI, M.; MIMURA, T.; MATSUI, T. *Enhancement-mode GaN MIS-HEMTs using Al₂O₃ gate insulator grown by atomic layer deposition*. IEEE Electron Device Letters, v. 27, n. 8, p. 719–721, ago. 2006.
- [42] GREENE, J. W.; VETURY, R.; JOH, J.; PALACIOS, T. *High temperature and high field reliability of GaN HEMTs*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 60, n. 10, p. 3126–3132, out. 2013.
- [43] WONG, M. H.; CHOW, T. P. *Gate leakage mechanisms of GaN-based HEMTs on SiC and Si substrates*. IEEE Transactions on Electron Devices, v. 55, n. 3, p. 649–656, mar. 2008.
- [44] YEOM, M. J. et al. *Low subthreshold slope AlGaIn/GaN MOS HEMT with spike-annealed HfO₂ gate dielectric*. Micromachines, Basel, v. 12, n. 12, p. 1441, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/12/1441>. Acesso em: 23 set. 2025.
- [45] CHINI, A.; FANTINI, F.; MENEGHESSO, G.; ZANONI, E. *Trap-assisted tunneling current of ultrathin InAlN/GaN HEMTs on Si (111) substrate*. Solid-State Electronics, v. 158, p. 107622, 2019. DOI: 10.1016/j.sse.2019.107622.

- [46] SZE, S. M. *Semiconductor devices: physics and technology*. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2001
- [47] TURUVEKERE, S.; RAWAL, D. S.; DASGUPTA, A.; DASGUPTA, N. *Evidence of Fowler–Nordheim tunneling in gate leakage current of AlGaIn/GaN HEMTs at room temperature*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 61, n. 12, p. 4291–4294, dez. 2014. DOI: 10.1109/TED.2014.2361436.
- [48] CANDIDO, J.; POMPEO, L. M.; BATISTA JUNIOR, B.; PANZO, E. C.; MARTINS, E.; ANDRADE, M. G. C. *Impact of thermal effects on the electrical performance of AlGaIn/GaN HEMTs*. In: *XIX Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC 2025)*, São Bernardo do Campo, 2025.
- [49] CHINI, A. et al. *Gate leakage current mechanisms in AlGaIn/GaN HEMTs*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 58, n. 5, p. 1247–1253, 2011.
- [50] CAO, Y. et al. *Field emission and Fowler–Nordheim tunneling in GaN-based devices*. *Solid-State Electronics*, v. 52, n. 4, p. 495–499, 2008.
- [51] UREN, M. J. et al. *Punch-through in AlGaIn/GaN HEMTs: experiment and simulation*. *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 64, n. 3, p. 734–740, 2017.
- [52] A. K. Singh, S. Khandelwal and Y. S. Chauhan, “On the temperature-dependence characterization and modeling of GaN HEMTs,” *Micro and Nano Engineering*, vol. 24, 100241, 2025.
- [53] M. H. Kim, S. Lee, J. Park, and H. J. Kim, “Temperature-Dependent Electrical Characteristics and Low-Frequency Noise Analysis of AlGaIn/GaN HEMTs,” *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol. 24, no. 4, pp. 350–358, 2024.
- [54] S. Karmalkar and U. K. Mishra, “Study on Temperature-Dependence Scattering Mechanisms and Mobility Effects in GaN and GaAs HEMTs,” in *Proc. Int. Conf. Advanced Semiconductor Devices*, Springer, 2014, pp. 213–221.
- [55] J. Joh and J. A. del Alamo, “A Physics-Based Model of Gate Current Transients in GaN High Electron Mobility Transistors,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 58, no. 1, pp. 132–140, jan. 2011.