UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba
Campus de São João da boa vista

BRAZ BAPTISTA JÚNIOR

ESTUDO DE TRANSISTORES HEMT's DE AlGaN/GaN OPERANDO EM BAIXAS TEMPERATURAS

SOROCABA/SP
2023

BRAZ BAPTISTA JÚNIOR

ESTUDO DE TRANSISTORES HEMT's DE AlGaN/GaN OPERANDO EM BAIXAS TEMPERATURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Campus de Sorocaba, como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos.

Orientadora: Profª. Dra. Maria Glória Caño de Andrade.

SOROCABA/SP
2023

B222e

Baptista Júnior, Braz
Estudo de transistores HEMT's de AlGaN/GaN operando em baixas temperaturas. / Braz Baptista Júnior. -- Sorocaba, 2023
128 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

1. Transistor HEMT AlGaN/GaN. 2. High Electron Mobility Transistor. 3. Baixa temperatura. 4. Transistor HEMT sobre silicio. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo de Transistores de Alta Velocidade Operando em Baixas Temperaturas

AUTOR: BRAZ BAPTISTA JÚNIOR

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:

Profª. Drª. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciencia e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba

Prof. Dr. WILSON HENRIQUE VENEZIANO (Participaçao Virtual)
Computação / Universidade de Brasilia UnB, campus Darcy Ribeiro,

Prof. Dr. EVERSON MARTINS (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba

São João da Boa Vista, 25 de maio de 2023

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

Dedico aos amores de minha vida, minha amada filha Giovana e minha amada esposa Joelma que sempre me incentivaram a nunca desistir dos meus sonhos.

Aos meus amados pais Braz (in memorian) e Aparecida Iray que sempre me deram muito apoio para a realização de mais uma importante vitória em minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria Glória, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos, e apoio em todos os momentos.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) e todos seus funcionários, pela excelência na educação disponibilizada ao Brasil.

Aos amigos do grupo de mestrado da Unesp Sorocaba, Carlos, Fábio, Jeveson e Renan, que me ajudaram em algum momento na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Braz (*in memoriam*), que me viu iniciar o mestrado, mas não teve oportunidade de me ver concluir, e Aparecida Iray, um agradecimento muito especial, por todo esforço, amor, carinho e por acreditarem em mim, dedicando suas vidas para a criação, formação e realizações de seus filhos.

À minha amada esposa Joelma, à minha filha Giovana, por todo amor, suporte, incentivo, apoio e compreensão. Amo vocês do fundo de meu coração.

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

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é estudar o desempenho de transistores de alta mobilidade eletrônica AlGaN/GaN HEMT, quando submetidos a baixas temperaturas de operação.

Esta investigação foi desenvolvida a partir de dados experimentais coletados em laboratório do imec de um dispositivo experimental e pesquisas em livros e publicações acadêmicas de dispositivos AlGaN/GaN HEMT. Os achados analisadas foram medidas em baixas temperaturas, utilizando-se dispositivos com diferentes dimensões de comprimento (L) e largura (W) de canal. A partir dos dados coletados, foi possível obter diversos parâmetros dos dispositivos tais como, curvas características I_DxV_G, I_DxV_D, I_GxV_G, transcondutância, tensão de limiar (V_T), DIBL (redução da barreira induzida pelo dreno), inclinação de sublimiar (SS), corrente de fuga de porta do dispositivo, condutância de saída (g_D), tensão Early (V_{EA}) e o ganho intrínseco de tensão (A_V). A partir desses parâmetros verificamos desempenho e a resposta do dispositivo e uma determinada faixa de temperatura, que foram medidas em laboratório, bem como na influência que as alterações nas dimensões, podem trazer no desempenho dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT. Estes transistores AlGaN/GaN HEMT foram fabricados sobre uma lâmina de silício de alta resistividade (SiHR) de 200mm com orientação cristalográfica (111).

Os resultados analisados dos dispositivo AlGaN/GaN HEMT mostram que, devido a mudança no potencial de Fermi e da mobilidade dos elétrons, ocorrem variações nos parâmetros com a redução da temperatura e a variação do comprimento do canal (L), esse efeito foi observado para todos os dispositivos com diferentes comprimentos de canal (L), e para as temperaturas analisadas. Adicionalmente, estes transistores de AlGaN/GaN HEMT, respondem de forma satisfatória, quando submetidos a operações em baixas temperaturas.

Palavras-chave: Transistor HEMT; GaN; High Electron Mobility Transistor; 2DEG; FET.

ABSTRACT

The main objective of this work is to study the performance of AlGaN/GaN HEMT high electronic mobility transistors, when subjected to low operating temperatures.

This investigation is developed from experimental data collected in the laboratory of an experimental device and research in books and academic publications of AlGaN/GaN HEMT devices. The measurements analyzed are measured at low temperatures, using devices with different dimensions of length (L) and width (W) of the channel. From the data collected, it is possible to obtain several parameters of the devices such as I_DxV_G, I_DxV_D, I_GxV_G characteristic curves, transconductance, threshold voltage (V_T), DIBL (drain-induced barrier reduction), subthreshold slope (SS), the device gate leakage current, output conductance (gD), Early voltage (V_{EA}) and intrinsic voltage gain (A_V) verifying the performance and response of the device and a certain temperature range, which were measured in the laboratory, as well as the influence that changes in dimensions can have on the performance of AlGaN/GaN HEMT devices. These AlGaN/GaN HEMT transistors were fabricated on a 200mm high resistivity (SiHR) silicon wafer with crystallographic orientation (111).

The analyzed results of the AlGaN/GaN HEMT device show that, due to the change in the Fermi potential and the mobility of electrons, variations in the parameters occur with the reduction of temperature and the variation of the channel length (L). This effect was observed for all devices with different channel lengths (L), and for the for analyzed temperatures. Additionally, these AlGaN/GaN HEMT transistors respond satisfactorily when subjected to operations at low temperatures.

Keywords: Transistor HEMT; GaN; High Electron Mobility Transistor; 2DEG; FET.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Satoshi Hiyamizu a esquerda e Takashi Mimura a direita 21
Figura 2 - Seção transversal estrutural básica de dispositivo um HEMT. 25
Figura 3 - Bandas de energia de heterojunções (a) Tipo I; (b) Tipo II; Tipo III. 27
Figura 4 - Descrição dos níveis de energia em uma heterojunção Tipo I.....28
Figura 5 - Diagrama de banda e formação 2DEG em uma heterojunção Tipo-I. 29
Figura 6 - Estrutura do HEMT no sistema AlGaAs/GaAs 32
Figura 7 - Diagrama de bandas representando a curvatura de banda e a formação 2DEG em um HEMT AlGaAs / GaAs quando V_G <0. As linhas escuras indicam V_G <0 e as linhas coloridas sombreadas indicam o diagrama de banda de equilíbrio térmico quando V_G = 0. 33
Figura 8 - Diagrama de banda que descreve a curvatura de banda e a formação 2DEG em um HEMT AlGaAs / GaAs quando V_G> 0. As linhas escuras indicam V_G <0 e as linhas coloridas sombreadas indicam o diagrama de banda de equilíbrio térmico quando V_G = 0. 34
Figura 9 - Distribuição potencial em um HEMT com aplicação de tensão de porta. .35
Figura 10 - Representação esquemática da modulação dopagem. 38
Figura 11 - Estrutura HEMT AlGaAs / GaAs. 39
Figura 12 - Estrutura HEMT InAlGaAs/InGaAs. 40
Figura 13 - Estrutura HEMT AlGaN/GaN. 40
Figura 14 - Exemplos de estruturas cristalinas do Nitreto de Gálio.....43
Figura 15 - Câmara do Reator.....44
Figura 16 - Tensão Early através da curva de corrente de dreno em função da tensão aplicada no dreno. 52
Figura 17 - Representação simplificada da estrutura de um transistor HEMT AlGaN/GaN depositada em substrato de HR Si (111). 54
Figura 18 - Bandas de energia HEMT AlGaN dopado. 57
Figura 19 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN dopado. 58
Figura 20 - Bandas de energia HEMT AlGaN não dopado. 59
Figura 21 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN não dopado. 60
Figura 22 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN não dopado formação 2DEG.....61

Figura 23 - Equipamento de teste 63
Figura 24 - Alocação dos transistores analisados na lâmina.....64
Figura 25 - Posicionamento lâmina no equipamento de teste.....65
Figura 26 - Posicionamento das pontas de prova do equipamento de teste.....65
Figura 27 - Formação de gelo sobra a lâmina.....66
Figura 28 - Exemplo de gráfico de curvas I_D x V_G de um dispositivo HEMT a 0ºC. ...67
Figura 29 - Gráfico de curvas I_D x V_G de seis dispositivo HEMT a 25ºC.....68
Figura 30 - Exemplo de gráfico de curvas I_DxV_D de um dispositivo HEMT a 0ºC. 69
Figura 31 - Gráfico I_D x V_G de seis dispositivo HEMT similares a 25ºC. 70
Figura 32 - Gráfico de curvas I_D x V_G com V_{DS} = 0,05V. 71
Figura 33 - Gráfico de curvas I_DxV_G com V_{DS} = 3,00V. 72
Figura 34 - Gráfico curvas I_D x V_G de 6 dispositivos similares com V_{DS} = 3,00V. 73
Figura 35 - Gráfico I_D x V_G de 2 dispositivos similares (D1 e D2) com V_{DS}=3,00V. ..74
Figura 36 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=1,00µm V_{DS}=3,00V. 78
Figura 37 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V. 78
Figura 38 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V. 79
Figura 39 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V. 79
Figura 40 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=100,00µm V_{DS}=3,00V. 80
Figura 41 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=100,00µm V_{DS}=3,00V. 80
Figura 42 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=1,00µm V_{DS}=0,05V. 81
Figura 43 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=1,00µm V_{DS}=0,05V. 81
Figura 44 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=10,00µm V_{DS}=0,05V. 82
Figura 45 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=0,05V. 82
Figura 46 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=100,00µm V_{DS}=0,05V. 83
Figura 47 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=100,00µm V_{DS}=0,05V. 83
Figura 48 - Gráfico V_T x Temperatura de 2 dispositivos HEMT similares (D1, D2). ..85
Figura 49 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT W=1,0µm. 87
Figura 50 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT W=10,0µm. 87
Figura 51 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT L=100,0µm. 88
Figura 52 - Gráfico V_T x Temperatura 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2). 89
Figura 53 - Gráfico Inclinação de Sublimiar do dispositivo HEMT. 90
Figura 54 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=1µm). 92
Figura 55 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=10µm). 92

Figura 56 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=100μm). 93
Figura 57 - Exemplo de gráfico da transcondutância do HEMT a -20ºC. 94
Figura 58 - Transcondutância x V_G de 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2). 95
Figura 59 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=1,0μm e V_{DS}=3,0V. 98
Figura 60 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=10,0μm e V_{DS}=3,0V. 98
Figura 61 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=100,0μm e V_{DS}=3,0V. 99
Figura 62 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=1,0μm e V_{DS}=0,05V. 99
Figura 63 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=10,0μm e V_{DS}=0,05V. 100
Figura 64 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=100,0μm e V_{DS}=0,05V. 100
Figura 65 - Gráfico I_D x V_G e I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 0,05V. 102
Figura 66 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 0,05V. 103
Figura 67 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 3,00V. 103
Figura 68 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 4,00V. 104
Figura 69 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS}=10,00V. 104
Figura 70 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a 25ºC. 105
Figura 71 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a 0ºC. 105
Figura 72 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a -20ºC. 106
Figura 73 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a -35ºC. 106
Figura 74 - Gráfico I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2) V_{DS} = 3,00V. 107
Figura 75 - Gráfico I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2) V_{DS} = 0,05V. 108
Figura 76 - Gráfico I_D x V_G e I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2). 109
Figura 77 - Gráfico g_D x L do HEMT W=1,0μm e V_{DS}=3,0V. 111
Figura 78 - Gráfico g_D x L do HEMT W = 10,0μm e V_{DS} = 3,0V. 111
Figura 79 - Gráfico g_D x L do HEMT W = 100,0μm e V_{DS} = 3,0V. 112
Figura 80 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 1,0μm e V_{DS} = 3,0V 113
Figura 81 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 10,0μm e V_{DS} = 3,0V 114
Figura 82 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 100,0μm e V_{DS} = 3,0V. 115
Figura 83 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 1,0μm e V_{DS} = 3,0V. 117
Figura 84 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 10,0μm e V_{DS} = 3,0V. 117
Figura 85 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 100,0μm e V_{DS} = 3,0V. 118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das bandas de energia dos principais semicondutores.....30
Tabela 2 - Dimensões transistor HEMT. 55
Tabela 3 - Valores corrente constante para V_T do transistor HEMT.....75
Tabela 4 - Valores de V_T do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.....76
Tabela 5 - Valores de V_T do transistor HEMT com V_{DS}=0,05V.....77
Tabela 6 - Valores de V_T do dispositivo HEMT D1 e D2 com V_{DS}=0,05V e 3,00V. ...84
Tabela 7 - Valores de DIBL do transistor HEMT para V_{DS}=0,05V. e V_{DS}=3,00V. 86
Tabela 8 - Valores de DIBL do transistor HEMT para V_{DS}=0,05V. e V_{DS}=3,00V. 89
Tabela 9 - Valores de Sublimiar (SS) do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V. 91
Tabela 10 - Valores de g_m max do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V. 96
Tabela 11 - Valores de g_m max do transistor HEMT com V_{DS}=0,05V. 97
Tabela 12 - Valores de g_D do transistor HEMT com V_{DS} = 3,00V.....110
Tabela 13 - Valores de V_{EA} do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.....113
Tabela 14 - Valores de A_V do transistor HEMT com V_{DS} = 3,00V.....116

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

Al	Elemento químico Alumínio
AlGaN	Composto químico Nitreto de Alumínio e Gálio
AlGaAs	Composto químico Arseneto de Gálio e Alumínio
Al_2O_3	Composto químico Óxido de Alumínio
As	Elemento químico Arsênio
a-Si	Silício amorfo
B	Elemento químico Boro
CO_2	Dióxido de Carbono, ou gás Carbônico
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FET	Transistor de Efeito de Campo
Ga	Elemento químico Gálio
GaAs	Composto químico Arseneto de Gálio
GaN	Composto químico Nitreto de Gálio
Ge	Elemento químico Germânio
HEMT	Transistor de Alta Mobilidade Eletrônica
Imec	Centro Interuniversitário de Microeletrônica
In	Elemento químico Índio
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor

N	Elemento químico Nitrogênio
P	Elemento químico Fósforo
p-Si	Silício policristalino
Si	Elemento químico Silício
SiO_2	Óxido de Silício
SOI	Silício Sobre Isolante
WBG	Amplo intervalo de energia entre a banda de valência e a banda de condução.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_V	Ganho intrínseco de tensão	V
DIBL	Redução da barreira induzida pelo dreno	mV/V
Eg	Banda proibida do material semicondutor	eV
E_{Ox}	Espessura da região do óxido de porta	µm
E_{OxE}	Espessura da região do óxido enterrado	µm
E_S	Espessura da camada de silício	µm
g_D	Condutância	S
GIDL	Corrente de fuga do dreno induzida pela porta	A
g_m	Transcondutância	S
g_m/I_D	Eficiencia analógica do transistor	V^{-1}
I_D	Corrente de dreno	A
I_S	Corrente de fonte	A
I_G	Corrente de porta	A
k	Constante de Boltzmann	J/K
k_e	Coeficiente de extinção	---
L	Comprimento do canal	µm
N_A	Concentração de impurezas aceitadoras	cm^{-3}
N_C	Densidade de estado efetiva da banda de condução	cm^{-3}

N_D	Concentração de impurezas doadoras	cm^{-3}
N_V	Densidade de estado efetiva da banda de valência	cm^{-3}
q	Carga elementar do elétron	C
R_T	Resistencia total	Ω
SS	Inclinação de sublimiar	mV/dec
T	Temperatura absoluta	K
V_D	Tensão de dreno	V
V_{EA}	Tensão Early	V
V_G	Tensão de porta	V
V_T	Tensão de limiar	V
V_S	Tensão de fonte	V
W	Largura do canal	µm
τn	Tempo de vida útil do elétron	s
τp	Tempo de vida útil da lacuna	s
E	Energia da onda eletromagnética	eV
h	Constante de Planck	J.s
f	Frequência da onda eletromagnética	Hz
λ	Comprimento de onda	m

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Objetivo 17

1.2 Estrutura do trabalho 18

2 HEMT (HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR) 19

2.1 Estrutura Básica do HEMT 25

2.2 Heterojunções 26

2.3 Diagrama de Bandas de Energias da Heterojunção Tipo-I 28

2.4 Princípio de Funcionamento dos HEMTs 31

2.5 Tensão de Limiar 34

2.6 Características de Corrente e Tensão 37

2.7 Dopagem de Modulação e 2DEG 37

2.8 Materiais Utilizados nos HEMTs 39

2.9 Classificação dos HEMTs 41

2.10 Substrato de Silício 43

3 PARÂMETROS ELÉTRICOS E ANALÓGICOS 47

3.1 Tensão de Limiar (V_T) 47

3.2 Redução da Barreira Induzida pelo Dreno – DIBL 48

3.3 Inclinação de Sublimiar (SS) 49

3.4 Transcondutância (g_m) 50

3.5 Corrente de Porta (I_G) 50

3.6 Condutância de Saída (g_D) 51

3.7 Tensão Early (V_{EA}) 51

3.8 Ganho Intrínseco de Tensão (A_V) 53

4 DADOS FÍSICOS DO DISPOSITIVO INVESTIGADO 54

4.1 Dimensões Físicas do Dispositivo 54

4.2 A Estrutura do Dispositivo AlGaN/GaN HEMT Investigado 56

4.3 Substrato HR Si 61

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 63

5.1 Desenvolvimento Experimental 63

5.2 Curvas I_D x V_G e I_D x V_D 67
5.3 Tensão de Limiar (V_T) 75
5.4 Redução da Barreira Induzida pelo Dreno – DIBL 86
5.5 Inclinação de Sublimiar (SS) 90
5.6 Transcondutância (g_m) 94
5.7 Corrente de Porta (I_G) 101
5.8 Condutância de Saída (g_D) 109
5.9 Tensão Early (V_{EA}) 113
5.10 Ganho Intrínseco de Tensão (A_V) 115
6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS 120
7 PUBLICAÇÕES DO AUTOR 123
REFERÊNCIAS 125

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há um grande interesse em pesquisas de dispositivos eletrônicos que trabalhem com potência e frequência elevadas, na medida em que se exigem dispositivos com maior velocidade de atuação e cada vez menores, esses dispositivos são incorporados em equipamentos diversos, que fazem parte do cotidiano das pessoas, realizando trabalhos de computação, processamento, comunicações, muitas vezes em regiões com climas severos.

Os dispositivos HEMTs a princípio tiveram sua utilização somente em aplicações militares, sendo utilizados em radares, misseis e redes de comunicações. Com a evolução das técnicas de fabricação de substratos com o desenvolvimento utilização de novos materiais na fabricação dos substratos, que proporcionaram redução de custos, aliado as necessidades de dispositivos que proporcionassem altas frequências e potência de operação. As primeiras aplicações comerciais dos transistores HEMT foram com o surgimentos dos rádios digitais de comunicações e nos satélites de comunicação.

Neste trabalho é realizada uma investigação do comportamento do transistor de alta mobilidade eletrônica, que são usados em uma ampla gama de projetos de rádio frequência, incluindo os em sistemas de microondas, comunicações móveis, comunicações por satélites, transmissões de TV, radares, radioastronomia, sendo usado principalmente em aplicações de comunicação sem fio, aplicações espaciais, aplicações de defesa, aplicações médicas e militares de rádio frequência que requerem desempenho com baixo ruido e operações em frequências muito altas.

1.1 Objetivo

O objetivo desta dissertação de mestrado é realizar um estudo dos parâmetros elétricos e analógicos de transistores AlGaN/GaN HEMT, quando estão operando a baixas temperaturas.

Os transistores AlGaN/GaN HEMT foram estudados a partir de dados coletados de tensões e correntes no laboratório do Imec na Bélgica de dispositivos com diferentes comprimentos de canal nas temperaturas de 25º, 0º, -20º e -35ºC.

1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos, nos quais são apresentados alguns dos principais aspectos sobre os transistores AlGaN/GaN HEMT e suas diversas aplicações.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, o objetivo e a estrutura deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta aspectos gerais sobre o transistor HEMT, tais como a estrutura básica, heterojunções, diagrama de bandas, o princípio de funcionamento, tensão de limiar, características de tensão e corrente, dopagens e modulação 2DEG, materiais utilizados, classificação dos HEMTs e substrato de silício.

No Capítulo 3, são apresentados alguns parâmetros elétricos que podem ser utilizados para avaliação do desempenho do dispositivo AlGaN/GaN HEMT investigado nesta pesquisa. Os parâmetros elétricos apresentados neste capítulo são: Tensão de limiar (V_T), Redução da barreira induzida pelo dreno - DIBL, Inclinação de sublimiar (SS), Transcondutância (g_m), Corrente de fuga do dreno induzida pela porta (GIDL), Corrente pela porta I_G), Condutância de saída (g_D), Tensão Early (V_{EA}) e Ganho intrínseco de tensão (A_V).

No Capítulo 4, são apresentadas as dimensões físicas e a estrutura do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, tais como o comprimento (L) e a largura (W) de porta, além do substrato de silício de alta resistividade, sobre o qual o transistor AlGaN/GaN HEMT foi fabricado.

No Capítulo 5, é feita a descrição da metodologia utilizada para o tratamento e triagem dos dados das medições realizadas em laboratórios dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT investigados neste trabalho e são apresentados os resultados obtidos.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões em relação aos aspectos abordados nesta pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros.

2 HEMT (HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR)

O desenvolvimento do HEMT levou muitos anos. Porém, após o FET ser estabelecido como um componente eletrônico padrão, levou pouco anos para que o HEMT aparecer no mercado. O modo específico de transporte dos portadores usado em HEMTs foi investigado pela primeira vez em 1969, mas somente em 1980 que os primeiros dispositivos experimentais estavam disponíveis para os projetos de RF mais recentes. Na década de 1980 começaram a ser usados, mas em vista de seu custo inicial muito alto, seu uso era consideravelmente limitado. Agora com seu custo um pouco menor, eles são mais amplamente utilizados, encontrando usos nas telecomunicações móveis como bem como uma variedade de links de comunicação de rádio de microondas e muitas outras aplicações de projetos de RF (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

O elemento-chave em um HEMT é a junção PN especializada que ele usa. Isso é conhecido como uma heterojunção e consiste em uma junção que usa diferentes materiais de cada lado do a junção. Os materiais mais comuns usados são o arseneto de gálio e alumínio (AlGaAs), arseneto de gálio (GaAs), nitreto de gálio e alumínio (AlGaN) e o Nitreto de gálio (GaN) (MUHAMMAD, SHARADINDU, *et al.*, 2017). Esses materiais são geralmente usados porque fornecem um alto nível de mobilidade básica do elétron, e isso é crucial para o funcionamento do dispositivo (VARLEY, CHEN e HIGASHIWAKI, 2022).

Há uma variedade de estruturas diferentes que podem ser usadas em um dispositivo HEMT, porém todas usavam basicamente os mesmos processos de fabricação, que tinham custos elevados e sua comercialização a princípio acabou sendo restrita às aplicações militares e espaciais, sendo utilizados em sistemas de satélites comerciais e telefonia móvel na década de 90 (COLINGE e COLINGE, 2005).

Na fabricação dos primeiros HEMTs, era utilizada uma camada intrínseca de arseneto de gálio, com aproximadamente 1μm de espessura, é depositada primeiro na camada semicondutora. A próxima é uma camada de arseneto de gálio e alumínio intrínseco, muito fina (entre 3 e 6nm). Seu objetivo é garantir a separação da interface de hetero-junção da região de arseneto de gálio e alumínio dopado. Isso é crítico para a alta mobilidade do elétron ser alcançada. A camada dopada de arseneto de alumínio e gálio (cerca de 50nm) é definido acima disso.

O controle preciso da espessura desta camada é necessário e técnicas especiais são usadas para atingir a precisão necessária no controle.

Existem duas estruturas principais que são usadas. Estas são estrutura de íons auto alinhados implantados e a estrutura da porta de recesso. No caso da estrutura com íons auto alinhados implantados a porta, o dreno e a fonte são definidos e geralmente são contatos metálicos, embora os contatos da fonte e do dreno às vezes podem ser feitos de germânio. A porta é geralmente feita de titânio, e forma uma junção de polarização reversa minúscula semelhante à do GaAs FET (BEER, WEBER, *et al.*, 1994).

Para a estrutura da porta de recesso, outra camada de arseneto de gálio tipo N é estabelecida para permitir que os contatos do dreno e da fonte sejam feitos. A espessura sob a porta também é muito crítica, uma vez que a tensão de limiar do FET é determinada por isso. O tamanho da porta e, portanto, o canal é muito pequeno. Normalmente, a porta tem apenas 0,25µm ou menos, permitindo que o dispositivo tenha um muito bom desempenho de alta frequência.

O HEMT é diferente de outros tipos de FET e, é capaz de fornecer um desempenho muito melhor em relação à junção padrão ou MOSFETs, e em particular em aplicações de rádio de microondas. Elétrons da região tipo N movem-se através da rede cristalina e muitos permanecem próximo à hetero-junção. Esses elétrons formam uma camada com apenas uma camada de espessura, formando o que é conhecido como um gás de elétron bidimensional. Dentro desta região, os elétrons são capazes de se mover livremente porque não há outros elétrons doadores ou outros itens com os quais os elétrons colidem e a mobilidade dos elétrons no gás é muito alta. Uma polarização aplicada à porta formada como um diodo de barreira Schottky é usada para modular o número de elétrons no canal formado a partir do gás de elétrons 2DEG e, por sua vez, isso controla a condutividade do dispositivo. Isso pode ser comparado aos tipos mais tradicionais de FET onde a largura do canal é alterada pela polarização da porta.

O HEMT foi originalmente desenvolvido para aplicações de alta velocidade. Foi só quando os primeiros dispositivos foram fabricados e foi descoberto que exibiam uma figura de ruído muito baixo. Isso está relacionado à natureza do gás de elétron bidimensional e ao fato de que existem menos colisões de elétrons (SHEN, HEIKMAN, *et al.*, 2001).

Como resultado de seu desempenho de ruído, eles são amplamente utilizados em amplificadores de pequenos sinais de baixo ruído, amplificadores de potência, osciladores e mixers operando em frequências de até 60GHz e mais e prevê-se que, em última análise, os dispositivos estarão amplamente disponíveis para frequências até cerca de 100GHz. Na verdade, os dispositivos HEMT são usados em uma ampla variedade aplicações de projetos de RF, incluindo telecomunicações celulares, receptores de transmissão direta – DBS, radar, radioastronomia e qualquer aplicação de projeto de RF que requer uma combinação de ruído e desempenho de frequência muito alta (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Por volta de 1980, Dr. Takashi Mimura, com Fujitsu Laboratories Ltd., Kawasaki, Japão, profundamente imerso em pesquisas sobre dispositivos semicondutores compostos III-V de alta frequência e alta velocidade, fez a sua primeira implementação do transistor de alta mobilidade de elétrons de heteroestrutura (HEMT). Este HEMT foi desenvolvido usando o sistema de materiais AlGaAs / GaAs (MIMURA, 2002).

Figura 1 - Satoshi Hiyamizu a esquerda e Takashi Mimura a direita

Fonte: Mimura (2002).

O trabalho de HEMT usa o conceito de modulação dopagem, que foi demonstrado pela primeira vez em 1978 por Ray Dingle e seus colaboradores no Bell Labs (DINGLE, 1988) (NIEHENKE, 2015). Durante o mesmo período, Daniel Delagebeaudeuf e Trong L. Nuyen da Thomson-CSF (França) registraram uma patente para o mesmo dispositivo, com o título “Transistor de efeito de campo com alta frequência de corte e processamento” (MIMURA, 2002). Desde a pesquisa inicial de dispositivos, as características de comutação de alta velocidade de dispositivos HEMT tornou-se evidente em 1981, quando a Fujitsu demonstrou um oscilador de anel comutando em um atraso tão baixo quanto 17,1ps (MIMURA, JOSHIN, *et al.*, 1981). Este primeiro circuito integrado HEMT usando ambos os modos de enriquecimento e depleção.

Com tecnologia mais estabilizada e as melhorias nas tecnologias de fabricação, HEMTs se tornaram componentes essenciais dos dispositivos com características de ruído mais baixas (MIMURA, 2005). Como resultado do processo de fabricação amadurecido, GaAs MESFET foram substituídos por HEMTs, o que resultou em uma redução drástica do tamanho das antenas.

Com aplicações de alta tecnologia, como radioastronomia, ao espaço e aplicações militares e aplicações de entretenimento em receptores de transmissão por satélite, HEMT rapidamente ganhou popularidade. Avanços em aplicações digitais como registradores de dados multibit, com dispositivo HEMT de heterojunção GaAs / AlGaAs com 0,5 μm na tecnologia LSI, pavimentou o caminho para o uso de HEMTs no desenvolvimento de supercomputadores (WATANABE, SAITO, *et al.*, 1988).

No início de 1990, HEMTs foram demonstrados pela primeira vez usando heterojuncões baseadas em nitreto semicondutores AlGaN / GaN HEMT. HEMTs foram demonstrados em vários materiais, (e os mais notáveis são) os sistemas AlGaAs / GaAs e AlGaN / GaN (KHAN, BHATTARAI, *et al.*, 1993) (XING, KELLER, *et al.*, 2001). Hoje em dia, HEMT é onipresente em aplicações que variam de amplificadores de baixo ruido criogênicos, radiotelescópio para detectar sinais de micro-ondas, transmissores e receptores de satélite, telefones celulares e radares automotivos.

O desempenho dos transistores baseados em GaN para amplificadores de potência RF de alta frequência tem melhorado tremendamente nos últimos anos por

meio de extensas pesquisas. A frequência máxima de trabalho f_T foi aumentada de algumas dezenas de GHz para cerca de 450GHz, reduzindo a lacuna com tecnologias de semicondutores de baixa banda de energia. Além disso, além de novas tecnologias para aumentar o desempenho de frequência de pico, novas abordagens para manter a alta velocidade sob uma ampla faixa de polarização. Espera-se que o desempenho em alta frequência desses dispositivos, em combinação com a grande tensão de ruptura de GaN HEMTs, possam abrir uma nova fronteira para amplificadores e misturadores eletrônicos de sinais de RF num futuro próximo (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

As expectativas para esta quinta geração de redes móveis são altas. Espera-se que 5G habilite mobilidade extrema de banda larga com taxas de dados de até 10Gbps, para atender, por exemplo, a demanda futura para streaming de vídeo. Ele também promete permitir a comunicação máquina a máquina em suporte da plataforma Internet-of-Things (internet das coisas). E espera-se que permita comunicação de máquinas críticas – como carros sem motorista se comunicando uns com os outros e com estações base vizinhas. Essas aplicações geralmente exigem confiabilidade extremamente alta e latências baixas, abaixo de 1ms (AGIWAL, KWON, *et al.*, 2021).

Para permitir essa experiência quase ilimitada, são necessárias inovações no geral da infraestrutura de rede (incluindo estações base e pequenas células), bem como nas tecnologias para dispositivos móveis.

Os primeiros dispositivos baseados em GaN, tornaram-se comercialmente disponíveis por volta do ano de 2006. Estes dispositivos passaram a ser fabricados por empresas que já possuíam uma grande experiência com a tecnologia GaAs (arseneto de gálio). A maioria desses produtos, era baseada em material que sofreu um crescimento epitaxial, como por exemplo, em substratos do composto SiC (carboneto de silício). No entanto, em algumas aplicações específicas, o Si (silício), também foi utilizado como um substrato interessante, pois devido à sua abundância, apresenta preço inferior, além de excelente condutividade térmica (COLINGE, 2012).

Novas técnicas de deposição de GaN (nitreto de gálio) sobre safira por MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) foram desenvolvidas e passaram a ser

utilizadas no ano de 2010, iniciando então, a fabricação comercial de transistores constituídos por AlGaN/GaN (GHOSH, HINZ, *et al.*, 2023).

A deposição epitaxial MOCVD é uma técnica amplamente utilizada para crescer camadas de GaN (nitreto de gálio) sobre substratos de silício.

Em geral, a técnica MOCVD envolve a introdução de precursores gasosos, geralmente compostos de organometálicos e gases de alimentação, em uma câmara de reação de alta temperatura. O calor ativará a reação química entre os precursores, o que levará à deposição da camada de GaN no substrato de silício.

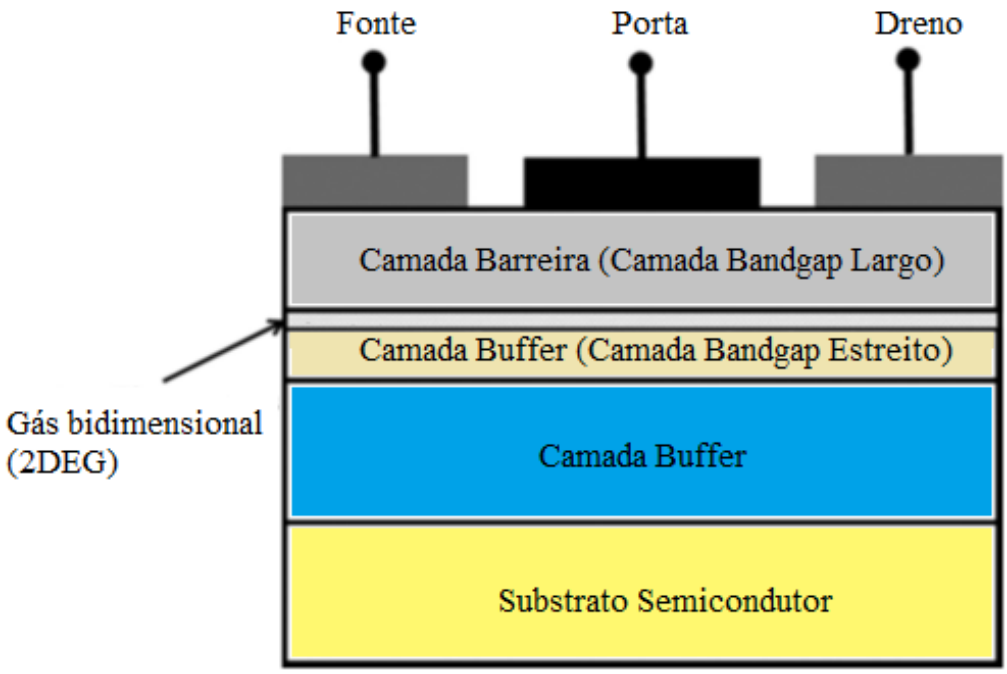
Existem várias etapas para o crescimento epitaxial MOCVD de GaN sobre silício, incluindo:

- Preparação do substrato: O substrato de silício deve ser limpo e preparado para receber a camada de GaN. Normalmente, isso envolve a remoção de impurezas e a oxidação da superfície do silício para formar uma camada de óxido.
- Preparação dos precursores: Os precursores de metal orgânicos e gases de alimentação devem ser preparados e misturados nas proporções corretas para a deposição do GaN.
- Introdução dos precursores na câmara de reação: Os precursores são introduzidos na câmara de reação através de válvulas controladas por computador.
- Crescimento da camada de GaN: A reação química é ativada pela alta temperatura dentro da câmara de reação, o que leva à deposição da camada de GaN no substrato de silício. O crescimento epitaxial é alcançado quando a camada de GaN é depositada em uma orientação cristalina semelhante à do substrato de silício.
- Resfriamento e retirada da amostra: Depois que a camada de GaN atinge a espessura desejada, a amostra é resfriada e retirada da câmara de reação (GHOSH, HINZ, *et al.*, 2023).

2.1 Estrutura Básica do HEMT

A seção transversal estrutural de um HEMT é mostrada na Figura 2. O coração de HEMT é a formação de gás de elétron bidimensional (2DEG) em um poço quântico. O 2DEG é formado pela escolha adequada do sistema de materiais. Em um HEMT, a camada de barreira é um material com bandas de energia larga e a camada tampão constitui um material com bandas de energia estreita. A camada de barreira e a camada de buffer podem ter o mesmo tipo de dopagem, tipo N, formando uma heterojunção. Geralmente, o doping da camada de barreira é maior do que a camada de tampão. Quando a camada de barreira é colocada em contato com a camada de tampão, para adquirir configuração de energia mínima, os elétrons se difundem da ampla camada de barreira de bandas de energia para estreitar a camada de bandas de energia do tampão. Esta transferência de elétrons continua até que a difusão seja contrabalançada por um campo elétrico embutido (semelhante ao processo que ocorre em uma junção PN). Assim, o nível de Fermi em ambos os lados fica alinhado e dentro da estrutura, e a mudança espacial do nível de Fermi através da junção é zero. Debaixo de condição de equilíbrio, banda de condução, bandas de valência dobram-se adequadamente.

Figura 2 - Seção transversal estrutural básica de dispositivo um HEMT.



Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

Na região do canal, a banda apresenta uma curvatura que facilita a formação de um poço quântico bidimensional com uma barreira finita em altura e largura. Como resultado do fenômeno da mecânica quântica, os elétrons são confinados em níveis de energia quantizados dentro do poço. Os elétrons no canal são, portanto, restritos a esse poço quântico e ocupam níveis de energia específicos, criando um estado conhecido como 2DEG. Enquanto a camada de barreira N-dopada fornece elétrons para o canal, os portadores de carga (elétrons) são espacialmente separados dos átomos doadores ionizados, reduzindo a dispersão de impurezas das cargas móveis. Isso resulta em um canal mais limpo e um 2DEG mais eficiente. Além disso, como a região de transporte de corrente é longe da superfície, a dispersão da superfície também é reduzida. Ambos os fenômenos melhoraram a mobilidade da portadora e, portanto, o nome transistor de alta mobilidade de elétrons. O canal não dopado aumenta ainda mais a mobilidade da portadora. Portanto, é uma prática padrão minimizar o doping da camada de tampão e, portanto, a camada de tampão não é dopada. A porta forma um contato Schottky com a camada de barreira enquanto o dreno e a fonte formam um contato ôhmico com a camada de barreira (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Para entender o princípio de funcionamento de um HEMT, é necessário conhecer o funcionamento alguns tipos de formação de 2DEG e diferentes heterojunções Tipo I, II e III descritas a seguir.

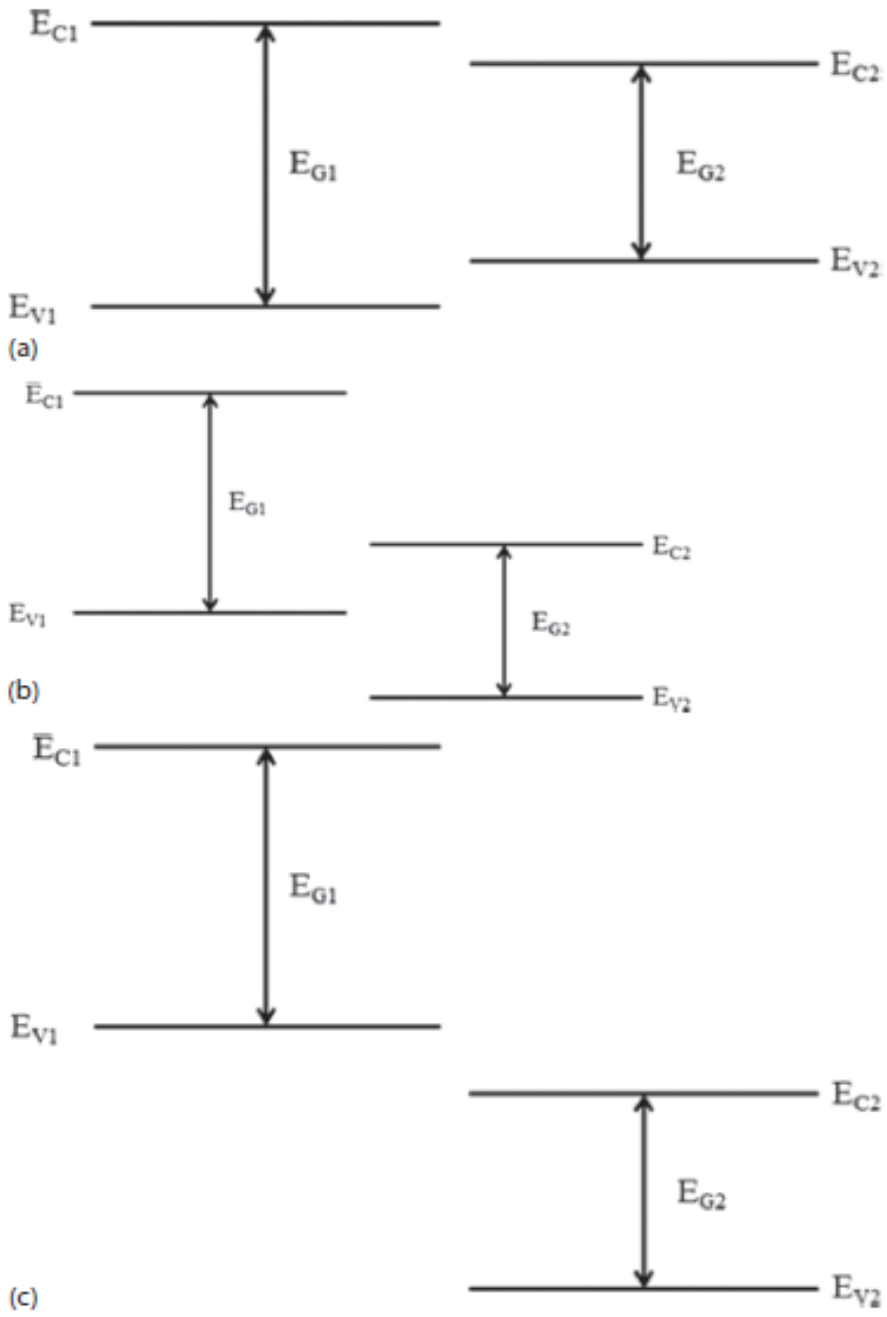
2.2 Heterojunções

Uma heterojunção é formada quando dois semicondutores diferentes são colocados em contato. Dependendo do alinhamento de bandas de condução e valência de dois semicondutores e da banda proibida, as heterojunções podem ser classificadas em três categorias distintas.

A Figura 3.a mostra o alinhamento mais comum, que é chamado de alinhamento Tipo-I ou alinhamento montado. $Al_xGa_{(1-x)}As$ / GaAs é um exemplo de alinhamento montado. O alinhamento Tipo-II consiste em alinhamento escalonado. No alinhamento escalonado, a diferença no alinhamento da banda de condução e da banda de valência estão na mesma direção. Como mostrado na Figura 3.b, $GaAs_ySb_{(1-y)}$ / $Ga_xIn_{(1-x)}$ como sistema material é um exemplo de alinhamento escalonado.

O alinhamento de bandas de energia interrompida mostrado na Figura 3.c ocorre em sistemas de material GaSb / InAs. O alinhamento da banda de energia interrompida também é chamado de alinhamento do Tipo III. O alinhamento da banda tipo I é adequado para um dispositivo HEMT. (MIMURA, JOSHIN, *et al.*, 1981) (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Figura 3 - Bandas de energia de heterojunções (a) Tipo I; (b) Tipo II; Tipo III.



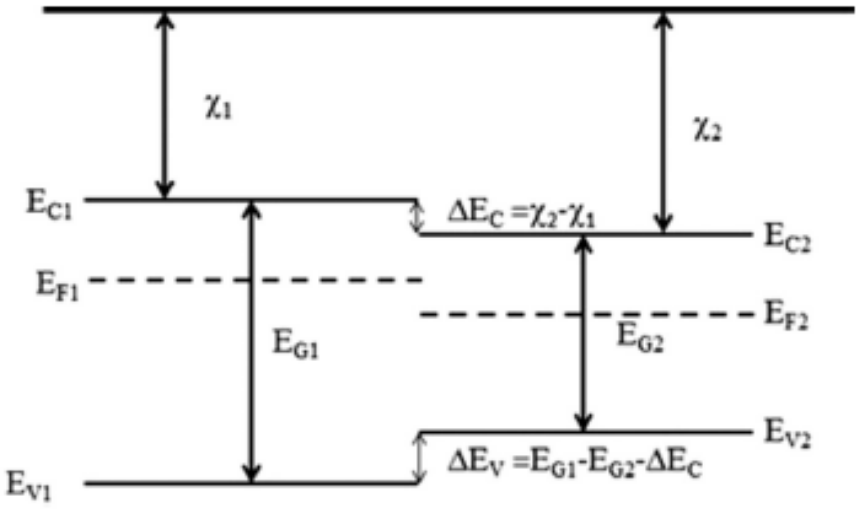
Fonte: Mimura (2005).

2.3 Diagrama de Bandas de Energias da Heterojunção Tipo-I

Considere que os dois materiais semicondutores mostrados na Figura 3.a são colocados em contato. Sejam χ_1 e χ_2 a afinidade eletrônica, E_{G1} e E_{G2} as bandas de energia dos dois materiais semicondutores respectivamente, conforme mostrado na Figura 4. Quando o efeito da imagem força é negligenciado, o modelo de afinidade eletrônica assume que o equilíbrio de energia de um elétron mudou do nível de vácuo para o semicondutor-1 para o nível de vácuo do semicondutor-2. Após colocar os dois materiais em contato, na região livre do campo, as diferenças da banda de condução e de borda da banda de valência são ilustradas na Figura 5. Assim, essa diferença pode ser calculada usando a equação (2.1) (NIRMAL e AJAYAN, 2019; KHAN, BHATTARAI, *et al.*, 1993).

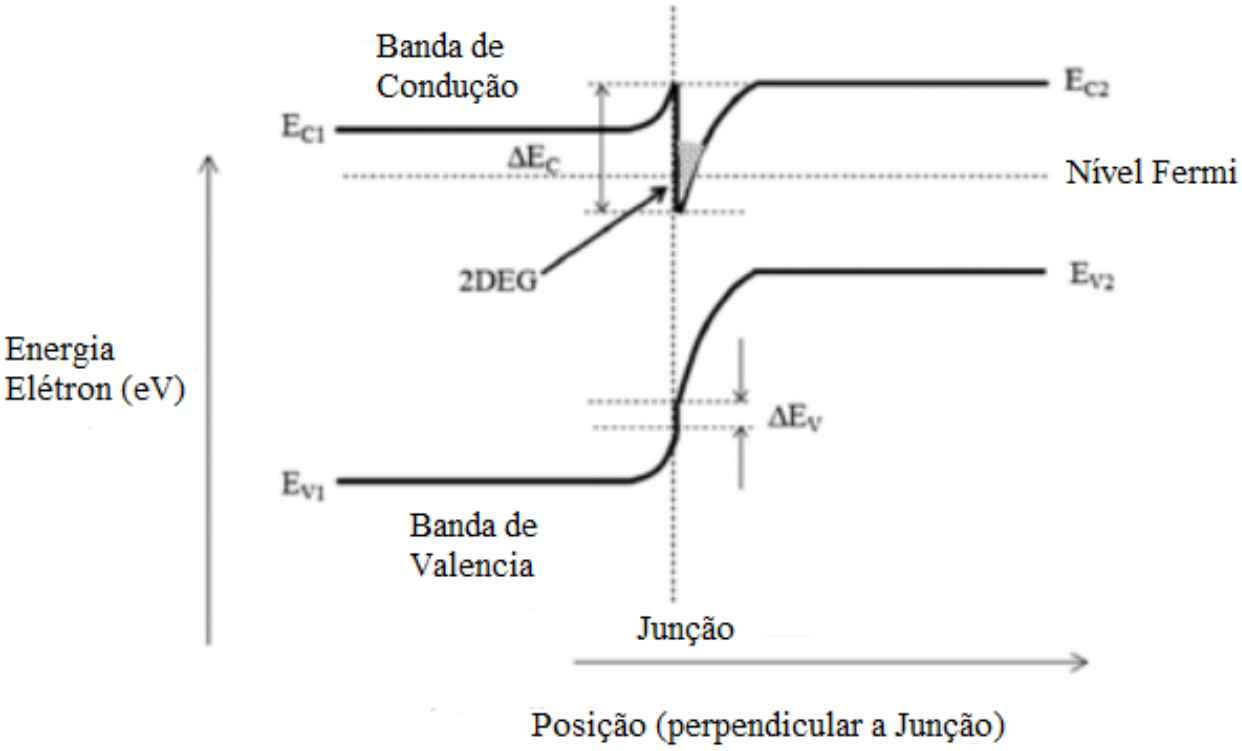
$$\Delta E_C = x_1 - x_2 \qquad (2.1)$$

Figura 4 - Descrição dos níveis de energia em uma heterojunção Tipo I.



Fonte: Nirmal e Ajayan (2019).

Figura 5 - Diagrama de banda e formação 2DEG em uma heterojunção Tipo-I.



Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

Nesta situação temos representadas as seguintes grandezas:

• EF = nível de energia de Fermi.

• E_{G1} = bandgap do semicondutor 1 (diferença de energia, em elétron-volt, entre a parte superior da banda de valência e a parte inferior da banda de condução).

• E_{G2} = bandgap do semicondutor 2 .

• E_{C1} = banda de condução do semicondutor 1.

• E_{C2} = banda de condução do semicondutor 2.

• E_{V1} = banda de valência do semicondutor 1.

• E_{V2} = banda de valência do semicondutor 2.

• ΔE_C = banda off-set da condução.

• ΔE_V = banda off-set da valência.

Conseqüentemente, a diferença da borda da banda de valência é dada pela equação (2.2) (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

$$\Delta E_V = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_C \qquad (2.2)$$

Uma vez que materiais com banda de energia larga e estreita são unidos em uma heterojunção, as bandas de energia se alinham para que o sistema alcance o equilíbrio. O diagrama da banda de equilíbrio uma heterojunção Tipo I é mostrado na Figura 5 indicando o 2DEG (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Uma das principais características de uma heterojunção reside no fato, que as bandas de energia dos semicondutores participantes são geralmente diferentes. Assim, a energia dos portadores deve mudar em pelo menos uma das bordas da banda à medida que esses portadores passam pela heterojunção. Na maioria das vezes, haverá descontinuidades tanto na banda de condução quanto na de valência. Essas descontinuidades são a origem da maioria das propriedades úteis das heterojunções. A combinação de múltiplas heterojunções em um dispositivo é chamada de heteroestrutura. Transistores HEMTs são constituídos por heterojunções e os semicondutores utilizados apresentam larguras de bandas proibidas distintas.

Na Tabela 1, são apresentados os principais semicondutores utilizados na fabricação de dispositivos HEMT com os respectivos valores de bandas de energia.

Tabela 1 - Valores das bandas de energia dos principais semicondutores.

Material	Símbolo Químico	Bandas de Energia (eV)
Germânio	Ge	0,67
Silício	Si	1,10
Arseneto de Gálio	GaAs	1,40
Carboneto de Silício	SiC	3,26
Nitreto de Gálio	GaN	3,40
Nitreto de Gálio Alumínio	AlGaN	3,49

Fonte: Adaptado de Liao, Shen e Wang (2019).

A eficiência dos semicondutores está diretamente relacionada ao valor da zona proibida (bandgap) de energia, entre a banda de valência e a banda de condução. No projeto de transistores que deverão atuar em regimes de alta potência (KW) e alta frequência (GHz), um grande valor das bandas de energia, ou WBG (Wide BandGap) é fator determinante na escolha do semicondutor (BALIGA, 2018).

Podemos destacar os seguintes pontos na utilização de heterojuncões com alto valores de banda de energia, por exemplo, Nitreto de Gálio (3,4eV) são:

- Alta eficiência, chegando a valores superiores à 90%, quanto ao aproveitamento da energia.
- Frequência de comutação superior quando comparadas as estruturas baseadas no silício (Si) ou Germânio (Ge).
- Operação em uma faixa maior de temperaturas, quando comparados com estruturas baseadas no silício (Si) ou Germânio (Ge).
- Sistemas com uso de energia de ciclo de vida reduzido.

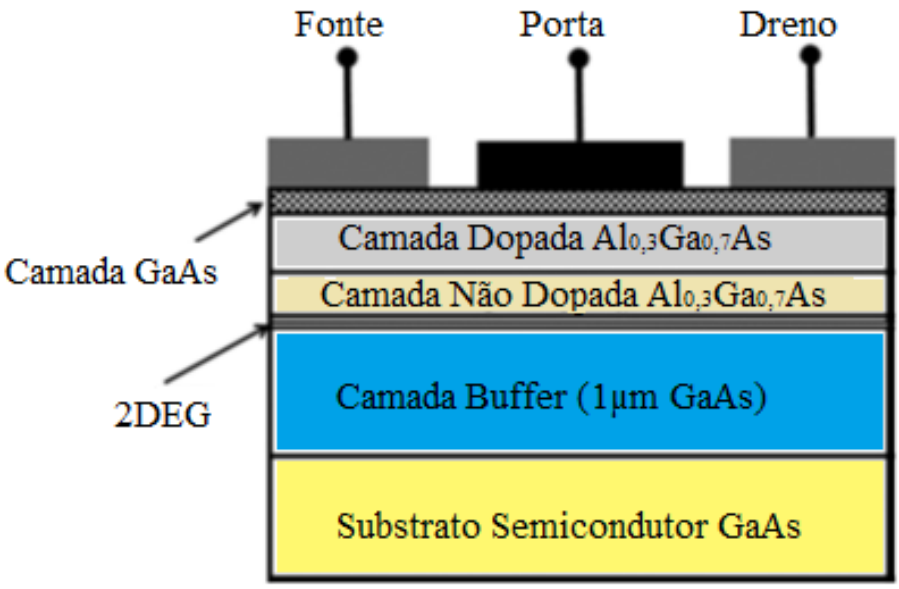
Embora os custos de fabricação de heterojunções de semicondutores que apresentam um amplo intervalo de energia entre a banda de valência e a banda de condução, GaN por exemplo, ainda tenham preços mais elevados do que os aplicados em dispositivos homojunção, a necessidade de desenvolvimento constante dos sistemas eletrônicos que necessitam de altas frequência ou alta potência, como por exemplo as comunicações móveis 5G, devem impulsionar a redução em seu valor final, com aumento de produção em escala (ANDRADE, BERGAMIM, *et al.*, 2021).

2.4 Princípio de Funcionamento dos HEMTs

Existem dois modos de operação para os transistores: o modo de depleção e o modo de enriquecimento. A espessura das camadas de AlGaAs é o fator determinante para a escolha do modo. Quando as camadas são suficientemente grossas, a carga é fornecida pela camada para preencher os estados da superfície na interface entre as camadas AlGaAs e o metal da porta, assim como para a camada de GaAs para o alinhamento dos níveis de Fermi, o que resulta no transistor estar normalmente ligado. No entanto, quando uma tensão adequada é aplicada na porta, a largura da camada de depleção é aumentada, o que gera uma redistribuição de cargas e, consequentemente, altera a densidade de portadores e a corrente através do poço quântico. Nessa etapa, os elétrons são removidos da camada GaAs próxima

à interface de heterojunção, e isso faz com que o fluxo de corrente seja interrompido, desligando o dispositivo (NIRMAL e AJAYAN, 2019). A estrutura básica de um HEMT é mostrada na Figura 6:

Figura 6 - Estrutura do HEMT no sistema AlGaAs/GaAs



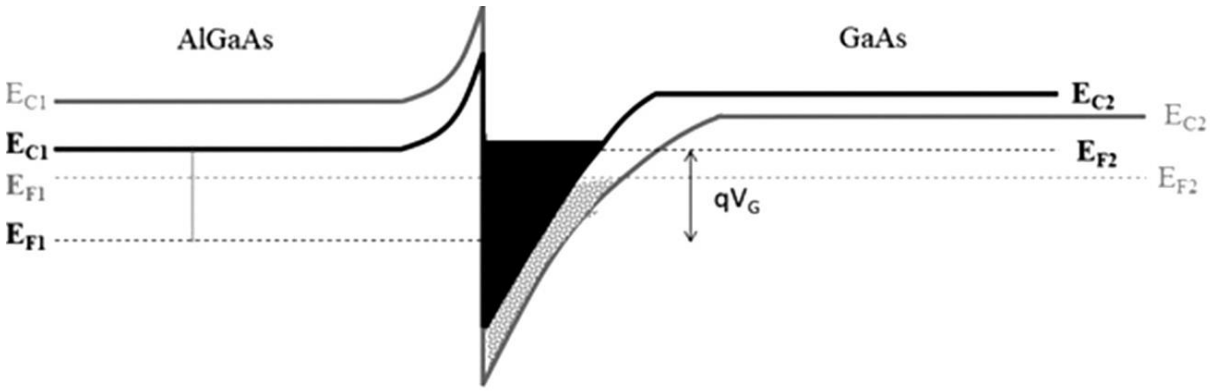
Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

Por outro lado, se a camada de barreira se tornar fina, e a carga disponível na camada não for suficiente para causar o alinhamento dos níveis de Fermi, a camada de GaAs é necessária para fornecer a carga adicional. Uma vez que a camada está depletada, o transistor está normalmente desligado.

A aplicação de uma tensão adequada na porta resulta na redistribuição das cargas e, na verdade, altera a densidade de portadores e, portanto, a corrente através do canal formado pelo poço quântico. Na camada GaAs perto da interface de heterojunção, os elétrons ocupam os níveis de energia e o HEMT conduz corrente. Ambos os modos de operação são necessários para diferentes tipos de operações de transistor e diferentes circuitos funcionais. A possibilidade de ter o modo de enriquecimento e modo de depleção HEMT no mesmo chip é considerada uma grande vantagem (MIMURA, JOSHIN, *et al.*, 1981).

Diagrama de banda de um modo de enriquecimento HEMT com aplicação de uma tensão positiva e negativa na porta é mostrada nas Figura 7 e Figura 8, respectivamente.

Figura 7 - Diagrama de bandas representando a curvatura de banda e a formação 2DEG em um HEMT AlGaAs / GaAs quando V_G <0. As linhas escuras indicam V_G <0 e as linhas coloridas sombreadas indicam o diagrama de banda de equilíbrio térmico quando V_G = 0.



Fonte: Nirmal e Ajayan (2019).

Onde:

• E_{F1} = nível de energia de Fermi do semicondutor 1.

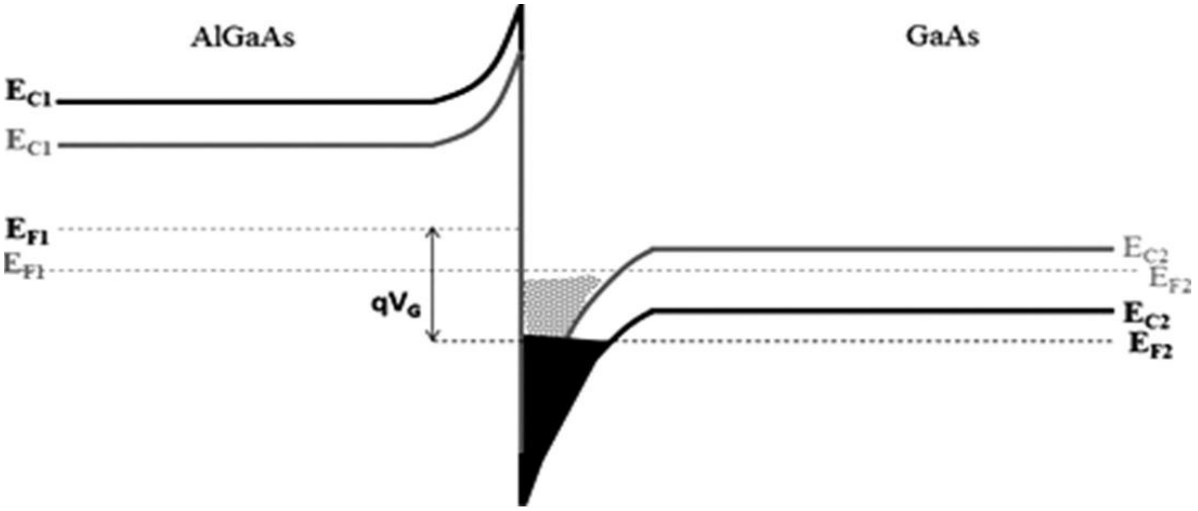
• E_{F2} = nível de energia de Fermi do semicondutor 2.

• E_{C1} = banda de condução do semicondutor 1.

• E_{C2} = banda de condução do semicondutor 2.

• qV_G = diferença entre os níveis de Fermi dos semicondutores 1 e 2.

Figura 8 - Diagrama de banda que descreve a curvatura de banda e a formação 2DEG em um HEMT AlGaAs / GaAs quando $V_G > 0$. As linhas escuras indicam $V_G < 0$ e as linhas coloridas sombreadas indicam o diagrama de banda de equilíbrio térmico quando $V_G = 0$.



Fonte: Nirmal e Ajayan (2019).

Onde:

- E_{F1} = nível de energia de Fermi do semicondutor 1.
- E_{F2} = nível de energia de Fermi do semicondutor 2.
- E_{C1} = banda de condução do semicondutor 1.
- E_{C2} = banda de condução do semicondutor 2.
- qV_G = diferença entre os níveis de Fermi dos semicondutores 1 e 2.

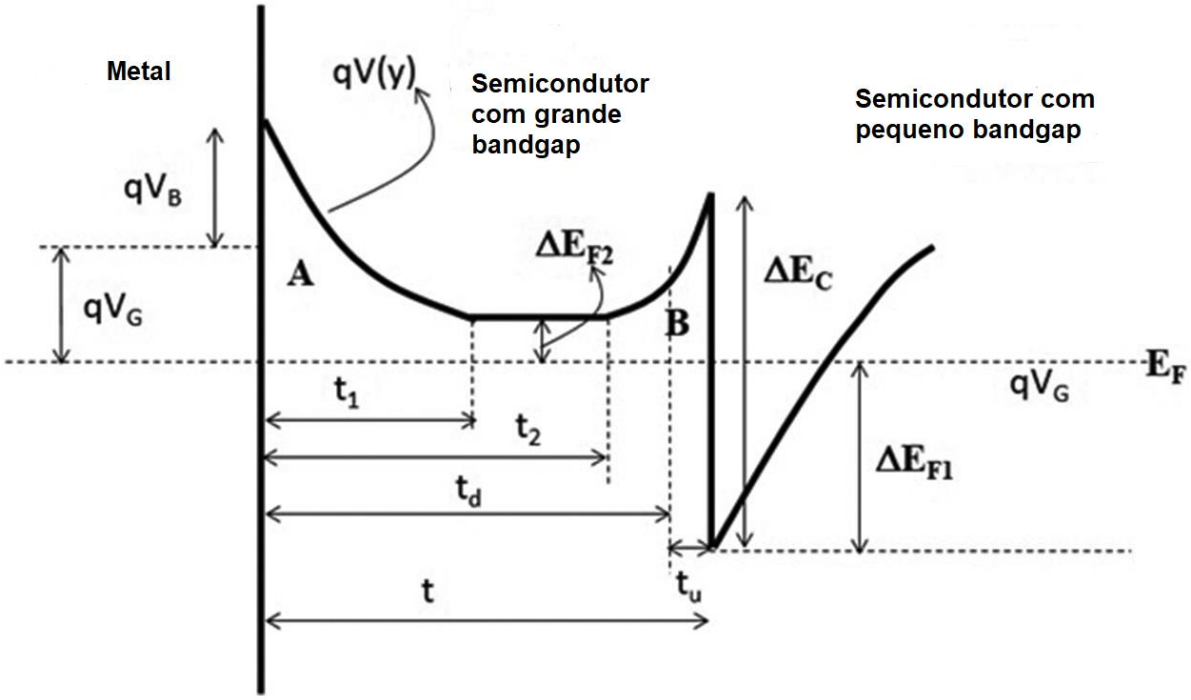
2.5 Tensão de Limiar

A distribuição de potencial com aplicação de uma tensão negativa de porta (V_G) entre o metal de porta e o semicondutor com pequena bandgap são mostrados na Figura 9. Para facilitar a compreensão, suponha que os materiais usados nesses cálculos seja AlGaAs / GaAs e o alinhamento de bandas é mostrado na Figura 9. O nível Fermi está alinhado nas camadas AlGaAs e GaAs enquanto no metal o nível de Fermi, é reduzido por qV_G. Devido a tensão aplicada, duas regiões de depleção são formadas – uma na interface porta-semicondutor (região marcada como A) e a outra na heterojunção (região marcada como B). Na região A, os elétrons se acumulam na superfície do metal, que produzem um campo elétrico E_s.

Os doadores positivamente ionizados na camada de AlGaAs produzem um gradiente de campo positivo, que neutraliza E_s em uma distância t_1 e produz equilíbrio. Então, existe uma região livre de campo elétrico de uma espessura ($t_2 – t_1$). E ainda assumido que a espessura da camada AlGaAs dopada é t_d e a espessura da camada AlGaAs não dopada é t_u. A tensão de limiar para o controle de carga V_{T1} é dada pela equação (2.3) (NAG, 2002).

$$V_{T1} = V_s - \frac{\Delta E_{F2}}{q} - a(d - d_0) \qquad (2.3)$$

Figura 9 - Distribuição potencial em um HEMT com aplicação de tensão de porta.



Fonte: Adaptado de Chang e Ploog (2012).

Onde:

• E_F = nível de Fermi.

• ΔE_{F1} = diferença entre nível de Fermi do semicondutor 1 e o nível de Fermi.

• ΔE_{F2} = diferença entre o nível de Fermi do semicondutor 2 e o nível de Fermi.

• ΔE_C = diferença entre a banda de condução do semicondutor 1 e a banda de condução do semicondutor 2.

• V_{T1} = tensão de limiar para o controle de carga.

• V_{T2} = tensão de limiar para o controle da porta.

• qV_G = diferença entre os níveis de Fermi dos semicondutores 1 e 2.

Onde a e d_0 são dados pelas equações (2.4) e (2.5) (NAG, 2002), respectivamente. N_D é a concentração de dopagem e ϵ1 é permissividade da camada AlGaAs.

$$a = \frac{qN_D}{\epsilon_1} \tag{2.4}$$

$$ad_0^2 = ad^2 + \frac{\Delta E_c - \Delta E_{F2} - \Delta E_{F1}}{q} \tag{2.5}$$

A tensão de limiar para controlar a porta, V_{Th2}, é dada pela equação(2.6) (NAG, 2002).

$$V_{Th2} = V_B - \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{E_F}{q} - at_d^2 \tag{2.6}$$

Para operar um HEMT, com acumulação de carga na interface, a carga precisa para ser controlada usando uma tensão de porta. Portanto, a polarização de porta aplicada deve estar entre V_{Th1} e V_{Th2}. Para HEMTs de modo de enriquecimento, a espessura t da camada AlGaAs é tal que essa carga se acumula até $V_G > V_{Th2}$ e permanece controlável até $V_G < V_{Th1}$, portanto, $V_{Th1} > V_{Th2} > 0$. No caso de HEMTs no modo de depleção, o t é escolhido de forma que $V_{Th2} < 0$ e $|V_{Th2}| > |V_{Th1}|$. Assim, as condições de operação de um HEMT no modo de depleção são $|V_{Th2}| > |V_G| > |V_{Th1}|$. (NAG, 2002)

2.6 Características de Corrente e Tensão

Suponha que para um HEMT com um comprimento de canal L, uma tensão de porta V_{GS} e uma tensão de dreno V_{DS} são aplicados em relação à fonte. Sendo a direção da corrente atual na direção x e V_{GS} é a origem. A tensão aplicada entre o dreno e a fonte varia como uma função de x e é indicada por V (x). A tensão efetiva V_{eff} na posição x é dada pela equação(2.7) (NAG, 2002).

$$V_{eff} = V_G - V(x) \tag{2.7}$$

A densidade de carga superficial em x é dada por (2.8) (NAG, 2002).

$$qn(x) = \frac{\in_1}{d}(V_{eff} - V_{Th2}) \tag{2.8}$$

Se W é a largura do eletrodo da porta, então a corrente através da região do canal é dada por (2.9) (NAG, 2002).

$$I = \mu(E)qn(x)\frac{dV}{dx}\,\mathrm{W} \tag{2.9}$$

Substituindo n (x), assumindo mobilidade constante e integrando a partir da extremidade da fonte para o dreno, temos a corrente total através do canal.

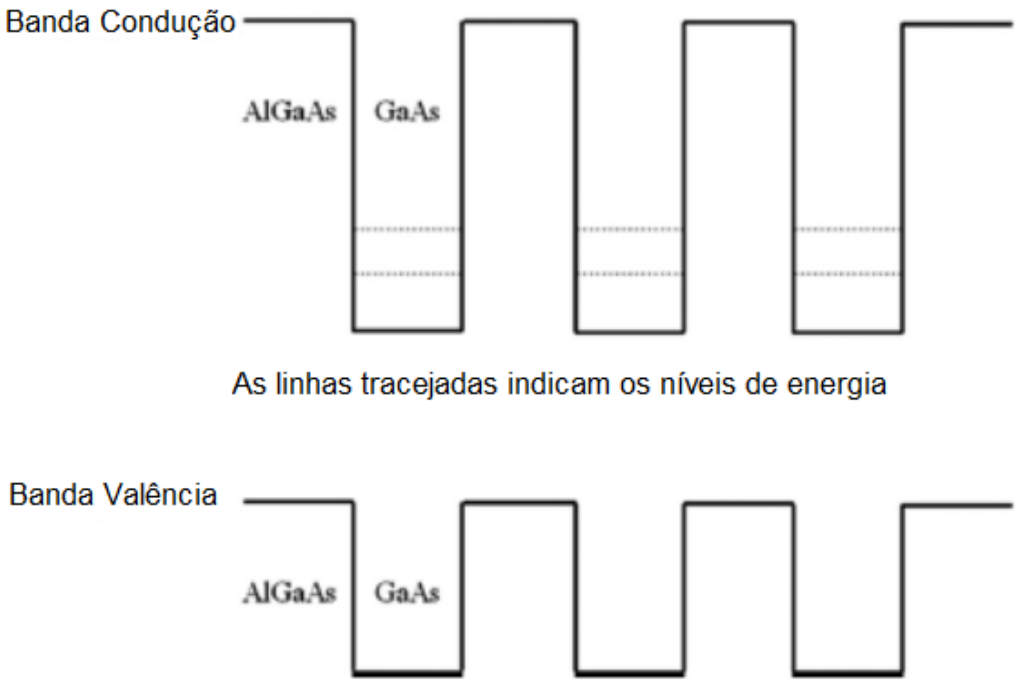
2.7 Dopagem de Modulação e 2DEG

A técnica de modulação dopagem (MD) tem sua origem em heteroestruturas semicondutoras e superredes (CHANG e PLOOG, 2012). Os portadores de carga são confinados por heterojuncões, ocupando estados de energia quantizados. A quantização ocorre na dimensão perpendicular à heteroestrutura, enquanto o movimento paralelo à interface é livre. Com apenas dois sentidos de movimento livre disponíveis, os portadores de carga em cada estado quântico, formam um sistema bidimensional.

As estruturas de modulação são projetadas para separar doadores de elétrons móveis para aumentar o tempo entre eventos de espalhamento, aumentando assim a velocidade de operação.

A representação esquemática de uma estrutura dopada por modulação é mostrada na Figura 10. Baixa energia dos estados de elétrons nos poços em relação aos elétrons que residem nas barreiras resulta em um poço finito. Como resultado, um poço quadrado de profundidade finita é formado. A carga transferência e confinamento do portador que formam a base para a maioria das modulações de dopagem (CHANG e PLOOG, 2012).

Figura 10 - Representação esquemática da modulação dopagem.



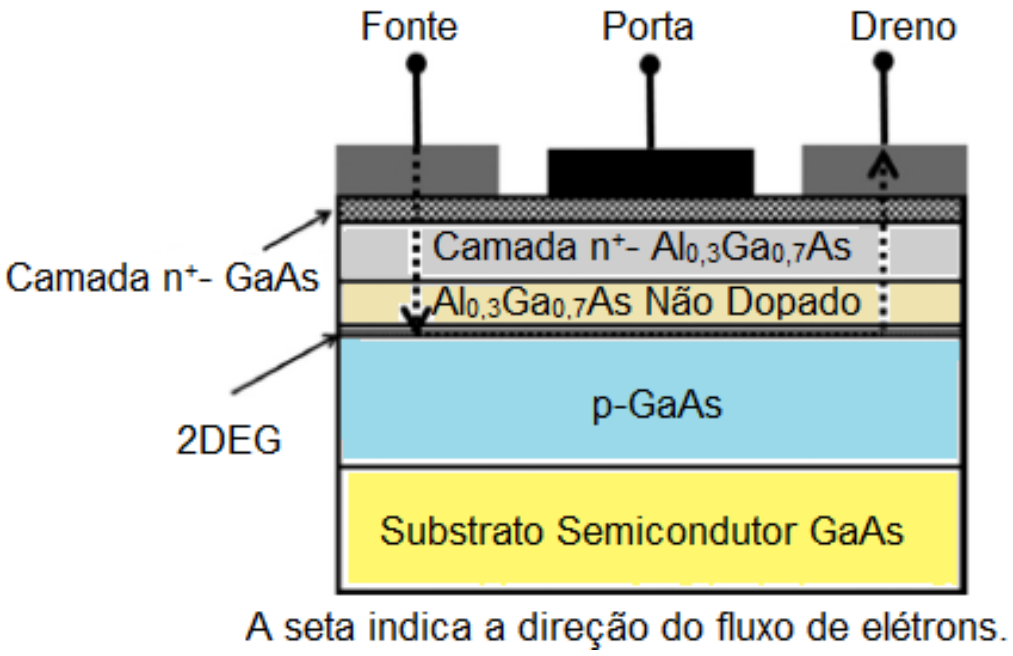
Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

2.8 Materiais Utilizados nos HEMTs

Trabalhos sobre HEMTs por vários grupos de pesquisa indicam que o InP HEMTs mostra ganho de transistor superior, frequência de transição e comportamento de baixo ruído em comparação com HEMTs de GaN e GaAs devido à alta mobilidade de elétrons, velocidade de saturação de elétrons e densidades de carga de camada bidimensional (2DEG) do canal de materiais InGaAs ou InAs.

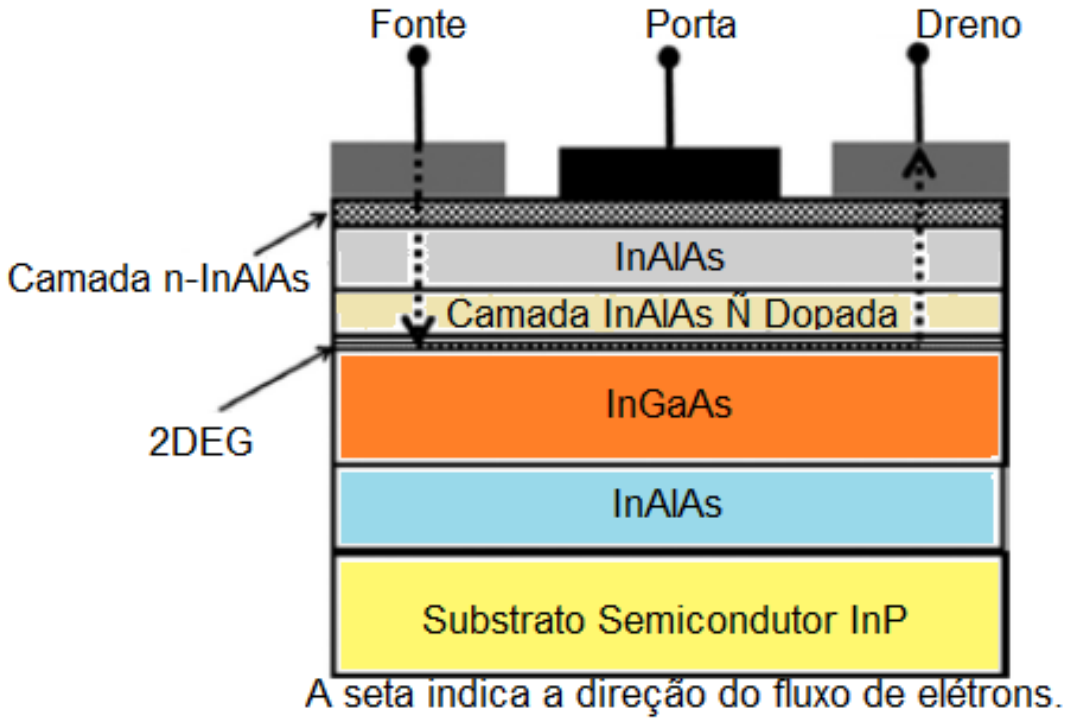
Além disso, em um InP, os efeitos parasitários podem ser reduzidos, pois o dimensionamento agressivo é possível pela seleção adequada da arquitetura do dispositivo. Devido ao baixo custo e à redução da complexidade do processo, HEMTs baseados em substrato GaAs, MMICs e circuitos integrados monolíticos terahertz (TMICs) são mais econômicos quando comparados aos dispositivos baseados em substrato InP. Por outro lado, HEMTs baseados em GaAs são mais adequados para aplicações de alta frequência e baixa potência, enquanto HEMTs baseados em GaN são úteis para alta potência, alta frequência e sistemas de baixo ruído. O sistema AlGaAs / GaAs HEMT é mostrado na Figura 11. O sistema InGaAs / InAlAs HEMT é mostrado na Figura 12. O sistema AlGaN / GaN HEMT é mostrado em Figura 13 (MIMURA, JOSHIN, *et al.*, 1981) (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

Figura 11 - Estrutura HEMT AlGaAs / GaAs.



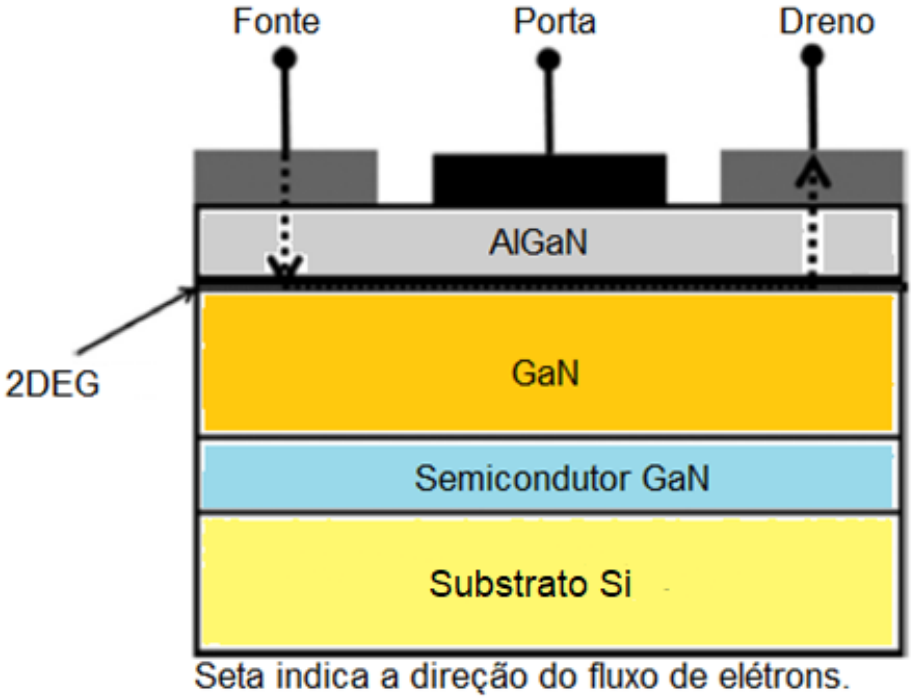
Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

Figura 12 - Estrutura HEMT InAlGaAs/InGaAs.



Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

Figura 13 - Estrutura HEMT AlGaN/GaN.



Fonte: Adaptado de Nirmal e Ajayan (2019).

2.9 Classificação dos HEMTs

HEMTs podem ser classificados com base na estrutura e operação do dispositivo. Para formar um poço quântico e, portanto, um 2DEG, dois materiais diferentes são necessários. Um requisito ideal é ter mesma orientação da rede cristalina em toda a heterojunção. No entanto, na prática, os dois diferentes materiais usados a partir de uma heterojunção teriam diferentes constantes de rede, normalmente ligeiramente diferente. A incompatibilidade de rede, portanto, resulta em defeitos de cristal. Em semicondutores, essas incompatibilidades de rede resultam em descontinuidades de rede que, por sua vez, formam o nível profundo armadilhas e reduzem significativamente o desempenho do dispositivo.

Usando uma rede cristalina fina, a incompatibilidade da rede pode ser evitada. Uma camada muito fina estica-se para se ajustar à outra estrutura. Um HEMT onde a incompatibilidade de rede é evitada o uso de uma camada de cristal fina é chamado de HEMT pseudomórfico (pHEMT). Devido a deslocamentos reduzidos, pHEMT permite a fabricação de transistores com diferenças de bandas de energia maiores do que em outros tipos é possível, dando-lhes melhor desempenho.

Se a incompatibilidade de rede cristalina for evitada usando uma camada de buffer na heterojunção, o HEMT é chamado de HEMT metamórfico ou mHEMT. A camada tampão é obtida usando um gradiente de concentração. Por exemplo, variando a concentração de índio, a constante de rede do substrato GaAs e do canal GaInAs podem ser combinados. Gradiente de concentração de dopagem fornece uma vantagem de que uma concentração desejada no canal pode ser alcançada, para que os dispositivos possam ser otimizados para diferentes aplicações. (MIMURA, 2005)

O uso de um buffer entre o substrato de silício de alta resistividade (HRSi) e o AlGaN/GaN em um transistor HEMT pode oferecer diversas vantagens. Algumas delas incluem:

- Redução de defeitos: O buffer pode ajudar a reduzir defeitos na interface entre o HRSi e o AlGaN/GaN, o que pode melhorar a qualidade do cristal e, consequentemente, o desempenho do dispositivo.

- Redução do estresse mecânico: O buffer pode ajudar a reduzir o estresse mecânico gerado durante o crescimento do AlGaN/GaN sobre o HRSi, o que pode melhorar a estabilidade e a confiabilidade do dispositivo.
- Melhoria da uniformidade: O buffer pode ajudar a melhorar a uniformidade da espessura e da composição do AlGaN/GaN, o que pode levar a uma melhoria na consistência do desempenho do dispositivo (MEDJDOUB, ZEGAOUI, *et al.*, 2011).

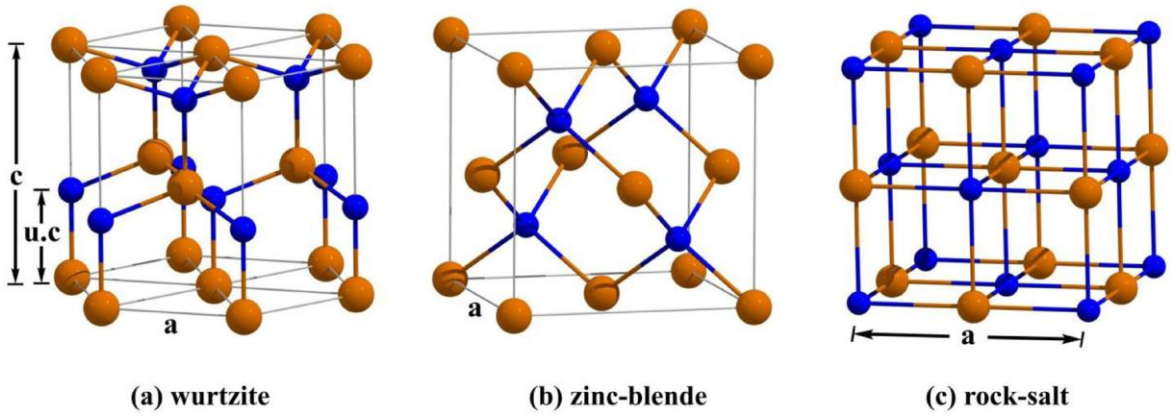
Um HEMT induzido é um dispositivo no qual os portadores de carga são “induzidos” ao 2DEG ao invés de criado por dopantes. A ausência de uma camada dopada aumenta a mobilidade do elétron significativamente quando comparada com suas contrapartes dopadas com modulação. Como a dopagem é reduzida, os ruídos térmicos devido à ionização do dopante são reduzidos, portanto, aplicações em dispositivos eletrônicos ultra estáveis e ultrassensíveis. Por exemplo, ao contrário AlGaAs / GaAs HEMT, que requerem dopagem intencional para formar 2DEG, 2DEG em AlGaN / GaN HEMT é devido à polarização induzida de elétrons em 2DEG são devidos a estados de superfície.

Devido às diferenças de eletronegatividade, as ligações Al-N e Ga-N são altamente iônicas e cada uma carregam um dipolo forte. Como a eletronegatividade de N é muito maior que a de Ga, o elétron a função de onda em torno do par Ga-N é deslocado para o lado do nitrogênio. O efeito é ainda mais exagerado no par Al-N, que é uma característica especial dos III-nitretos e o grau de a polarização espontânea é mais de cinco vezes maior do que na maioria dos semicondutores III-V.

Em um sistema AlGaN / GaN, a camada AlGaN tem dois vetores de polarização diferentes, devido ao polarizações piezoelétricas e espontâneas, respectivamente. A polarização no AlGaN resulta na formação de cargas dipolo com uma carga positiva na junção AlGaN / GaN. A polarização na camada de GaN causa uma carga negativa na junção AlGaN / GaN. Uma vez que a polarização total no AlGaN é maior, o resultado geral é uma rede carga positiva na interface AlGaN / GaN. A presença de cargas e polarização induz um campo elétrico em AlGaN resultando em uma formação 2DEG sem dopagem de barreira (NIEHENKE, 2015) (NIRMAL e AJAYAN, 2019).

O Nitreto de Gálio GaN pode ser sintetizado na estrutura cristalina conhecida como “wurtzite” que é similar a uma estrutura hexagonal compacta, porém com átomos adicionais no seu interior, na estrutura cristalina cúbica denominada “zincblende” e na estrutura “rock-salt”, conforme mostrados na Figura 15 (WONGLAKHON e ZAHN, 2020).

Figura 14 - Exemplos de estruturas cristalinas do Nitreto de Gálio



Fonte: Wonglakhon e Zahn (2020).

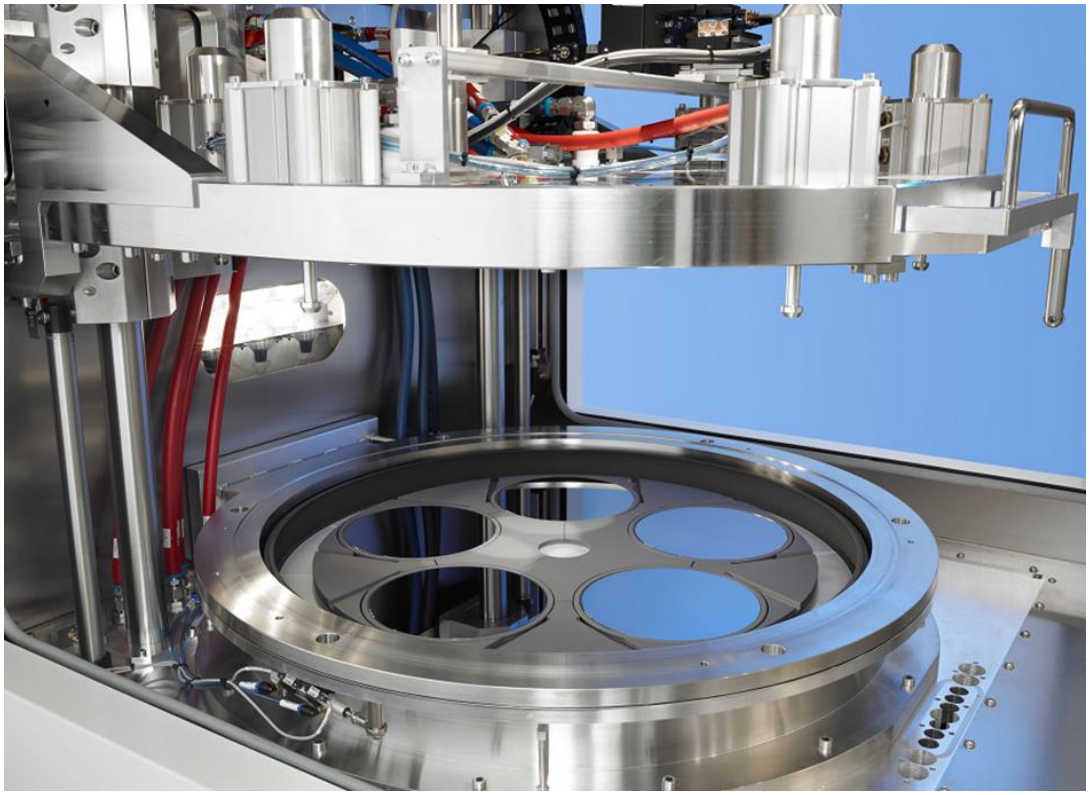
2.10 Substrato de Silício

A utilização de substrato de silício de alta resistividade – HR Si (High Resistivity Silicon) surgiu como uma alternativa promissora devido a evolução das técnicas de fabricação que possibilitaram uma redução do custo de fabricação, e devido aos excelentes resultados obtidos com transistores HEMT – AlGaN / GaN desenvolvidos sobre um substrato de HR Si quando comparados aos resultados obtidas com o carbeto de silício (SiC) (LANDGRAF, RÖSNER, *et al.*, 2006).

Evidentemente, o carbeto de silício (SiC) apresenta benefícios quando usado como substrato, para o crescimento epitaxial. Entre suas principais vantagens podemos destacar sua utilização numa ampla faixa de temperatura, e sua rigidez dielétrica elevada, e oferecem uma redução significativa nas perdas por comutação e alcançam frequências de trabalho muito mais altas do que é possível a partir do uso apenas do silício (Si) (LANDGRAF, RÖSNER, *et al.*, 2006). Porém novas alternativas estão em constante desenvolvimento, visando a redução do custo de produção, e o silício (Si) volta a ser considerado como uma das soluções.

A principal característica intrínseca ao silício de alta resistividade (HR-Si), é evidentemente, sua resistividade elevada, que permanece, num valor constante ao longo da lâmina (até 10.000Ω.m) e por consequência, apresenta um gradiente de resistividade uniforme, seja no sentido radial ou axial. Os dispositivos HEMT GaN investigados neste trabalho, foram obtidos pela deposição em uma base de HR Si, com 200 mm, a partir da técnica MOCVD (Deposição de vapor químico metal-orgânico – Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) (BUECHLER, KASPER, *et al.*, 1986). MOCVD tem sido a técnica mais comumente usada para desenvolver camadas à base de GaN e é realizada a temperaturas superiores a 1000ºC e envolve reagentes gasosos (como trimetilgálio e NH3) passando sobre um substrato aquecido que reage para formar uma camada condensada ou filme no substrato. As taxas de crescimento estão em alguns µm por hora (MACFARIANE, 2014). Na Figura 15 temos a câmara de um reator utilizado para sistemas de deposição para semicondutores compostos para GaN em 150/200mm de Si.

Figura 15 - Câmara do Reator



Fonte: Aixtron ([2021?])

O dispositivo AlGaN/GaN HEMT estudado, tem sua estrutura formada por múltiplas camadas crescidas umas sobre as outras:

- Substrato: é utilizado como base para o processo de cultivo. HEMTs são geralmente cultivados em Silício, safira ou carbeto de silício. O crescimento bem-sucedido do GaN no Silício atrai a indústria devido à disponibilidade de grandes pastilhas de silício de alta resistência a baixo custo. O substrato de silício deve ser limpo e preparado para receber a camada de GaN. Normalmente, isso envolve a remoção de impurezas e a oxidação da superfície do silício para formar uma camada de óxido.

- Camada Buffer: composta pelo material de banda larga. A qualidade do material desta camada é muito importante, especialmente por causa das armadilhas e defeitos em níveis profundos que podem degradar o desempenho do dispositivo de RF. A polarização piezoelétrica não está presente nesta camada devido ao seu estado relaxado e espessura (0,5 a 4μm).

- Camada GaN: composta pelo material de banda larga que quando colocado em contato com o a camada AlGaN vai propiciar a formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG). A reação química é ativada pela alta temperatura dentro da câmara de reação, o que leva à deposição da camada de GaN no substrato de silício. O crescimento epitaxial é alcançado quando a camada de GaN é depositada em uma orientação cristalina semelhante à do substrato de silício. Depois que a camada de GaN atinge a espessura desejada, a amostra é resfriada e retirada da câmara de reação.

- Camada AlN: é uma camada espaçadora AlN usada para aumentar e melhorar a densidade 2DEG, a mobilidade e a corrente de dreno.

- Camada AlGaN: é uma camada dopada involuntariamente formada pelo material de largo bandgap AlxGa1-xN, onde x é a fração molar de alumínio. Esta camada forma o contato Schottky com o contato de metal da porta e fornece os elétrons para a condução de corrente no canal. A espessura (3 a 30nm) e a composição da liga desta camada são cruciais para determinar o estresse mecânico e daí a polarização piezoelétrica na estrutura.

AlGaN/GaN HEMT pode estar sujeito a fenômenos parasitários que o impedirão de funcionar em condições ótimas. Assim, as demais camadas são geralmente necessárias a estrutura.

- Camada de cap SiN: permite proteger a camada ativa e reduzir o contato e a resistência do canal para limitar a corrente de fuga.

O crescimento das diferentes camadas é conseguido principalmente através de um dos dois métodos diferentes, Deposição de vapor químico metalorgânico (MOCVD) ou Epitaxia por Feixe Molecular (MBE).

A orientação cristalográfica 111 é amplamente utilizada no crescimento epitaxial de Si de alta resistividade para a produção de AlGaN/GaN HEMTs devido a várias razões:

- Orientação cristalina preferida: O Si de alta resistividade possui uma estrutura cristalina cúbica com faces (111) altamente planares, o que facilita o crescimento epitaxial em substratos com orientação cristalina (111).
- Maior mobilidade de elétrons: A orientação (111) permite a formação de uma interface de alta qualidade entre o Si e o AlGaN/GaN, que é essencial para a obtenção de uma alta mobilidade de elétrons no HEMT. Além disso, a mobilidade de elétrons em Si (111) é geralmente maior do que em outras orientações devido à menor densidade de poços de elétrons associados a deslocamentos de impurezas e desordem atômica.
- Menor tensão residual: O uso da orientação (111) também pode reduzir a tensão residual na interface Si/AlGaN/GaN, o que é importante para evitar defeitos na camada de AlGaN/GaN e melhorar o desempenho do HEMT (YOU, HENG, *et al.*, 2023).

3 PARÂMETROS ELÉTRICOS E ANALÓGICOS

O conhecimento dos parâmetros elétricos do dispositivo AlGaN/GaN HEMT é essencial para se verificar sua eficiência, ganho, faixa de frequência, potência que o dispositivo pode operar. Neste capítulo, são apresentados e definidos os principais parâmetros elétricos do dispositivo AlGaN/GaN HEMT experimental estudado neste trabalho.

3.1 Tensão de Limiar (V_T)

A tensão de limiar (V_T) se refere ao valor necessário de tensão que quando aplicada entre a porta e a fonte do transistor irá inverter as cargas da região do canal, induzindo a passagem de corrente entre fonte e dreno. Ao aplicar uma tensão de limiar na porta, as lacunas do canal serão repelidas e os elétrons, que são cargas minoritárias na região do canal e que podem ter sido gerados termicamente, por exemplo, são atraídos para a superfície, formando a região de inversão, ou seja, formando o canal de elétrons entre a fonte e o dreno.

A tensão limiar, deve ser igual ao valor da tensão entre porta-fonte (V_{GS}) para se obter a corrente de dreno mínima, que possibilite o estado desligado.

A redução de tensão de limiar do transistor (V_T) indica a sensibilidade do transistor à ocorrência de efeitos de canal curto.

A tensão da porta (V_{GS}), controla a densidade da camada 2DEG , portanto, a corrente de dreno (I_D) também se torna um valor importante, para a verificação da tensão limiar (STENGEL, MOHAMMAD e MORKOÇ, 1996).

Existem diversos métodos para extrair este parâmetro, podemos citar aos menos cinco métodos: Corrente-Constante – CC, Extrapolação da Região de Linear – ERL, Segunda-Derivada – SD, Relação da Corrente pela raiz quadrada da Transcondutância – CsrTR e Relação da Corrente pela Transcondutância – TCR (CONDE, SANCHEZ, *et al.*, 2013).

A tensão de limiar pode ser extraída utilizando o método da transcondutância. Nesse método, a tensão de limiar é definida pela tensão aplicada à porta do transistor, onde a derivada da transcondutância tem o seu valor máximo.

Matematicamente, quando o resultado de derivada da corrente de dreno I_D sobre a tensão de porta V_G é igual a zero, conforme demostrado na equação (3.1) (COLINGE, 2012):

$$\frac{dI_D}{dV_g} = 0 \qquad (3.1)$$

Paro o dispositivo estudado, adotamos o cálculo da Tensão de Limiar pelo método da Corrente Constante.

O método de corrente constante é amplamente utilizado na indústria devido à sua simplicidade; a tensão de limiar pode ser determinada rapidamente sendo necessária apenas uma medida de tensão. No entanto, tem a desvantagem de ser fortemente dependente da escolha arbitrária do nível de corrente de dreno. Para o calcular a tensão de limiar, através do método da corrente constante, é necessário ter a relação de largura pelo comprimento do canal multiplicado por $1x10^{-7}$, conforme demostrado na Equação (3.2). (ANDRADE, 2012) (CONDE, SANCHEZ, *et al.*, 2013).

$$V_T = \frac{W}{L} \text{ x } 1x10^{-7} \qquad (3.2)$$

3.2 Redução da Barreira Induzida pelo Dreno – DIBL

O DIBL (Drain Induced Barrier Lowering) é um importante efeito de canal curto e ocorre quando as regiões de depleção do dreno, induzidas pelo alto potencial nessa região, avançam para o interior do canal. Essa influência aumenta em dispositivos pequenos, causando variação da tensão de limiar (COLINGE e COLINGE, 2005). O DIBL é caracterizado por uma redução da tensão de limiar do transistor (V_T). Através do DIBL, podemos evidenciar o quanto a tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) pode diminuir a barreira de potencial da junção fonte/canal de um transistor, e por consequência reduz a tensão de limiar do transistor (ANDRADE, 2012) (KRANTI, HALDAR e GUPTA, 2001).

O valor do DIBL pode ser obtido em milivolts por volt através da Equação (3.3) (KRANTI, HALDAR e GUPTA, 2001):

$$DIBL\left(\frac{mV}{V}\right) = \frac{V_{T1}(V_{DS1}) - V_{T2}(V_{DS2})}{V_{DS2} - V_{DS1}} \qquad onde\ V_{DS2} > V_{DS1} \quad (3.3)$$

Onde: V_{DS1} e V_{DS2} são os valores de tensão do dreno correspondentes a V_{T1} e V_{T2}, respectivamente.

3.3 Inclinação de Sublimiar (SS)

A inclinação de sublimiar é um parâmetro que pode ser utilizado para determinar o quão rápido o transistor passa do estado de corte para o estado de condução e é determinada como o inverso da inclinação da curva log I_{DS} (corrente entre dreno e fonte) x V_{GS}, para $V_{GS}<V_T$ conforme a Equação (3.4) abaixo (COLINGE e COLINGE, 2005; COLINGE, 2012):

$$SS = \frac{dV_{GS}}{\mathrm{d}(\log \mathrm{I}_{DS})} = \frac{\mathrm{kT}}{\mathrm{q}} \ln(10)\, \mathrm{n} \quad (3.4)$$

Sendo, k a constante de Boltzmann, T a temperatura em Kelvin e n o fator de corpo, sendo este um parâmetro que indica o controle de eletrodo de porta sobre o potencial de superfícies da primeira interface e q é a carga elementar, que é aproximadamente 1.6×10^{-19} coulombs

3.4 Transcondutância (g_m)

A transcondutância (g_m) é um fator que mede a eficácia do controle da corrente que passa pelo canal entre o dreno e a fonte (I_{DS}) pela tensão aplicada na porta (V_{GS}), podendo ser definida pela Equação (3.5) (COLINGE, 1998):

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \tag{3.5}$$

3.5 Corrente de Porta (I_G)

Através da corrente de porta podemos identificar se existe corrente de fuga de porta, que é um fenômeno que pode indicar a degradação do dispositivo AlGaN/GaN HEMT. O tempo necessário para observar a degradação tem uma forte dependência com a tensão utilizada. Além disso, a degradação da porta tem uma fraca dependência da temperatura (MARCON, KAUERAUF, *et al.*, 2010).

A corrente de fuga de porta excessiva é um fator limitante, nestes dispositivos, especialmente para dispositivos que operam em ambientes de alto campo elétrico e alta temperatura. Quando o dispositivo é polarizado diretamente, a corrente de fuga dominante é devido à emissão térmica (TE), que aumenta exponencialmente com a polarização através do contato Schottky da porta. Nos HEMTs de GaN nos quais as armadilhas são frequentemente encontradas na camada de AlGaN, a corrente de tunelamento assistido por armadilha (TAT) também se torna importante a ser considerada no regime de polarização direta do contato Schottky de porta. Por outro lado, quando o contato é polarizado reversamente, o I_G é devido à emissão Poole-Frenkel (PF) e ao tunelamento Fowler-Nordheim (FN) (LI, YAGYU, *et al.*, 2020). Na região de polarização direta inferior, um pequeno aumento na corrente de porta é observado com o aumento da temperatura e as curvas para diferentes temperaturas se fundem na polarização direta mais alta (YITIAN, HUANG, *et al.*, 2022).

O impacto da corrente de fuga pela porta, na corrente de dreno, está na redução do controle da corrente de porta em reduzir a corrente de fuga a um ponto chave para

obter altos níveis de corrente de dreno e para limitar algum estresse induzido por mecanismos que levam a uma redução da vida útil do dispositivos (KARBOYAN, LABAT e LAMBERT, 2013).

3.6 Condutância de Saída (g_D)

A condutância de saída (g_D) é um parâmetro importante para a caracterização analógica dos transistores. Esta grandeza indica como a corrente de dreno (I_D) deste dispositivo é influenciada pelo campo elétrico proveniente da tensão aplicada no dreno (D). É determinada através da derivada da corrente de dreno (I_D) em função da tensão aplicada no dreno-fonte (V_{DS}), quando se mantém a tensão de porta (V_G) constante, sendo determinada na Equação (3.6) abaixo (ANDRADE, 2012) (KRANTI, HALDAR e GUPTA, 2001):

$$g_D = \frac{dI_D}{dV_{DS}} \qquad (3.6)$$

No entanto, o cálculo preciso da g_D para um HEMT AlGaN/GaN requer um modelo de dispositivo apropriado e sofisticado que leve em conta os efeitos físicos complexos presentes no dispositivo. Portanto, é necessário usar simulações numéricas ou modelos de circuito equivalente para calcular a g_D com precisão (ZAYAK, 2013).

3.7 Tensão Early (V_{EA})

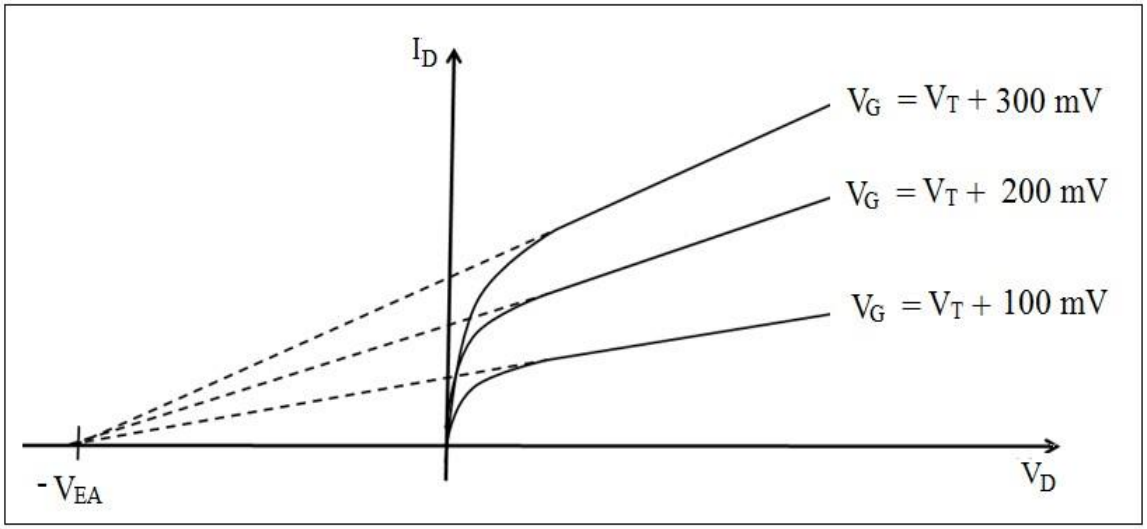
A tensão Early representa o efeito da modulação do comprimento de canal devido à polarização entre o dreno e a fonte do transistor. Quando a tensão aplicada no dreno é maior que a tensão de saturação, a região de estrangulamento do canal (pinch-off) próxima ao dreno aumenta e consequentemente, o comprimento efetivo do canal diminui, provocando um aumento na corrente de dreno na saturação (I_{Dsat}).

Considerando que os valores de corrente de dreno e a condutância de saída tenham sido obtidos na região de saturação, a tensão Early pode ser determinada pela Equação (3.7) (COLINGE e COLINGE, 2005) (ANDRADE, 2012):

$$V_{EA} \cong \frac{I_{D_{sat}}}{g_{D_{sat}}} \qquad (3.7)$$

Também pode ser determinada pela extrapolação de uma reta tangente à curva de corrente de dreno em função da tensão entre fonte e dreno (I_D x V_{DS}), na região de saturação, até a intersecção com o eixo de V_D. Este ponto no eixo V_D = - V_{EA} é o valor da tensão Early mostrado na Figura 16 abaixo (COLINGE e COLINGE, 2005) (ANDRADE, 2012):

Figura 16 - Tensão Early através da curva de corrente de dreno em função da tensão aplicada no dreno.



Fonte: Colinge e Colinge (2005).

3.8 Ganho Intrínseco de Tensão (A_V)

O ganho intrínseco DC é em uma das principais características dos circuitos analógicos, principalmente para os circuitos amplificadores.

O ganho máximo intrínseco de tensão dos transistores (AV), pode ser determinado pela razão existente entre a transcondutância (g_m) e a condutância de saída (g_D), conforme a Equação (3.8) abaixo (COLINGE e COLINGE, 2005) (ANDRADE, 2012):

$$A_V = \frac{g_m}{g_D} \cong \frac{g_m}{I_D} . V_{EA} \qquad (3.8)$$

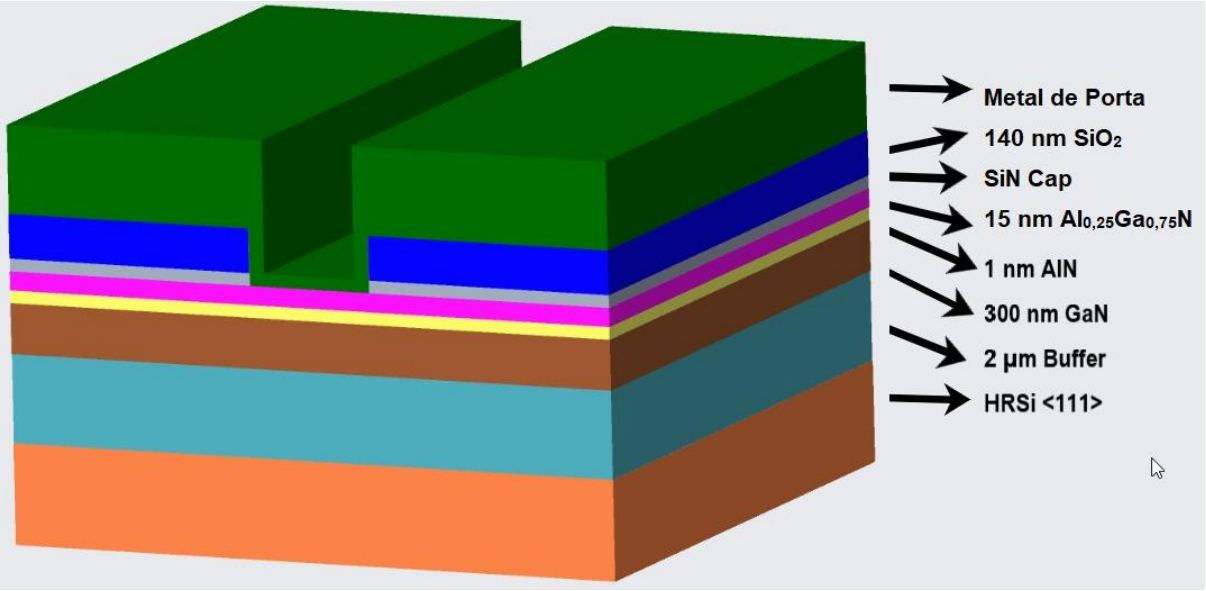
4 DADOS FÍSICOS DO DISPOSITIVO INVESTIGADO

Neste capítulo, serão abordados os dados físicos e os materiais utilizados no dispositivo estudado, assim como a tecnologias adotada para confecção de lâminas para a fabricação de transistores AlGaN/GaN HEMT.

4.1 Dimensões Físicas do Dispositivo

Os dados coletados do dispositivo experimental, obtidos através de medições de tensão, corrente de porta, dreno e fonte, no laboratório do Imec (Centro Interuniversitário de Microeletrônica) na Bélgica, são de um dispositivo HEMT, conforme demonstrado na Figura 17 (o dispositivo da Figura 17 está fora de escala, sendo apenas para fins didáticos) .

Figura 17 - Representação simplificada da estrutura de um transistor HEMT AlGaN/GaN depositada em substrato de HR Si (111).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dispositivos estudados são heteroestruturas GaN/AlGaN e estão dispostos sobre um substrato de silício (wafer) de alta resistência de 200mm de diâmetro com orientação cristalográfica 111.

As dimensões que variam de um dispositivo para o outro, são as de comprimento de canal (L), largura de canal (W), distância entre a porta e o dreno (L_{GD}) e a distância entre a porta e fonte (L_{GS}), conforme demonstradas na

Tabela *2*.

Foram medidos os valores de tensões e corrente de porta, dreno e fonte dos dispositivos, quando submetidos as temperaturas de 25º, 0º, -20º e -35ºC.

Tabela 2 - Dimensões transistor HEMT.

Dispositivos HEMT	**L (µm)**	**W (µm)**	**L_{GD} (µm)**	**L_{GS} (µm)**
1	0,20	1,00	1,75	1,50
2	0,20	10,00	1,75	1,50
3	0,20	100,00	1,75	1,50
4	0,40	1,00	1,75	1,50
5	0,40	10,00	1,75	1,50
6	0,40	100,00	1,75	1,50
7	1,00	1,00	1,75	1,50
8	1,00	10,00	1,75	1,50
9	1,00	100,00	1,75	1,50
10	10,00	1,00	1,75	1,50
11	10,00	10,00	1,75	1,50
12	10,00	100,00	1,75	1,50

Fonte: Adaptado do Imec (2019).

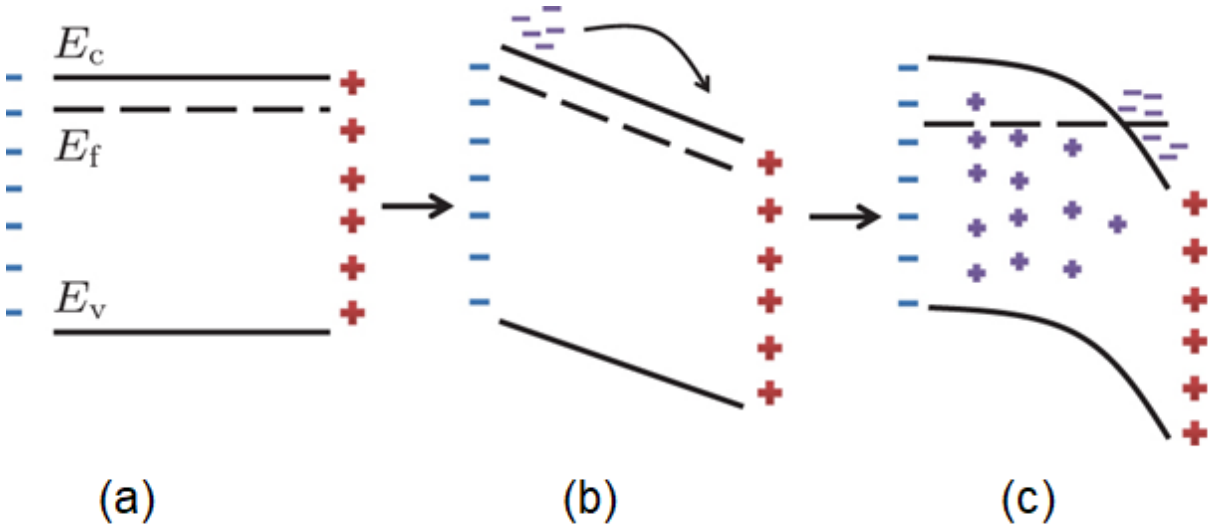
4.2 A Estrutura do Dispositivo AlGaN/GaN HEMT Investigado

O modelo de um transistor AlGaN/GaN - HEMT investigado é formado a partir de dois componentes distintos, o nitreto de gálio e alumínio (AlGaN) e o nitreto de gálio (GaN), resultando em um semicondutor pertencente ao grupo III-V da tabela periódica. A principal vantagem apresentada deste semicondutor em relação às tradicionais ligas silício-germânio é o seu maior valor de banda de energia comparado com as bandas de energia de outros semicondutores comerciais. Isso permite que estes os dispositivos com essa estrutura, possam operam em temperaturas mais baixas ou mais elevadas que os dispositivos com bandas de energia menor. Outro fator que podemos destacar é a maior estabilidade química do GaN o que favorece a sua utilização em ambientes desfavoráveis, que apresentam substâncias poluentes ou abrasivas. Com estas características, os sensores utilizados em gases corrosivos ou ácidos, encontram no GaN uma solução confiável e perene (STUTZMANN, STEINHOFF, *et al.*, 2002).

Após a junção dos compostos que formam a liga AlGaN/GaN, desenvolve-se uma região específica, entre estas duas camadas, denominada 2DEG (two dimensional eléctron gás) que apresenta uma condutividade elétrica extremamente alta. Os elétrons acumulados fluirão da camada inferior de AlGaN para o topo da camada GaN formando o 2DEG, isto ocorre devido a diferença do nível de Fermi do GaN que é menor que do AlGaN. Este processo de formação do 2DEG somente será interrompido quando, houver o alinhamentos os níveis de Fermi de ambos os materiais, levando o sistema ao equilíbrio. Forma-se então, uma depleção entre as duas camadas constituintes à região 2DEG. Esta camada, 2DEG, surge entre as estruturas AlGaN e GaN e interliga dois dos três terminais deste transistor, no caso analisado, o dreno (D - Drain) e a fonte (S - source). (REYES, EL-GHAZALY, *et al.*, 1996). Ao dividir a heterojunção em duas partes separadas, podemos facilmente analisar e compreender a formação do 2DEG. Vamos supor o seguinte que a camada de AlGaN é crescida em um buffer de GaN. Esta camada crescida de AlGaN induz um efeito de polarização resultando em uma carga positiva na interface AlGaN / GaN e uma carga negativa no topo da camada AlGaN. Essas áreas com cargas diferentes resultam na formação de um campo elétrico dentro da camada AlGaN.

A seguir, vamos supor que a interface AlGaN / GaN e a superfície AlGaN são planos infinitamente carregados, por causa da proporção muito pequena entre a espessura da camada AlGaN, que é da ordem de alguns μm e o tamanho do lado grande de todo o substrato. Quando analisamos a formação de 2DEG em uma heteroestrutura AlGaN / GaN com camada de AlGaN n-dopada. A polarização descrita antes faz com que a banda de energia, incluindo o nível de Fermi, se incline em direção à interface AlGaN / GaN. O mesmo efeito da inclinação da banda de energia pode ser obtido fazendo um capacitor planar simples usando um AlGaN dopado com n como o dielétrico e aplicando tensão nele. Vamos definir os eletrodos negativos e positivos do capacitor. Por causa da voltagem aplicada, uma força elétrica está agindo sobre os elétrons livres na camada, forçando-os a se moverem em direção ao eletrodo positivo, deixando cargas espaciais positivas pelo eletrodo negativo. Após este evento, o nível de Fermi é novamente plano. O campo elétrico embutido entre os elétrons negativos acumulados e cargas espaciais positivas fixas reduz o campo elétrico polarizador tornando a faixa de energia inclinada mais plana. Na Figura 18, estão mostradas as bandas de energia da camada n-dopada de AlGaN (a), a mesma camada usada como um dielétrico para um capacitor plano conectado a uma fonte de tensão (b), resultando em banda de energia curva após o transporte de elétrons livres deixando cargas positivas fixas no negativo eletrodo do capacitor AlGaN(c).

Figura 18 - Bandas de energia HEMT AlGaN dopado.

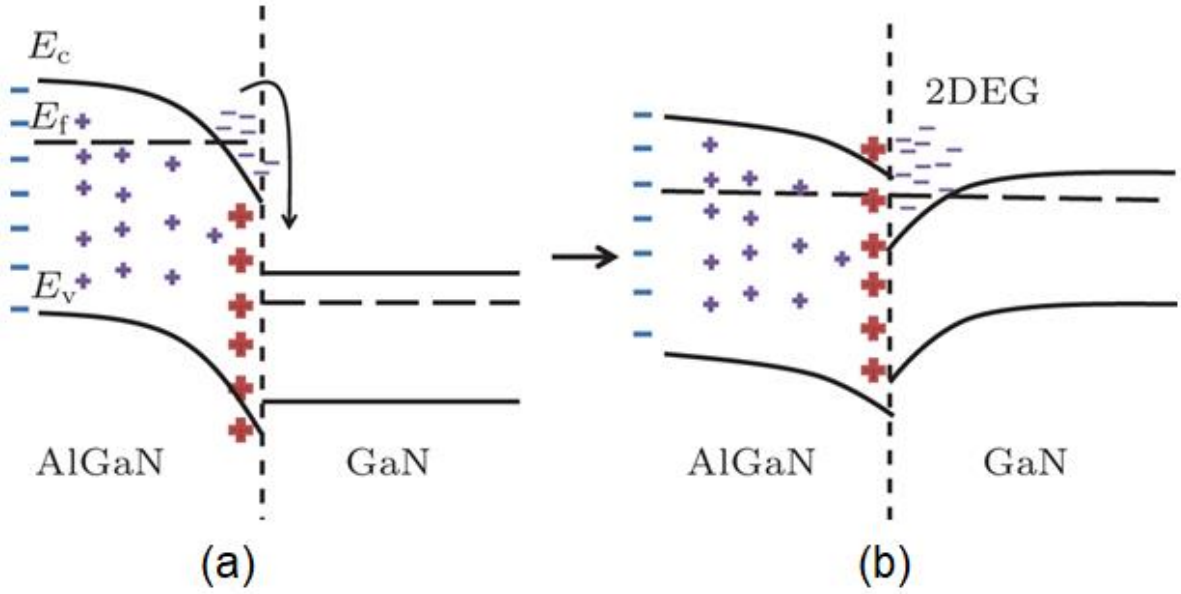


Fonte: He, Zhao e Jiang (2015).

Depois de levar em consideração a conexão com a camada de GaN, algo fascinante acontecerá. Como o nível de Fermi de GaN é menor do que de AlGaN, os elétrons acumulados fluirão da camada inferior de AlGaN para o topo da camada de GaN formando o 2DEG resultante (Figura 19). Este processo de crescimento 2DEG irá parar quando os níveis de Fermi de ambos os materiais se alinharem.

Na Figura 19 a Banda de energia de um AlGaN n-dopado conectando-se a GaN mostrando diferentes camadas de Fermi e fluxo de elétrons para o material GaN (a), a banda de energia completa de uma heteroestrutura AlGaN / GaN n-dopado após equalização dos níveis de Fermi mostrando o 2DEG resultante (b) .

Figura 19 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN dopado.



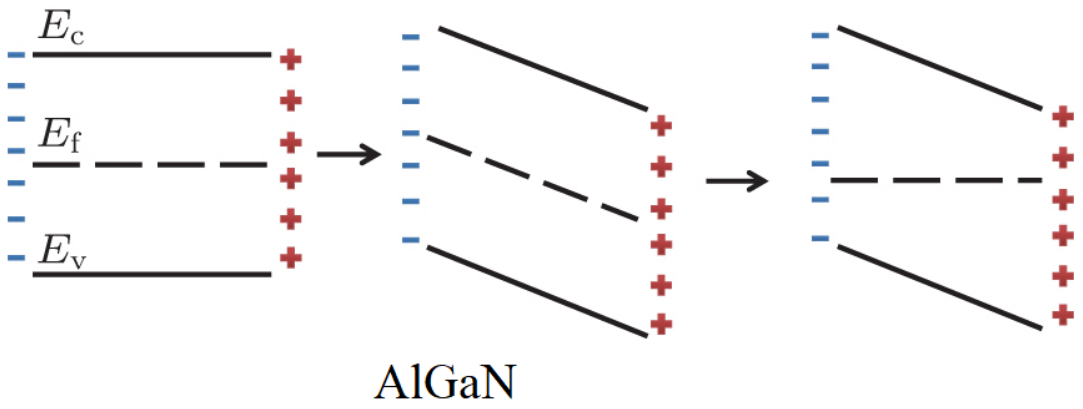
Fonte: He, Zhao e Jiang (2015).

Com o AlGaN intrínseco, a situação é diferente por causa de ter poucos ou até mesmo nenhum elétron livre presente no material. Devido a esse fato, o método utilizado com o AlGaN dopado produz muitos problemas, por ter pouco ou nenhum transporte de elétrons, resultando em quase nenhuma flexão de banda de energia, embora a inclinação permaneça. Também, pode acontecer que o nível de Fermi de GaN seja superior ao de AlGaN, resultando em baixo ou nenhum fluxo de elétrons para o GaN. E por causa disso nenhum 2DEG deve se formar. Mas este não é o caso.

Como mostrada na Figura 20, em uma heteroestrutura AlGaN / GaN não dopada, poucos elétrons condutores se moverão sob a força do campo elétrico e a banda de energia quase permanecerá inalterada devido à falta de elétrons condutores. Quando os elétrons entram em contato com o GaN, os níveis de Fermi nas laterais ficam próximos uns dos outros e até mesmo o nível de Fermi de GaN pode ser mais alto, então muito poucos ou nenhum elétron fluirá para o lado do GaN e nenhum 2DEG se formará. No entanto, isso não está de acordo com o fato de que nenhum doping intencional é necessário para gerar 2DEG na interface AlGaN / GaN.

Na Figura 20, é mostrado a banda de energia de AlGaN não dopado na suposição de que a camada AlGaN está sob a mesma tensão de tração que quando cresce em GaN. O campo elétrico induzido pela polarização não causará curvatura da banda de energia devido à falta de elétrons condutores.

Figura 20 - Bandas de energia HEMT AlGaN não dopado.



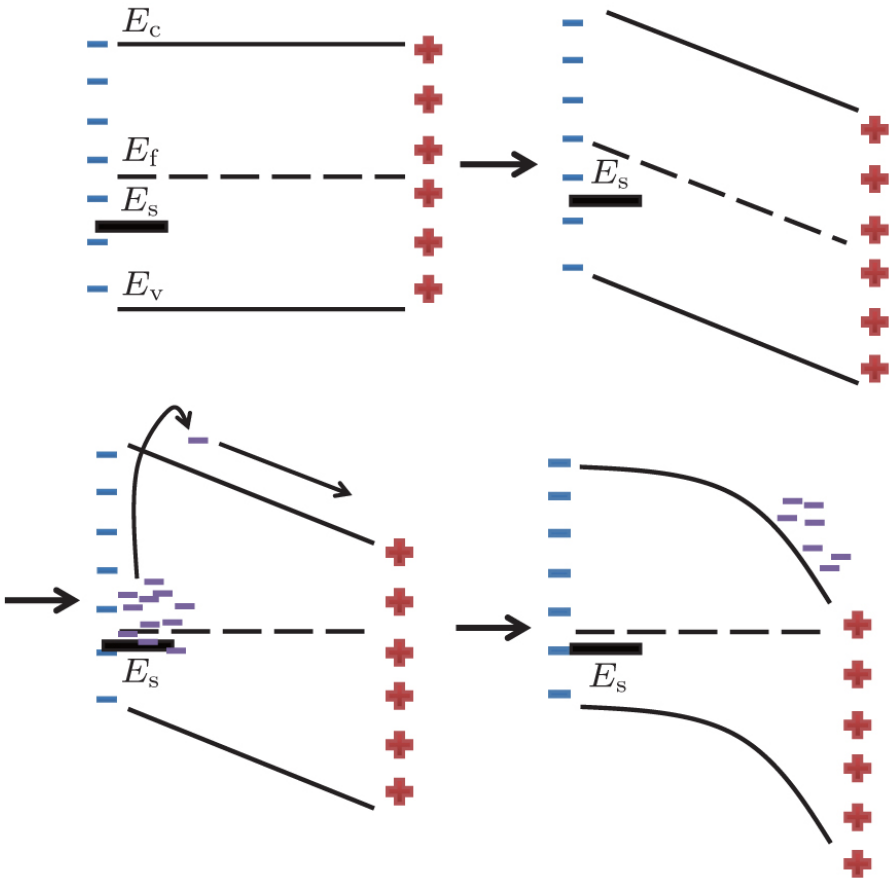
Fonte: He, Zhao e Jiang (2015).

A formação do 2DEG não pode vir do buffer GaN. A carga total de polarização na interface AlGaN / GaN pode ser dividida em duas partes. Uma parte vem do AlGaN e a outra vem do GaN. A parte AlGaN não terá efeito no lado GaN porque a carga de polarização negativa no topo da camada AlGaN e a carga de polarização positiva na interface formam um capacitor de placa plana, que não gera campo elétrico fora de seus dois planos. Da mesma forma, a parte de GaN, junto com sua contraparte na parte inferior da camada de GaN, gera um campo elétrico uniforme apontando da parte inferior da camada de GaN em direção à interface AlGaN / GaN.

Este campo elétrico reduzirá a densidade líquida de elétrons na interface AlGaN / GaN, quanto mais formar 2DEG. Em segundo lugar, o 2DEG não pode vir do corpo da barreira AlGaN porque existem poucos elétrons condutores em AlGaN não dopado, como mencionado antes.

A formação do 2DEG na interface AlGaN / GaN pode ser bem explicada, assumindo a existência de estados doadores na superfície AlGaN. (SMORCHKOVA, ELSASS, *et al.*, 1999). A Figura 21 mostra a banda de energia de um pedaço de AlGaN com estados doadores de superfície na suposição de que a camada AlGaN está sob a mesma tensão de tração que cresceu em GaN. Se a camada AlGaN for espessa o suficiente, o nível de Fermi atingirá o nível do estado doador Es, e os elétrons serão estimulados para a banda condutiva e empurrados para o outro lado pela força do campo elétrico induzido pela polarização (HE, ZHAO e JIANG, 2015).

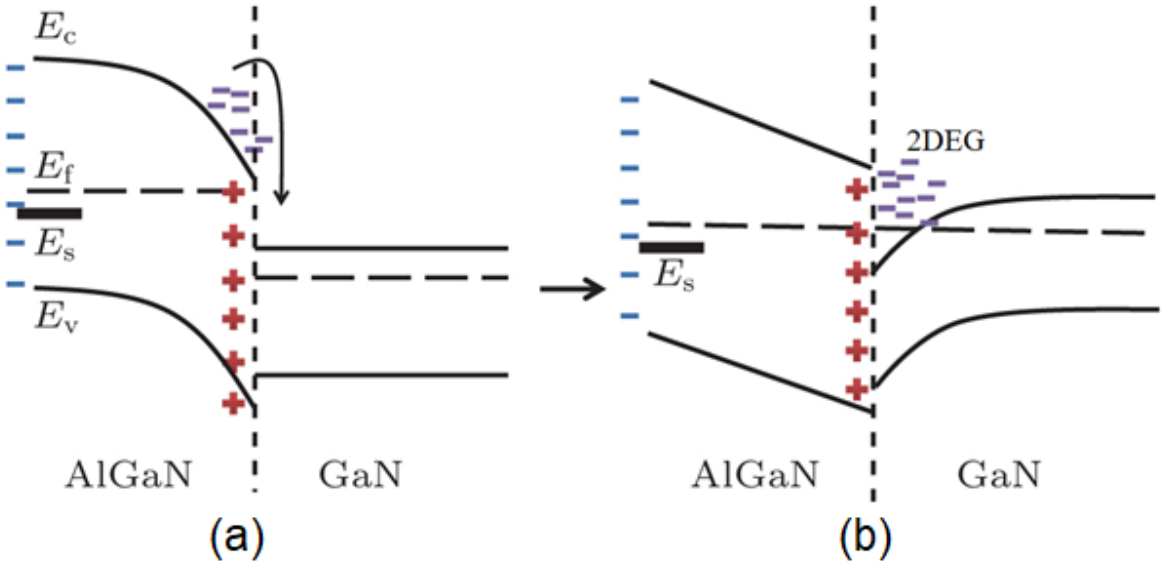
Figura 21 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN não dopado.



Fonte: He, Zhao e Jiang (2015).

Como mostrado na Figura 22, ao entrar em contato com uma camada de GaN, os elétrons fluirão para o lado de GaN devido à queda do nível de Fermi (a). Os elétrons se acumularão na interface e formarão 2DEG (b). O 2DEG e os estados doadores de superfície ionizados irão gerar um campo elétrico apontando da interface para a superfície e reduzir o campo de polarização na camada AlGaN.

Figura 22 - Bandas de energia HEMT AlGaN/GaN não dopado formação 2DEG.



Fonte: He, Zhao e Jiang (2015).

4.3 Substrato HR Si

O dispositivo AlGaN/GaN HEMT estudado foi fabricado sobre um substrato de silício de alta resistividade – HR Si (High Resistivity Silicon), por ser uma alternativa viável devido a evolução das técnicas de fabricação que possibilitaram uma redução do custo de fabricação, e aos excelentes resultados obtidos com transistores HEMT - AlGaN / GaN desenvolvidos sobre um substrato de HR Si, mesmo quando comparados aos resultados obtidas com o carbeto de silício (SiC). (LANDGRAF, RÖSNER, *et al.*, 2006). Os transistores de efeito de campo de alta mobilidade elétrica (HEMTs) AlGaN/GaN fabricados sobre substratos de silício de alta resistividade (HRSi) oferecem diversas vantagens em relação a outros substratos, tais como safira e SiC.

Algumas dessas vantagens são (BELAROUSSI, RACK, *et al.*, 2017):

- Baixo custo: o silício de alta resistividade é um substrato muito mais barato do que outros materiais usados para fabricar transistores AlGaN/GaN HEMT, como o safira e o SiC.

- Facilidade de processamento: como o silício é um material bem conhecido e amplamente utilizado na indústria de semicondutores, a fabricação de transistores AlGaN/GaN HEMT sobre substrato de silício de alta resistividade é relativamente simples e pode ser feita usando técnicas já estabelecidas.

- Boa integração com circuitos CMOS: o silício é o material padrão usado na fabricação de circuitos integrados de baixo custo, o que torna a integração de transistores AlGaN/GaN HEMT com circuitos CMOS muito mais fácil.

- Boas propriedades elétricas: o silício de alta resistividade possui propriedades elétricas favoráveis para a fabricação de transistores AlGaN/GaN HEMT, incluindo uma alta resistividade para minimizar as perdas por efeito Joule e uma alta capacidade de suporte de tensão.

- Melhora na dissipação de calor: Os substratos de HRSi têm uma condutividade térmica significativamente maior do que a safira e o SiC, o que melhora a dissipação de calor dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT e aumenta sua confiabilidade em operações de alta potência.

- Melhora na dissipação de calor: Os substratos de HRSi têm uma condutividade térmica significativamente maior do que a safira e o SiC, o que melhora a dissipação de calor dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT e aumenta sua confiabilidade em operações de alta potência. (LIU, WANG, *et al.*, 2020)

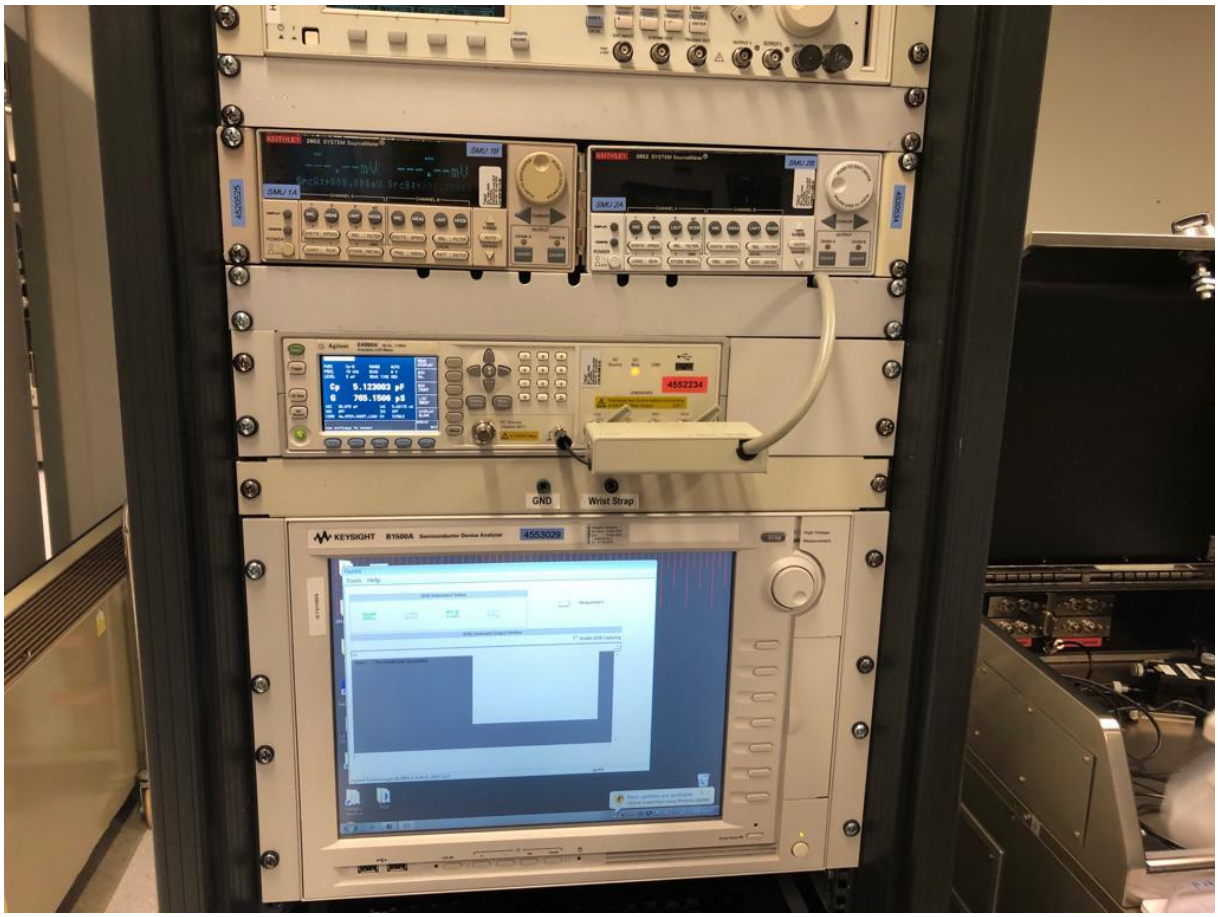
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Desenvolvimento Experimental

Os dispositivos analisados neste trabalho foram projetados e desenvolvidos no Interuniversity Microelectronics Center (imec) que é um centro de pesquisa de referência na área de microeletrônica, situado na cidade de Leuven, na Bélgica.

Para realizar as medições foram utilizados os equipamentos da Keithley Instruments Inc., Modelo 2602 e modelo A-LFNA E4727A, conforme apresentado na Figura 23:

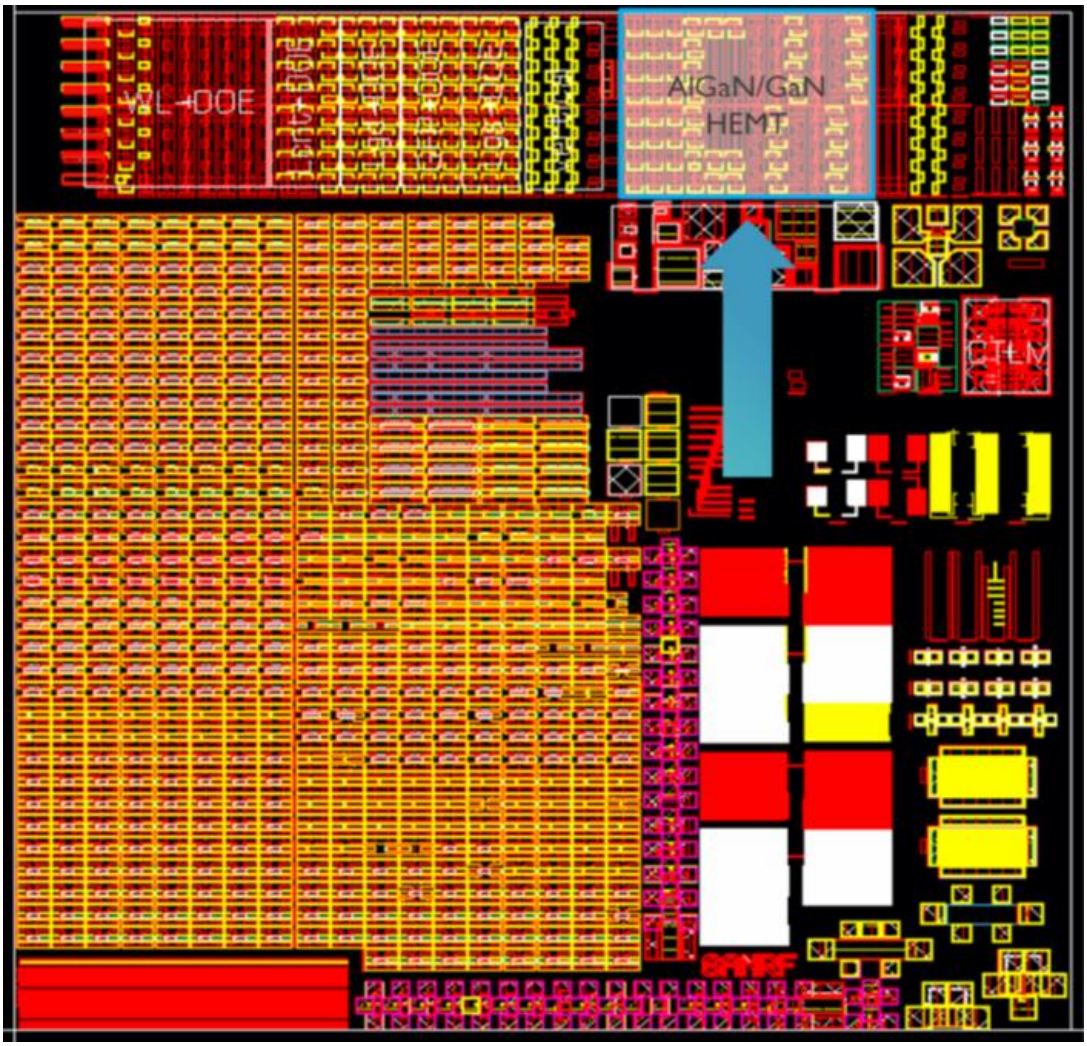
Figura 23 - Equipamento de teste



Fonte: Imec (2019)

Este equipamento aplica as tensões e correntes programadas nos transistores que estão dispostos em uma lâmina de material semicondutor, para se obter os dados desejados. Essas lâminas são divididas em várias partes iguais “chip” ou dye, os transistores HEMT analisados estão dispostos, conforme ilustrado na Figura 24:

Figura 24 - Alocação dos transistores analisados na lâmina.



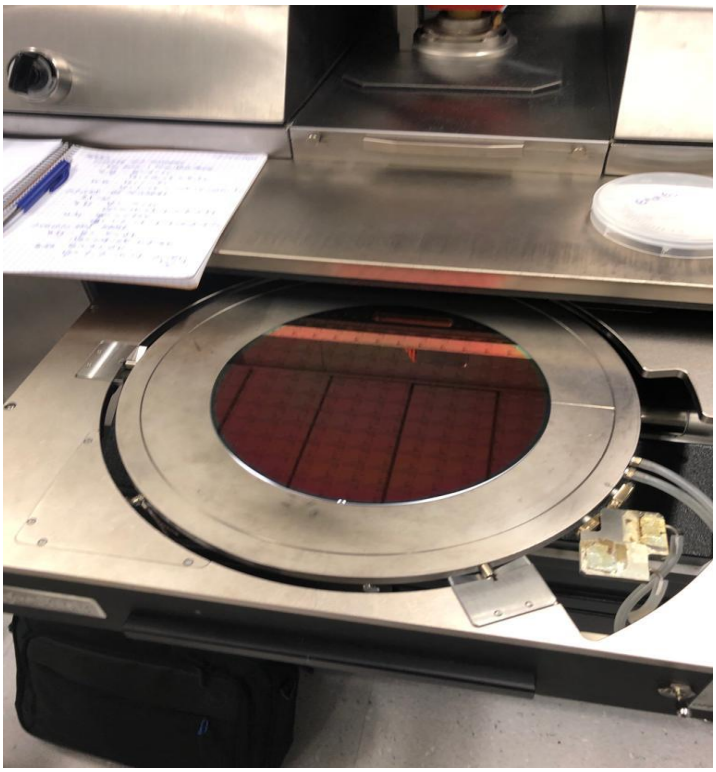
Fonte: Adaptado do Imec (2019).

Dentro do “chip” estão contidos transistores com algumas variações de comprimento e largura do canal.

Relativo aos dados elétricos, foram coletados tanto os parâmetros de corrente de dreno, porta e fonte e tensão de dreno através de um valor de tensão na porta constante, quanto esses mesmos parâmetros de corrente, porém com a inclusão da tensão de porta como variável e tensão de dreno como constante.

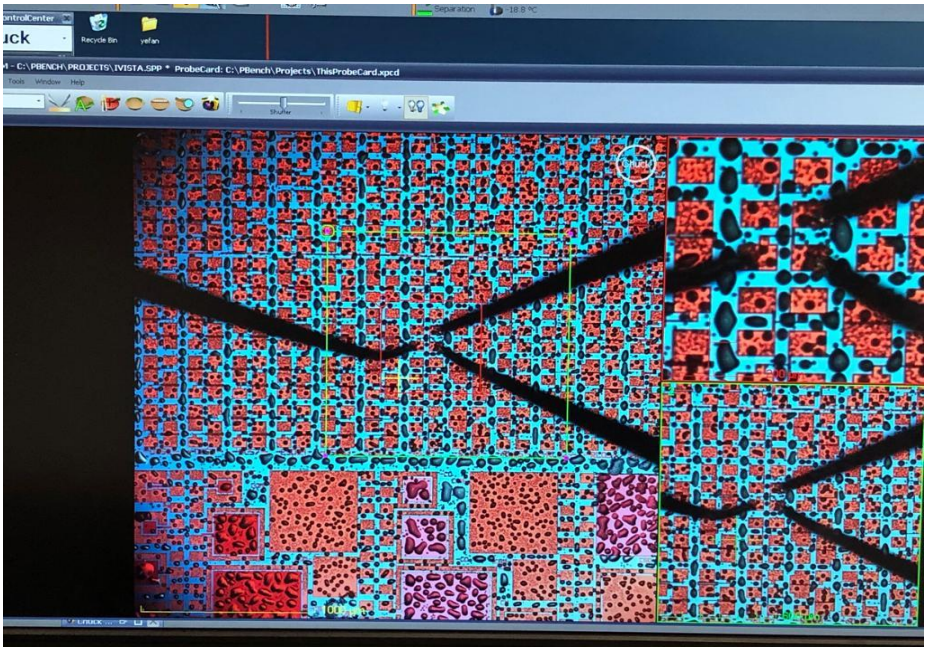
A lâmina de silício, são posicionadas no equipamento mostrado na Figura 25, onde são posicionadas as pontas de prova, no dreno, fonte e porta através de imagens ampliadas, mostrado na Figura 26:

Figura 25 - Posicionamento lâmina no equipamento de teste.



Fonte: Imec (2019).

Figura 26 - Posicionamento das pontas de prova do equipamento de teste.

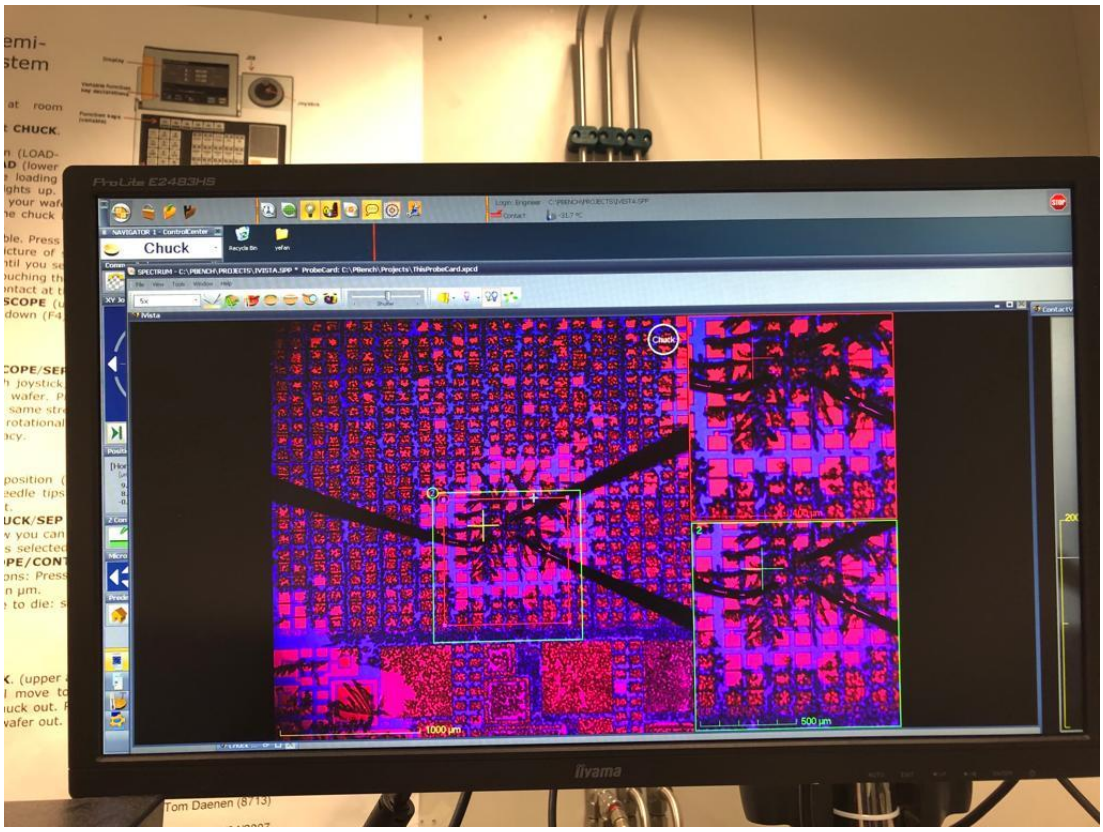


Fonte: Imec (2019).

Após realizar cada medição, o equipamento agrupava os dados aferidos em arquivos de texto com disposição de conteúdo em linhas bem delimitadas. Cada dispositivo mensurado apresentava um arquivo de texto único.

Uma das dificuldades encontradas na realização de medidas em baixas temperaturas, foi que o dispositivo congelava, conforme mostrado na Figura 27, causando mau contato das pontas de prova do equipamento, muitas vezes invalidando as medidas realizadas, obrigando a serem refeitas.

Figura 27 - Formação de gelo sobra a lâmina.



Fonte: Imec (2019).

Dessa forma, a análise experimental foi dividida em duas etapas, onde a primeira correspondeu a análise experimental dos resultados dos dados de tensão, corrente obtidos em diferentes temperaturas em transistores HEMTs de diferentes dimensões.

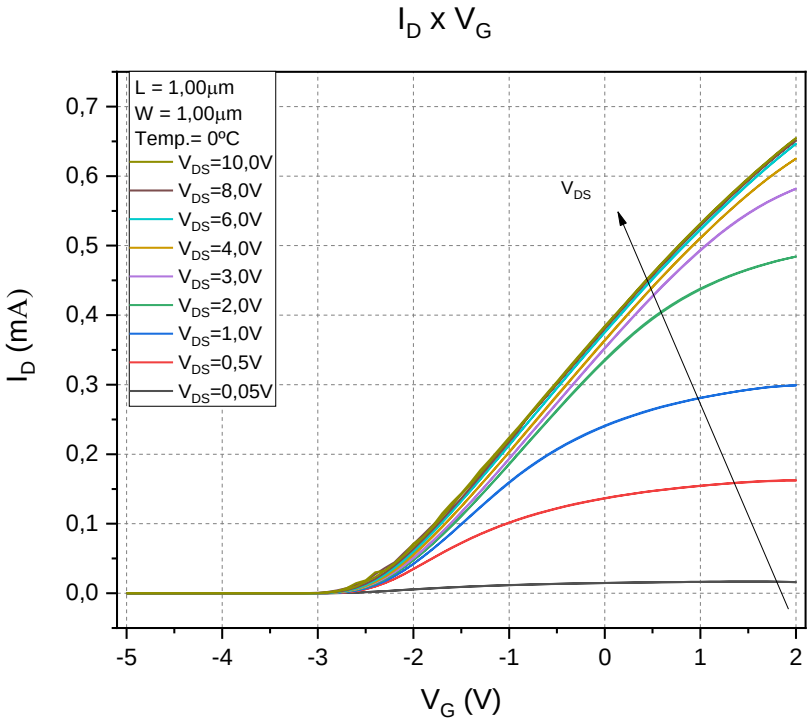
A segunda etapa consistiu no tratamento dos dados, onde foi possível obter, massivamente, todos os gráficos necessários para avaliação do comportamento elétrico em várias temperaturas.

5.2 Curvas I_D x V_G e I_D x V_D

Os dados obtidos, foram utilizados inicialmente para produzir gráficos de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) e corrente de dreno por tensão de dreno (I_D x V_D). Através dos quais já foi possível selecionar os dispositivos que apresentavam curvas características dentro do esperado e excluir algumas curvas que apresentavam erros nas medições de dispositivos, seja devido ao congelamento do dispositivo, fazendo com que a ponta de prova utilizada pelo aparelho para medição tivesse mau contato ou por falha do próprio dispositivo mesmo, devido a problemas de fabricação ou por estresse devido as sucessivas medições. Foram elaborados os gráficos de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) e corrente de dreno por tensão de dreno (I_D x V_D) nas quatro temperaturas estudadas para os 12 dispositivos com variações de comprimento e largura de canal, conforme descrita na Tabela 2.

Na Figura 28, demonstramos um dos gráficos de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) com valores de tensão entre drenos e fonte V_{DS} variando de 0,05 a 10,00V do dispositivo HEMT a 0ºC, para visualização do perfil das curvas características obtidas com os dados coletados.

Figura 28 - Exemplo de gráfico de curvas I_D x V_G de um dispositivo HEMT a 0ºC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

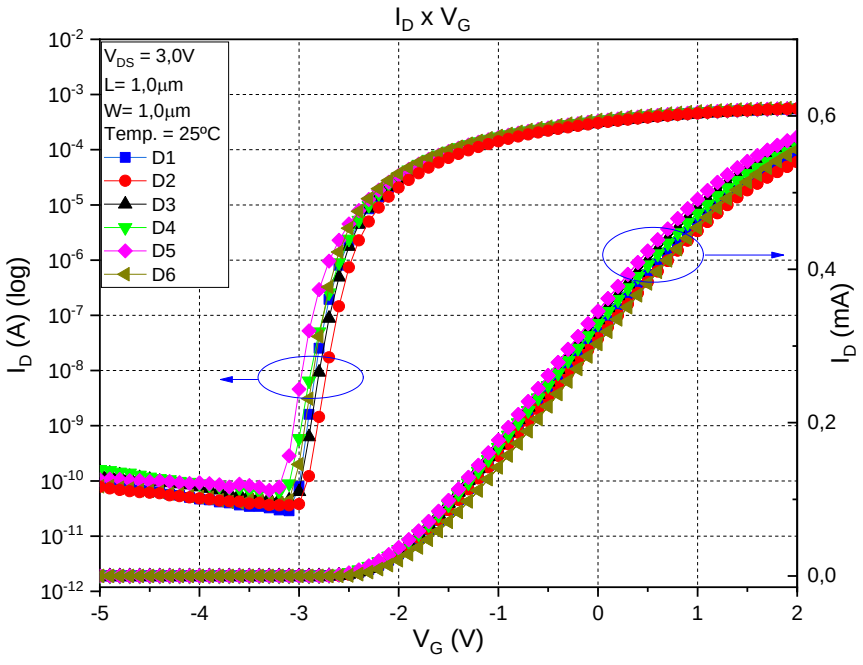
A curva de I_D x V_G é uma curva com uma região de operação linear no início, seguida por uma região de saturação. Na região linear, a corrente de dreno aumenta proporcionalmente à tensão de porta, enquanto na região de saturação, a corrente de dreno se estabiliza em um valor máximo que é determinado pelas características do dispositivo.

Além disso, o ponto de operação ideal do transistor AlGaN HEMT está localizado na região linear da curva I_D x V_G. Nessa região, o transistor funciona de forma mais eficiente e com menor distorção. Por outro lado, se o transistor operar na região de saturação, pode ocorrer aumento da distorção e redução da eficiência.

Finalmente, o valor da corrente de dreno também pode ser controlado pela tensão de porta em um transistor AlGaN HEMT. Isso significa que é possível usar a tensão de porta para ajustar a corrente de dreno e, consequentemente, a potência de saída do dispositivo.

Na Figura 29, é apresentado o gráfico de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) em escala linear e logarítmica, para seis dispositivos com de mesmas dimensões do dispositivo 7 da Tabela 2, com valor de tensão entre dreno e fonte V_{DS} igual 3,00V do dispositivo HEMT a 25ºC, para visualização do perfil das curvas características obtidas com os dados coletados.

Figura 29 - Gráfico de curvas I_D x V_G de seis dispositivo HEMT a 25ºC.

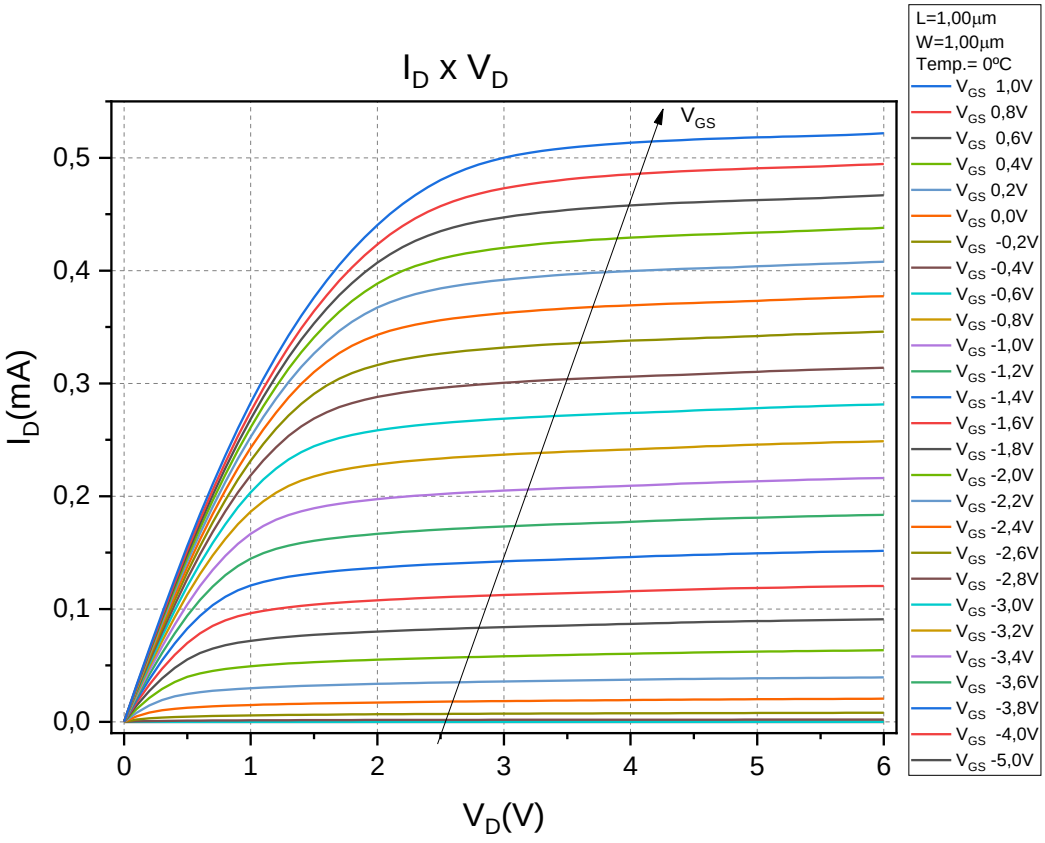


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que embora os dispositivos sejam fabricados na mesma lâmina e com as mesmas características, existem pequenas diferenças no desempenho de cada dispositivo.

Na Figura 30, demostramos um dos gráficos de corrente de dreno por tensão de dreno (I_D x V_D) com valores de tensão entre porta e fonte V_{GS} variando de -5,00 a 1,00V do dispositivo AlGaN/GaN HEMT a 0ºC, para visualizarmos o perfil das curvas características obtidas com os dados coletados.

Figura 30 - Exemplo de gráfico de curvas I_DxV_D de um dispositivo HEMT a 0ºC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o gráfico I_D x V_D de um AlGaN HEMT, é possível observar algumas características importantes, como:

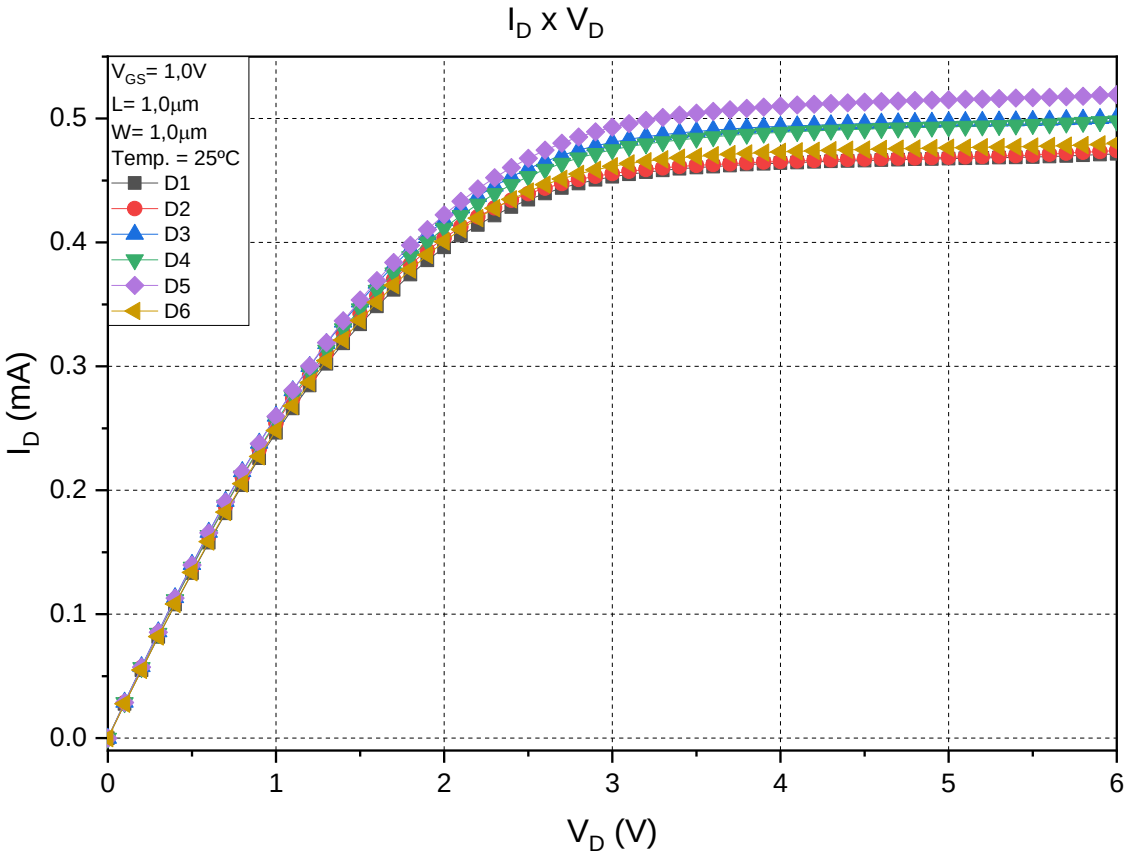
- Região de saturação: A região de saturação é onde o transistor está operando em sua máxima corrente possível e a tensão de dreno não influencia mais na corrente de dreno. Nessa região, o gráfico apresenta uma curva praticamente horizontal.

- Região de corte: A região de corte é onde o transistor está desligado e não há passagem de corrente de dreno. Nessa região, o gráfico apresenta uma linha vertical na tensão de dreno de corte.
- Região linear: A região linear é onde o transistor está operando de forma linear, ou seja, a corrente de dreno é proporcional à tensão de dreno. Nessa região, o gráfico apresenta uma curva inclinada.

O gráfico I_D x V_D também pode ser utilizado para determinar alguns parâmetros importantes do transistor, como a resistência de saída e a transcondutância. A resistência de saída é determinada a partir da inclinação da curva na região linear, enquanto a transcondutância é determinada a partir da inclinação da curva na região de saturação.

A curva I_D x V_D de um transistor AlGaN HEMT é uma ferramenta importante para entender o comportamento desse tipo de transistor em diferentes condições de operação e pode ser utilizado para determinar parâmetros importantes do dispositivo.

Figura 31 - Gráfico I_D x V_G de seis dispositivo HEMT similares a 25ºC.

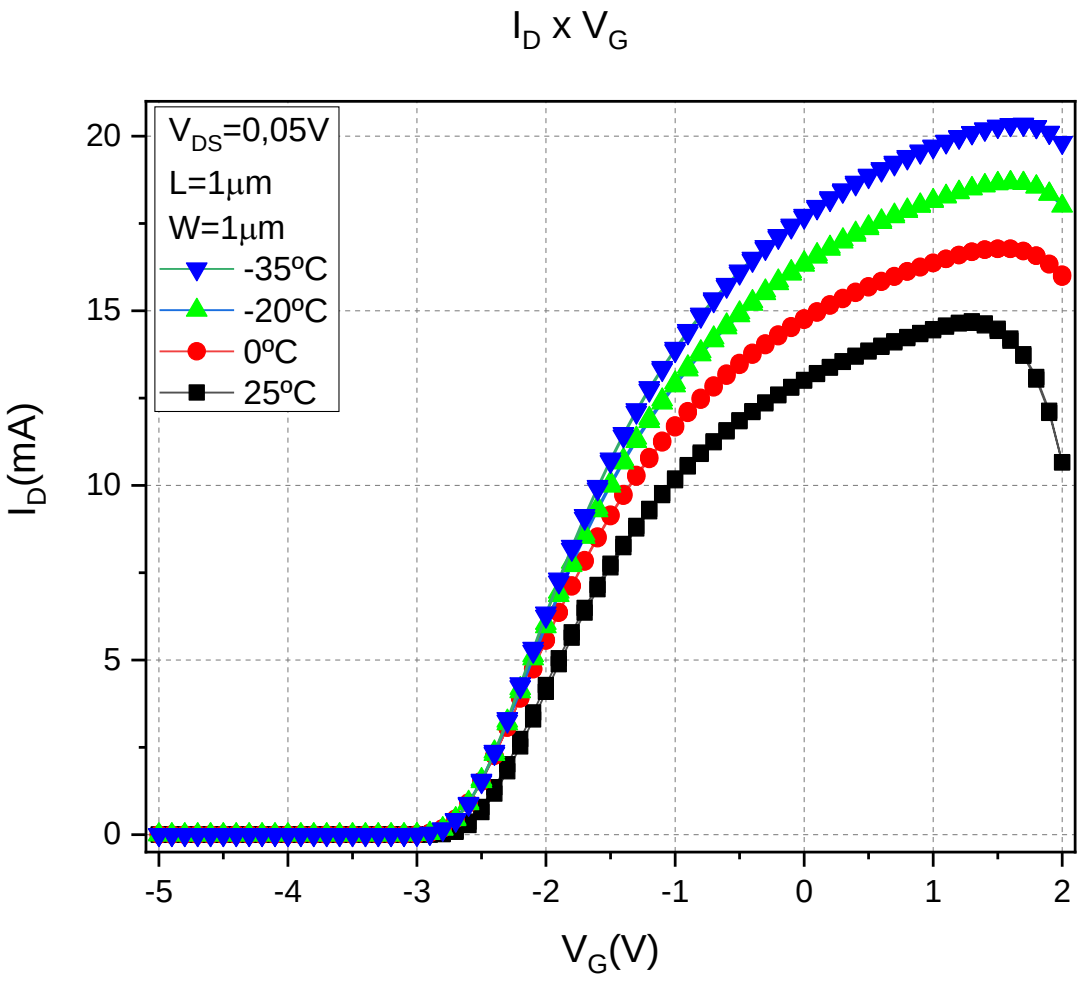


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 31, é mostrado o gráfico de corrente de dreno por tensão de dreno (I_D x V_D), para seis dispositivos com de mesmas dimensões do dispositivo 7 da Tabela 2, com valor de tensão entre porta e fonte V_{GS} igual 1,00V do dispositivo HEMT a 25ºC, para visualização do perfil das curvas características obtidas com os dados coletados.

Na Figura 32, demostramos um dos gráficos de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) para V_{DS} = 0,05V, com valores de tensão entre porta e fonte V_{GS} variando de -5,00 a 2,00V do dispositivo AlGaN/Gan HEMT, nas temperaturas de 25ºC, 0ºC, -20ºC e -35ºC, onde é possível visualizarmos que com o aumento da da tensão de porta (V_G) há aumento da corrente de dreno (I_D) e quanto mais baixa a temperatura maior a corrente de dreno (I_D).

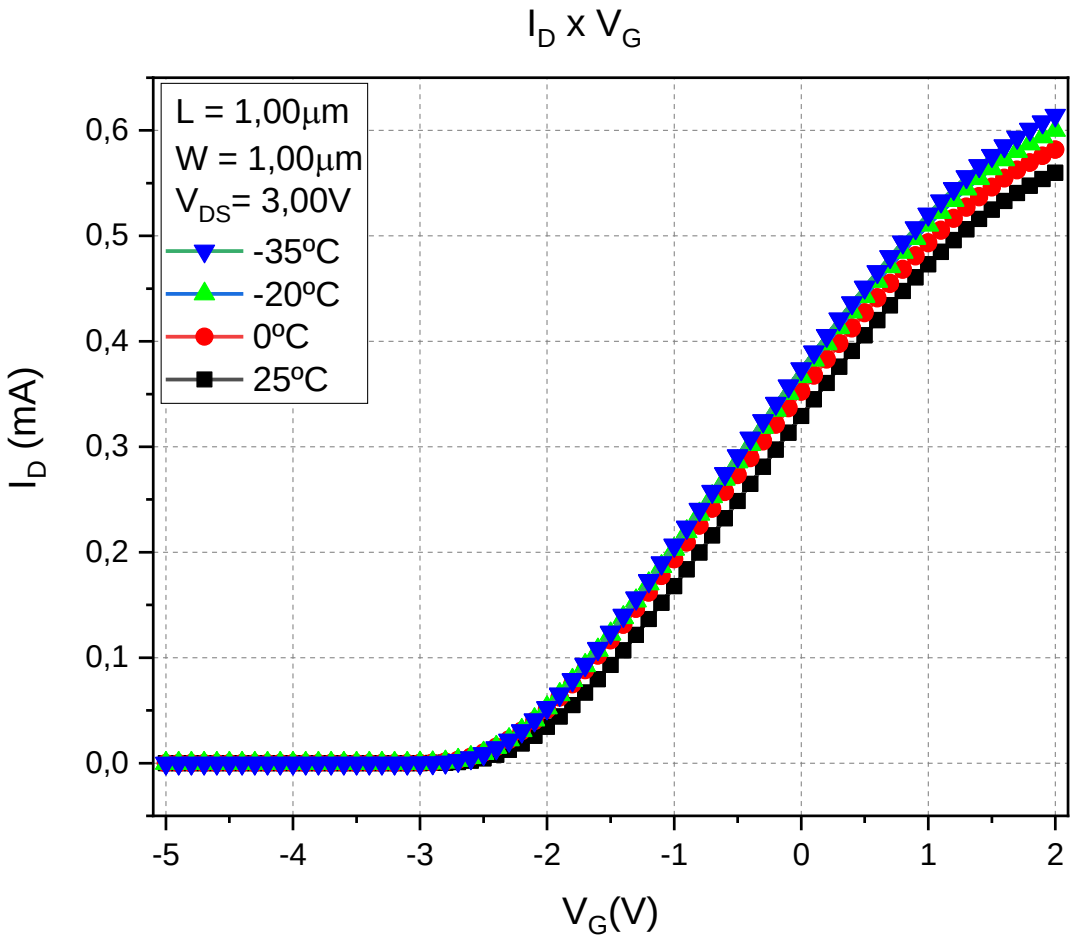
Figura 32 - Gráfico de curvas I_D x V_G com V_{DS} = 0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 33, demostramos um dos gráficos de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) para V_{DS}=3,00V, com valores de tensão entre porta e fonte V_{GS} variando de -5,00 a 2,00V do dispositivo AlGaN/Gan HEMT, nas temperaturas de 25ºC, 0ºC, -20ºC e -35ºC, onde e possível visualizarmos que com o aumento da tensão de porta (V_G) há aumento da corrente de dreno (I_D) e quanto mais baixa a temperatura maior a corrente de dreno (I_D).

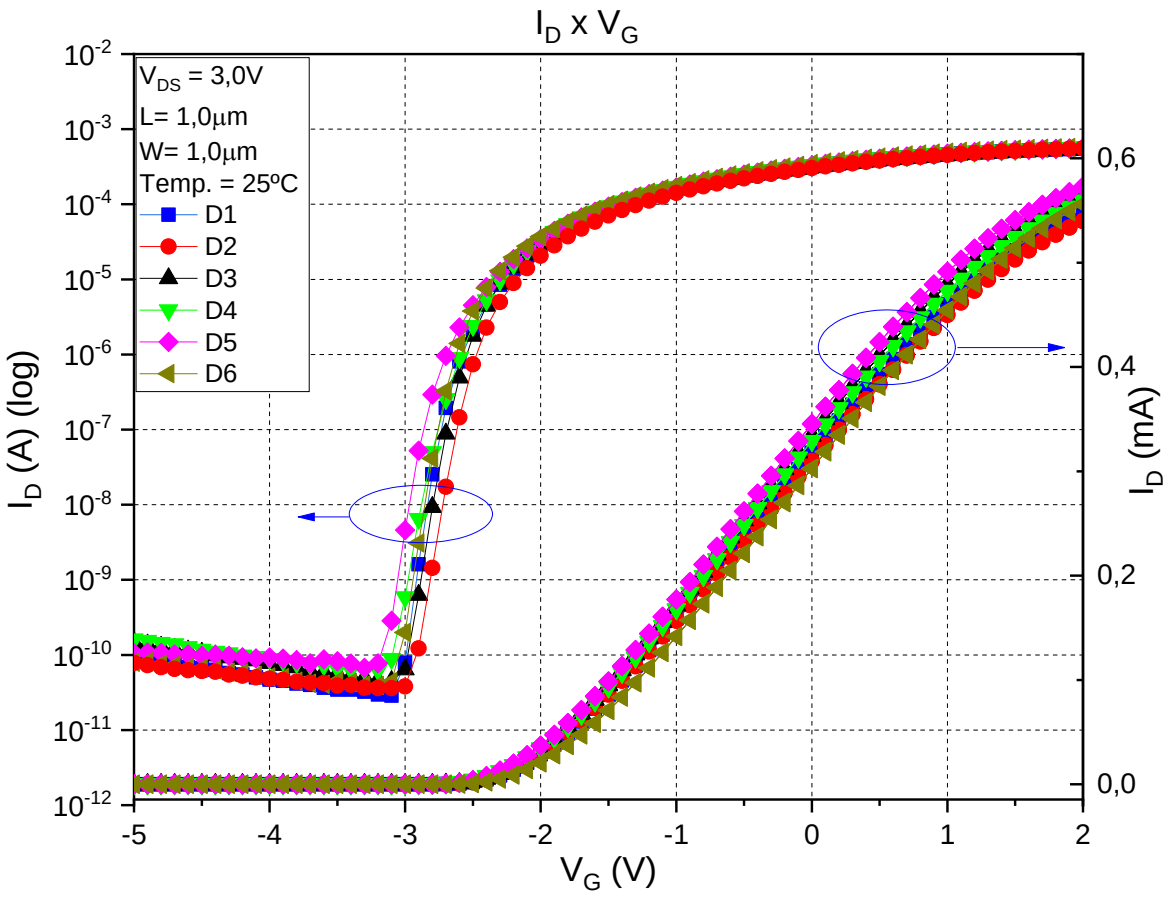
Figura 33 - Gráfico de curvas I_DxV_G com V_{DS} = 3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 34, é mostrado o gráfico de corrente de dreno por tensão de porta (I_DxV_G) em escala linear e logarítmica, para seis dispositivos com de mesmas dimensões do dispositivo 7 da Tabela 2, com valor de tensão entre dreno e fonte V_{DS} = 3,00 V do dispositivo AlGaN/Gan HEMT a 25ºC, para visualização do perfil das curvas características obtidas com os dados coletados.

Figura 34 - Gráfico curvas I_D x V_G de 6 dispositivos similares com V_{DS} = 3,00V.

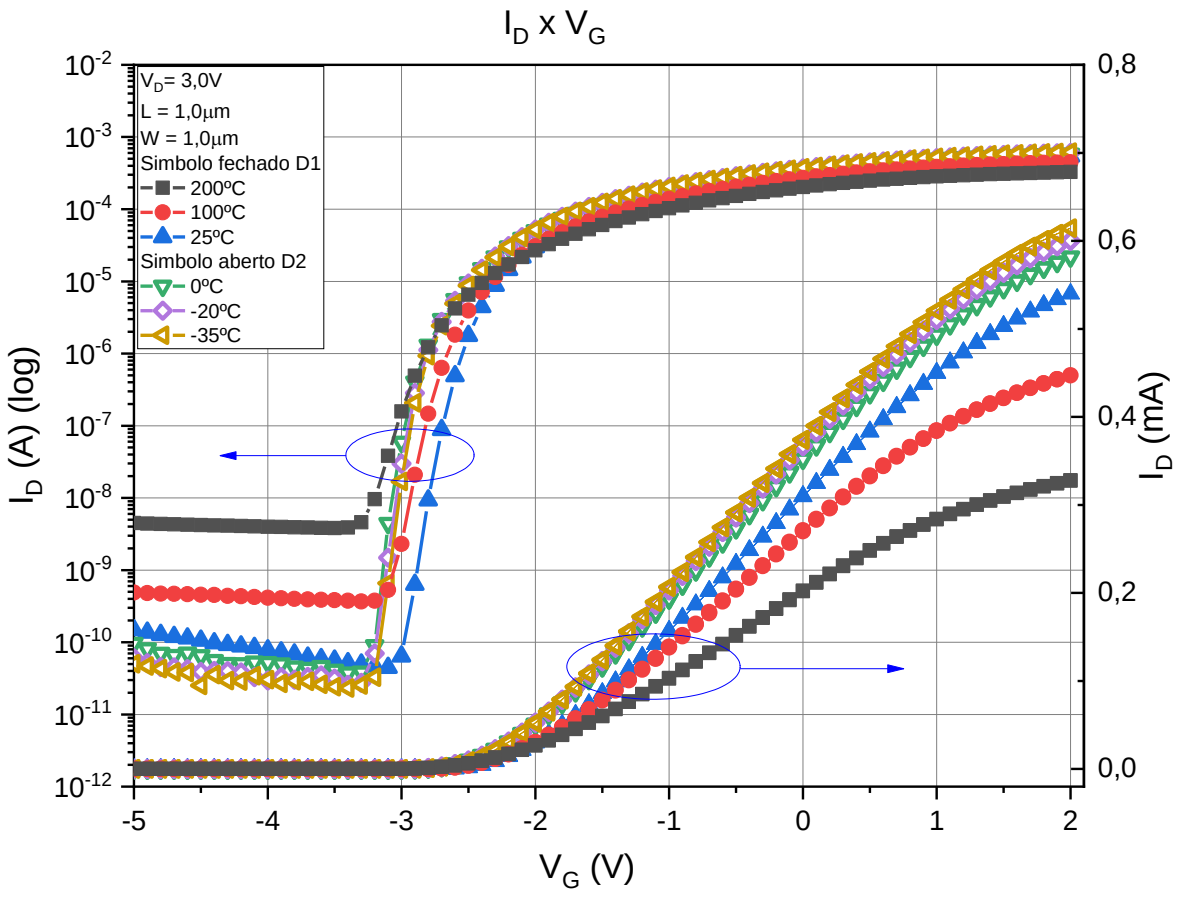


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os 6 dispositivos similares, dois foram selecionados aleatoriamente (D1 e D2). O dispositivos, D1 foi submetido a temperaturas de 25º, 100º e 200ºC e o dispositivo D2 foi submetido a temperaturas de -35º, -20º e 0ºC.

Na Figura 35, demostramos o gráfico de corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G) para V_{DS}=3,00V, com valores de tensão entre porta e fonte V_{GS} variando de -5,00 a 2,00V do dispositivo AlGaN/Gan HEMT, nas temperaturas de 200º, 100º, 25º, 0º, -20º e -35ºC.

Figura 35 - Gráfico I_D x V_G de 2 dispositivos similares (D1 e D2) com V_{DS}=3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foi possível visualizarmos, que com o aumento da tensão de porta (V_G) há aumento da corrente de dreno (I_D) e quanto mais baixa a temperatura maior a corrente de dreno (I_D).

5.3 Tensão de Limiar (V_T)

Para o calcular a tensão de limiar (V_T), através do método da corrente contínua, é necessário obtermos a relação de largura pelo comprimento do canal, para posteriormente multiplicarmos por $1x10^{-7}$, resultando no calcula da corrente constante, através da qual podemos obter graficamente o valor da tensão de limiar(V_T) (CONDE, SANCHEZ, *et al.*, 2013). O cálculo dos valores da corrente constante para o cálculo tensão de limiar (V_T) para os dispositivos AlGaN/GaN HEMT estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Valores corrente constante para V_T do transistor HEMT.

Dispositivo	L (µm)	W (µm)	W/L	Corrente Constante
1	0,20	1,00	5,00	5,00E-07
2	0,40	1,00	50,00	5,00E-06
3	1,00	1,00	500,00	5,00E-05
4	10,00	1,00	2,50	2,50E-07
5	0,20	10,00	25,00	2,50E-06
6	0,40	10,00	250,00	2,50E-05
7	1,00	10,00	1,00	1,00E-07
8	10,00	10,00	10,00	1,00E-06
9	0,20	100,00	100,00	1,00E-05
10	0,40	100,00	0,10	1,00E-08
11	1,00	100,00	1,00	1,00E-07
12	10,00	100,00	10,00	1,00E-06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após os cálculos dos valores da corrente constante calculados, obtivemos graficamente os valores da tensão de limiar (V_T) dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT nas temperaturas de 25º, 0º,-20º e -35ºC e para V_{DS} = 3,00V, descritos na Tabela 4:

Tabela 4 - Valores de V_T do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.

V_{DS}=3,00V	**L (µm)**	**W (µm)**	**V_T 25ºC**	**V_T 0ºC**	**V_T -20ºC**	**V_T -35ºC**
1	0,20	1,00	-3,30	-3,24	-3,17	-3,11
4	0,40	1,00	-3,26	-3,18	-3,11	-3,03
7	1,00	1,00	-3,06	-3,00	-2,96	-2,89
10	10,00	1,00	-2,94	-2,88	-2,82	-2,81
2	0,20	10,00	-3,33	-3,32	-3,30	-3,28
5	0,40	10,00	-3,30	-3,17	-3,10	-3,07
8	1,00	10,00	-3,17	-3,10	-3,09	-3,04
11	10,00	10,00	-3,03	-2,99	-2,95	-2,87
3	0,20	100,00	-3,39	-3,35	-3,34	-3,32
6	0,40	100,00	-3,30	-3,28	-3,25	-3,20
9	1,00	100,00	-3,22	-3,20	-3,16	-3,10
12	10,00	100,00	-3,17	-3,16	-3,11	-3,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 5, estão os valores da tensão de limiar (V_T) dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT nas temperaturas de 25º, 0º,-20º e -35ºC e para V_{DS} = 0,05V:

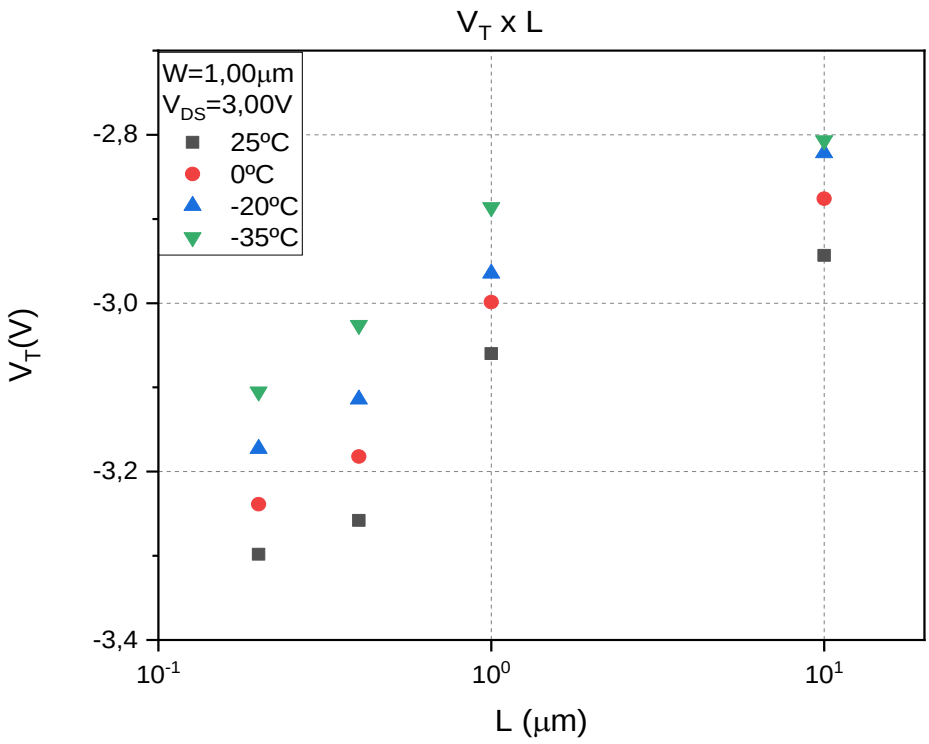
Tabela 5 - Valores de V_T do transistor HEMT com V_{DS}=0,05V.

V_{DS}=0,05V	**L (µm)**	**W (µm)**	**V_T 25ºC**	**V_T 0ºC**	**V_T -20ºC**	**V_T -35ºC**
1	0,20	1,00	-3,07	-3,05	-3,04	-3,00
4	0,40	1,00	-3,04	-3,00	-2,99	-2,94
7	1,00	1,00	-2,98	-2,96	-2,93	-2,86
10	10,00	1,00	-2,91	-2,85	-2,80	-2,79
2	0,20	10,00	-3,10	-3,09	-3,08	-3,07
5	0,40	10,00	-3,08	-3,00	-2,93	-2,91
8	1,00	10,00	-3,00	-2,94	-2,93	-2,88
11	10,00	10,00	-2,90	-2,86	-2,83	-2,77
3	0,20	100,00	-2,90	-2,88		
6	0,40	100,00	-2,83	-2,81	-2,78	-2,75
9	1,00	100,00	-2,76			
12	10,00	100,00	-2,73			

Fonte: Elaborado pelo autor.

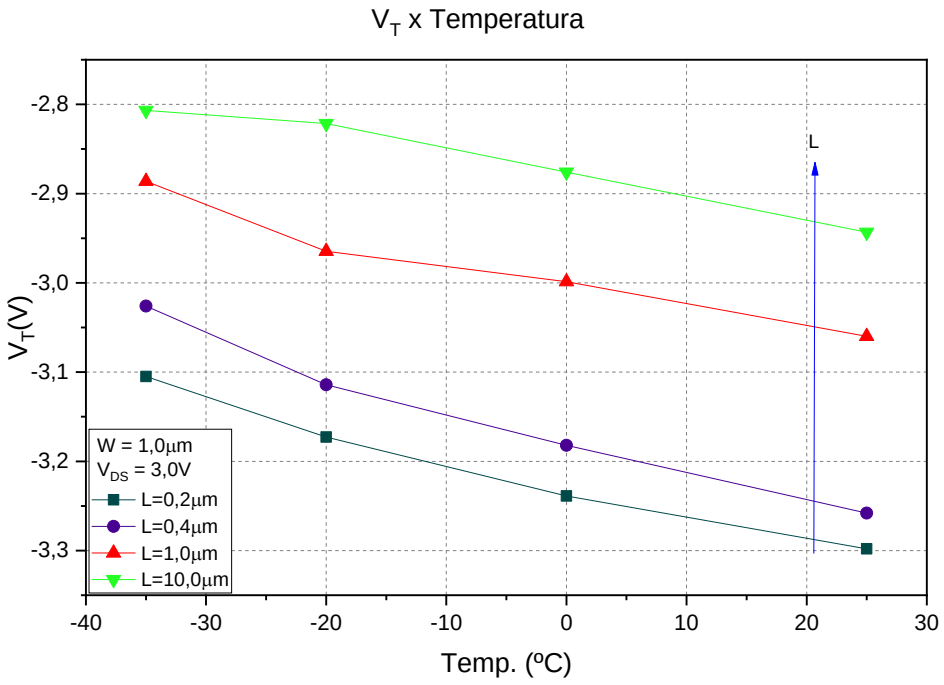
A partir dos resultados obtidos nas Tabela 4 foram elaborados os gráficos da Tensão de Limiar (V_T) pelo comprimento do canal(L), com V_{DS}=3,0V e W= 1,0, 10,0 e 100,0µm. Os gráficos estão apresentados abaixo, Figura 36, Figura 38 e Figura 40 e os gráficos de Tensão de Limiar (V_T) pelo Temperatura (ºC), com V_{DS} = 3,0V e W = 1,0, 10,0 e 100,0µm apresentados abaixo, Figura 37, Figura 39 e Figura 41:

Figura 36 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=1,00µm V_{DS}=3,00V.



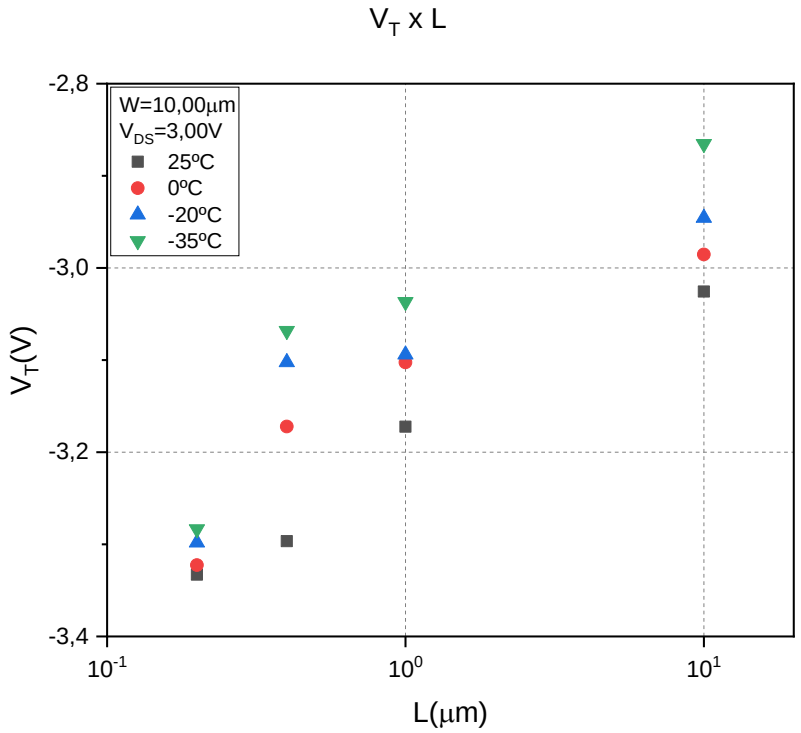
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V.



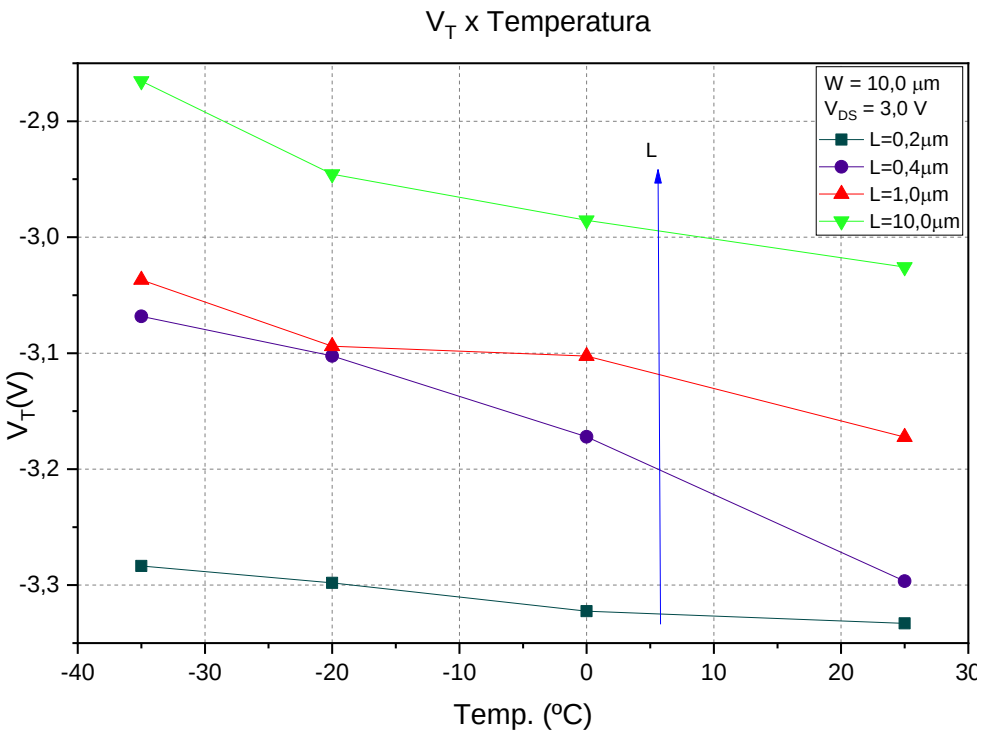
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V.



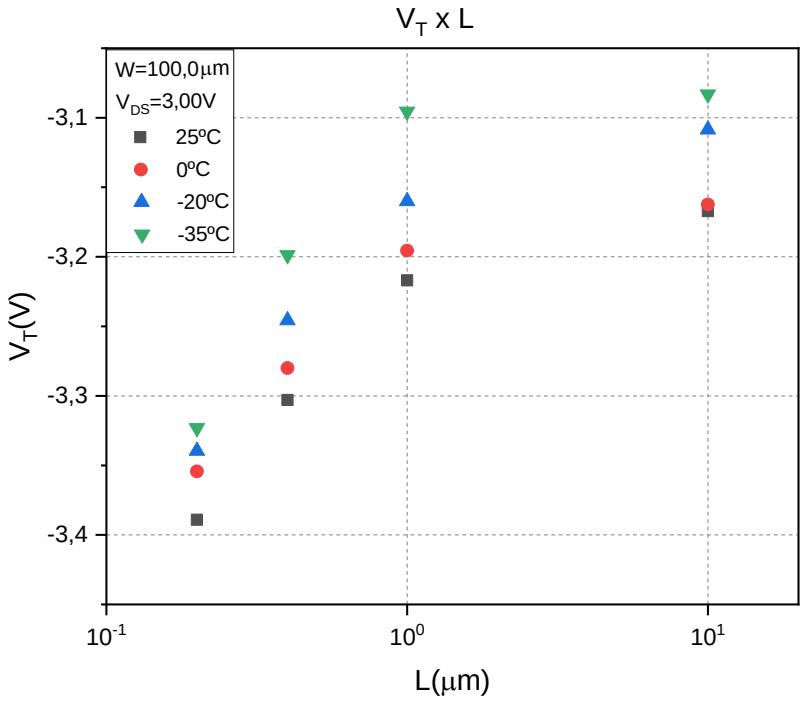
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=3,00V.



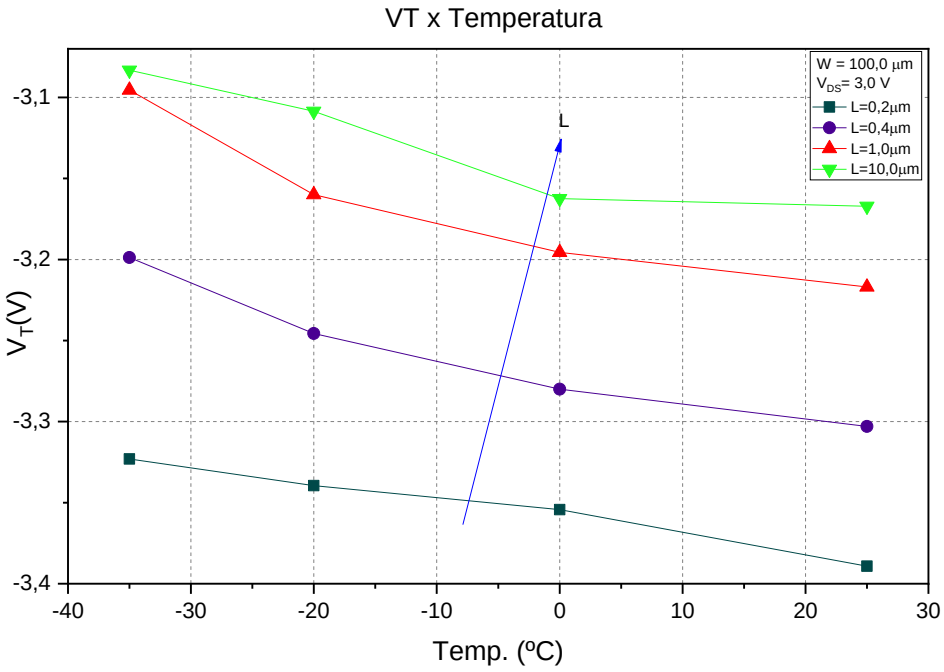
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=100,00µm V_{DS}=3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

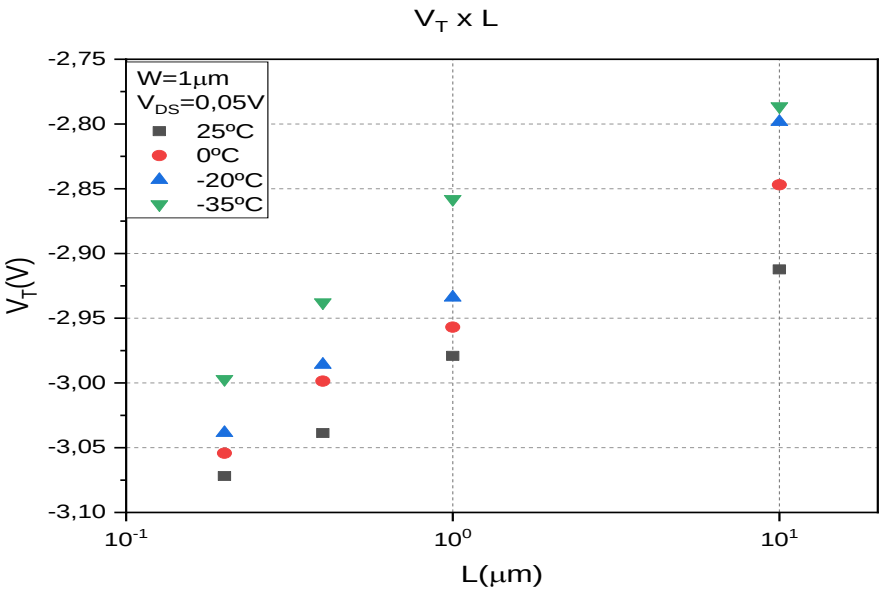
Figura 41 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=100,00µm V_{DS}=3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

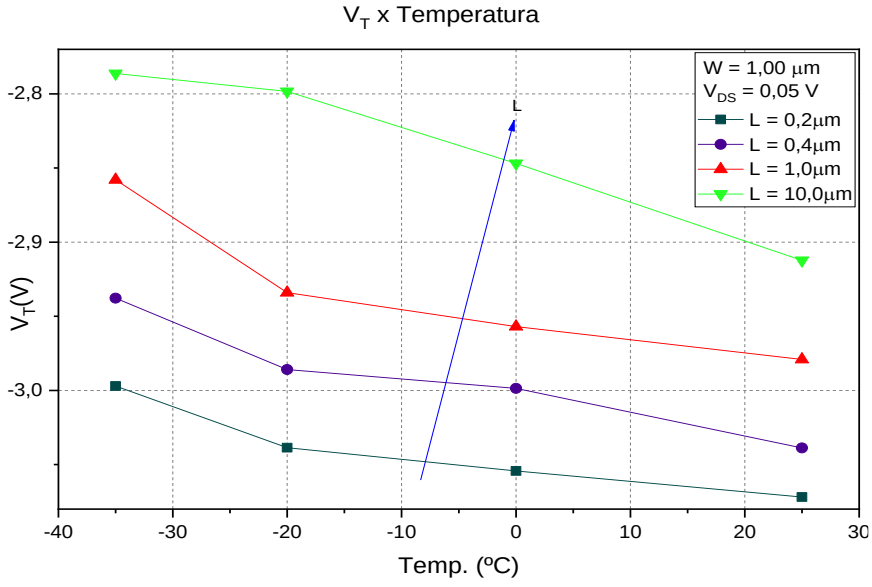
A partir dos resultados obtidos nas Tabela 5 foram elaborados os gráficos da Tensão de Limiar (V_T) pelo comprimento do canal(L), com V_{DS} = 0,05V e W= 1,0, 10,0 e 100,0µm. Os gráficos estão apresentados abaixo, Figura 42, Figura 44 e Figura 46 e os gráficos de Tensão de Limiar (V_T) pelo Temperatura (ºC), com V_{DS} = 0,05V e W = 1,0, 10,0 e 100,0µm apresentados abaixo nas Figuras 43, Figura 45 e Figura 47:

Figura 42 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=1,00µm V_{DS}=0,05V.



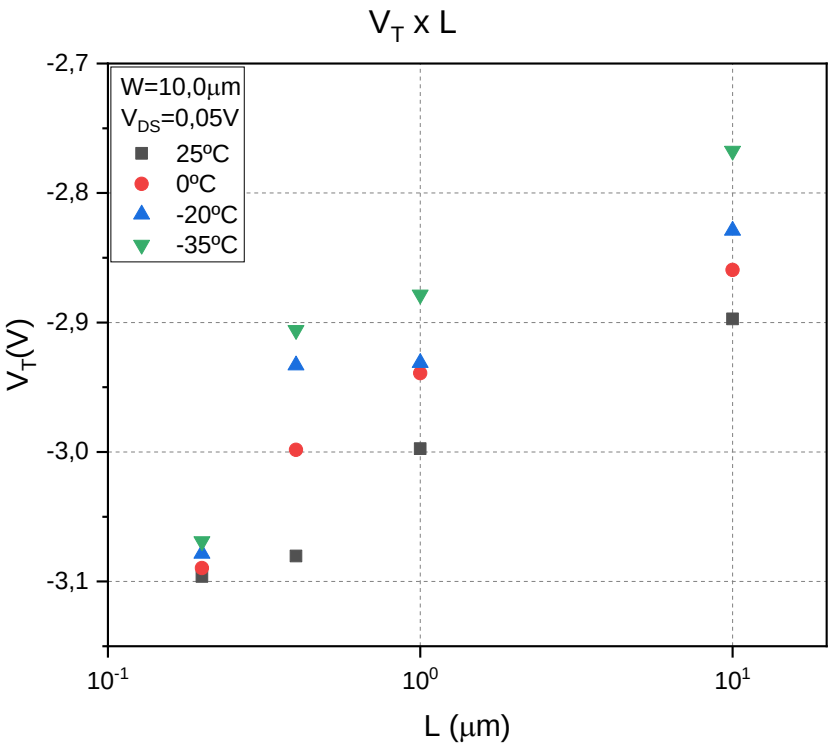
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=1,00µm V_{DS}=0,05V.



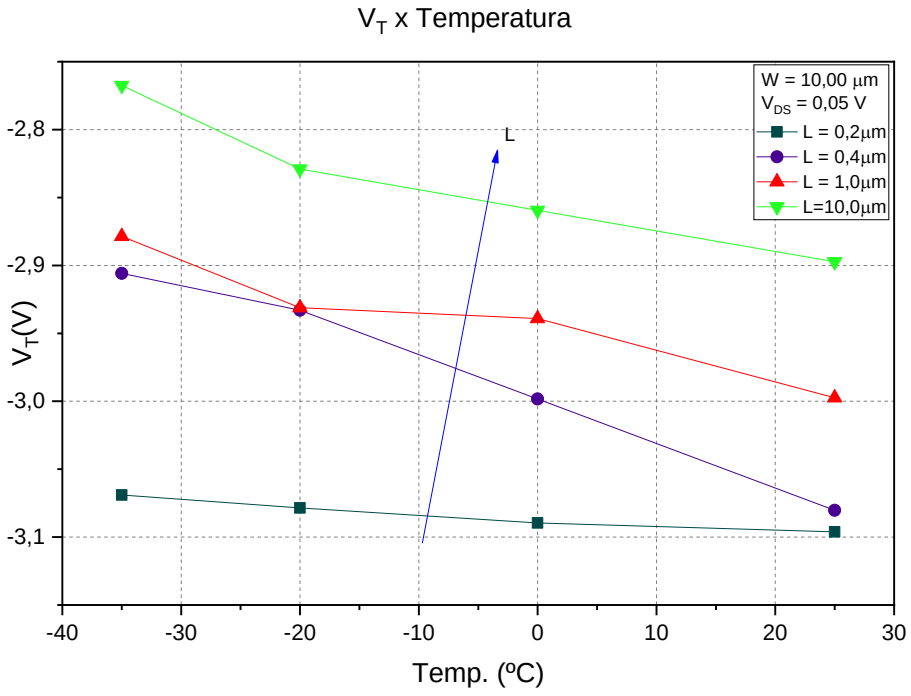
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=10,00µm V_{DS}=0,05V.



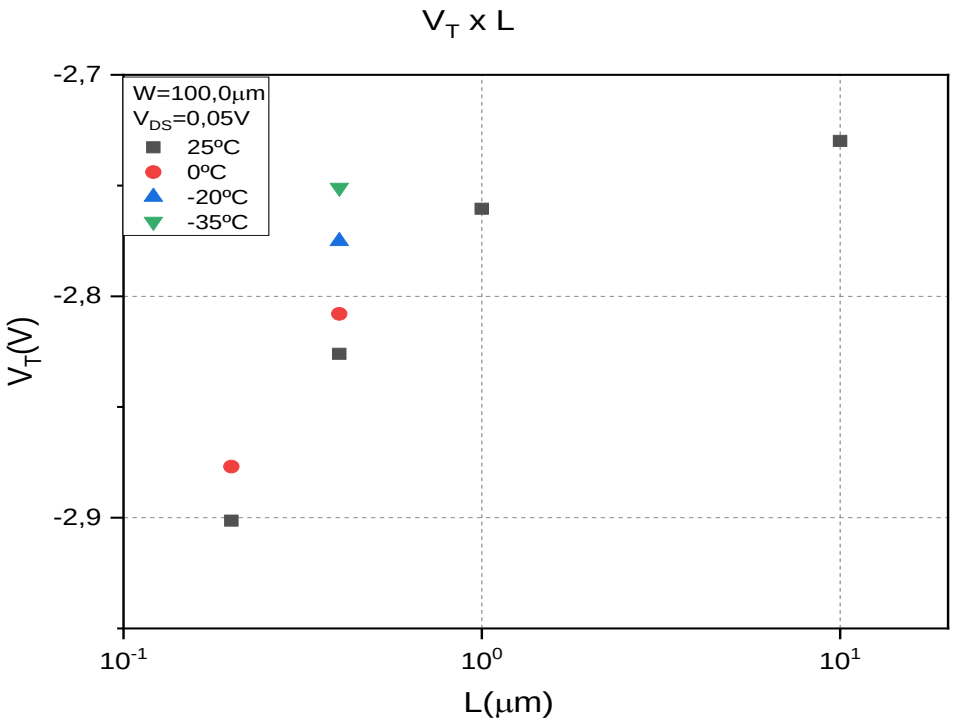
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=10,00µm V_{DS}=0,05V.



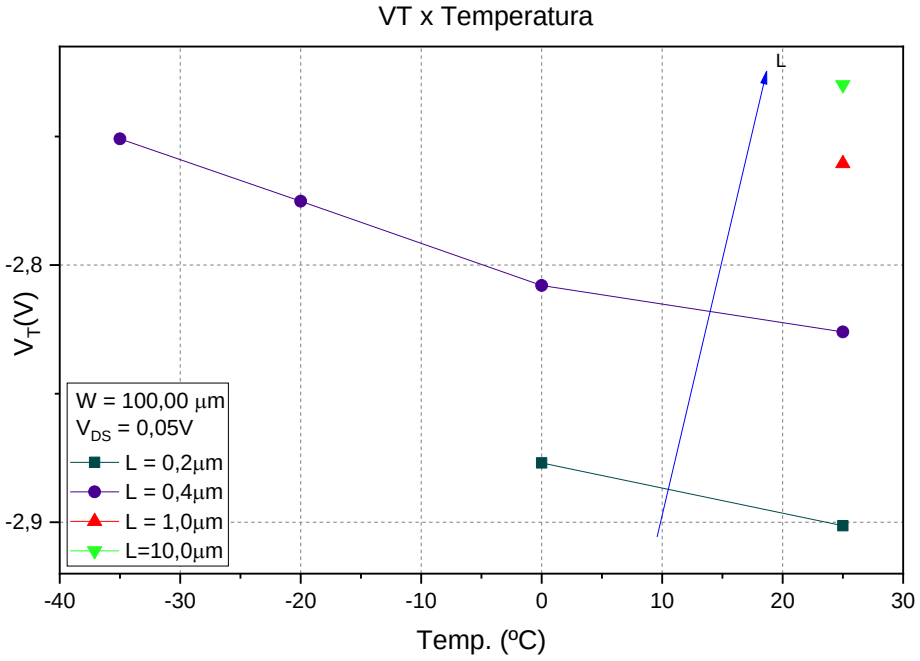
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Gráfico V_T x L(µm) HEMT W=100,00µm V_{DS}=0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Gráfico V_T x Temperatura HEMT W=100,00µm V_{DS}=0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos da tensão de limiar(V_T) pelo comprimento do canal (V_T x L), dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para valores de V_{DS} = 3,00V e V_{DS} = 0,05V , constamos que a tensão de limiar (V_T) diminui à medida que o comprimento do canal (L) diminui. Isso ocorre porque, quando o comprimento do canal é menor, a densidade de portadores no canal aumenta, o que reduz a tensão de limiar necessária para atingir uma dada corrente de dreno. Por outro lado, a tensão de limiar diminui com aumento temperatura, devido ao aumento da mobilidade dos portadores de carga. Isso leva a uma diminuição da densidade de portadores no canal, o que requer uma tensão de limiar mais alta para atingir a mesma corrente de dreno.

Também foram realizados os cálculos dos valores da corrente constante, para os dispositivos similares (D1 e D2) com L = 1μm e W = 1μm e obtivemos graficamente os valores da tensão de limiar (V_T) dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT nas temperaturas de 200º, 100º, 25º, 0º,-20º e -35ºC e para V_{DS} = 0,05V e V_{DS} = 3,00V, descritos na Tabela 6:

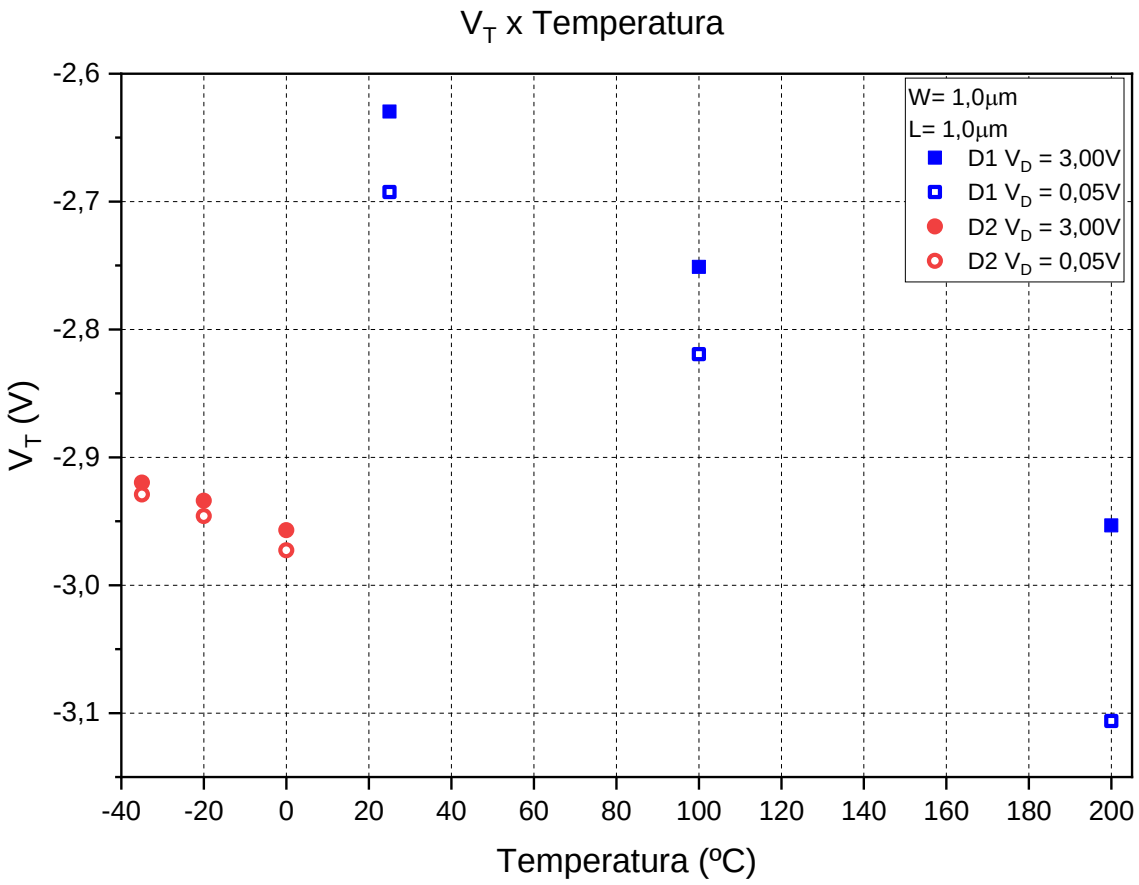
Tabela 6 - Valores de V_T do dispositivo HEMT D1 e D2 com V_{DS}=0,05V e 3,00V.

V_{DS} = 0,05V	**V_T 200ºC**	**V_T 100ºC**	**V_T 25ºC**	**V_T 0ºC**	**V_T -20ºC**	**V_T -35ºC**
D1	-2,95	-2,75	-2,62			
D2				-2,95	-2,93	-2,91
V_{DS} = 3,00V	**V_T 200ºC**	**V_T 100ºC**	**V_T 25ºC**	**V_T 0ºC**	**V_T -20ºC**	**V_T -35ºC**
D1	-3,10	-2,81	-2,69			
D2				-2,97	-2,94	-2,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos nas Tabela 6, foi elaborado o gráfico da Tensão de Limiar (V_T) pela Temperatura (ºC), com V_{DS}=0,05V e V_{DS}=3,00V para os dispositivos similares (D1 e D2) com L = 1μm e W = 1μm, Figura 48:

Figura 48 - Gráfico V_T x Temperatura de 2 dispositivos HEMT similares (D1, D2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já observado anteriormente, a tensão de limiar (V_T) diminui com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque, à medida que a temperatura aumenta, os elétrons no canal ganham mais energia térmica, o que aumenta sua mobilidade. Aumentando a mobilidade, os elétrons podem fluir mais facilmente através do canal do transistor, reduzindo assim a tensão de limiar.

5.4 Redução da Barreira Induzida pelo Dreno – DIBL

Após calcular os valores da tensão de limiar V_T para V_{DS}=0,05V e V_{DS}=3,00V, nas quatro temperaturas, aplicamos esses valores na Equação (3.3) do DIBL, constante na página 50 deste trabalho. O valor do DIBL pode ser obtido em milivolts por volt (KRANTI, HALDAR e GUPTA, 2001) e estão apresentados na Tabela 7:

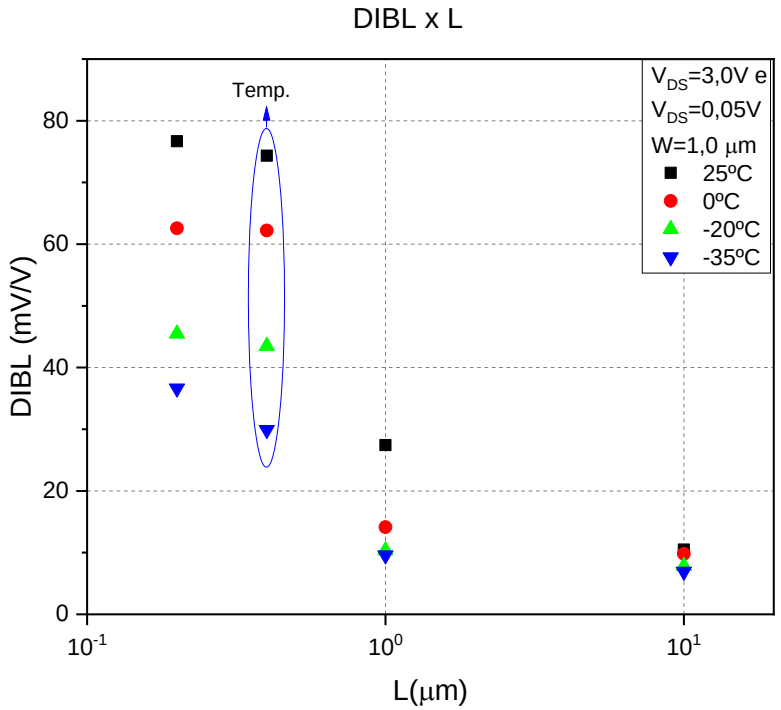
Tabela 7 - Valores de DIBL do transistor HEMT para V_{DS}=0,05V. e V_{DS}=3,00V.

Dispositivo	L µm	W µm	25ºC mV/V	0ºC mV/V	-20ºC mV/V	-35ºC mV/V
1	0,20	1,00	7,67E+01	6,26E+01	4,55E+01	3,66E+01
2	0,20	10,00	8,03E+01	7,89E+01	7,44E+01	7,27E+01
3	0,20	100,00	1,65E+02	1,62E+02		
4	0,40	1,00	7,43E+01	6,22E+01	4,35E+01	2,99E+01
5	0,40	10,00	7,33E+01	5,89E+01	5,74E+01	5,50E+01
6	0,40	100,00	1,62E+02	1,60E+02	1,59E+02	1,52E+02
7	1,00	1,00	2,74E+01	1,41E+01	1,04E+01	9,57E+01
8	1,00	10,00	5,93E+01	5,54E+01	5,52E+01	5,36E+01
9	1,00	100,00	1,55E+02			
10	10,00	1,00	1,05E+01	9,81E+00	7,84E+00	6,93E+00
11	10,00	10,00	4,35E+01	4,27E+01	3,95E+01	3,32E+01
12	10,00	100,00	1,48E+02			

Fonte: Elaborado pelo autor.

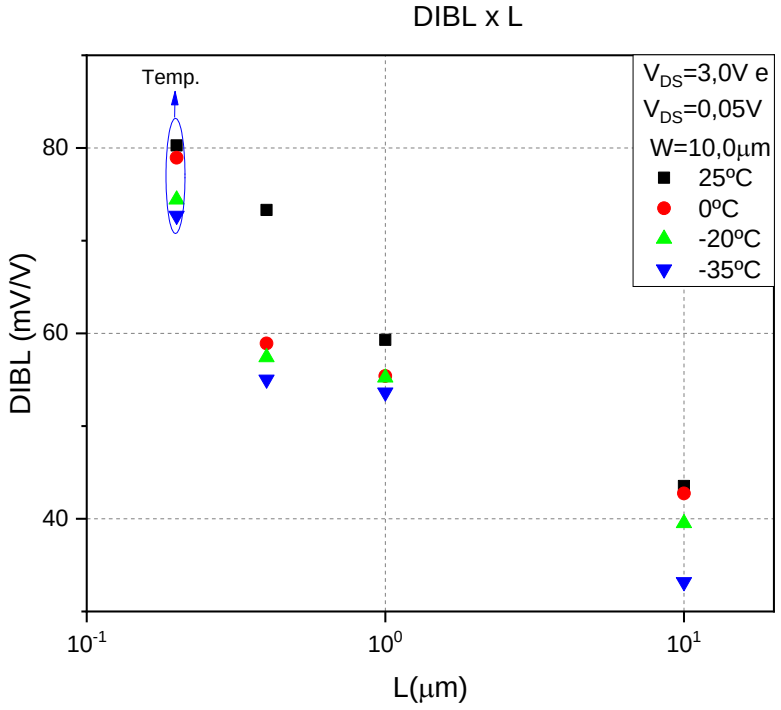
A partir dos resultados obtidos nas Tabela 7 foram elaborados os gráficos da Redução da Barreira Induzida pelo Dreno (DIBL) pelo comprimento do canal(L) variando entre, L = 0,2; 0,4; 1,0 e 10,0µm. Os gráficos estão apresentados abaixo sendo que, na Figura 49 com W = 1,0µm, Figura 50 com W = 10,0µm e Figura 51 com W = 100,0µm:

Figura 49 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT W=1,0µm.



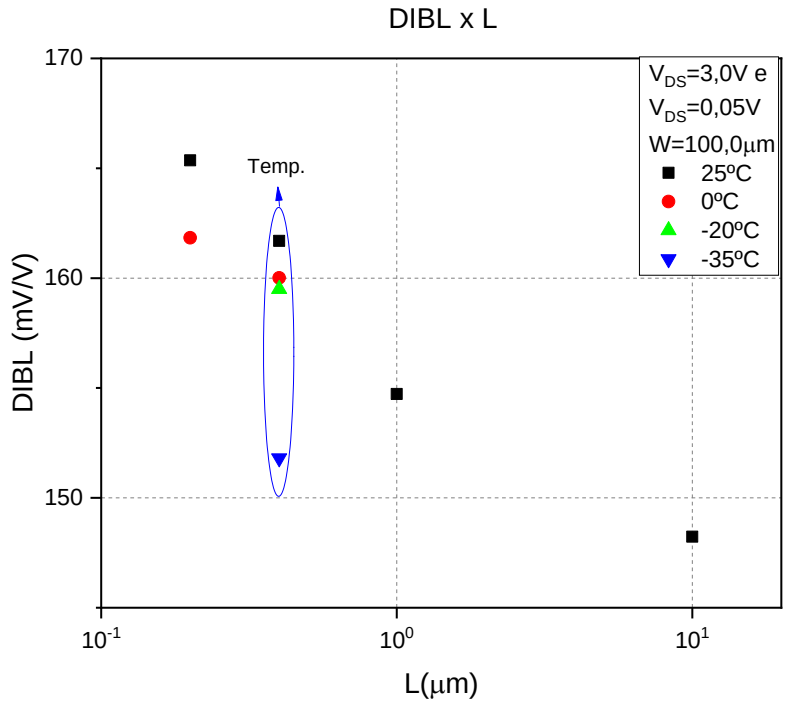
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT W=10,0µm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Gráfico DIBL x L(µm) HEMT L=100,0µm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos do DIBL pelo comprimento do canal (DIBL x L), dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para valores de V_{DS}=3,00V e V_{DS}=0,05V , constamos que o DIBL aumenta com a diminuição do comprimento do canal. Isso ocorre porque, em um canal mais curto, a barreira de energia na junção dreno-canal é menor, o que torna o transistor mais suscetível ao DIBL. Além disso, a variação de temperatura pode afetar a mobilidade eletrônica do material do canal, o que também pode levar a uma maior susceptibilidade ao DIBL.

Foram efetuados os cálculos dos valores de DIBL, para os dispositivos similares (D1 e D2) com L = 1µm e W = 1µm e obtivemos valores de DIBL dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT nas temperaturas de 200º, 100º, 25º, 0º,-20º e -35ºC e para V_{DS} = 0,05V e V_{DS} = 3,00V, descritos na Tabela 8:

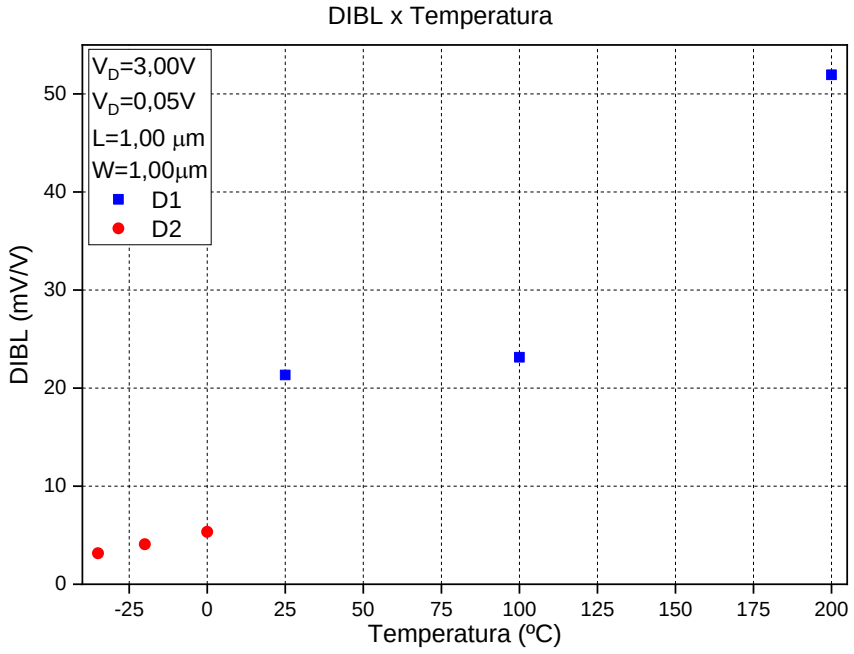
Tabela 8 - Valores de DIBL do transistor HEMT para V_{DS}=0,05V. e V_{DS}=3,00V.

Dispositivo	200ºC mV/V	100ºC mV/V	25ºC mV/V	0ºC mV/V	-20ºC mV/V	-35ºC mV/V
D1	5,20E+0	2,32E+01	2,13E+01			
D2				5,34E+00	4,08E+00	3,15E+00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados obtidos nas Tabela 8 foram elaborados os gráficos da Redução da Barreira Induzida pelo Dreno (DIBL) pelo pela Temperatura (ºC), com V_{DS}=0,05V e V_{DS}=3,00V para os dispositivos similares (D1 e D2) com L = 1μm e W = 1μm, Figura 52:

Figura 52 - Gráfico V_T x Temperatura 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos do DIBL pela Temperatura (DIBL x ºC), dos dispositivos similares (D1 e D2) AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 200º, 100º, 25º, 0º,-20º e -35ºC, para valores de V_{DS} = 3,00V e V_{DS} = 0,05V , constamos que o DIBL aumenta com o aumento da temperatura.

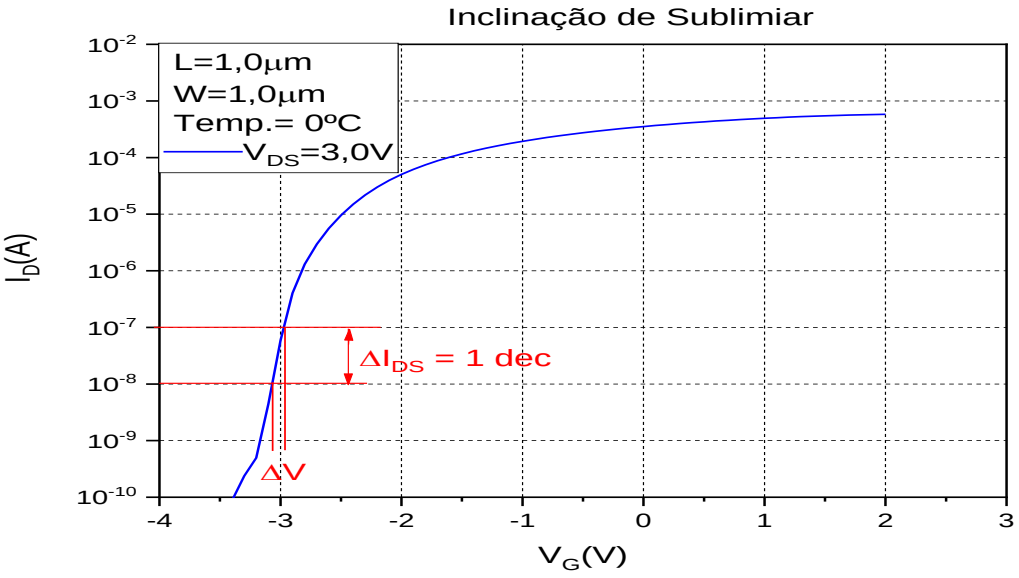
O DIBL é afetado pela temperatura devido às mudanças na densidade de portadores no canal do transistor. Um dos principais efeitos é o aumento da mobilidade eletrônica na região do canal com o aumento da temperatura. Isso significa que os elétrons podem se mover mais facilmente através do canal do transistor quando a temperatura é elevada, resultando em uma menor resistência de canal. Quando a resistência de canal diminui, o efeito de modulação de canal causado pelo sinal de dreno é mais forte, o que leva a uma diminuição na barreira de potencial do canal e, consequentemente, a um aumento no DIBL.

Além disso, o aumento da temperatura pode levar a um aumento da densidade de portadores na região do canal, o que também pode contribuir para o aumento do DIBL.

5.5 Inclinação de Sublimiar (SS)

Inclinação de sublimiar (SS) é uma das formas de medir a resposta de um dispositivo, principalmente no que diz respeito à sua velocidade de chaveamento. Ao aplicar uma tensão de porta na região de sublimiar, há uma variação da corrente de dreno. A inclinação de sublimiar é a variação da tensão de porta necessária para aumentar em uma década a corrente de dreno (COLINGE e COLINGE, 2005) , como pode ser observado na Figura 53:

Figura 53 - Gráfico Inclinação de Sublimiar do dispositivo HEMT.



Fonte: Adaptado do Colinge e Colinge (2005).

Os valores de sublimiar (SS), foram calculados através dos gráficos da corrente de dreno pela tensão de porta (I_D x V_G), dos dispositivos AlGaN/GaN, nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00V apresentados na Tabela 9:

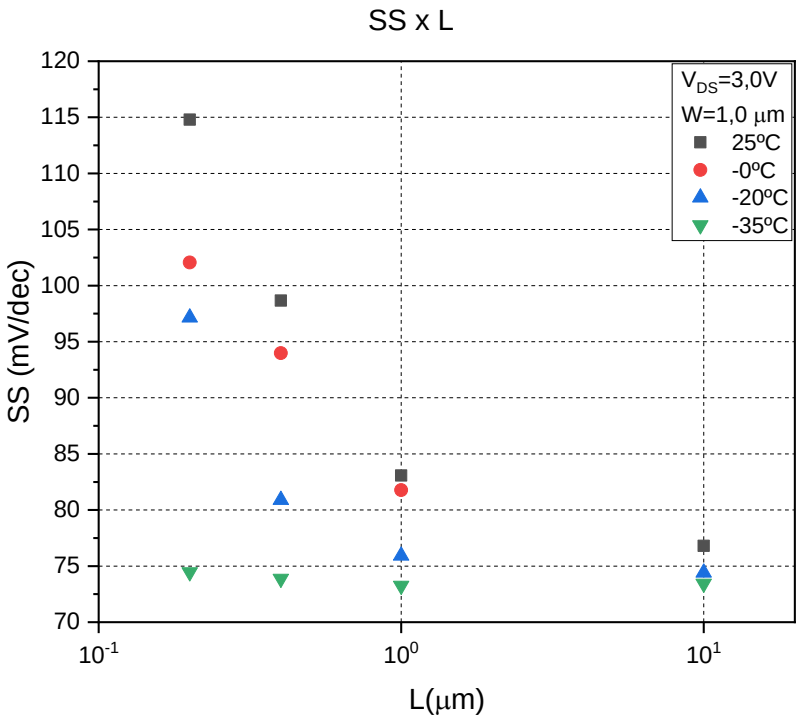
Tabela 9 - Valores de Sublimiar (SS) do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.

Dispositivo	**L (µm)**	**W (µm)**	***SS(mV/dec)* 25ºC**	***SS(mV/dec)* 0ºC**	***SS(mV/dec)* - 20ºC**	***SS(mV/dec)* -35ºC**
1	0,20	1,00	114,79	102,06	97,15	74,46
4	0,40	1,00	98,67	93,98	80,90	73,87
7	1,00	1,00	83,08	81,77	75,92	73,25
10	10,00	1,00	76,80		74,42	73,44
2	0,20	10,00	115,65	108,57	103,57	102,86
5	0,40	10,00	112,81	102,53	94,60	
8	1,00	10,00	108,33	97,18	89,07	84,53
11	10,00	10,00	106,67	94,59	79,48	77,51
3	0,20	100,00	155,57	144,06	125,15	93,98
6	0,40	100,00	135,35	125,46	109,09	85,39
9	1,00	100,00	121,37		97,44	80,77
12	10,00	100,00	99,24		86,67	79,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

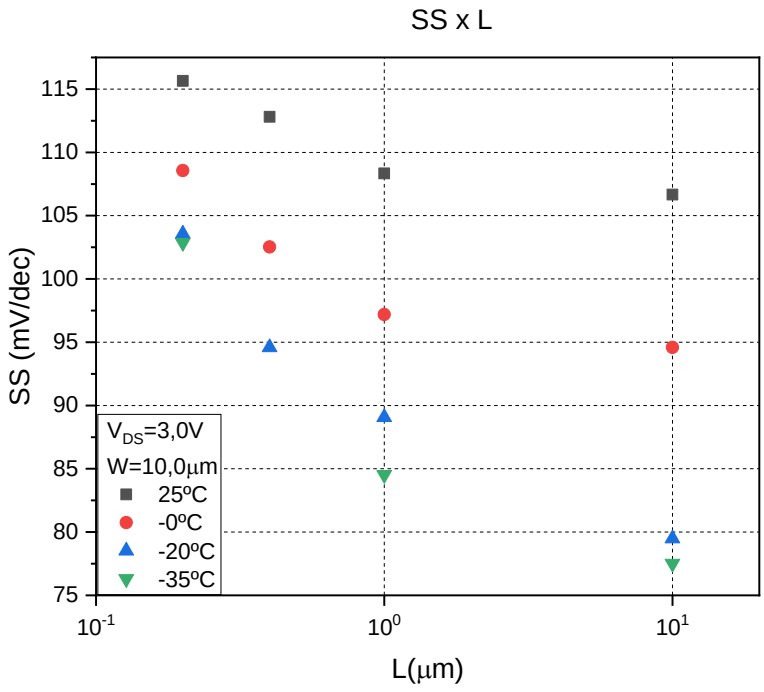
A partir dos resultados obtidos na Tabela 9 foram elaborados os gráficos do valor de sublimiar(SS) pelo comprimento do canal(L), com o comprimento do canal variando entre, L= 0,2, 0,4, 1,0 e 10,0µm. Os gráficos estão apresentados abaixo sendo que, na Figura 54 com W = 1,0µm, Figura 55 com W = 10,0µm e Figura 56 com W = 100,0µm:

Figura 54 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=1μm).



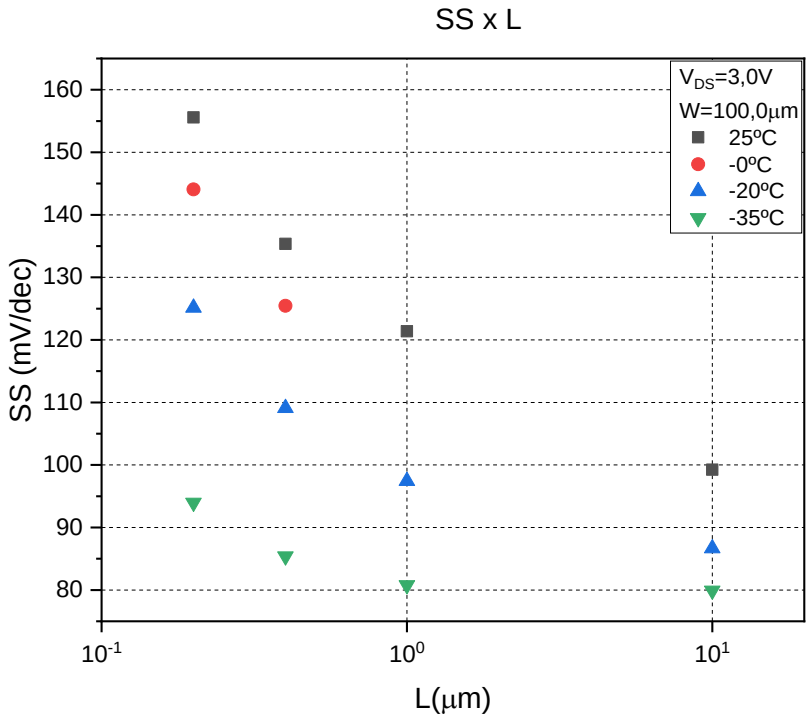
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=10μm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Gráfico Inclinação de Sublimiar x L do HEMT (W=100μm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos da inclinação de sublimiar pelo comprimento do canal (SS x L), dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para V_{DS}=3,00V, observamos que o comprimento do canal afeta a inclinação de sublimiar, pois quanto maior o comprimento do canal, maior será a resistência elétrica no canal e maior será a tensão necessária para ativar o dispositivo. Isso pode levar a valores de inclinação de sublimiar (SS) mais altos. A temperatura também influencia a inclinação de sublimiar (SS). A variação que foi observada nos valores de inclinação de sublimiar (SS) está relacionada com a menor mobilidade dos elétrons e velocidade de saturação, conforme a temperatura aumenta. A temperatura pode afetar a mobilidade dos elétrons no canal do HEMT, que é uma das principais propriedades que determina o desempenho do dispositivo. À medida que a temperatura aumenta, os elétrons podem adquirir mais energia térmica, o que pode resultar em um aumento na dispersão de elétrons, diminuindo assim a mobilidade. Como resultado, a inclinação de sublimação do transistor HEMT pode ser afetada. À medida que a temperatura aumenta, a geração de portadores de carga aumenta, o que pode

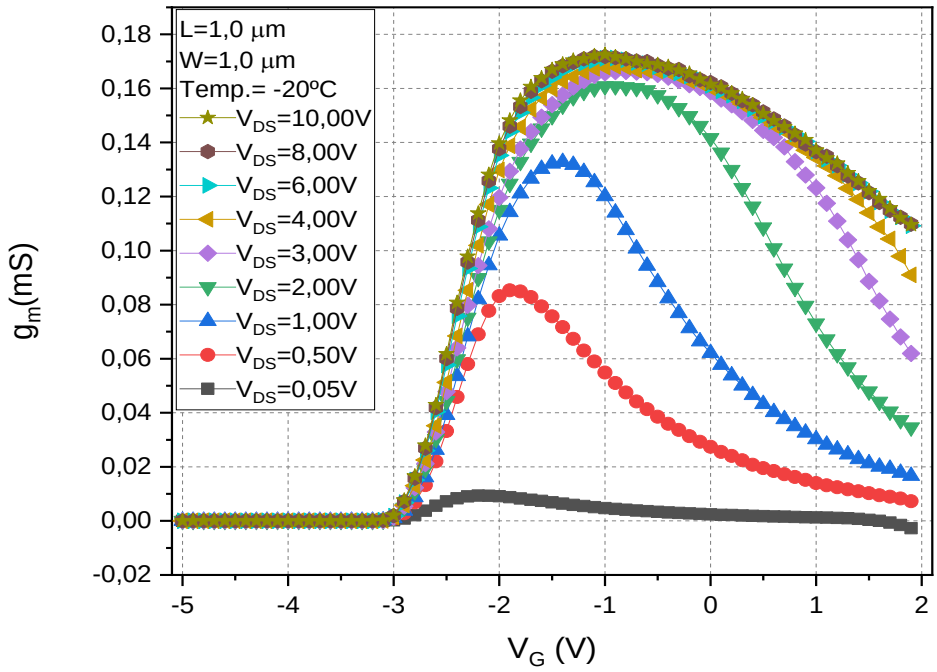
aumentar a inclinação de sublimiar (SS). Isso ocorre porque, a uma temperatura mais alta, uma tensão mais alta é necessária para ativar o dispositivo.

Em geral, a inclinação de sublimiar (SS) é afetada por uma variedade de fatores, incluindo a geometria do dispositivo, o material usado na construção e outros parâmetros elétricos. Portanto, a relação exata entre a inclinação de sublimiar (SS), o comprimento do canal e a temperatura pode variar dependendo do dispositivo específico em questão.

5.6 Transcondutância (g_m)

Após uma triagem preliminar iniciamos os cálculos e características elétricas do dispositivos. Na sequência foram produzidos os gráficos corrente de dreno por tensão de porta (I_D x V_G), podemos fazer o cálculo da primeira derivada da curva onde obtemos a curva de transcondutância (g_m) do dispositivo AlGaN/GaN HEMT. Na Figura 57, temos um exemplo dos inúmeros gráficos produzidos da transcondutância nas temperaturas de 25º, 0º,-20º e -35ºC.

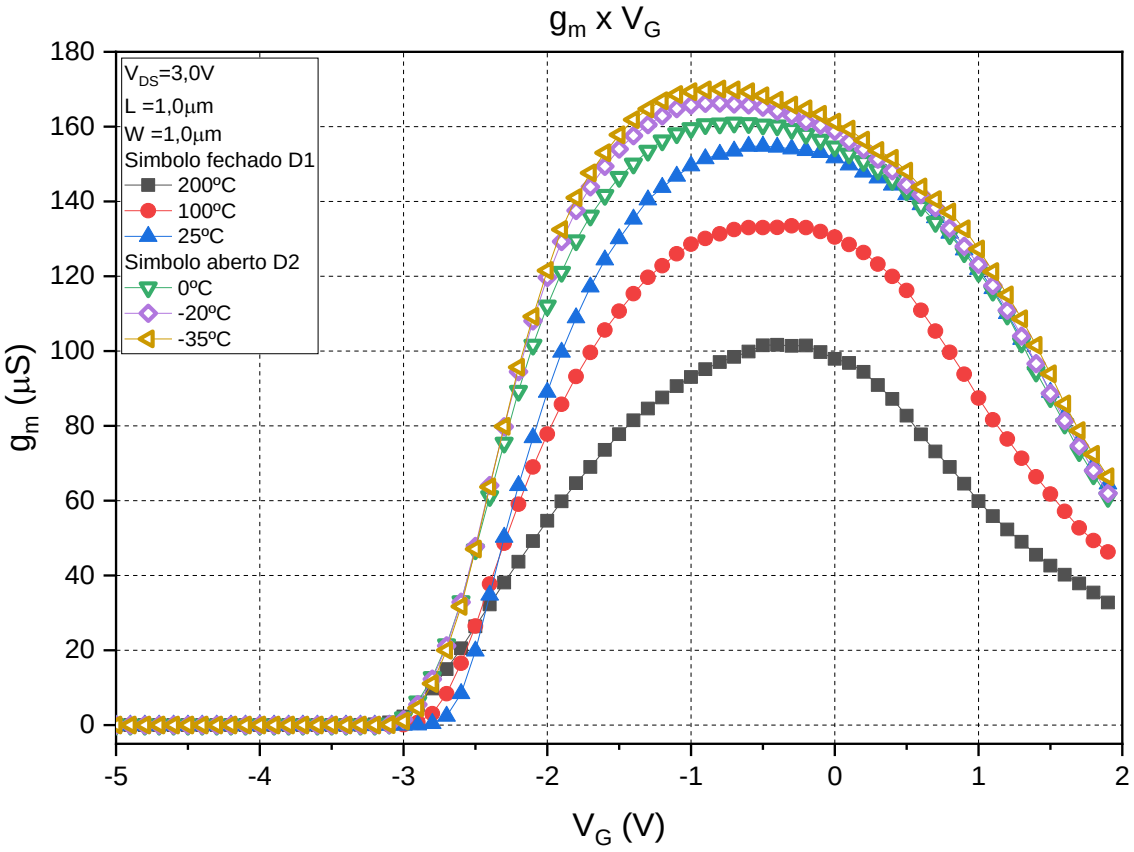
Figura 57 - Exemplo de gráfico da transcondutância do HEMT a -20ºC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram obtidos os valores da transcondutância para os dispositivos similares (D1 e D2) com L = 1μm e W = 1μm dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT nas temperaturas de 200º, 100º, 25º, 0º, -20º e -35ºC e para V_{DS} = 0,05V e V_{DS} = 3,00V, mostrados na Figura 58:

Figura 58 - Transcondutância x V_G de 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos da transcondutância dos dispositivos AlGaN/GaN, extraímos o valor da máxima transcondutância, através da segunda derivada da curva (I_D x V_G) nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00V apresentados na Tabela 10 e para valores de V_{DS} = 0,05V são os valores apresentados na Tabela 11:

Tabela 10 - Valores de g_m max do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.

V_{DS}=3,00V	**L (µm)**	**W (µm)**	***g_m max* 25ºC**	***g_m max* 0ºC**	***g_m max* -20ºC**	***g_m max* -35ºC**
1	0,20	1,00	1,85E-04	1,94E-04	1,99E-04	2,06E-04
4	0,40	1,00	1,76E-04	1,83E-04	1,88E-04	1,92E-04
7	1,00	1,00	1,61E-04	1,63E 4	1,66E-04	1,70E-04
10	10,00	1,00	8,36E-05	8,66E-05	9,34E-05	9,84E-05
2	0,20	10,00	3,35E-03	3,43E-03	3,58E-03	3,62E-03
5	0,40	10,00	2,72E-03	3,37E-03	1,66E-04	
8	1,00	10,00	2,37E-03	2,71E-03	2,92E-03	3,00E-03
11	10,00	10,00	5,68E-04	6,44E-04	7,15E-04	8,17E-04
3	0,20	100,00	3,12E-02	3,29E-02	3,33E-02	3,36E-02
6	0,40	100,00	2,92E-02	2,95E-02	3,15E-02	3,21E-02
9	1,00	100,00	2,21E-02		2,32E-02	2,35E-02
12	10,00	100,00	4,38E-03		4,35E-03	4,35E-03

Fonte: Elaborado pelo autor.

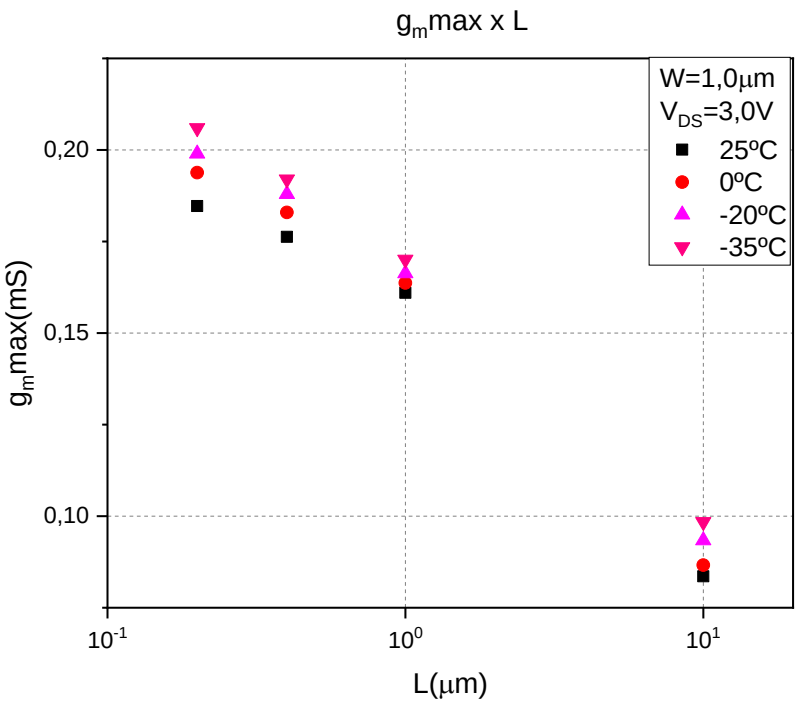
Tabela 11 - Valores de g_m max do transistor HEMT com V_{DS}=0,05V.

V_{DS}=0,05V	**L (µm)**	**W (µm)**	***g_m max* 25ºC**	***g_m max* 0ºC**	***g_m max* -20ºC**	***g_m max* -35ºC**
1	0,20	1,00	1,41E-05	1,63E-05	1,73E-05	1,73E-05
4	0,40	1,00	1,24E-05	1,34E-05	1,45E-05	1,58E-05
7	1,00	1,00	7,94E-06	8,41E-06	8,59E-06	8,87E-06
10	10,00	1,00	2,03E-06		2,06E-06	
2	0,20	10,00	2,77E-04	2,88E-04	2,88E-04	2,98E-04
5	0,40	10,00	1,94E-04	1,88E-04	1,95E-04	
8	1,00	10,00	1,28E-04	1,41E-04	1,70E-04	1,79E-04
11	10,00	10,00	3,59E-05	3,38E-05	3,34E-05	4,09E-05
3	0,20	100,00	2,20E-03	2,86E-03	2,87E-03	0,00E+00
6	0,40	100,00	1,94E-03	1,96E-03	1,98E-03	2,01E-03
9	1,00	100,00	1,16E-03	1,37E-03	1,53E-03	
12	10,00	100,00	3,58E-04		8,52E-05	

Fonte: Elaborado pelo autor.

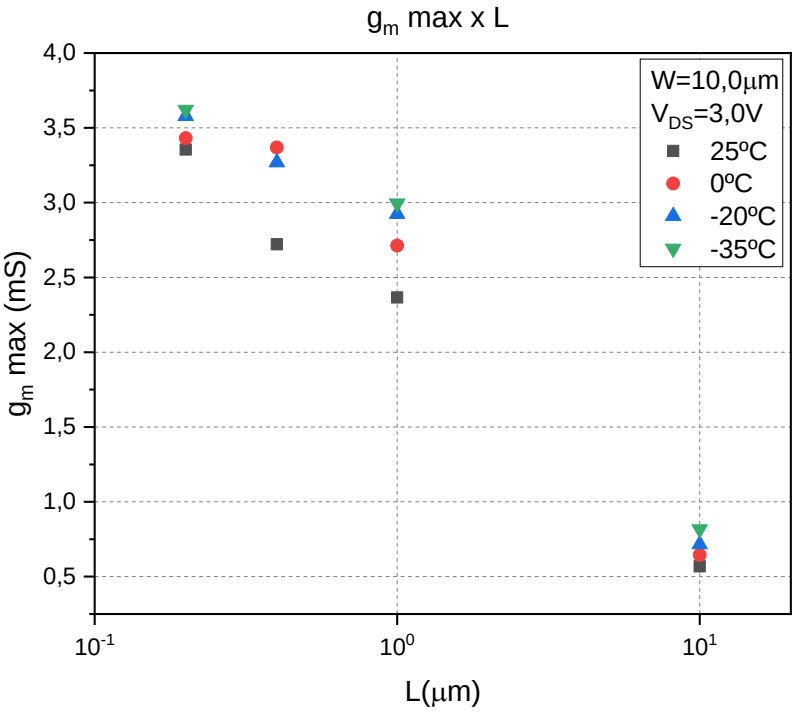
O passo seguinte foi produzir os gráficos da transcondutância máxima x L ($g_m$max x L) para W = 1,0, 10,0 e 100,0µm e V_{DS} = 3,0V, que são apresentados nas Figura 59, Figura 60 e Figura 61:

Figura 59 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=1,0µm e V_{DS}=3,0V.



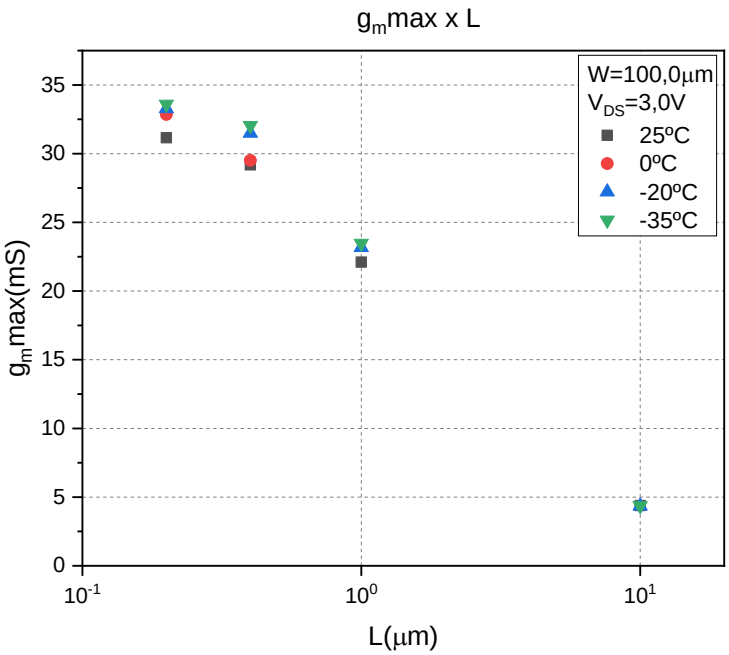
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=10,0µm e V_{DS}=3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

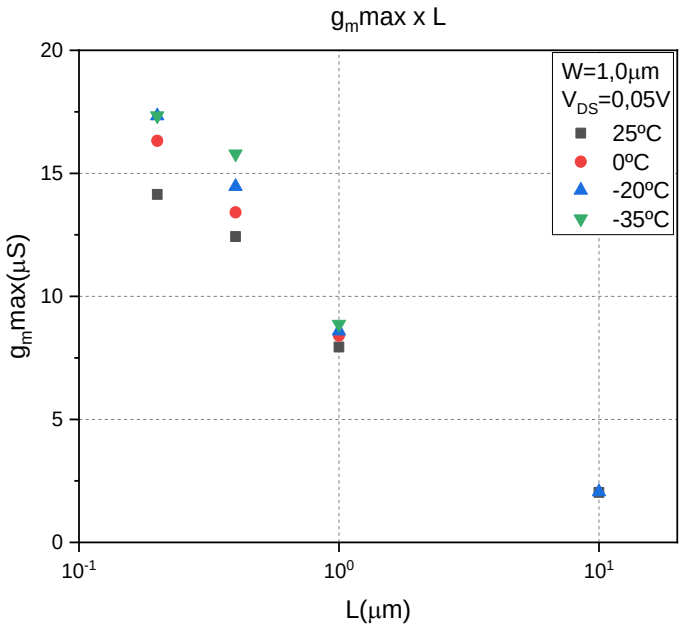
Figura 61 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=100,0µm e V_{DS}=3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

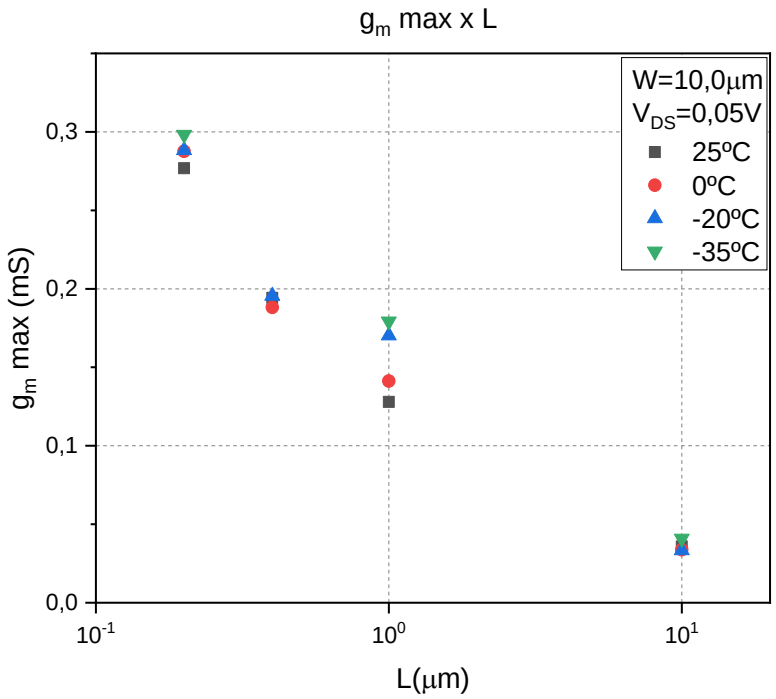
Os gráficos da transcondutância máxima x L ($g_m$max x L) para W = 1,0, 10,0 e 100,0µm e V_{DS} = 0,05 V que são apresentados nas Figura 62, Figura 63 e Figura 64:

Figura 62 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=1,0µm e V_{DS}=0,05V.



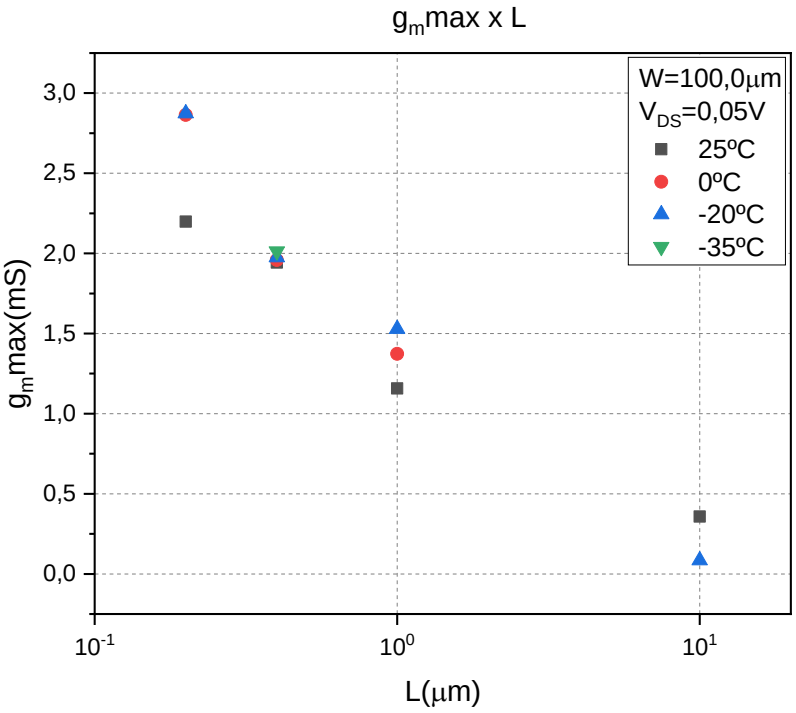
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=10,0µm e V_{DS}=0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 - Gráfico $g_m$max x L do HEMT W=100,0µm e V_{DS}=0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos da transcondutância máxima pelo comprimento do canal, dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT, nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00V e V_{DS} = 0,05V, pudemos observar que a transcondutância aumenta quando a temperatura abaixa e que a transcondutância máxima diminui quando o comprimento do canal(L) aumenta. A transcondutância máxima de um transistor AlGaN/GaN HEMT depende principalmente do comprimento do canal e da temperatura. A transcondutância máxima é a máxima variação de corrente de dreno em função da variação da tensão de porta do dispositivo.

A transcondutância máxima é proporcional à densidade de portadores de carga no canal e ao fator de ganho de transcondutância, que é afetado pelo comprimento do canal e pela temperatura. O comprimento do canal afeta a transcondutância máxima porque quanto mais curto o canal, maior é a densidade de portadores de carga que pode ser alcançada. Isso ocorre porque um canal mais curto permite que mais elétrons se acumulem na região de canal do dispositivo, aumentando a densidade de portadores de carga. Como resultado, um HEMT com um canal mais curto geralmente terá uma transcondutância máxima mais alta do que um dispositivo com um canal mais longo.

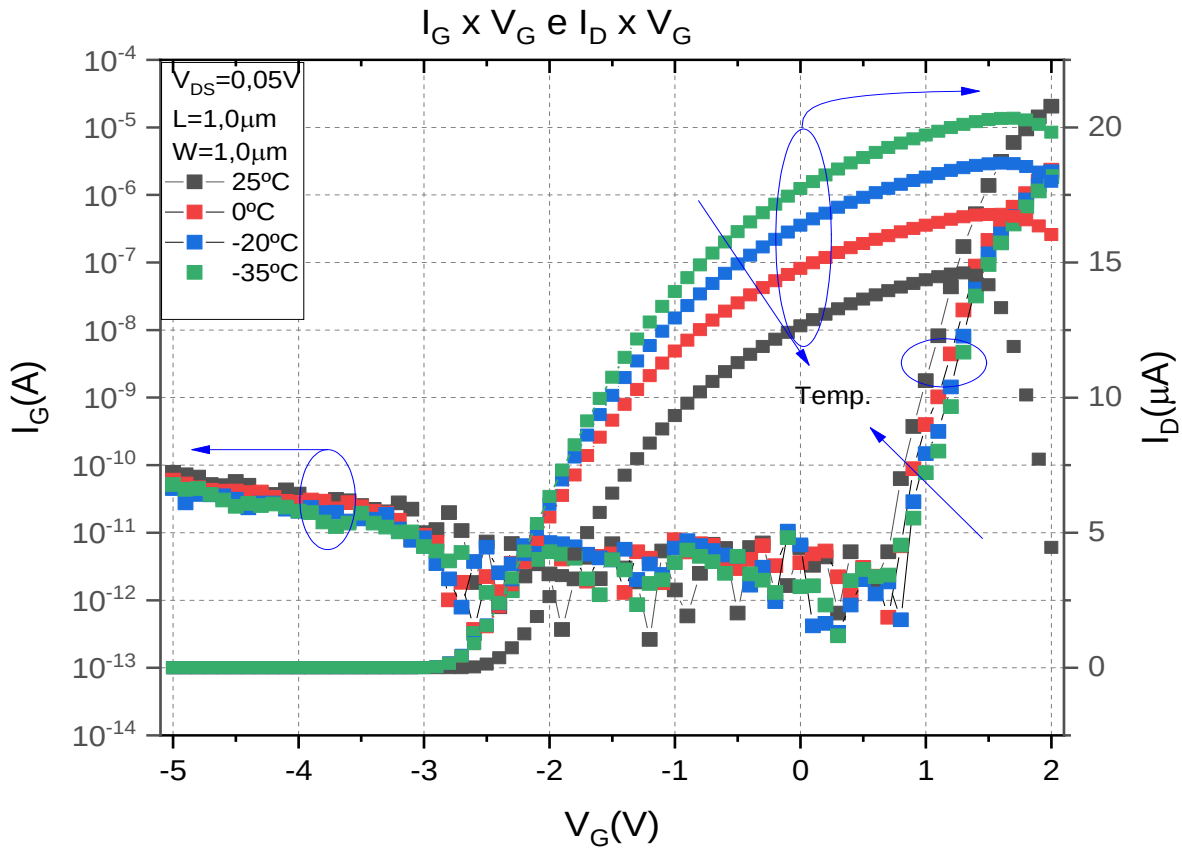
A temperatura também afeta a transcondutância máxima, pois a mobilidade dos elétrons no canal diminui com o aumento da temperatura. Isso pode levar a uma diminuição da densidade de portadores de carga no canal, o que, por sua vez, reduz a transcondutância máxima do dispositivo. (BERGAMIM, PARVAIS, *et al.*, 2021)

5.7 Corrente de Porta (I_G)

A corrente de porta é um fenômeno não desejado, uma vez que idealmente a corrente entre fonte e dreno seria controlada apenas pela tensão de porta, e quando ocorre o aparecimento desta corrente que pode indicar a degradação do dispositivo AlGaN/GaN HEMT. O tempo necessário para observar a degradação tem uma forte dependência com a tensão utilizada. Além disso a degradação da porta tem uma fraca dependência da temperatura (MARCON, KAUERAUF, *et al.*, 2010).

Através dos gráficos de I_G x V_G e I_D x V_G, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para V_{DS} = 0,05V, mostrado na Figura 65, constamos que quanto maior a temperatura, menor o valor da corrente de dreno (I_D) e maior a corrente de porta (I_G).

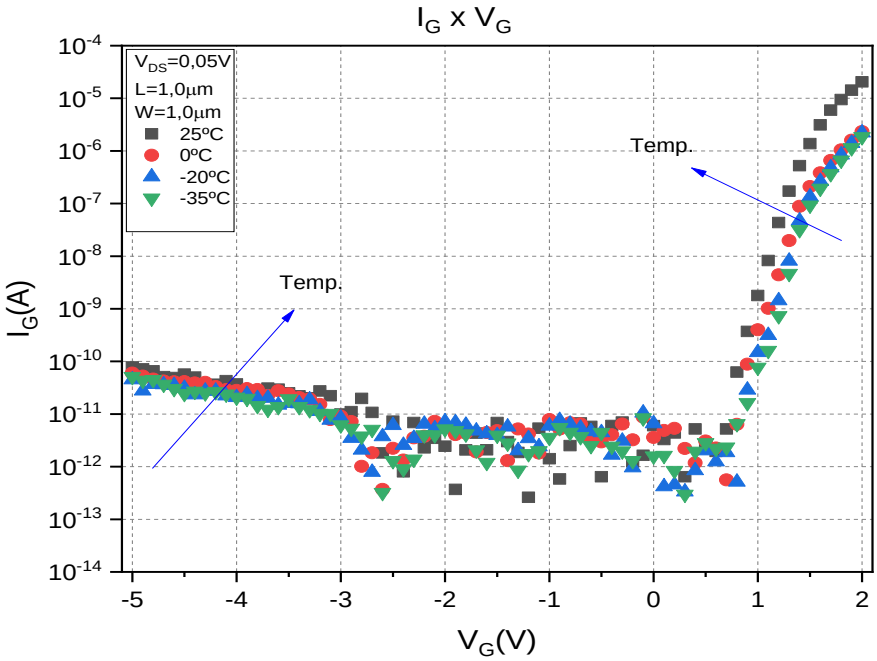
Figura 65 - Gráfico I_D x V_G e I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 0,05V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

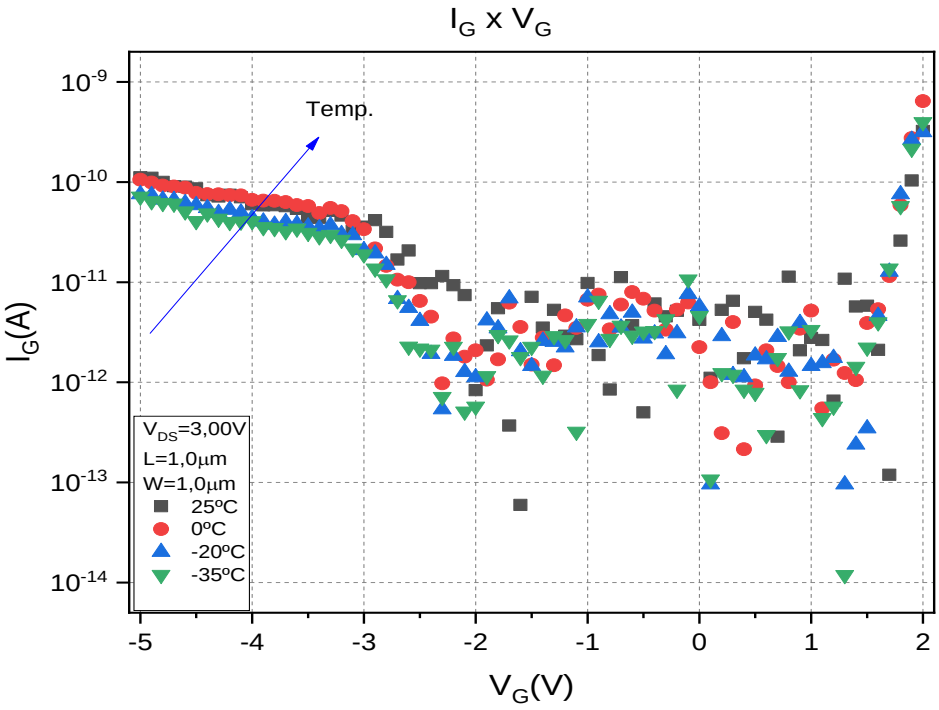
Através dos gráficos de I_G x V_G, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para V_{DS} = 0,05V, mostrado no gráfico da Figura 66, constamos que a corrente de porta (I_G), tem pouca dependência da temperatura para valores de tensão de porta (V_G) negativos e a temperatura tem uma relevância um pouco maior quando os valores da tensão de porta (V_G) se tornam positivos.

Figura 66 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 0,05V.



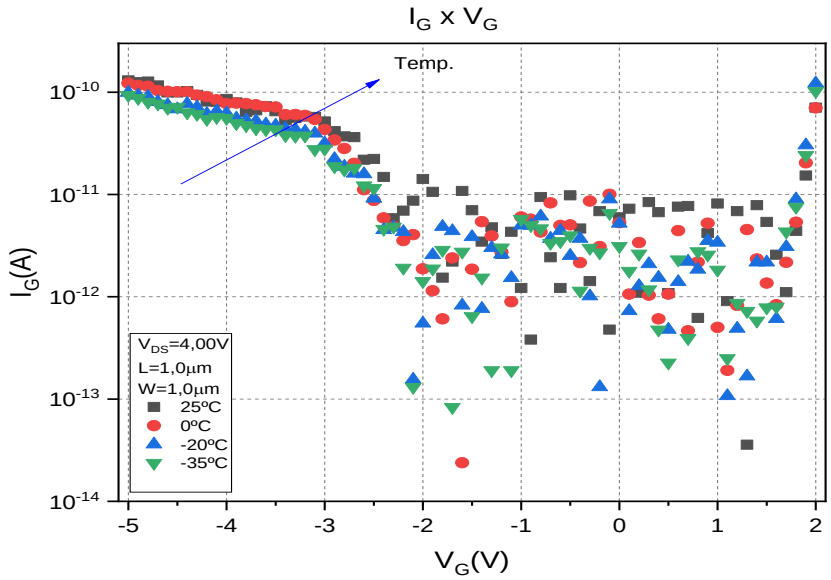
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

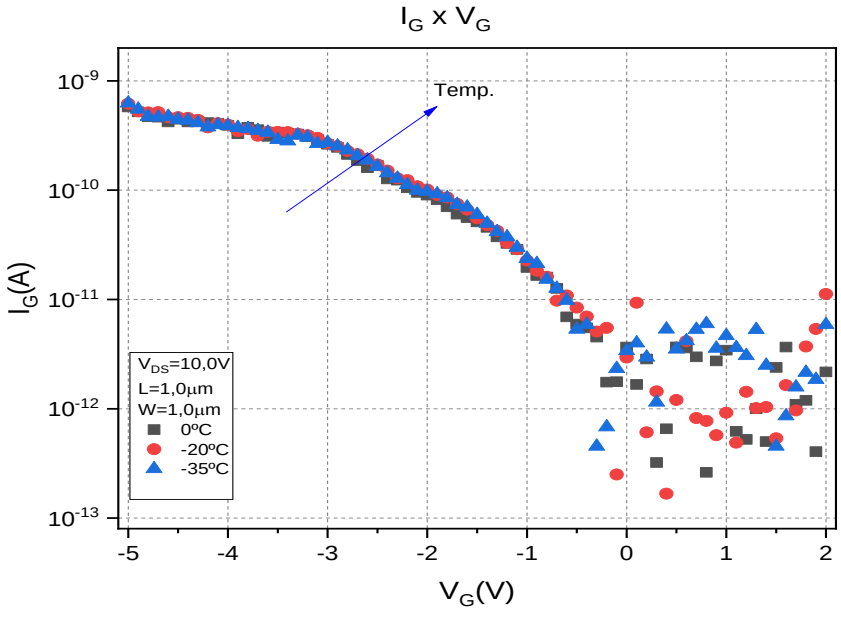
Figura 68 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS} = 4,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos gráficos de I_GxV_G, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para V_{DS} = 3,0 e 4,0V, mostrados nos gráficos, Figura 67 e Figura 68, constamos que a corrente de porta (I_G) tem pouca dependência da temperatura para valores de tensão de porta (V_G) negativos.

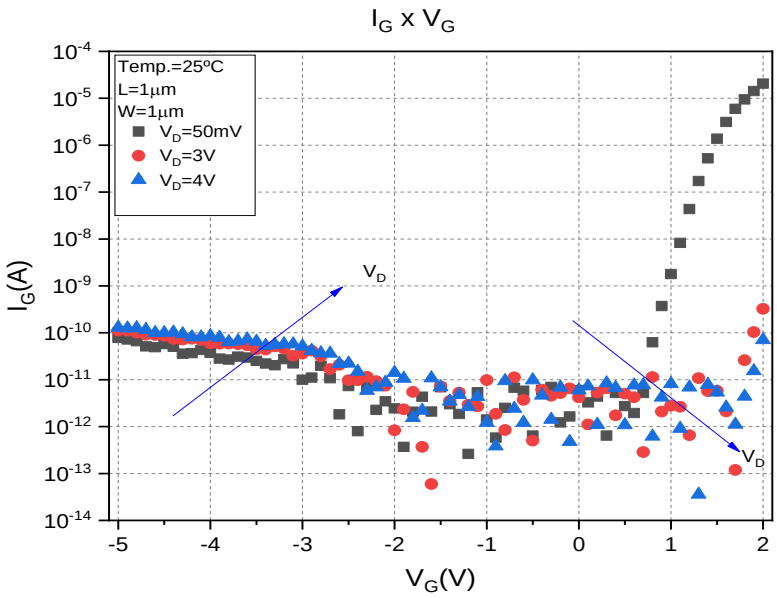
Figura 69 - Gráfico I_G x V_G do HEMT V_{DS}=10,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

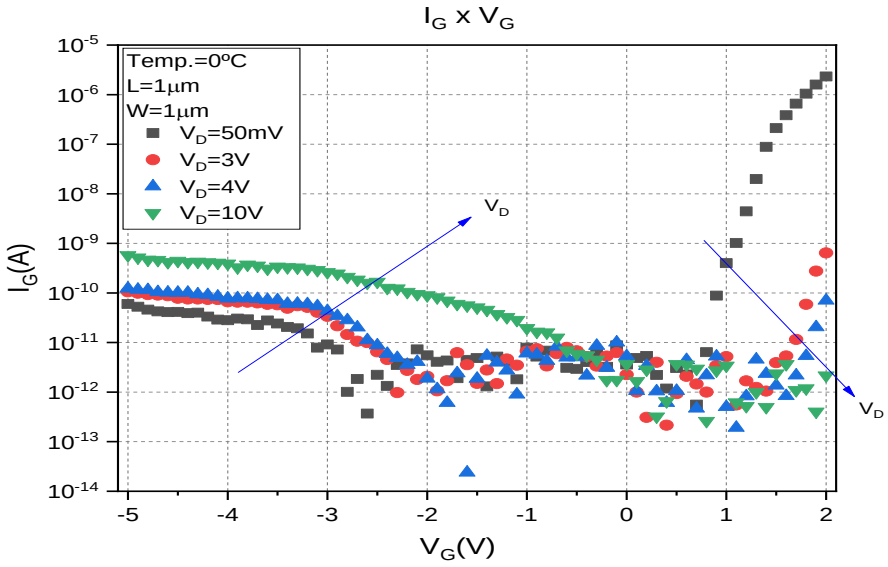
Através do gráfico de I_G x V_G, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, para V_{DS} = 10,00V, mostrado no gráfico da Figura 69, onde constamos que a a corrente de porta (I_G), praticamente não sofre influência da variação de temperatura.

Figura 70 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a 25ºC.



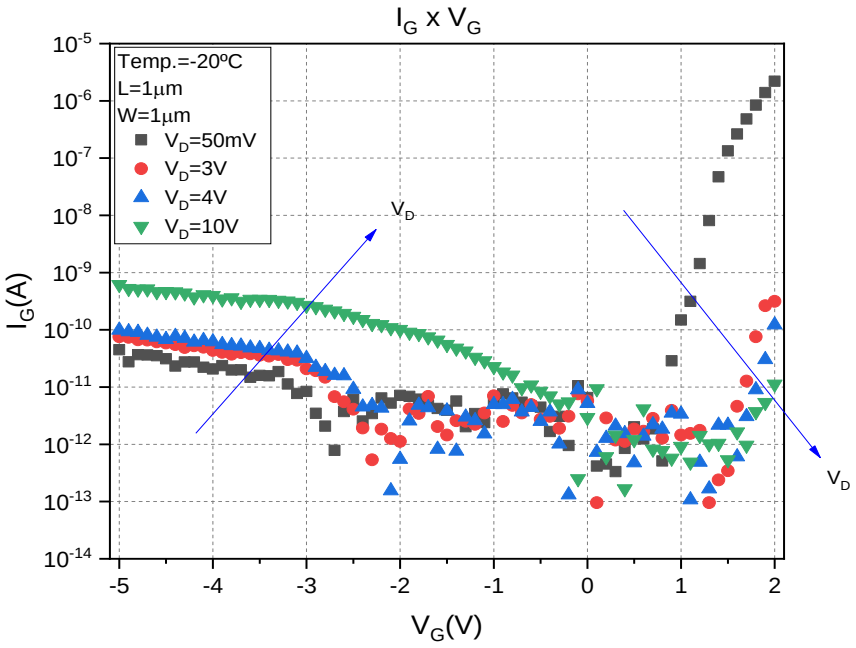
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a 0ºC.



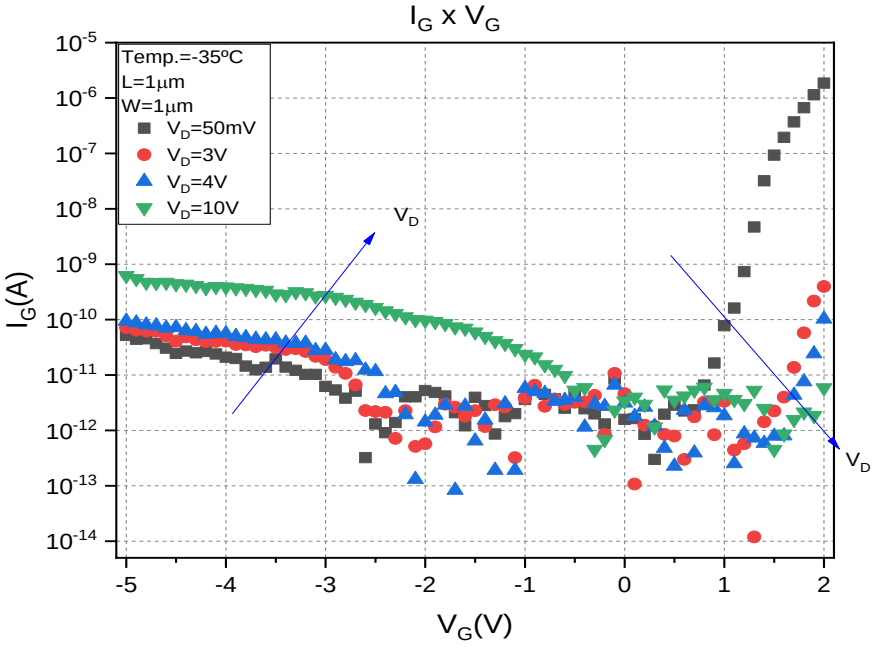
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a -20ºC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - Gráfico I_G x V_G do HEMT a -35ºC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

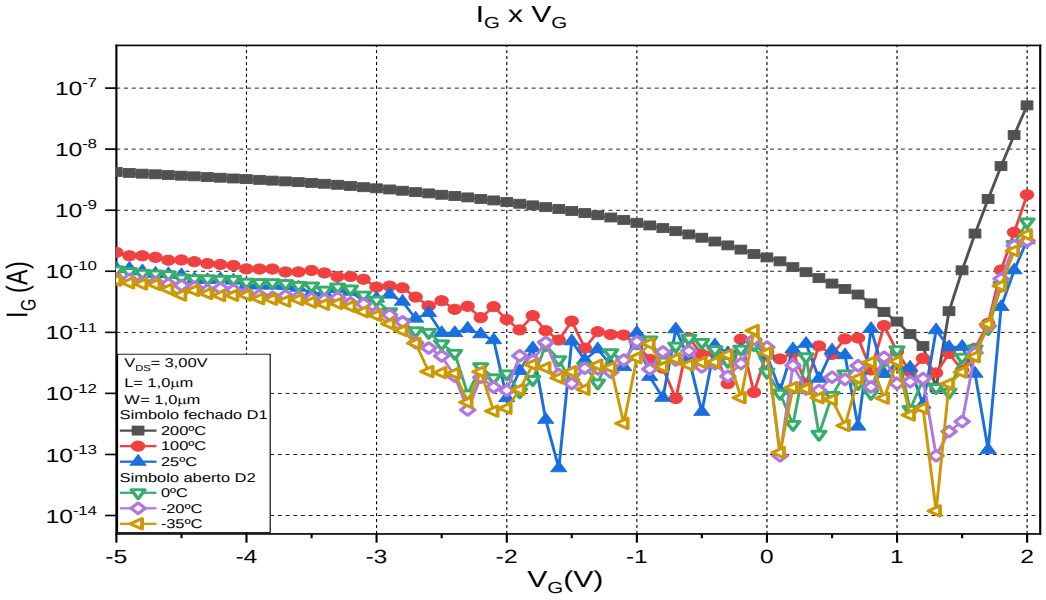
Os gráficos de I_G x V_G, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, com tensão de dreno (V_{DS}) entre 0,05 e 10,00V, mostrados nos gráficos da Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73, onde observamos que quando aumenta a polarização de dreno (V_D), a corrente de porta (I_G) diminui, isso para valores negativos de tensão de porta (V_G), quando e tensão de porta (V_G) se torna positiva essa tendência praticamente se inverte, demonstra pouca influência da variação de temperatura.

A corrente de porta em um transistor AlGaN/GaN HEMT é afetada pelo comprimento do canal e pela variação de temperatura devido às alterações na densidade de portadores de carga e na mobilidade dos elétrons no canal.

Observamos que o aumento do comprimento do canal no transistor AlGaN/GaN HEMT levou a uma diminuição na corrente de porta, pois a resistência do canal aumenta com o comprimento, o que leva a uma diminuição na mobilidade dos elétrons. Além disso, a variação da temperatura também afeta a mobilidade dos elétrons, levando a uma diminuição na corrente de porta em temperaturas mais altas.

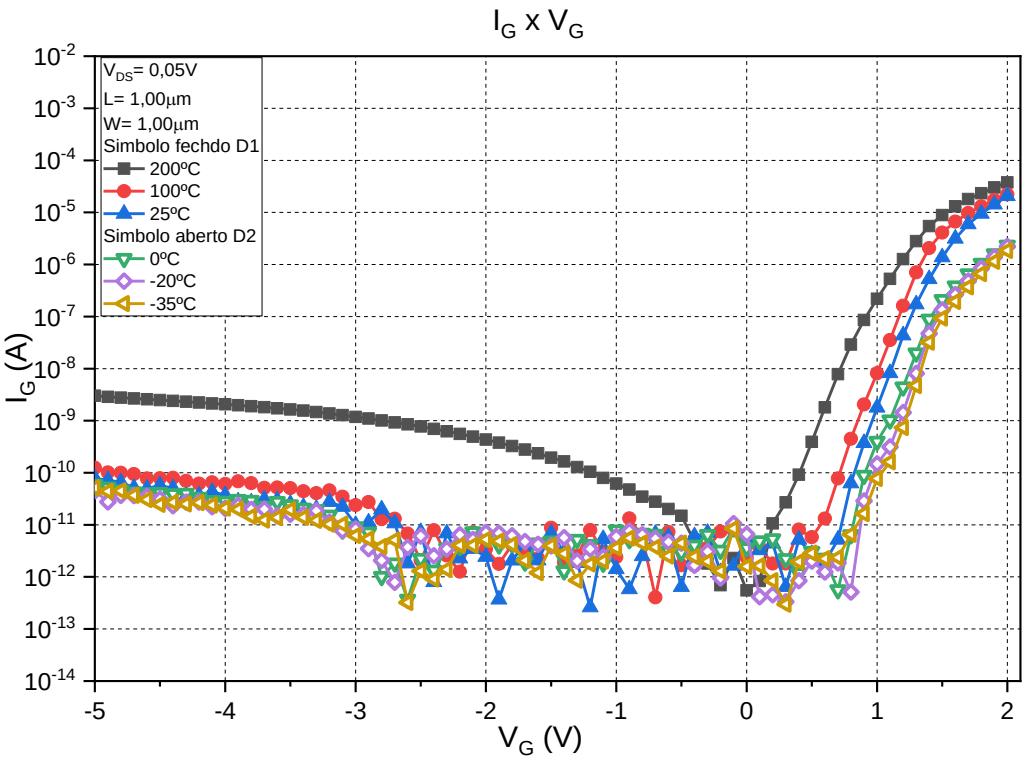
Através dos gráficos de I_G x V_G, dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT similares (D1 e D2) com L = 1μm e W = 1μm nas temperaturas de 200º, 100º, 25ºC, 0ºC, -20º e -35ºC e para V_{DS} = 3,00V e V_{DS} = 0,05V, mostrados nas Figura 74 e Figura 75:

Figura 74 - Gráfico I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2) V_{DS} = 3,00V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 - Gráfico I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2) V_{DS} = 0,05V.



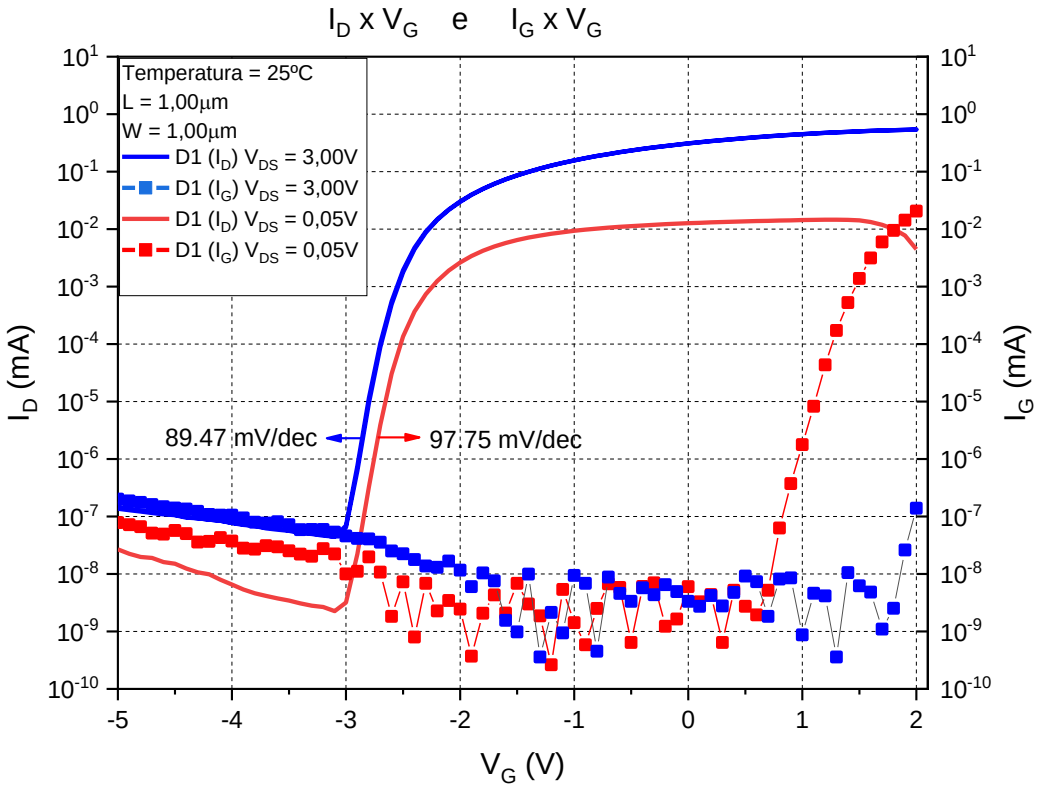
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando observamos os gráficos de I_G x V_G, dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT similares (D1 e D2) com L = 1µm e W = 1µm nas temperaturas de 200º, 100º, 25º, 0º, -20º e -35ºC e para V_{DS}=3,00V e V_{DS}=0,05V, podemos notar que a corrente de porta aumenta com o aumento da temperatura, devido a um aumento na densidade de portadores de carga na região da porta.

Outros fatores, como o envelhecimento do dispositivo e a degradação do desempenho, também podem afetar a corrente de porta com o tempo e a temperatura, com já observado anteriormente.

Através dos gráficos de I_D x V_G e I_G x V_G, dos dispositivos AlGaN/GaN HEMT similares (D1 e D2) com L = 1µm e W = 1µm na temperaturas de 25ºC com V_{DS} = 3,00V e V_{DS} = 0,05V, mostrados na Figura 76:

Figura 76 - Gráfico I_D x V_G e I_G x V_G 2 dispositivos HEMT similares (D1 e D2).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar que quando a temperatura foi mantida constante, e com o aumento da tensão de porta (V_G), que a corrente de dreno (I_D) aumenta até certo ponto e começa a diminuir justamente quando a corrente de porta (I_G) começa a aumentar.

5.8 Condutância de Saída (g_D)

A condutância de saída, é uma importante métrica de desempenho para um HEMT AlGaN/GaN, pois mede a capacidade do dispositivo em fornecer corrente para a carga externa, e é uma característica importante que afeta o desempenho do dispositivo em altas frequências.

Os valores de condutância de saída (g_D), foram calculados através dos gráficos da corrente de dreno pela tensão de dreno (I_DxV_D), dos dispositivos AlGaN/GaN, nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00 V apresentados na Tabela 12:

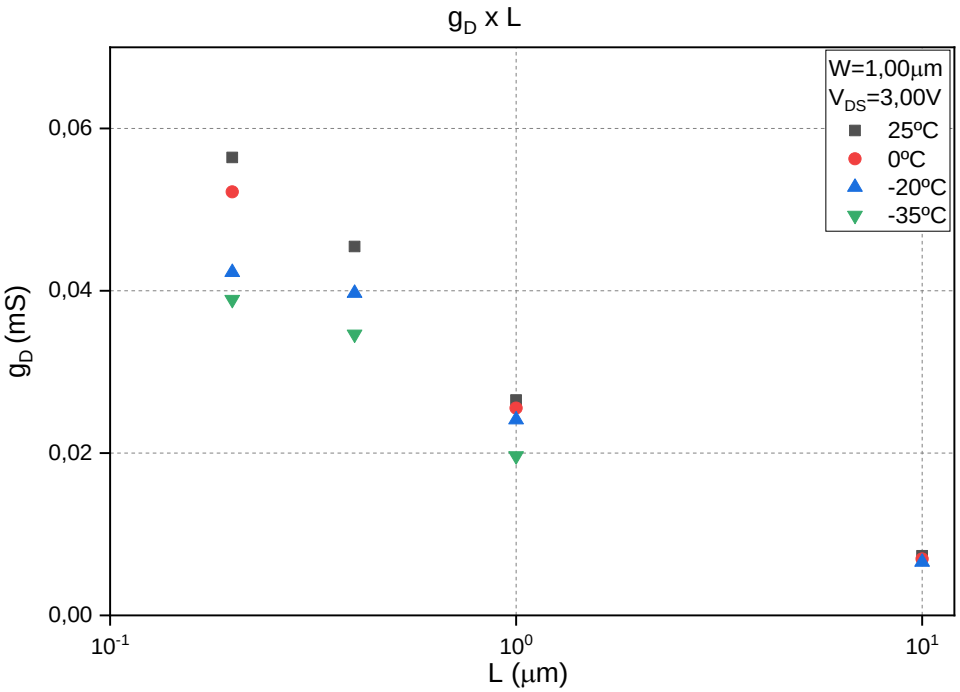
Tabela 12 - Valores de g_D do transistor HEMT com V_{DS} = 3,00V.

V_{DS}=3,00V	L (µm)	W (µm)	g_D 25ºC	g_D 0ºC	g_D -20ºC	g_D -35ºC
1	0,20	1,00	5,64E-05	5,22E-05	4,23E-05	3,89E-05
4	0,40	1,00	4,54E-05		3,97E-05	3,46E-05
7	1,00	1,00	2,65E-05	2,55E-05	2,41E-05	1,96E-05
10	10,00	1,00	7,35E-06	6,95E-06	6,58E-06	
2	0,20	10,00	4,50E-04	3,41E-04	2,81E-04	2,12E-04
5	0,40	10,00	3,29E-04		2,41E-04	
8	1,00	10,00	2,89E-04	2,25E-04	1,84E-04	
11	10,00	10,00	9,45E-05	9,39E-05	9,29E-05	9,18E-05
3	0,20	100,00	9,76E-04		6,36E-04	4,61E-04
6	0,40	100,00	6,44E-04		6,07E-04	
9	1,00	100,00	5,86E-04	5,62E-04	4,93E-04	4,38E-04
12	10,00	100,00	4,42E-04	3,32E-04	3,22E-04	

Fonte: Elaborado pelo autor.

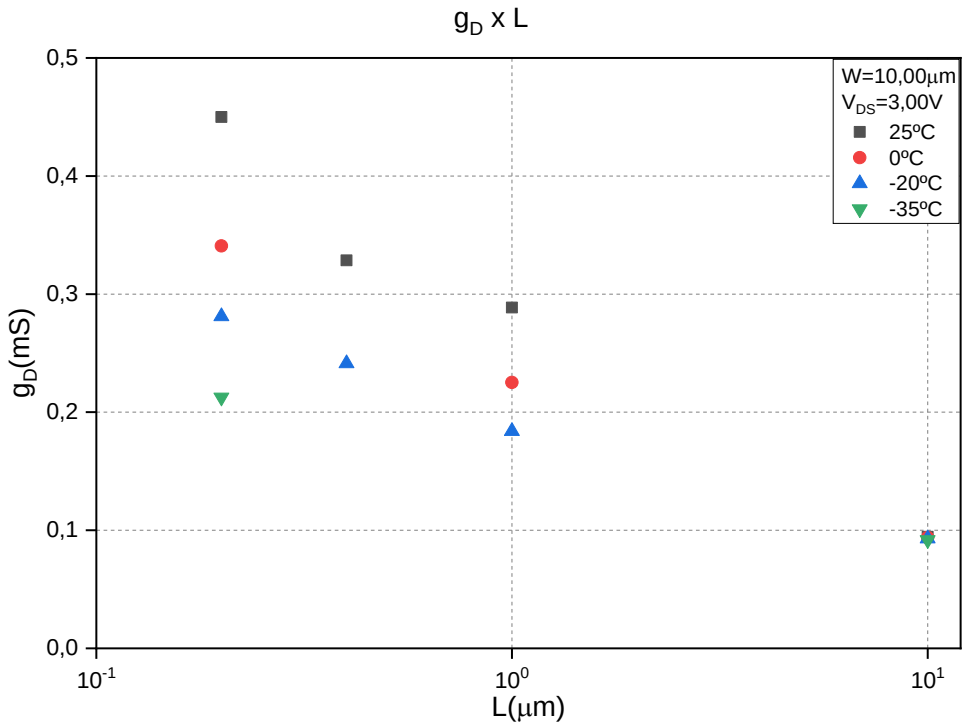
Os gráficos de g_D x L, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, com tensão de dreno (V_{DS}) de 3,00V, mostrados nos gráficos da Figura 77, Figura 78 e Figura 79, onde observamos que quando aumenta a condutância de saída de um AlGaN/GaN HEMT diminui à medida que o comprimento do canal L aumenta e condutância de saída aumenta com o aumento da temperatura.

Figura 77 - Gráfico g_D x L do HEMT W=1,0µm e V_{DS}=3,0V.



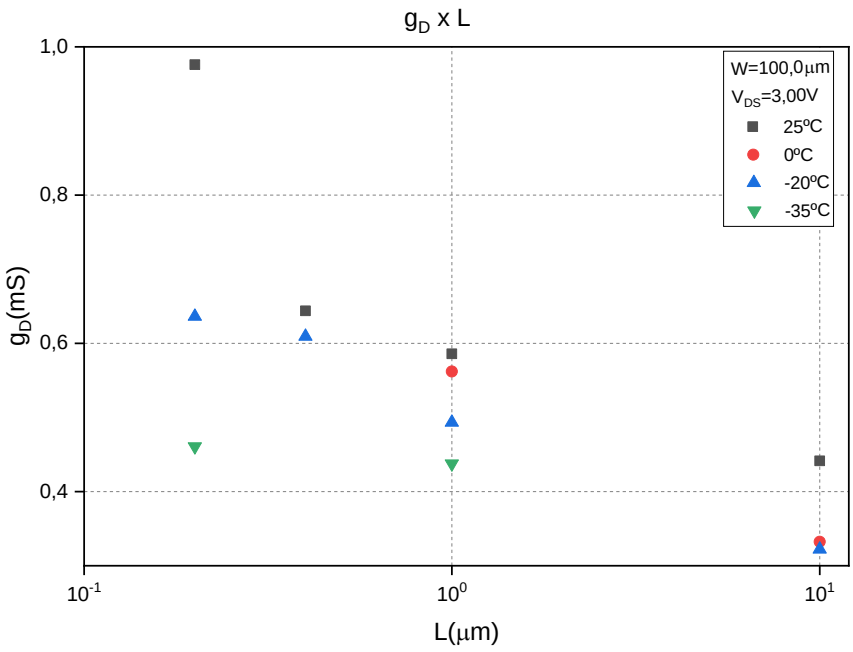
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 78 - Gráfico g_D x L do HEMT W = 10,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 79 - Gráfico g_D x L do HEMT W = 100,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A condutância de saída de um AlGaN/GaN HEMT diminui à medida que o comprimento do canal L aumenta. Isso ocorre porque um canal mais longo implica em uma maior resistência à passagem de corrente elétrica, o que reduz a capacidade do dispositivo de fornecer uma alta condutância de saída.

Com o aumento da temperatura, a mobilidade dos elétrons em um AlGaN/GaN HEMT geralmente aumenta. Isso ocorre porque a mobilidade dos elétrons é afetada pela temperatura e pode aumentar com o aumento da energia térmica dos elétrons. Como resultado, a condutividade dos elétrons aumenta, levando a um aumento na condutância de saída. A temperatura também pode afetar a densidade de portadores de carga em um de AlGaN/GaN HEMT. Com o aumento da temperatura, a densidade de portadores de carga, como elétrons e lacunas, pode aumentar devido a processos de geração térmica. Isso resulta em um aumento na condutância de saída do dispositivo. A temperatura também pode alterar a banda de energia do material semicondutor AlGaN/GaN. Com o aumento da temperatura, a banda de energia pode se modificar, resultando em mudanças nas propriedades de transporte dos elétrons. Isso pode levar a um aumento na condutância de saída do dispositivo.

5.9 Tensão Early (V_{EA})

Os gráficos de V_{EA} x L, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, com tensão de dreno (V_{DS}) de 3,00V, e tensão de porta (V_{GS}) de 0,80V mostrados nos gráficos da Figura 80, Figura 81 e Figura 82, onde observamos que a tensão Early de um AlGaN/GaN HEMT tende a aumentar à medida que o comprimento do canal aumenta e pode diminuir quando aumenta a temperatura.

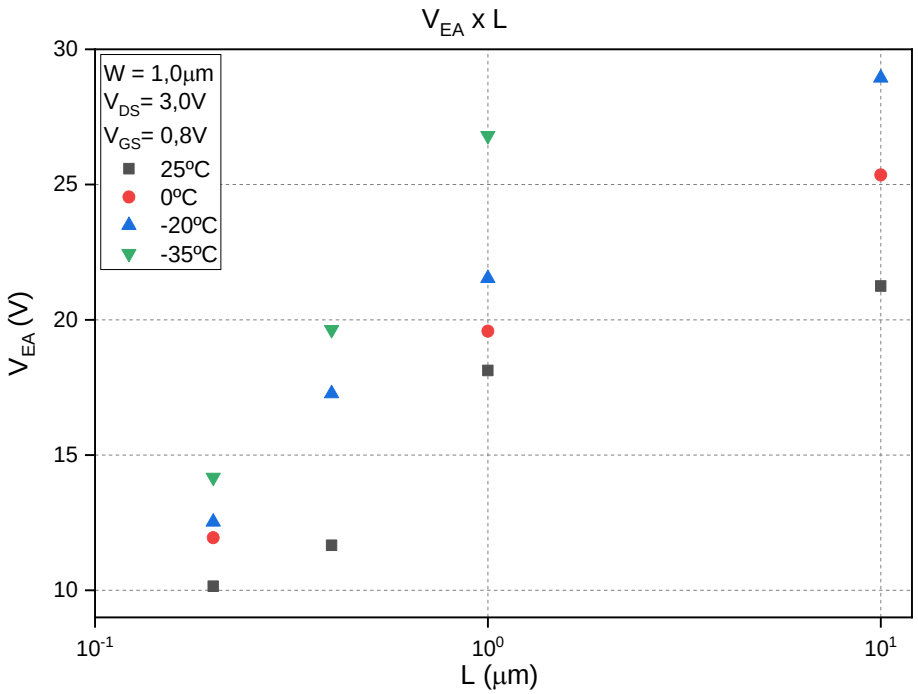
Os valores de tensão Early (V_{EA}), foram calculados através da corrente de dreno pela tensão e pela condutância de saída, dos dispositivos AlGaN/GaN, nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00V apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 - Valores de V_{EA} do transistor HEMT com V_{DS}=3,00V.

V_{DS}=3,00V	**L (µm)**	**W (µm)**	***V_{EA}* 25ºC**	***V_{EA}* 0ºC**	***V_{EA}* -20ºC**	***V_{EA}* -35ºC**
1	0,20	1,00	5,64E-05	5,22E-05	4,23E-05	3,89E-05
4	0,40	1,00	4,54E-05		3,97E-05	3,46E-05
7	1,00	1,00	2,65E-05	2,55E-05	2,41E-05	1,96E-05
10	10,00	1,00	7,35E-06	6,95E-06	6,58E-06	
2	0,20	10,00	4,50E-04	3,41E-04	2,81E-04	2,12E-04
5	0,40	10,00	3,29E-04		2,41E-04	
8	1,00	10,00	2,89E-04	2,25E-04	1,84E-04	
11	10,00	10,00	9,45E-05	9,39E-05	9,29E-05	9,18E-05
3	0,20	100,00	9,76E-04		6,36E-04	4,61E-04
6	0,40	100,00	6,44E-04		6,07E-04	
9	1,00	100,00	5,86E-04	5,62E-04	4,93E-04	4,38E-04
12	10,00	100,00	4,42E-04	3,32E-04	3,22E-04	

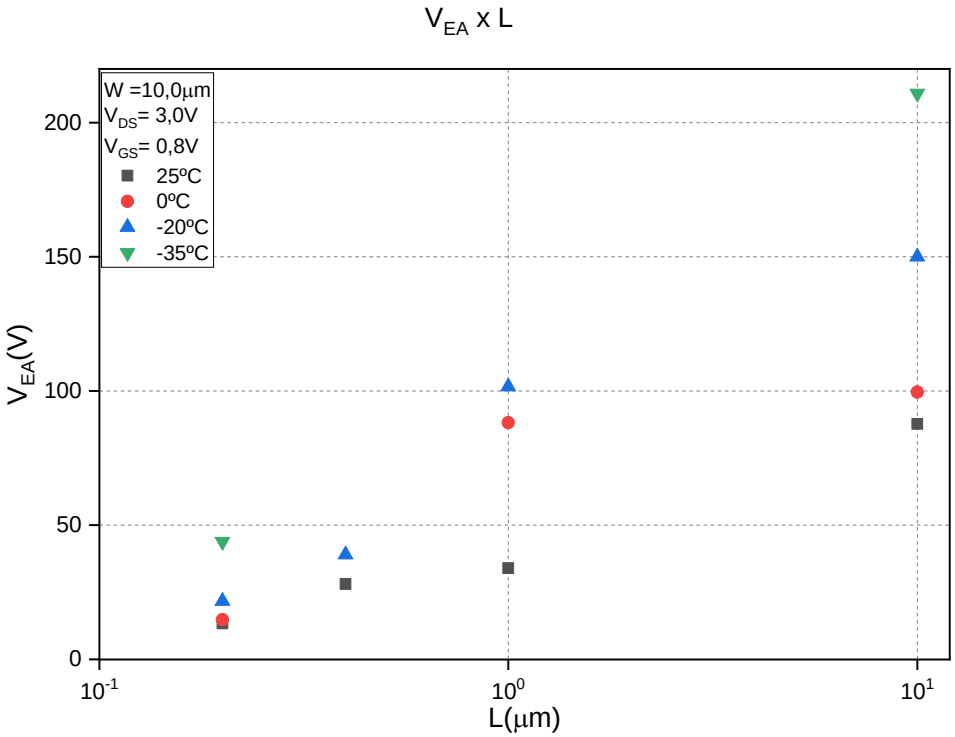
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 80 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 1,0µm e V_{DS} = 3,0V.



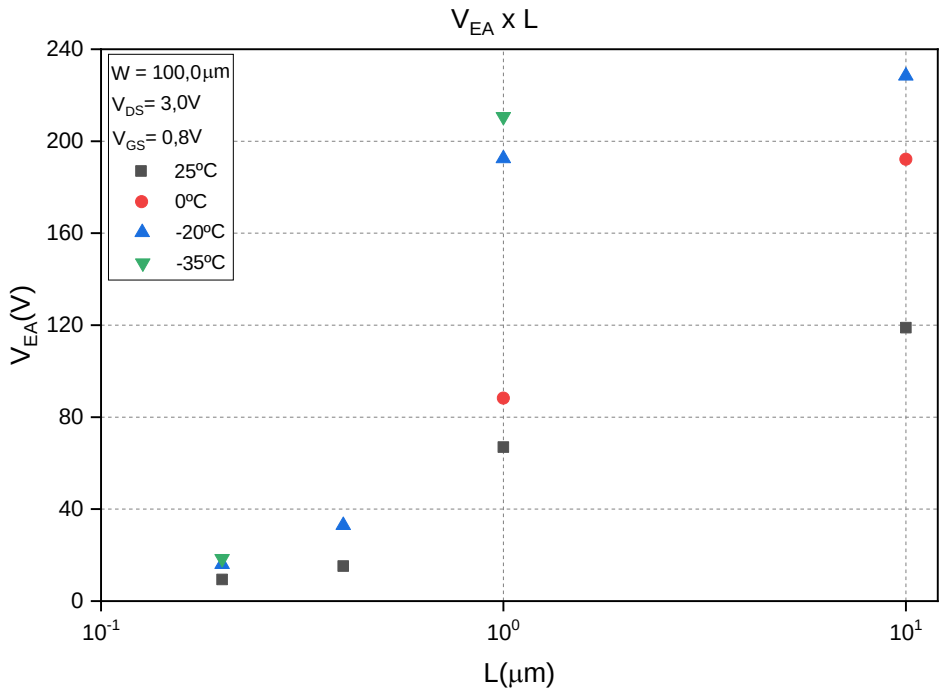
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 81 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 10,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 82 - Gráfico V_{EA} x L do HEMT W = 100,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tensão Early de um AlGaN/GaN HEMT tende a aumentar à medida que o comprimento do canal aumenta. Essa relação ocorre devido à presença de uma camada de AlGaN entre o GaN (nitreto de gálio) e o AlN (nitreto de alumínio) na estrutura do HEMT AlGaN/GaN. Essa camada de AlGaN atua como uma barreira de elétrons, permitindo que os elétrons se acumulem na interface GaN/AlGaN e formem um gás de elétrons bidimensional (2DEG) na superfície do GaN. A tensão Early, pode diminuir com o aumento da temperatura, devido ao aumento da mobilidade dos elétrons em temperaturas mais altas. No entanto, em outros casos, a tensão Early pode aumentar com a temperatura, devido a efeitos de aquecimento e à variação da densidade de portadores de carga na estrutura do dispositivo.

5.10 Ganho Intrínseco de Tensão (A_V)

O Ganho Intrínseco de Tensão (A_V) de um transistor AlGaN/GaN HEMT é uma medida da capacidade do dispositivo amplificar um sinal de entrada em sua saída. O A_V é influenciado por vários fatores, incluindo o comprimento do canal do transistor e a temperatura.

Os valores de ganho de tensão (AV), foram calculados através da transcondutância e pela condutância de saída, dos dispositivos AlGaN/GaN, nas quatro temperaturas estudas, para valores de V_{DS} = 3,00V apresentados na Tabela 14:

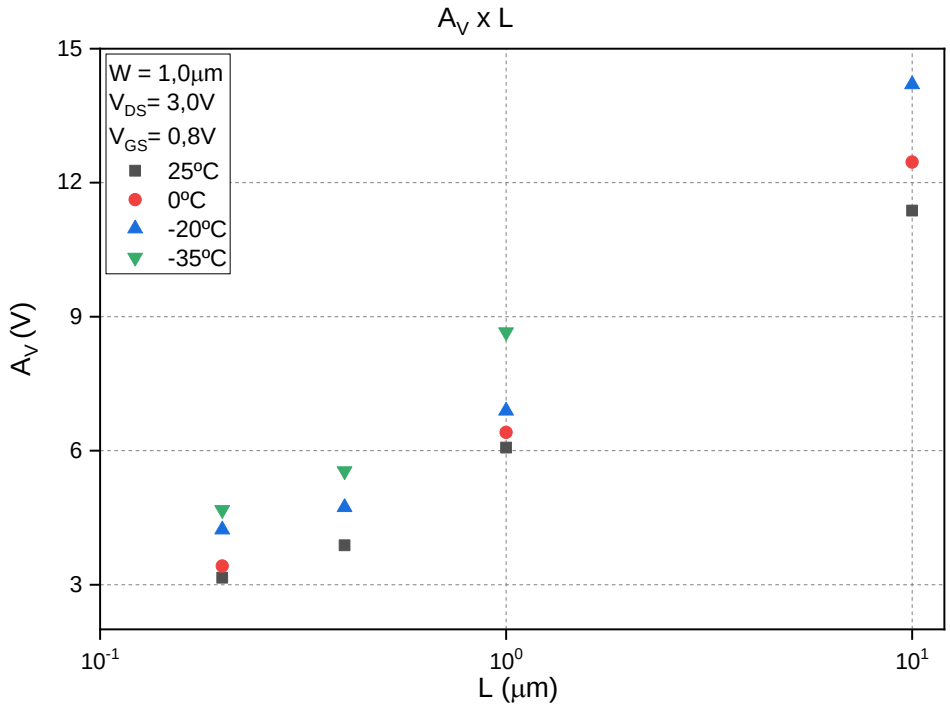
Tabela 14 - Valores de A_V do transistor HEMT com V_{DS} = 3,00V.

V_{DS}=3,00V	**L (µm)**	**W (µm)**	***A_V* 25ºC**	***A_V* 0ºC**	***A_V* -20ºC**	***A_V* -35ºC**
1	0,20	1,00	3,155	3,418	4,232	4,674
4	0,40	1,00	3,879		4,733	5,543
7	1,00	1,00	6,070	6,409	6,895	8,655
10	10,00	1,00	11,373	12,460	14,198	
2	0,20	10,00	3,041	5,114	6,017	6,888
5	0,40	10,00	8,283		13,413	
8	1,00	10,00	8,305	11,161	13,697	
11	10,00	10,00	9,190	20,930	22,587	30,672
3	0,20	100,00	10,565		20,871	37,630
6	0,40	100,00	18,952		44,731	
9	1,00	100,00	23,644		57,394	75,262
12	10,00	100,00	33,846		59,097	

Fonte: Elaborado pelo autor.

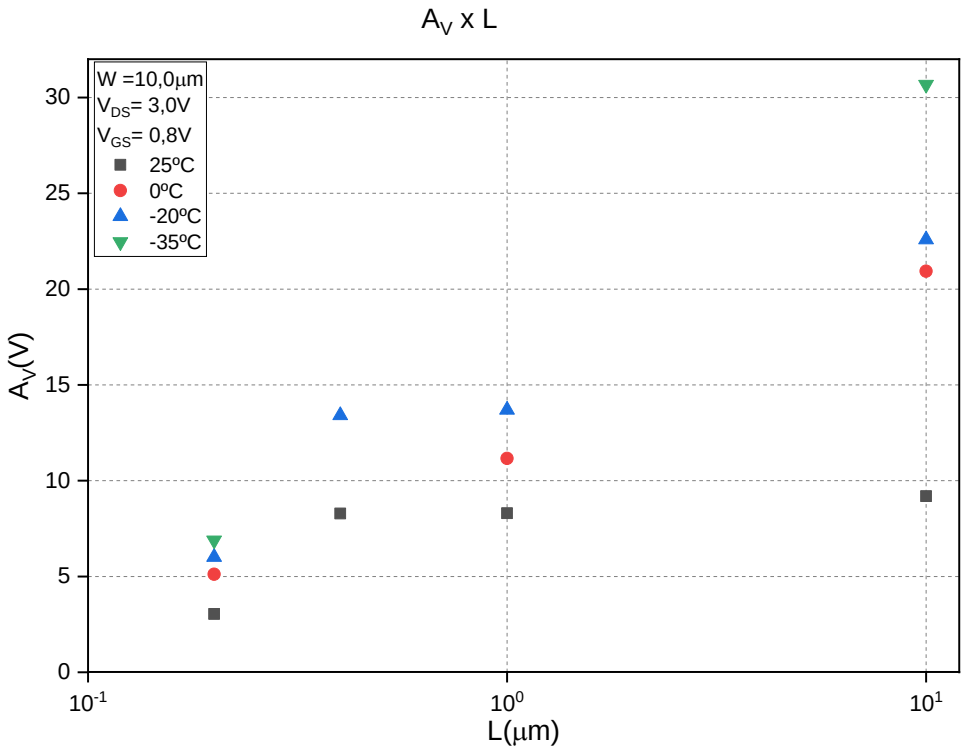
Os gráficos de A_V x L, do dispositivo AlGaN/GaN HEMT, nas temperaturas 25º, 0º,-20º e -35ºC, com tensão de dreno (V_{DS}) de 3,00V, e tensão de porta (V_{GS}) de 0,80 V mostrados nos gráficos da Figura 83, Figura 84 e Figura 85, onde observamos que o ganho intrínseco de tensão de um AlGaN/GaN HEMT tende a aumentar à medida que o comprimento do canal aumenta e pode diminuir quando aumenta a temperatura.

Figura 83 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 1,0µm e V_{DS} = 3,0V.



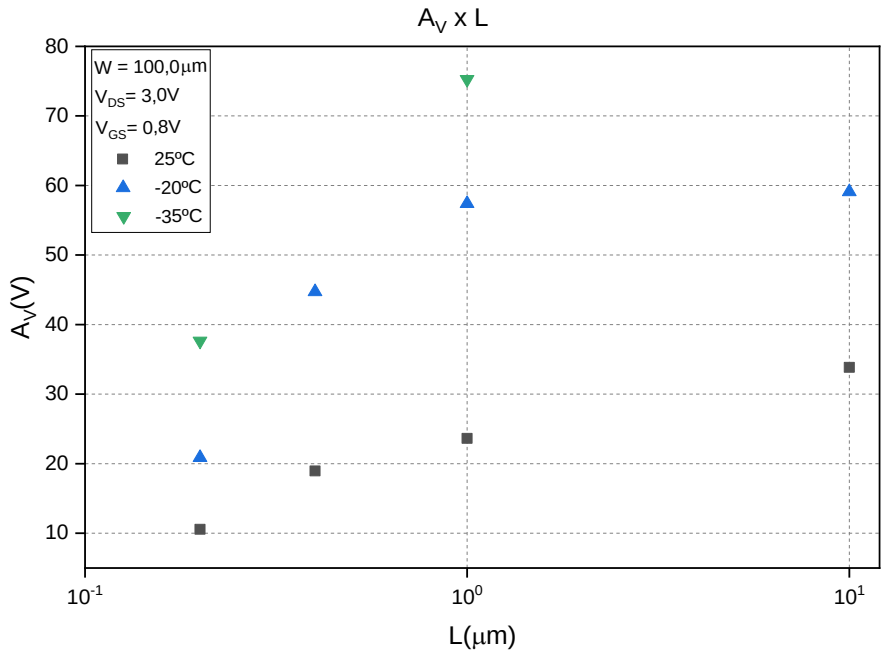
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 84 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 10,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 85 - Gráfico A_V x L do HEMT W = 100,0µm e V_{DS} = 3,0V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento do comprimento do canal pode levar a um aumento do ganho intrínseco de tensão (A_V). Isso ocorre principalmente devido à melhoria da eficiência de transporte dos elétrons ao longo do canal. Quando o comprimento do canal é aumentado, a região de canal do dispositivo torna-se mais extensa, permitindo que os elétrons se movam com maior liberdade ao longo do canal. Isso pode resultar em menor dispersão dos elétrons, o que diminui a perda de sinal e melhora a eficiência de transporte de carga. Além disso, o aumento do comprimento do canal também pode levar a uma redução da resistência do canal, o que resulta em menor queda de tensão ao longo do canal. Isso pode contribuir para um ganho intrínseco de tensão (A_V) maior, pois menos tensão é perdida ao longo do canal, resultando em maior amplitude do sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

A diminuição da temperatura também pode levar a uma diminuição na densidade de portadores de carga, ou seja, a quantidade de elétrons e lacunas presentes nas camadas do dispositivo. Isso ocorre porque, à medida que a temperatura diminui, a probabilidade de geração de portadores de carga térmicos diminui.

Com uma menor densidade de portadores de carga, a probabilidade de colisões entre os portadores de carga também diminui, o que pode levar a uma diminuição da dispersão eletrônica e, por sua vez, resultar em um aumento no A_V do transistor AlGaN/GaN HEMT.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um estudo sobre o transistor AlGaN/GaN HEMT, com variações de comprimento (L) e largura (W) de canal, operando em baixas temperaturas. Na primeira fase do trabalho foram pesquisadas as diferentes estruturas básicas de um dispositivo HEMT, o princípio de funcionamento do dispositivo, a formação do gás bidimensional de elétrons (2DEG), os materiais utilizados, a classificação dos HEMT's e a utilização do silício de alta resistividade como substrato.

Os dispositivos analisados foram fabricados sobre a lâmina de 200 mm de diâmetro de silício de alta resistividade com orientação cristalográfica (111), e então selecionados os dispositivos medidos nas quatro temperaturas diferentes.

As características dos HEMTs AlGaN/GaN foram estudadas na faixa de temperatura de -35º a 25ºC, e as seguintes conclusões foram obtidas:

Os primeiros gráficos elaborados a partir das tensões e correntes de porta, dreno e fonte, foram as curvas I_DxV_G e I_DxV_D. Nestes gráficos, observa-se que a corrente de dreno (I_D) aumenta com o aumento da tensão de porta (V_G), com o aumento da tensão fonte-dreno (V_{DS}), e que, quando a temperatura aumenta, a corrente de dreno (I_D) diminui.

Nos gráficos de I_DxV_D, observou-se que a corrente de dreno (I_D) aumenta com o aumento da tensão de dreno (V_D) e com a variação crescente da tensão entre porta e dreno (V_{GS}).

A tensão de limiar (V_T) mostra um aumento do valor quando a temperatura diminui e aumenta com o aumento do comprimento do canal (L), devido ao aumento da altura da barreira Schottky com o aumento da temperatura.

O valor da redução da barreira induzida pelo dreno-DIBL, se reduz com a queda da temperatura e com o aumento do comprimento do canal (L), apresentando tendencia contrária a tensão de limiar (V_T).

Os valores da inclinação de sublimiar (SS), apresentaram queda quando a temperatura diminui, e diminuem com o aumento do comprimento do canal (L).

Na faixa de temperatura de 25º a -35ºC, a transcondutância máxima aumenta com a diminuição da temperatura devido ao aumento de mobilidade na região de 2DEG, enquanto a concentração 2DEG quase se mantém constante quando a temperatura diminui. A transcondutância diminui com o aumento do comprimento do canal (L).

Quando analisamos a corrente de porta (I_G), observamos que quando aumenta a polarização de dreno (V_D), a corrente de porta (I_G) diminui, isso para valores negativos de tensão de porta (V_G), e quando e tensão de porta (V_G) se torna positiva essa tendencia praticamente se inverte, e demonstra pouca influência da variação de temperatura.

A condutância de saída (g_D) diminui à medida que o comprimento do canal (L) aumenta. Isso ocorre porque um canal mais longo implica em uma maior resistência à passagem de corrente elétrica, o que reduz a capacidade do dispositivo de fornecer uma alta condutância de saída. A condutância de saída aumenta à medida que a temperatura aumenta.

A tensão Early (V_{EA}) aumentou à medida que o comprimento do canal (L) aumenta. Essa relação ocorre devido à presença de uma camada de AlGaN entre o GaN (nitreto de gálio) e o AlN (nitreto de alumínio) na estrutura do HEMT AlGaN/GaN. Essa camada de AlGaN atua como uma barreira de elétrons, permitindo que os elétrons se acumulem na interface GaN/AlGaN e formem um gás de elétrons bidimensional (2DEG) na superfície do GaN. A tensão Early, também diminuiu com o aumento da temperatura, devido ao aumento da mobilidade dos elétrons em temperaturas mais altas. No entanto, em outros casos, a tensão Early pode aumentar com a temperatura, devido a efeitos de aquecimento e à variação da densidade de portadores de carga na estrutura do dispositivo.

Foi verificado aumento do ganho intrínseco de tensão (A_V) com o aumento do comprimento do canal (L), que ocorre principalmente devido à melhoria da eficiência de transporte dos elétrons ao longo do canal, permitindo que os elétrons se movam com maior liberdade ao longo do canal. Que resulta em menor dispersão dos elétrons, o que diminui a perda de sinal e melhora a eficiência de transporte de carga. O aumento do comprimento do canal também pode levar a uma redução da resistência do canal, o que resulta em menor queda de tensão ao longo do canal. Contribuindo

para um ganho intrínseco de tensão (A_V) maior, pois menos tensão é perdida ao longo do canal, resultando em maior amplitude do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. A diminuição da temperatura também levou a uma diminuição na densidade de portadores de carga, ou seja, a quantidade de elétrons e lacunas presentes nas camadas do dispositivo. Isso ocorre porque, à medida que a temperatura diminui, a probabilidade de geração de portadores de carga térmicos diminui. Com uma menor densidade de portadores de carga, a probabilidade de colisões entre os portadores de carga também diminuiu, o que levou a uma diminuição da dispersão eletrônica e, por sua vez, resultou em um aumento no A_V do transistor AlGaN/GaN HEMT.

Os resultados obtidos demostraram que o dispositivo AlGaN/GaN HEMT estudado sofre influência direta da temperatura, e que esta diferença é apresentada em dispositivos com vários comprimentos e larguras de canal, porém essa influência, se apresentou linearmente, comportamento que já era esperando, e pode ser verificado, mesmo com a variação de temperatura não sendo muito grande, comprovando sua eficiência e confiabilidade. Quando a temperatura operacional do dispositivo AlGaN/GaN HEMT diminuiu, isso causou um aumento na corrente de dreno (I_D), um aumento na tensão de limiar (V_T), uma diminuição em DIBL, uma diminuição na corrente de porta (I_G), uma diminuição em a inclinação do sublimiar (SS), aumento da transcondutância (g_m), diminuição da condutância de saída (g_D), aumento da tensão inicial (V_{EA}) e aumento do ganho de tensão intrínseca (A_V). As variações observadas são positivas do ponto de vista do desempenho do dispositivo em baixas temperaturas e estão relacionadas à menor mobilidade dos elétrons e velocidade de saturação conforme o aumento da temperatura.

Como perspectivas de futuros trabalhos, seria interessante realizar a simulação do dispositivo HEMT estudado, para poder ampliar a faixa de temperatura, bem como o comprimento e largura do canal, essa possibilidade de poder variar a temperatura e as dimensões do dispositivo, pode fornecer uma compreensão mais completa do comportamento do dispositivo sob diferentes condições. O que ajudaria entender melhor as limitações e características do HEMT. Pode-se determinar o desempenho do dispositivo em temperaturas extremamente baixas ou altas e verificar se ele pode ser utilizado em aplicações que exigem operações em temperaturas extremas, onde o desempenho do dispositivo pode ser afetado significativamente.

7 PUBLICAÇÕES DO AUTOR

Segue a relação das principais publicações e apresentações de trabalhos realizadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

ARTIGOS

Revistas Internacionais:

1. ANDRADE, M. G. C.; BERGAMIM, L. F. O.; **JUNIOR, B.B.;** NOGUEIRA, C.R.; SILVA, F. A.; TAKAKURA, K.; PARVAIS, B. and SIMOEN, E., **"Low-Frequency Noise Investigation of High-Electron-Mobility Field-Effect-Transistors"**. In : Solid-State Electronics, v. 183, p. 108050, 2021. DOI: 10.1016/j.sse.2021.108050.

Congressos Internacionais:

2. **JUNIOR B. B.;** M.G.C.; BERGAMIM, L.F.O.; NOGUEIRA, C.R.; ABUD, R.B.; SIMOEN, E. **Temperature Dependence of AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors on 200 mm Si wafers.** In: *LAEDC* 2022 *IEEE Latin American Electron Devices Conference* 2022, Cancun. Mexican. DOI: 10.1109/LAEDC54796.2022.9908239.

3. ANDRADE, M.G.C.; BERGAMIM, L. F. O.; **JUNIOR B. B.;** NOGUEIRA, C. R.; SILVA, F. A.; PARVAIS, B.; SIMOEN, E. **Low-Frequency noise investigation of AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors**. In: INFOS2021-22nd Conference on Insulating Films on Semiconductors, 2021, Rende, Italy.

Congressos nacionais:

4. NOGUEIRA, C. R.; **JUNIOR B. B.;** BERGAMIM, L. F. O.; ANDRADE, M.G.C**. Simulation Assessment of Cylindrical Vertical FETs Devices**. In: Anais da III Jornada Paranaense de Microletrônica SeMicro-PR, 2020, Curitiba, PR, Brasil. 2020.

APRESENTAÇÕES

Congresso Internacional:

1. **"Temperature Dependence of AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors on 200 mm Si wafers"**. In: *LAEDC* 2022 *IEEE Latin American Electron Devices Conference* 2022, Cancun. Mexican. DOI: 10.1109/LAEDC54796.2022.9908239.

REFERÊNCIAS

AGIWAL, M. et al. A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation. **IEEE Access**, [s.l.], vol. 9, 18 jan. 2021. pp. 16193-16210.

ANDRADE, M. G. C. **ESTUDO DE TRANSISTORES DE PORTA DE CORPO TRIPLO**. USP. São Paulo. 2012.

ANDRADE, M. G. C. et al. Low-Frequency noise investigation of AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors. **Solid-State Electronics**, [s.l.], vol. 183, set. 2021.

BALIGA, B. J. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications. [s.l.]: Woodhead Publishing, v. 1, 2018. p. 418. ISBN ISBN 978-0-08-102307-5.

BEER, A. C. et al. High Speed Heterostructure Devices. 1. ed. Boston: Academic Press, v. vol. 41, 1994. p. pp. 173-217.

BELAROUSSI, Y. et al. High quality silicon-based substrates for microwave and millimeter wave passive circuits. **Solid State Electron**, Bernin, vol. 135, 2017. pp. 78-84.

BERGAMIM, L. F. O. et al. Analog performance of GaN/AlGaN high-electron-mobility transistors. **Solid-State Electronics**, [s.l.], vol. 183, set. 2021.

BUECHLER, J. et al. Silicon High Resistivity Substrate Millimeter-Wave Technology. **IEEE Transactions on Electron Devices**, [s.l.], vol. 33, dez. 1986. pp. 2047-2052.

CHANG, L.L.; PLOOG, K. Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures. Boston: Dordrecht, the Netherlands, 2012. p. 191-330.

COLINGE, J. P. Thin-film SOI devices: A perspective. **Microelectronic Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 3-4, p. 127-147, dez. 1998. ISSN doi.org/10.1016/0167-9317(88)90013-5.

COLINGE, J. P. SILICON-ON-INSULATOR TECHNOLOGY: MATERIALS TO VLSI. 3. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2012. p. 361.

COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES. New York: Springer Science & Business Media, 2005. p. 436. ISBN ISBN 1-4020-7018-7.

CONDE, A. O. et al. Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods. **Microelectronics Reliability**, [s.l.], 53, jan. 2013. 90-104.

DINGLE, R. Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices. **APL Classic Papers**, [s.l], 33, 8 ago. 1988. 665-667.

GHOSH, S. et al. Design of step-graded AlGaN buffers for GaN-on-Si heterostructures grown by MOCVD. **Semiconductor Science and Technology**, [s.l.], 38, n. 4, 22 fev. 2023.

HE, Xiao-Guang; ZHAO, De-Gang; JIANG, De-Sheng. Formation of two-dimensional electron gas at AlGaN/GaN heterostructure and the derivation of its sheet density expression. **Chinese Physics B**, [s.l.], v. 24, n. 6, p. 7301, 10 abr. 2015.

KARBOYAN, S.; LABAT, N.; LAMBERT, B. Gate and Drain Low Frequency Noise of AlGaN/GaN HEMTs Featuring High and Low Gate Leakage Currents. **22nd International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF)**, Montpelier, 24-28 jun. 2013. 1-4.

KHAN, M. A. et al. High electron mobility transistor based on a GaN-AlxGa1−xN heterojunction. **Applied Physics Letters**, [s.l.], 63, n. 9, 30 ago. 1993. 1214-1215.

KRANTI, A.; HALDAR, S.; GUPTA, R. S. Analytical model for threshold voltage and I–V characteristics of fully depleted short channel cylindrical/surrounding gate MOSFET. **Microelectronic Engineering**, [s.l.], 56, ago. 2001. 241-259.

LANDGRAF, E. et al. Influence of crystal orientation and body doping on trigate transistor performance. **Solid State Electronics**, [s.l.], vol. 50, jan. 2006. p. 38-43.

LI, K. et al. **Compact modeling of gate leakage phenomenon in GaN**. 2020 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Kobe: IEEE. 2020. p. 225-228.

LIU, X. et al. Analysis of the back-barrier effect in AlGaN/GaN high electron mobility transistor on free-standing GaN substrates. **Journal of Alloys and Compounds**, [s.l.], 814, 25 jan. 2020.

MACFARIANE, D. J. **Design and fabrication of AlGaN/GaN HEMTs with high breakdown voltages, PhD Thesis**. School of Engineering, University of Glasgow. Glasgow. 2014.

MARCON, D. et al. **A Comprehensive Reliability Investigation of the Voltage-, Temperature- and Device Geometry-Dependence of the Gate Degradation on state-of-the-art GaN-on-Si H**. 2010 International Electron Devices Meeting, San Francisco. San Francisco: IEEE. dez. 2010. p. 20.3.1-20.3.4.

MEDJDOUB, F. et al. High-Performance Low-Leakage-Current AlN/GaN HEMTs Grown on Silicon Substrate. **IEEE Electron Device Letters**, [s.l.], 32, jul. 2011. p. 874-876.

MIMURA, T. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, [s.l.], vol. 50, mar. 2002. p. 780-782.

MIMURA, T. Development of high electron mobility transistor. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokio, 44, 8 dez. 2005. p. 8263-8268.

MIMURA, T. et al. High electron mobility transistor logic. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokio, 20, 1981. 8.

MUHAMMAD, N. A. A. et al. High Electron Mobility Transistors: performance analysis, research trend and applications. In: PEJOVIC, Momcilo M.; PEJOVIC, Milic M. **Different Types of Field-Effect Transistors-Theory and Applications**. Rijeka: IntechOpen, 2017. p. 45-64. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/different-types-of-field-effect-transistors-theory-and-applications/high-electron-mobility-transistors-performance-analysis-research-trend-and-applications.>.

NAG, B.R. Physics of Quantum Well Devices. Dordrechi: Kluwer Academic Publishers, v. 7, 2002. p. 297.

NIEHENKE, E.C. The evolution of transistors for power amplifiers: 1947 to today. **IEEE MTT-S International Microwave Symposium**, Phoenix, 17-22 maio 2015. p. 1-4.

NIRMAL, D.; AJAYAN, J. Handbbok for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. ISBN ISBN-13: 978-1-138-62527-3.

REYES, A. C. et al. **High Resistivity Si as a Microwave Substrate**. Eletronic Components and Technology Conference. Orlando: IEEE. 1996. p. 383-391.

SHEN, L. et al. AlGaN/AlN/GaN High-Power Microwave HEMT. **EEE Electron Device Lett**, [s.l.], v. 22, n. 10, p. 457-459, 21 out. 2001.

SMORCHKOVA, I. P. et al. Polarization-induced charge and electron mobility in AlGaN/GaN heterostructures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. **Journal of Applied Physics**, [s.l.], vol. 86, n. 8, 1999. p. 4520-4526.

STENGEL, F.; MOHAMMAD, S. N.; MORKOÇ, H. Theoretical investigation of electrical characteristics of AlGaN/GaN modulation doped fieldeffect transistors. **Journal of Applied Physics**, [s.l.], vol. 80, 01 set. 1996. p. 3031-3042.

STUTZMANN, M. et al. GaN-based heterostructures for sensor applications. **Diamond and Related Materials**, [s.l.], p. 886-891, jun. 2002.

VARLEY, J. B.; CHEN, B.; HIGASHIWAKI, M. Wide Bandgap Semiconductor Materials and Devices. **Journal of Applied Physics**, [s.l.], vol. 131, 17 jun. 2022.

WATANABE, Y. et al. **A HEMT LSI for a multibit data register**. 1988 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 1988 ISSCC. Digest of Technical Papers. San Francisco: IEEE. 1988. p. p. 86-87.

WONGLAKHON, T.; ZAHN, D. Interaction potentials for modelling GaN precipitation and solid state polymorphism. **Journal of Physics: Condensed Matter**, [s.l.], 18 fev. 2020. 205401.

XING, H. et al. Gallium nitride based transistors. **Journal of Physics: Condensed Matter**, [s.l.], 13, 26 jul. 2001. p. 7139.

YITIAN, G. et al. Temperature-Dependent Dynamic Performance of p-GaN Gate HEMT on Si. **IEEE Transactions on Electron Devices**, [s.l.], vol. 69, jun. 2022. p. 3302-3309.

YOU, C. W. et al. Effects on RF Performance for AlGaN/GaN HEMT on Si Substrate with AlGaN Buffer Engineering. **ECS Journal of Solid State Science and Technology**, [s.l.], 12, 07 mar. 2023. 035002.

ZAYAK, A. T. Accurate and scalable compact modeling of AlGaN/GaN HEMTs for circuit simulation. **IEEE Trans. Electron Devices**, [s.l.], 60, maio 2013. 1606-1614.