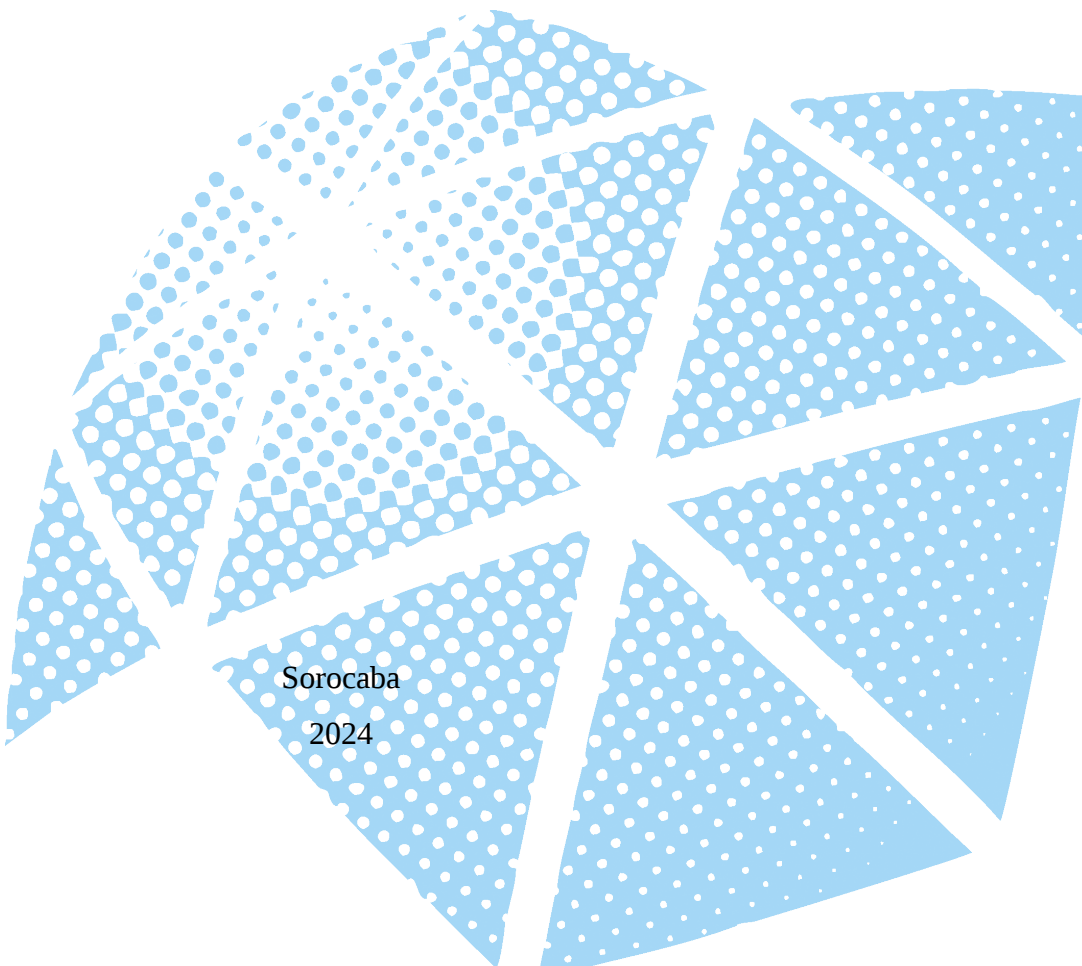


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba - Campus de Sorocaba

EDUARDO CANGA PANZO

ESTUDO DA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS NOS TRANSISTORES
HEMTs de AlGa_N/Ga_N



Sorocaba
2024

EDUARDO CANGA PANZO

**ESTUDO DA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS NOS TRANSISTORES
HEMTs de AlGa_N/Ga_N**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Área de Concentração: Sistemas eletrônicos.

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

Coorientador: Prof. Dr. Nilton Graziano Junior

Sorocaba

2024

P199e

Panzo, Eduardo Canga

Estudo da mobilidade dos elétrons nos transistores HEMTs de
AlGaIn/GaN / Eduardo Canga Panzo. -- Sorocaba, 2024
85 p. : il., tabs.

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

Orientadora: Maria Glória Caño de Andrade

Coorientador: Nilton Graziano Junior

1. Microeletrônica. 2. Transistores. 3. Elétrons. 4. Resistência
elétrica. 5. Semicondutores de potência. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa possui um impacto abrangente, uma vez que, do ponto de vista científico e técnico, pode revolucionar a eficiência dos dispositivos semicondutores. Além disso, impulsionará melhorias na indústria tecnológica e promoverá a educação científica como fator de inovação e relevância econômica. Internacionalmente, a pesquisa contribuirá para a disseminação do conhecimento e, nacionalmente, para o progresso na cultura da microeletrônica.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research has a broad impact, as it can revolutionize the efficiency of semiconductor devices from a scientific and technical perspective. Additionally, it will drive improvements in the technology industry and promote scientific education as a factor of innovation and economic relevance. Internationally, the research will contribute to the dissemination of knowledge and, nationally, to the advancement of the microelectronics culture.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTUDO DA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS NOS TRANSÍSTORES HEMTs
(HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORES)

AUTOR: EDUARDO CANGA PANZO

ORIENTADORA: MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE

COORIENTADOR: NILTON GRAZIANO JUNIOR

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

Prof^a. Dr^a. MARIA GLÓRIA CAÑO DE ANDRADE (Participação Presencial/Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automacao / Instituto de Ciencia e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba

Documento assinado digitalmente
 **MARIA GLORIA CANO DE ANDRADE**
Data: 17/06/2024 11:44:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Doutor RODRIGO TREVISOLI DORIA (Participação Virtual)
Engenharia Elétrica / Centro Universitário FEI

Documento assinado digitalmente
 **RODRIGO TREVISOLI DORIA**
Data: 17/06/2024 14:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RENAN TREVISOLI DORIA (Participação Virtual)
Engenharia / PUC SP - Câmpus Consolação

Documento assinado digitalmente
 **RENAN TREVISOLI DORIA**
Data: 17/06/2024 14:44:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

A banca decidiu por alterar o Titulo do Trabalho para: **ESTUDO DA MOBILIDADE DOS ELÉTRONS NOS TRANSÍSTORES HEMTs de AlGaN/GaN.**

Sorocaba, 03 de maio de 2024.

*Aos meus pais, Boa Ventura Ima Panzo e Victória Maria Canga
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por estar comigo sempre, e em cada momento desta trajetória.

Aos meus pais, Boa Ventura Ima Panzo e Victória Maria Canga, pela educação, cuidados e orientação que continuam dando.

À minha querida amiga Agna Nadine Maia de Sena Carvalho, pelo tamanho incentivo e apoio incondicional durante todo o processo.

À Lilian Helena Mathilde, da Seção de Pós-graduação, pela tamanha paciência em cada preocupação que apresentei, que não foram poucas.

Ao professor Átila Madureira Bueno, pela oportunidade que me proporcionou de frequentar o curso de mestrado ao assumir o papel de orientador.

À professora Maria Glória Caño de Andrade, que depois da troca de tema, de braços abertos aceitou assumir o papel de orientadora, e por todo acompanhamento que tem dado desde o primeiro contato.

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

Ao meu professor e coorientador Nilton Graziano Junior, pela exigência e por todo ensinamento que partilhou comigo durante o processo.

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

À Sabrina Gonçalves, pelo acompanhamento na organização da estrutura do trabalho.

Ao meu chefe, colegas e amigos do Departamento de Física da Faculdade de Ciências – Universidade Agostinho Neto/ Luanda, Angola. Por todo apoio na frequência do mestrado.

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

À minha esposa e meus filhos pela motivação e todo acompanhamento em cada dia.

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

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

E à CAADI, à qual também agradeço.

*"The significant problems we face cannot
be solved at the same level of thinking we
were at when we created them."
(Albert Einstein).*

RESUMO

PANZO, E. C. **Estudo da mobilidade dos elétrons nos transistores HEMTs de AlGaIn/GaN**. 2024. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2024.

Nesta dissertação de mestrado será feito um estudo sobre dispositivos de alta mobilidade de elétrons (HEMTs) fabricados a partir de uma heterojunção de AlGaIn/GaN (Nitreto de Gálio e Alumínio/Nitreto de Gálio). Estes transistores têm se tornado cada vez mais importantes no campo da eletrônica de potência. Eles oferecem várias vantagens em relação a outros dispositivos semicondutores como alta velocidade de comutação, alta potência de saída, alta eficiência energética, alta mobilidade de portadores de carga, alta densidade de elétrons, alta resistência térmica e capacidade de operar em altas frequências, especialmente na faixa de radiofrequência, tornando-os ideais para aplicações em sistemas de comunicação sem fio, como satélites, radares e redes móveis de geração 5G. Devido às suas vantagens, estes dispositivos têm sido amplamente adotados em uma variedade de aplicações incluindo amplificadores de potência de radiofrequência, dispositivos de comutação de alta velocidade, fontes de alimentação de alta eficiência, sistemas de iluminação de estado sólido (LEDs) e conversores de energia. Uma vez que a mobilidade é um dos parâmetros que caracteriza a eficiência do HEMT. Este trabalho apresenta um estudo sobre a mobilidade dos elétrons em HEMTs de AlGaIn/GaN em função de diversos aspectos como comprimento e largura do canal, temperatura, tensões de porta e de dreno e variações nos diferentes processos de fabricação dos respectivos dispositivos. Os resultados mostram que a mobilidade dos elétrons é maior em HEMTs com maior largura e comprimento de canal. Por outro lado, revelou que a mobilidade dos elétrons é menor com o aumento da temperatura e tensão de dreno. Verificou-se também que a mobilidade é maior em dispositivos desenvolvidos com 2 implantes ativos. Esses resultados destacam a importância de controlar tais características para obter maior mobilidade dos elétrons.

Palavras-chave: HEMTs de AlGaIn/GaN; transistor; mobilidade; HEMT.

ABSTRACT

PANZO, E. C. **Study of electron mobility in AlGaN/GaN HEMTs transistors**. 2024. 85 p. Master's thesis (Master's degree in Electrical Engineering) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2024.

In this master's thesis, a study will be carried out on high electron mobility devices (HEMTs) manufactured from an AlGaN/GaN (Aluminum Gallium Nitride/Gallium Nitride) heterojunction. These transistors have become increasingly important in the field of power electronics. They offer several advantages over other semiconductor devices such as high switching speed, high output power, high energy efficiency, high charge carrier mobility, high electron density, high thermal resistance and the ability to operate at high frequencies, especially in radio frequency range, making them ideal for applications in wireless communication systems, such as satellites, radars and 5G generation mobile networks. Due to their advantages, these devices have been widely adopted in a variety of applications including radio frequency power amplifiers, high-speed switching devices, high-efficiency power supplies, solid-state lighting systems (LEDs), and power converters. . Since mobility is one of the parameters that characterizes HEMT efficiency, this work presents a study on the mobility of electrons in AlGaN/GaN HEMTs as a function of several aspects such as channel length and width, temperature, gate voltages and of drain and variations in the different manufacturing processes of the respective devices. The results show that electron mobility is higher in HEMTs with greater channel width and length. On the other hand, it revealed that electron mobility is lower with increasing temperature and drain voltage. It was also found that mobility is greater in devices developed with 2 active implants. These results highlight the importance of controlling such characteristics to obtain greater electron mobility.

Keywords: AlGaN/GaN HEMTs; transistor; Mobility; HEMT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Transistor MOSFET de canal N.....	23
Figura 2 – Banda de condução da super-rede de dopagem modulada.....	24
Figura 3 – Estrutura básica de um HEMT.....	28
Figura 4 – Micrografia dos transistores MOSFET tipo n (à esquerda) e GaN HEMT (à direita).	30
Figura 5 – Estrutura esquemática em corte transversal de AlGaIn/AlN/GaN HEMT fabricado empregando dopagem por implantação de íons SiC.	32
Figura 6 – Vista em 3D do transistor de AlGaIn/GaN.....	33
Figura 7 – Características e áreas de aplicações de HEMTs de AlGaIn/GaN.	35
Figura 8 – Gráfico da corrente de dreno em função da tensão de porta onde são indicados a região de corte, a região de saturação e a região de trípode.....	37
Figura 9 – Gráfico da corrente de dreno em função da tensão de dreno onde são indicadas as regiões linear, de saturação e de Ruptura.	38
Figura 10 – Gráfico da Resistencia total em função do comprimento do canal.....	39
Figura 11 – Gráfico da condutância de saída (g_d) em função da tensão de dreno (V_d).....	40
Figura 12 – Gráfico da transcondutância (g_m) em função da tensão de porta (V_d).	41
Figura 13 – Resultado da extração da tensão de limiar pelo método de aproximação da corrente constante.....	43
Figura 14 – Resultado da extração da inclinação sublimiar pelo método gráfico.....	44
Figura 15 – Acima, a vista esquemática em corte transversal de um HEMT e abaixo o circuito equivalente mostrando as seções resistivas e a seção de efeito de campo sob a porta.	47
Figura 16 – Vista superior de (a) HEMT circular e (b) HEMT quadrado.....	49
Figura 17 – Demonstração da diferença de potencial na seção transversal do HEMT.	51
Figura 18 – Seção transversal de um HEMT geral mostrando dimensões, condições de viés e parâmetros extraídos.....	55
Figura 19 – Exemplo da extração da média para curvas $I_d \times V_g$ nos dispositivos α , β e γ	59
Figura 20 – Diferentes curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).	61
Figura 21 – Curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação	

para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).	62
Figura 22 – Diferentes curvas de corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).	63
Figura 23 – Curvas de corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.	64
Figura 24 – Curvas da transcondutância (g_m), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).	65
Figura 25 – Curvas da transcondutância (g_m), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.	65
Figura 26 – Curvas da condutância de saída (g_d), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).	66
Figura 27 – Curvas da condutância de saída (g_d), tendo em conta a variação dos dispositivos dos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.	67
Figura 28 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função do comprimento do canal (L) para dispositivos alfa (α).	70
Figura 29 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função da largura do canal (W) para dispositivos alfa (α).	71
Figura 30 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função da temperatura (T) para dispositivos alfa (α).	72
Figura 31 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função da tensão de porta (V_g) para dispositivos alfa (α).	73
Figura 32 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função da tensão de dreno (V_d) para dispositivos alfa (α).	74
Figura 33 – Resultados de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função do material de contato dreno-fonte, da estrutura ou material de porta e da temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Físicas dos Semicondutores (300 K)	27
Tabela 2 – Características elétricas dos materiais.	29
Tabela 3 – Descrição geométrica dos dispositivos codificados de RL1 – RL12	34
Tabela 4 – Número efetivo de quadrados para os HEMTs simples, circulares e quadrados....	50
Tabela 5 – Resultados de R_{SD} , V_T e S em função de: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta, tensão de dreno para o mesmo dispositivo (alfa) e de dispositivos com diferentes processos de fabricação (alfa, beta e gama).	68
Tabela 6 – Resultados de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função do material de contato dreno-fonte, da estrutura ou material de porta e da temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2DEG	Gás bidimensional de elétrons
BEM	<i>Molecular Beam Epitaxy</i> (Epitaxia por Feixe Molecular)
BFOM	Figura de mérito que avalia a eficiência
CVD	Deposição de vapor químico
D	Dreno
DIBL	Redução da Barreira de Potencial do Dreno
FET	<i>Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo)
G	Porta
GR	Geração e Recombinação
HEMT	<i>High Electron Mobility Transistor</i> (Transistor de alta mobilidade dos elétrons)
HFET	FET de heterojunção
HIGFET	<i>Heterostructure Isolated Gate FET</i> (FET de portão isolado de heteroestrutura)
IGFET	FET de porta isolada
Imec	<i>Interuniversity microelectronic center</i>
JBT	<i>Juntion Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Junção)
JFET	FET de junção
JFOM	Figura de mérito que relaciona a densidade de corrente e a transcondutância
MESFET	<i>Metal Semiconductor field effect transistor</i>
mHEMT	HEMT metamórficos
MISFETs	<i>FET metal insulator semiconductor</i> (FET metal-isolante-semicondutor)
MOCVD	<i>Metal organic chemical vapor deposition</i>
MODFET	<i>Modulation-Doped Field-Effect Transistor</i>
MOS	<i>Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Metal Óxido Semicondutor)
MOSFET	<i>FET metal-oxide-semiconductor</i> (FET metal-óxido-semicondutor)
NPN	Região P confinada entre duas regiões
pHEMT	HEMT pseudomórficos
PNP	Região N confinada entre duas regiões P
S	Fonte
SDHFET	<i>Selectively-Doped Heterojunction Field-Effect Transistor</i>
Si	Silício
TBJ	Transistor bipolar de junção
TEGFET	<i>Two-Dimensional Electron Gas Field-Effect Transistor</i>

TLM	<i>Transfer Length Method</i> (Método de comprimento de transferência)
TV	Televisão
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS

$g_{d,sat}$	Condutância de Saída em saturação (S)
$g_{m,max}$	Transcondutância máxima (S)
n_e	Concentração de elétrons (cm^{-3})
C_d	Capacitância elétrica por unidade de área (F)
E_C	Energia da Banda de condução (eV)
E_F	Posição do nível de Fermi (eV)
E_V	Energia da Banda de valência (eV)
E_g	Energia da banda proibida do material (eV)
I_G	Intensidade da corrente de porta (A)
$I_{d,max}$	Corrente de dreno máxima (A)
I_d	Corrente de dreno que flui através da conexão em série das resistências (A)
I_{dSAT}	Corrente de dreno em saturação (A)
L_{GD}	Comprimento porta dreno (μm)
L_{GS}	Comprimento porta fonte (μm)
L_T	Comprimento de transferência (μm)
L_g	Comprimento do canal (μm)
N_a	Concentração de dopagem no substrato (cm^{-3})
R_C	Resistência de contato entre o 2DEG e a metalização fonte/drenagem (Ω)
R_{Ch}	Resistencia do canal (Ω)
R_{CD}	Resistencia de contato do dreno (Ω)
R_{CP}	Soma das resistências R_C e R_P (Ω)
R_{CS}	Resistencia de contato da fonte (Ω)
R_D	Resistencia parasita de dreno (Ω)
R_{DG}	Resistência dreno porta (Ω)
R_{GCH}	Resistência do canal abaixo do Comprimento do canal L_G (Ω)
R_{GD}	Resistencia porta-dreno (Ω)
R_{GS}	Resistência porta-fonte (Ω)
R_P	Resistência de contato entre esta metalização e a sonda de medição (Ω)
R_S	Resistência parasita de fonte (Ω)
R_{S-0}	Resistência da chapa (constante na seção do bidimensional) (Ω)

R_{Sh}	Resistência da chapa (resistência por unidade quadrada) (Ω)
R_{SD}	Resistência fonte dreno (Ω)
R_T	Resistência total (Ω)
V_{2DEG-U}	Tensão através do 2DEG sob a porta (V)
V_{GO}	Tensão entre o elétrodo da porta e o 2DEG (V)
V_{GT}	Tensão de porta subtraída a tensão de limiar (V)
V_{R-C}	Tensão entre a resistência de contacto da fonte e do dreno (V)
V_{R-GD}	Tensões através das seções resistivas porta-fonte do 2DEG (V)
V_{R-GS}	Tensão através das seções resistivas porta-fonte do 2DEG (V)
V_T	Tensão limite ou tensão de limiar (V)
V_d	Tensão dreno para fonte ou soma das tensões nestas seções (V)
V_g	Tensão porta-fonte aplicada (V)
a_1	Comprimento do dreno (μm)
a_2	Comprimento interno da porta (μm)
a_3	Comprimento externo da porta (μm)
a_4	Comprimento interno da fonte (μm)
g_d	Condutância de saída (S)
g_m	Transcondutância (S)
n_C	Número efetivo de quadrados para as regiões de contato ôhmicos de fonte-dreno
n_D	Número efetivo de quadrados para as regiões de dreno ou entre a porta e o dreno
n_S	Número efetivo de quadrados para as regiões de fonte ou entre a porta e a fonte
n_s	Concentração de 2DEG abaixo do comprimento ($L_G + 2\Delta$) (cm^{-3})
r_1	Raio de contato do dreno (μm)
r_2	Raio interno do anel de porta (μm)
r_3	Raio externo do anel de porta (μm)
r_4	Raio interno do anel de fonte (μm)
r_G	Resistência da chapa do bidimensional sob a porta (Ω)
r_{S-U}	Resistência da chapa (variável na seção do bidimensional sob a porta) (Ω)
t_d	Espessura do material entre o 2DEG e o metal da porta (μm)
v_{sat}	Velocidade de deriva de saturação (cm/s)
δ_{LG}	Comprimento do canal virtual (μm)
ϵ_d	Permissividade (F/m)
ϵ_{si}	Permissividade do silício (F/m)

μ_0	Mobilidade de baixo campo ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_C	Mobilidade de portadores ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_{FE}	Mobilidade de efeito de campo ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_{eff}	Mobilidade efetiva por aproximação gradual ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
$\mu_{eff/gm.max}$	Mobilidade efetiva por $g_{m.max}$ ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
μ_n	Mobilidade de portadores (elétrons ou lacunas) ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ_{s0}	Densidade (g/cm^3)
Δd	Deslocamento médio dos elétrons no dispositivo (μm)
K	Constante de Boltzmann (J/K)
A	Área da secção transversal (m^2)
L	Comprimento do canal (μm)
R	Resistência (Ω)
S	Inclinação na região de sublimiar (V/dec)
T	Temperatura (K)
W	Largura do canal (μm)
m	Massa efetiva dos elétrons (g)
n	Número efetivo de quadrados
q	Carga elementar (C)
α	Acoplamento capacitivo (F)
ε	Constante dielétrica do semiconductor
ρ	Resistividade ($\Omega \cdot \text{m}$)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo	20
1.2	Estrutura	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Tipos de transistores FETs	22
2.2	Transistores de alta mobilidade dos elétrons (HEMTs)	24
2.2.1	Breve histórico.....	24
2.2.2	Arquitetura do HEMT	30
2.2.2.1	Descrição do HEMT em estudo.....	32
2.2.3	Aplicações dos HEMTs	34
2.2.4	Caraterização geral dos parâmetros em estudo no HEMT	35
2.2.4.1	Corrente de dreno (I_d)	36
2.2.4.2	Resistência série (R_{SD}).....	38
2.2.4.3	Condutância de saída (g_d)	40
2.2.4.4	Transcondutância (g_m)	41
2.2.4.5	Tensão de limiar (V_T)	42
2.2.4.6	Inclinação sublimiar (S)	43
2.2.4.7	Mobilidade.....	44
3	ESTUDO TEÓRICO DA MOBILIDADE (μ) NOS DISPOSITIVOS HEMTS	46
3.1	Métodos de extração da mobilidade	46
3.1.1	Mobilidade efetiva por aproximação gradual do canal (μ_{eff}).....	47
3.1.2	Mobilidade de efeito de campo (μ_{FE})	53
3.1.3	Mobilidade de baixo campo (μ_0)	54
3.1.4	Mobilidade efetiva por <i>gm.max</i> ($\mu_{eff/gm.max}$).....	55
3.2	Análise comparativa dos métodos de extração de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Caraterização dos dispositivos estudados	58
4.1.1	Descrição dos dispositivos	58
4.1.2	Parâmetros medidos e calculados	60
4.1.2.1	Curvas da corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$).....	60
4.1.2.2	Curvas da corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$)	62
4.1.2.3	Curvas da transcondutância (g_m)	64

4.1.2.4	Curvas da condutância de saída (g_d)	66
4.1.2.5	Análise da resistência serie (R_{SD}), inclinação sublimiar (S) e tensão limiar (V_T) ...	67
4.2	Cálculo de μ_{eff}, μ_{FE}, μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função dos parâmetros variados	69
4.2.1	Comprimento do canal (L_g)	70
4.2.2	Largura do canal (W).....	71
4.2.3	Temperatura (T).....	72
4.2.4	Tensão de porta (V_g).....	73
4.2.5	Tensão de dreno (V_d).....	74
4.2.6	Diferentes tipos de dispositivos HEMTs	74
4.3	Análise comparativa dos resultados de μ_{eff}, μ_{FE}, μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$.....	77
5	CONCLUSÕES DO TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS.....	79
6	PUBLICAÇÕES	81
6.1	Artigos publicados em congressos internacionais e nacionais.....	81
6.2	Artigos submetidos para publicação.....	81
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Para atender às demandas de uma ampla gama de circuitos elétricos e eletrônicos de potência, bem como para solucionar alguns desafios em aplicações que exigem baixo ruído, como circuitos digitais, circuitos de micro-ondas e telecomunicações, foram desenvolvidos os transistores de alta mobilidade (HEMTs). Esses dispositivos são projetados para operar em diferentes faixas de frequência e temperaturas, proporcionando versatilidade e desempenho em várias condições de funcionamento. (Mohapatra; Panda, 2018).

O surgimento do transistor se deu por volta do ano de 1947 através dos físicos John Bardeen e Walter House Brittain que criaram os transistores de silício e germânio nos laboratórios de tecnologia da empresa norte-americana Bell Telephone Company. (Colinge *et al.*, 2002).

A Lei de Moore, formulada em 1965 por Gordon Moore, cofundador da Intel, afirma que o número de transistores em um circuito integrado dobraria a cada dezoito meses pelo mesmo custo. Essa premissa é atendida até os dias atuais. O que implica no desenvolvimento de dispositivos semicondutores cada vez mais velozes e eficientes. Isso significa que, com o passar do tempo, os componentes eletrônicos têm se tornado cada vez mais poderosos e eficientes, enquanto seus preços reduzem (Schaller, 2018). Os transistores de alta mobilidade eletrônica (HEMTs), atendem a esse desenvolvimento e são caracterizados principalmente pela alta velocidade de comutação, alta potência de saída, alta eficiência energética, alta mobilidade de portadores de carga, alta densidade de elétrons e capacidade de operar em altas frequências. A alta mobilidade de portadores, que é uma das características principais do dispositivo e é parâmetro em estudo neste trabalho, pode variar em função da geometria, concentração de dopantes, corrente de condução, frequência de transição máxima etc. (Zhang *et al.*, 2020).

Este trabalho investiga o comportamento da mobilidade dos elétrons em diversos HEMTs, em função da variação de alguns parâmetros tais como o comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta, tensão de dreno, e em dispositivos que se diferem em algumas etapas dos respectivos processos de fabricação.

Assim como em outros transistores, vale frisar que os HEMTs são também em geral avaliados principalmente por parâmetros como: transcondutância, razão de aspecto entre a largura e comprimento do canal, inclinação sublimiar, mobilidade dos elétrons, entre outros. Além disso, possuem vantagens como ausência do efeito tiristor parasitário, diminuição das capacitâncias parasitas de fonte/dreno, dos efeitos de canal curto e correntes de fuga, baixo campo elétrico, redução de efeitos de resistência série etc. (Kilchytska *et al.*, 2005).

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento da mobilidade dos elétrons por diferentes métodos de extração da mobilidade em dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN, considerando a variação de parâmetros tais como comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta, tensão de dreno e variações nos diferentes processos de fabricação dos respectivos dispositivos. Condicionamente planeja-se analisar diversos resultados encontrados durante a pesquisa, tais como a corrente de dreno, transcondutância, condutância de saída, tensão de limiar, resistência série e inclinação sublimiar para cada parâmetro variado.

1.2 Estrutura

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. No primeiro capítulo, faz-se a introdução do trabalho enfatizando o seu principal objetivo.

No capítulo 2, apresenta-se o estado da arte, descrevendo os transistores em geral, alguns tipos de transistores conhecidos com as respectivas classificações e definição do transistor HEMT de AlGaIn/GaN como elemento principal em estudo, sua heteroestrutura, análise dos diagramas de energia, arquitetura, parâmetros característicos, avanços tecnológicos e desafios.

O terceiro capítulo aborda um estudo teórico sobre a mobilidade dos elétrons (μ) nos transistores HEMTs de AlGaIn/GaN através de diferentes métodos de extração, seguido da respectiva análise comparativa entre as respectivas formas de extração.

O quarto capítulo aborda a parte prática do trabalho, com as discussões ora realizadas tendo em conta os resultados encontrados. Fez-se inicialmente uma caracterização do dispositivo estudado, apresentou-se os dados disponíveis para o cálculo da mobilidade e a especificação dos parâmetros medidos e calculados para o posterior cálculo da mobilidade.

No quinto e último capítulo, fez-se a conclusão dos resultados que espelham importância de controlar os diferentes parâmetros que influenciam a mobilidade dos elétrons nos transistores HEMTs.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os transistores são dispositivos semicondutores comumente de silício (Si) ou germânio (Ge), que surgiram em 1947 como substitutos das válvulas termiônicas e representam a base da tecnologia moderna. Os transistores de efeito de campo (FETs) oferecem notáveis vantagens, como baixo consumo de energia, alta eficiência e escalabilidade, impulsionando a miniaturização e o desenvolvimento de dispositivos cada vez mais poderosos e compactos (Colinge *et al.*, 2002).

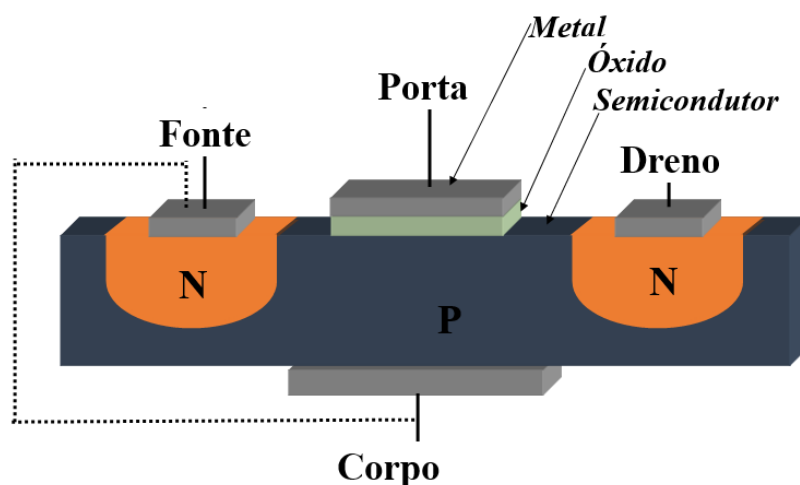
Funcionam como amplificadores ou chaves em circuitos, controlando o fluxo de corrente e operando em diferentes níveis de tensão, sendo crucial para a realização de cálculos lógicos e operações complexas em circuitos digitais, possibilitando assim o funcionamento de computadores, smartphones e outros dispositivos que moldam nossa sociedade (Sedra; Smith, 1971).

2.1 Tipos de transistores FETs

Os transistores de efeito de campo (FETs), se tornaram foco de atenção nas últimas décadas. Estes dispositivos são igualmente ativados por tensões elétricas a partir da porta. No cotidiano, esses transistores são mais acessíveis e de fácil fabricação em relação aos demais, sendo largamente utilizados em chips eletrônicos e diversos circuitos integrados (Sedra; Smith, 1971).

A Figura abaixo apresenta um MOSFET (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor) composto por diversas camadas, cada uma com função específica. A base do transistor é o substrato do tipo P (embora substratos do tipo N também possam ser utilizados), feito de um semicondutor como silício ou germânio. Separando a porta do canal, está a camada de óxido isolante. A porta, um terminal metálico, controla o fluxo de corrente através do canal por meio de um campo elétrico. Finalmente, os terminais dreno e fonte permitem que a corrente flua para fora e para dentro do transistor, respectivamente. (Colinge *et al.*, 2002).

Figura 1 – Transistor MOSFET de canal N.



Fonte: Autor.

Os FETs estão classificados em três diferentes grupos de transistores que são os IGFETs (FETs de porta isolada), os JFETs (FETs de junção) e os MESFETs (FETs de semicondutor e metal). Estes grupos de transistores são diferenciados, principalmente, pela forma como o capacitor de porta é composto. Nos IGFETs, o capacitor de porta é um isolante; nos JFETs, o capacitor de porta é formado pela camada de depleção de uma junção p-n; e nos MESFETs, o capacitor é uma barreira Schottky (Sze; Ng, 2007).

Nos IGFETs, encontram-se três diferentes grupos que são os MOSFETs (*FETs metal-óxido-semicondutor*), onde o isolante é uma camada de óxido crescida (ou depositada); os MISFETs (FETs metal-isolante-semicondutor) onde o isolador é um dielétrico depositado; e os HFETs (FETs de heterojunção) no qual o material de porta é uma camada semicondutora de alta energia de banda desenvolvida como uma heterojunção que atua como um isolante (Sze; Ng, 2007).

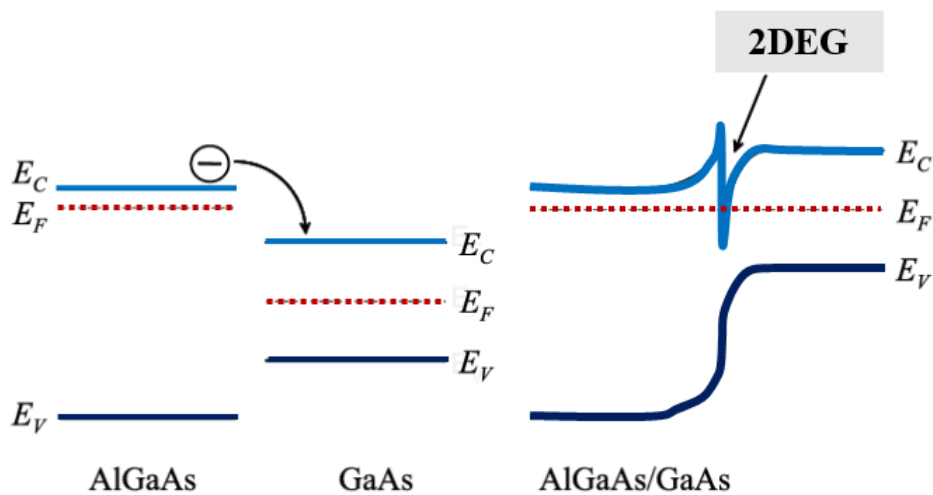
Os HFETs ou FETs de heterojunção são um dos mais recentes e estão classificados em dois diferentes grupos de transistores que são os MODFETs (*Modulation-doped FETs*) e os HIGFET (*Heterostructure-Isolated-Gate FETs*). Em geral os HEMTs são conhecidos como MODFETs (*Modulation-Doped Field-Effect Transistor*) (Sze; Ng, 2007).

2.2 Transistores de alta mobilidade dos elétrons (HEMTs)

2.2.1 Breve histórico

O estudo dos HEMTs tomou os seus primeiros passos nos anos de 1970, quando se tentava desenvolver MOSFETs de GaAs de maior velocidade (mobilidade dos elétrons), a partir de estudos teóricos, feitos em 1969 por Esaki e Tsu, a respeito de uma sequência de heterojunções denominada super rede de dopagem modulada (Figura 2), na qual somente o material de maior banda proibida seria dopado. Uma vez que a banda de condução do GaAs, apresenta uma energia menor que a do nível doador no AlGaAs, elétrons que possuam suficiente energia térmica para atingir a banda de condução irão se transferir do AlGaAs para o GaAs conforme a Figura 2. Este processo de transferência satisfaz a condição de equilíbrio expressa pelo nível de Fermi constante ao longo da heterojunção, acompanhado de um aumento no campo elétrico e um encurvamento do diagrama de bandas na região adjacente à interface AlGaAs/GaAs (Bergamim, 2022; Mimura, 2002).

Figura 2 – Banda de condução da super-rede de dopagem modulada.



Fonte: Autor.

Ou seja, uma vez que se trata do resultado de uma heteroestrutura, no HEMT, o elemento de maior energia na banda de condução é dopado com átomos doadores e, por isso, possui elétrons, em excesso que se difundem para a banda de condução do material adjacente devido à disponibilidade de estados com energias mais baixas. Esta difusão causa uma mudança no potencial e cria um campo elétrico entre os materiais que empurra os elétrons de volta para a região inicial do elemento de maior energia na respectiva banda de condução. O processo continua até que a difusão de elétrons e a deriva de elétrons se equilibrem criando uma junção em equilíbrio semelhante a uma junção PN (Mimura, 2002).

Os portadores de carga majoritários, produzirão altas velocidades de comutação e o fato de o semiconductor de banda proibida não ser dopado, significa que não há átomos doadores para causar espalhamento e, portanto, irá produzir alta mobilidade. Importante salientar que quanto maior a mobilidade dos portadores, maior será a corrente de dreno na região do canal e mais baixa será a resistividade (Mimura, 2002).

Esta heterojunção é fundamental no HEMT, pois permite que a corrente seja controlada pelo dispositivo, uma vez que, tendo em conta a sua rede cristalina, existe a facilidade de alguns elétrons da região do tipo N se moverem e outros permanecerem próximos à heterojunção, formando assim, a espessura conhecida como gás bidimensional (2DEG) de elétrons. Esta camada torna os elétrons capazes de se mover livremente devido à ausência de elétrons doadores ou outras impurezas com os quais os elétrons poderiam colidir, fazendo com que se obtenha alta mobilidade (Ajayan; Nirmal, 2019; Bergamim, 2022). O gás de elétrons bidimensional (2DEG), quando formado, propicia um impulso adicional à alta mobilidade dos elétrons podendo dobrar a mobilidade dos elétrons de $900\text{cm}^2/\text{Vs}$ para até $2000\text{cm}^2/\text{Vs}$, em relação ao GaAs (Ajayan; Nirmal, 2019; Lakhdhar, 2018).

Com as heterojunções de AlGaAs/GaAs, enfrentava-se ainda algumas limitações como por exemplo defeitos na formação da interface. Por volta de 1986, entretanto, foram publicados estudos sobre semicondutores a base de nitreto, nas quais usou-se a deposição de vapor químico orgânico de metal (MOCVD) para criar as camadas de GaN e AlN em filmes de alta qualidade usando o substrato de safira (Akasaka *et al.*, 2020). Essa técnica reduziu bastante tais limitações e abriu caminhos para a construção de dispositivos optoeletrônicos mais eficientes, potentes e duráveis, como lasers de alta potência, LEDs de alto brilho, detectores de luz UV e transistores de alta velocidade (Ajayan; Nirmal, 2019; Bergamim, 2022).

Estudos feitos até 2019 (tabela 1) mostram que geralmente transistores baseados em GaN têm uma capacitância parasitária muito baixa e uma frequência de corte alta, o que faz do GaN um material semiconductor muito importante. A Figura de mérito combinada evidente na tabela 1 mostra que o GaN tem atributos superiores como uma grande largura de banda de 3,49 eV, um campo de ruptura de $3,3 \times 10^6$ V/cm, mobilidade dos elétrons de $1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, densidade de portadores e altas velocidades de saturação de elétrons de até $10,5 \times 10^7$ cm/s. Essas características fazem do GaN uma das melhores escolhas para uso em aplicações de alta potência e operação em regime de alta frequência (Ajayan; Nirmal, 2019).

Além disso, o facto da sua heteroestrutura AlGaIn/GaN possuir um alto nível de descontinuidade da banda de condução e polarização piezoelétrica/espontânea forte, faz surgir uma grande densidade bidimensional de gás de elétrons, de aproximadamente $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ e a mobilidade dos elétrons pode atingir até $1800 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ na interface AlGaIn/GaN (Im *et al.*, 2019). Em aplicações de energia eficiente, os HEMTs baseados em GaN têm excelentes características e baixa perda de energia estática (Shi *et al.*, 2019).

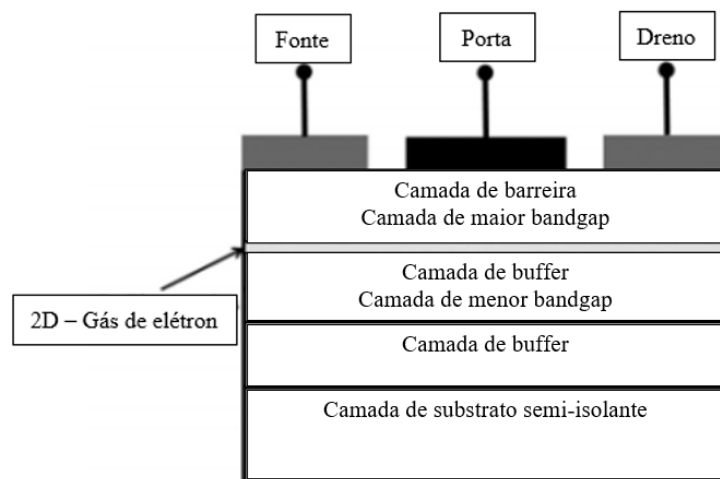
Tabela 1 – Propriedades Físicas dos Semicondutores (300 K)

Parâmetros	Si (SiGe/Si)	GaAs (AlGaAs/ InGaAs)	InP (InAlAs/ InGaAs)	4H SiC	GaN (AlGaN/GaN)	Diamante
Intervalo de banda (eV)	1,1	1,42	1,35	3,26	3,49	5,45
Mobilidade dos elétrons (cm^2/Vs)	1500 (2800)	8500 (8000)	5400 (10000)	700	900 (> 2000)	4000
Velocidade de saturação do elétron ($\times 10^7$ cm/s)	1,0 (1,0)	1,0 (10,1)	1,0 (10,3)	10,0	1,5 (10,7)	10,8
Densidade das resistências de contacto (cm^2)	2×10^{12}	$< 3 \times 10^{12}$	$< 4 \times 10^{12}$	N.A.	2×10^{13}	N.A.
Campo de ruptura crítica (MV/cm)	0,3	0,4	0,5	10,0	3,3	10
Condutividade térmica (W/cmK)	1,5	0,5	0,7	4,5	> 10,0	10,2

Fonte: Ajayan e Nirmal (2019).

Um dos maiores desafios da microeletrônica nos últimos anos tem sido a criação de dispositivos semicondutores com melhor desempenho para atender a demanda tecnológica (Ajayan; Nirmal, 2019). Por esta razão e a partir das descobertas envolvendo o comportamento de heterojunções, surgiu o HEMT, um dispositivo que apresenta algumas características encontradas no MOSFET de canal n (transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor), tal como o controle da corrente entre os terminais fonte-dreno que é feito pela tensão aplicada entre os terminais porta-fonte. No entanto, ele é composto de camadas de diferentes semicondutores (Ajayan; Nirmal, 2019). A Figura 3 mostra a arquitetura básica de um dispositivo HEMT em vista longitudinal, que será discutida posteriormente com mais detalhes.

Figura 3 – Estrutura básica de um HEMT.



Fonte: Autor.

A tabela 2 apresenta 3 parâmetros importantes, e como se pode observar, entre os elementos comparados o GaN irá possuir menor fuga de corrente e melhor desempenho em altas frequências.

Tabela 2 – Características elétricas dos materiais.

Propriedade	GaN	GaAs	Si
BFOM (ratio)	24,6	9,6	1
JFOM (ratio)	28	3,5	1
T_{máx} (°C)	700	300	300

Fonte: Adaptado de Ajayan e Nirmal (2019).

O GaN irá igualmente possuir maior BFOM (Figura de mérito que avalia a eficiência e é calculada como o produto da frequência de corte intrínseca e da máxima transcondutância); maior JFOM (Figura de mérito que relaciona a densidade de corrente máxima e a máxima transcondutância) e maior T_{máx} (temperatura máxima de operação).

Como foi dito, tais qualidades para o HEMT de GaN, o tornam melhor em aspectos como: capacidade de operar com alta velocidade e ganho, eficiente desempenho do dispositivo em aplicações de alta frequência, aplicações de altas densidades de corrente como em amplificadores de potência e capacidade de operar em temperaturas máximas de até 700 °C como observado na tabela 2 (Ajayan; Nirmal, 2019; Lakhdhar, 2018).

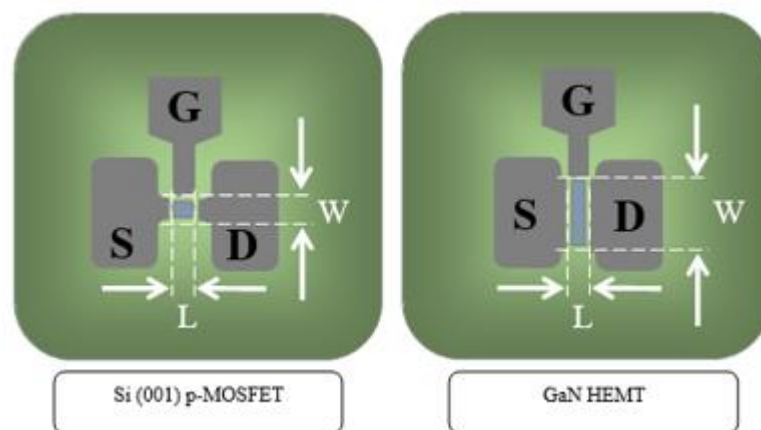
Reunindo todos estes fatores bem como a teoria dos HEMTs, as questões técnicas e econômicas, os HEMTs de GaN passam a ser uma boa opção para aplicações específicas.

2.2.2 Arquitetura do HEMT

Inicialmente, apresenta-se a Figura 4 que mostra comparativamente uma micrografia contendo dois transistores de potência de diferentes tipos. À esquerda, um transistor MOSFET do tipo N e a direita um HEMT de GaN, mostrando claramente através da zona de cor azul-cinza as regiões de canal dos dois transistores.

A tecnologia do HEMT pode permitir o funcionamento de transistores com maior largura efetiva de canal em relação ao MOSFET como mostrado na Figura abaixo o que permite o aumento da capacidade de condução de corrente (Bergamim, 2022).

Figura 4 – Micrografia dos transistores MOSFET tipo n (à esquerda) e GaN HEMT (à direita).



Fonte: Autor.

Assim como em outros transistores, é importante controlar a fuga da corrente de porta devido ao contato de porta Schottky e ao forte campo elétrico induzido pela polarização na camada de barreira, porque se a corrente de porta for alta, aumenta a dissipação de energia no estado desligado, e pode, conseqüentemente, apresentar problemas de confiabilidade e atuar como uma fonte de ruído adicional. Deste modo, a supressão da corrente de fuga de porta é essencial para melhorar o desempenho do dispositivo e sua confiabilidade (Ajayan; Nirmal, 2019).

O alto valor de corrente de porta pode ser mitigado pela inserção de uma camada isolante entre a camada de barreira AlGaIn e o metal da porta. Essa estrutura é comumente conhecida como Metal Isolante Semicondutor HEMT ou MIS-HEMT (Ajayan; Nirmal, 2019).

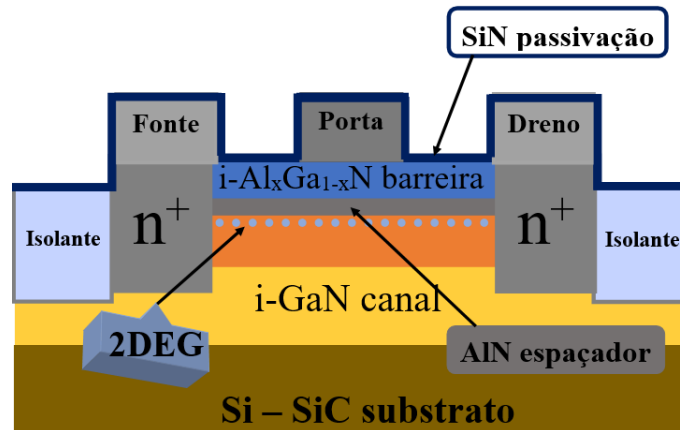
A seguir, observa-se uma estrutura HEMT de contato de porta Schottky conforme mostrado na Figura 5. O desempenho do HEMTs de GaN pode ser melhorado utilizando uma camada espaçadora de nitreto de alumínio (AlN) na interface de AlGaIn/GaN e usando silício (Si) nas regiões de fonte-dreno implantadas. A camada espaçadora de AlN colocada entre o canal de GaN e as camadas de barreira de AlGaIn aumenta significativamente a condutividade do gás de elétrons bidimensional (2DEG), o que pode resultar em uma densidade de corrente de até 1,3 A/mm (Ajayan; Nirmal, 2019).

No entanto, o AlN é, em geral, altamente isolante e, por esta razão, dificulta o acesso ao canal através das regiões fonte-dreno. As estruturas epitaxiais com camadas de tampão GaN, espaçador AlN e barreira AlGaIn, como mostrado nesta Figura abaixo, foram crescidas em substratos de silício ou ainda carbeto de silício (SiC) usando deposição de vapor químico metal-orgânico (MOCVD) (Ajayan; Nirmal, 2019).

Considerando que um dos elementos principais para o fabrico de um HEMT é a heterojunção, durante a formação desta heterojunção metal-semicondutor (barreira Schottky de polarização reversa) ocorre a união dos diferentes materiais de cada lado, onde a simplicidade das barreiras Schottky permite a fabricação considerando as respectivas tolerâncias geométricas (Ajayan; Nirmal, 2019).

Este estudo centra as atenções nos HEMTs de AlGaIn/GaN crescidos no substrato de silício. O silício vem sendo o material semicondutor mais popular na indústria para a fabricação de dispositivos discretos e circuitos integrados devido às suas diversas vantagens inerentes como maior confiabilidade, facilidade de uso e baixo custo (Ajayan; Nirmal, 2019; Lakhdhar, 2018).

Figura 5 – Estrutura esquemática em corte transversal de AlGa_N/AlN/GaN HEMT fabricado empregando dopagem por implantação de íons SiC.



Fonte: Autor.

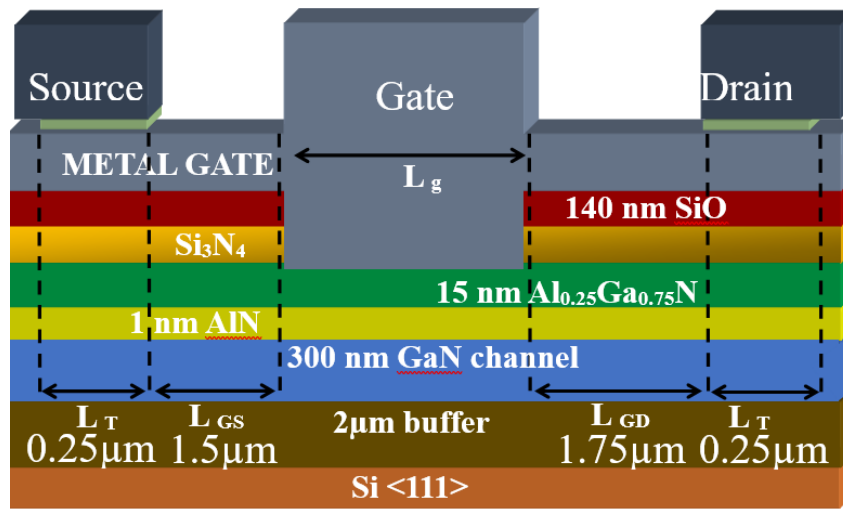
2.2.2.1 Descrição do HEMT em estudo

A Figura 6 apresenta uma vista em camadas do transistor de AlGa_N/Ga_N. Inicialmente, observa-se um substrato de alta resistividade de Si <111> como base principal onde cresce o dispositivo.

Além do silício, em alguns casos podem ainda ser usados como base a safira, o carbetto de silício, e em casos raros, o próprio nitreto de gálio que, além de caro, é necessário realizar nele uma difícil dopagem para torná-lo resistivo. Vale ressaltar que a base do substrato (silício) contribui para oferecer um funcionamento mais estável em diferentes temperaturas (Peralagu *et al.*, 2019; Lakhdhar, 2018).

Na Figura 6 observa-se 2 µm de camada de buffer (Ga_N/AlGa_N) que otimiza o funcionamento em todo o dispositivo. O canal propriamente dito é uma camada de 300 nm de Ga_N que se encontra abaixo de um espaçador de 1 nm de AlN que serve para melhorar a mobilidade e a corrente de dreno (Peralagu *et al.*, 2019; Lakhdhar, 2018).

Figura 6 – Vista em 3D do transistor de AlGaIn/GaN.



Fonte: Peralagu *et al.* (2019).

O dispositivo contém também uma barreira de 15 nm de $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{N}$, onde 0,25 é a fração molar do alumínio e 0,75 é a fração molar do gálio. Essa camada forma o contato Schottky com o contato metal de porta e gera elétrons para a corrente do canal (Peralagu *et al.*, 2019; Lakhdhar, 2018).

É adicionada uma camada de MOCVD (*Molecular Organic Chemical Vapour Deposition*) com temperaturas maiores que 1000 °C ou MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) com temperaturas maiores que 700 °C usando o Si_3N_4 e 140 nm de SiO_2 como espessura do material entre o 2DEG e o metal da porta seguido do metal de porta ou também chamada de porta metálica (Peralagu *et al.*, 2019; Lakhdhar, 2018).

Além da variação dos parâmetros, foram analisados três dispositivos e cada uma com características específicas, cujas respectivas diferenças estão no material de contato dreno-fonte, na estrutura ou material de porta e na temperatura de recozimento térmico durante o processo de fabricação.

Os transistores em estudo, estão contidos em chips e possuem dimensões diversas nos seus respectivos terminais de drenos, fontes e porta. Para identificar os dispositivos analisados, apresenta-se a tabela 3 com os dados das disposições geométricas de cada transistor, como o comprimento do canal e a largura do canal, onde cada RL, representa um chip com 8 transistores de mesmas dimensões. Para cada chip, foi obtido a média de 8 medições (uma para cada transistor) tanto em parâmetros geométricos (largura e comprimento do canal), como na análise das curvas $I_d \times V_g$ e $I_d \times V_d$.

Tabela 3 – Descrição geométrica dos dispositivos codificados de RL1 – RL12

RL	L (μm)	W (μm)
1	0,2	1
2	0,2	10
3	0,2	100
4	0,4	1
5	0,4	10
6	0,4	100
7	1	1
8	1	10
9	1	100
10	10	1
11	10	10
12	10	100

Fonte: Imec ([201-?])¹.

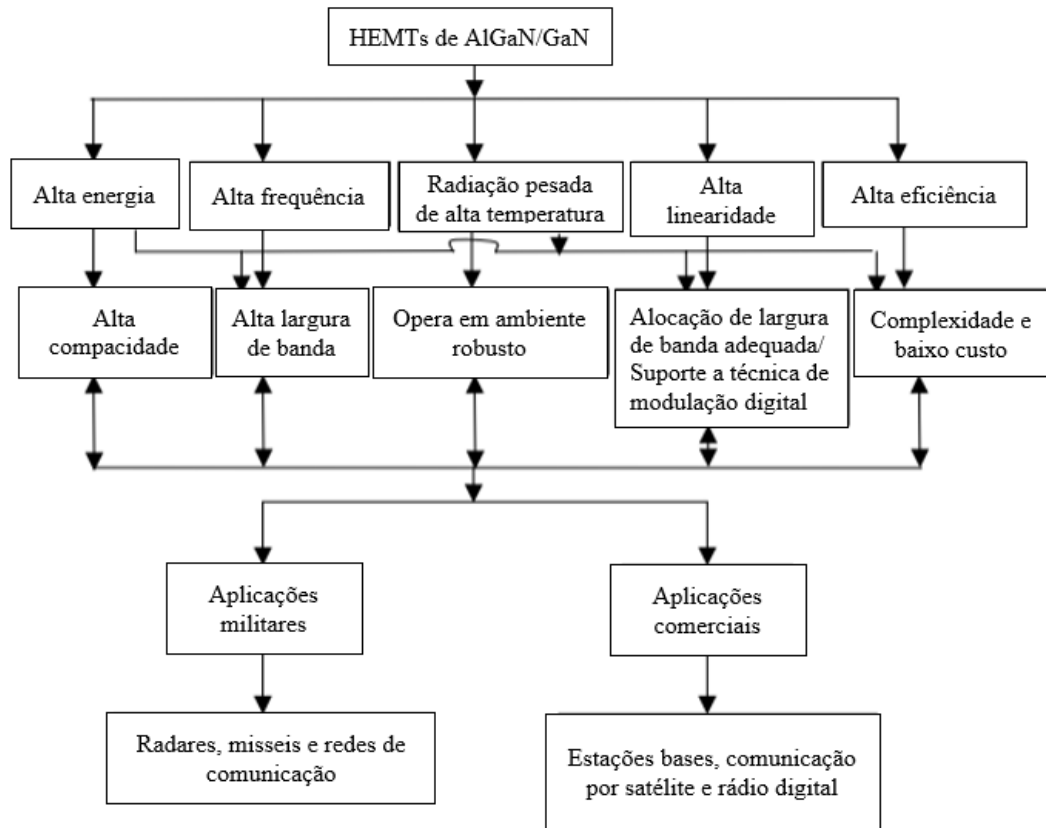
2.2.3 Aplicações dos HEMTs

O HEMT foi anteriormente desenvolvido para aplicações de alta velocidade e, devido ao seu desempenho de baixo ruído, são atualmente muito utilizados em amplificadores de pequenos sinais, amplificadores de potência, osciladores e misturadores operando em frequências de até 60 GHz. (Ajayan; Nirmal, 2019). O desenvolvimento do HEMT levou muitos anos, mas seu uso e sua expansão no mercado ocorreram logo depois que os transistores de efeito de campo se estabeleceram como componente eletrônico padrão (Mimura, 2002).

Os HEMTs de AlGaIn/GaN (HEMTs) são de grande interesse se aplicados em circuitos de radiofrequência e circuitos analógicos devido a suas propriedades como alta frequência, alto campo elétrico de ruptura e alta velocidade de saturação dos elétrons. Porém, os ajustes para cada aplicação podem ser feitos variando a largura e o comprimento do canal, onde são normalmente obtidas aplicações para diversos dispositivos como, por exemplo, em telefones celulares, radares, misturadores, osciladores, vigilância, reconhecimento, transmissão de TV, satélite de comunicação, estações rádio base, rádios digitais e atenuadores, aplicações militares etc. (ver Figura 7) (Ajayan; Nirmal, 2019; Lakhdhar, 2018).

¹ Documento disponibilizado pelo Imec.

Figura 7 – Características e áreas de aplicações de HEMTs de AlGaIn/GaN.



Fonte: Adaptado de Lakhdhar (2018).

Estudos mostram ainda que dispositivos a base de GaN são ideais para aplicação em 5G, uma vez que quando usado para confecção de HEMTs, oferecem um alto campo de ruptura, capacidades operacionais de alta temperatura e alta mobilidade dos elétrons devido à sua heteroestrutura (Ajayan; Nirmal, 2019).

2.2.4 Caracterização geral dos parâmetros em estudo no HEMT

Para o estudo dos HEMTs, aponta-se, de forma geral, alguns parâmetros importantes para a sua caracterização e cálculo da mobilidade dos elétrons tais como: corrente de dreno, resistência série, condutância de saída, transcondutância, tensão de limiar e inclinação sublimiar. É importante caracterizar tais parâmetros, uma vez que, por meio desta, torna-se também possível avaliar o desempenho do dispositivo.

2.2.4.1 Corrente de dreno (I_d)

No estudo de dispositivos FETs, a corrente de dreno (I_d) é definida como o fluxo de elétrons que atravessa o terminal de dreno do transistor, e é influenciada diretamente pela tensão de porta aplicada no terminal de controle, pelas características do próprio dispositivo e pela tensão de dreno, uma vez que a tensão de dreno pode influenciar a resistência de dreno, que é a resistência apresentada pelo dispositivo ao fluxo de corrente. A corrente máxima do HEMT pode ser obtida através da equação 1 (Ajayan; Nirmal, 2019).

$$I_{d,max} = \mu_n \frac{\varepsilon_d}{\omega} \frac{W}{L} \frac{(V_g - V_T)^2}{2} \quad (1)$$

onde μ_n é a mobilidade dos portadores, ε_d é a permissividade do material, ω é a largura média da camada de depleção no canal, $\frac{W}{L}$ é a relação de aspecto entre a largura e o comprimento do canal e $(V_g - V_T)$ é a tensão de overdrive ou tensão efetiva, sendo V_T a tensão de limiar.

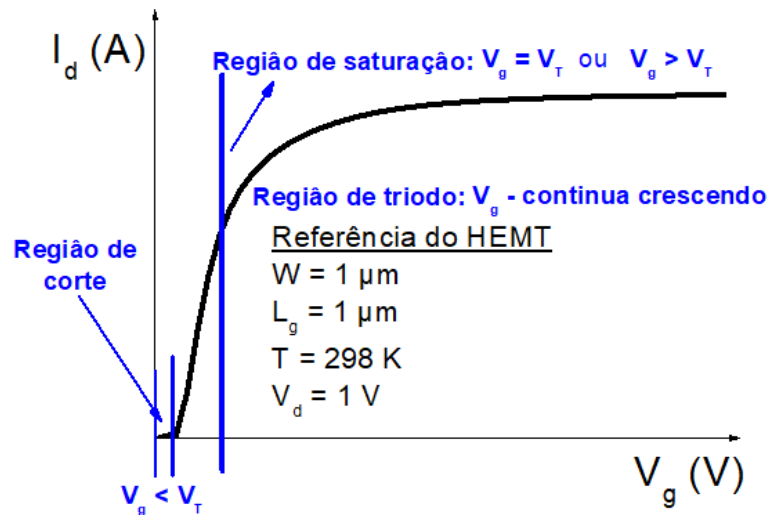
Em geral o comportamento da corrente de dreno é analisado através das curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$) e das curvas de corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$).

As curvas ($I_d \times V_g$) são essenciais para caracterizar o HEMT e, geralmente, traçadas com V_d constante. Elas podem ser controladas através de medições experimentais ou simulações computacionais, onde a corrente de dreno é plotada em função da tensão de porta. Essas curvas exibem três regiões principais: a região de corte, a região de saturação e a região de triodo (Figura 8).

Na região de corte, o HEMT está desligado e a I_d é muito baixa, para qualquer valor de V_g , desde que $V_g < V_T$. Quando $V_g \geq V_T$, o HEMT começa a conduzir e a I_d começa a aumentar rapidamente em resposta ao aumento de V_g , considerando o HEMT ativo e operando em seu modo de condução ideal, onde a I_d é proporcional à V_g . A taxa de variação de I_d por V_g é chamada de transcondutância (g_m) do HEMT, também conhecida como medida de sua sensibilidade à tensão de controle. Se V_g continuar a aumentar o transistor entrará na região de triodo, onde a I_d atinge um valor máximo e começa a se estabilizar para qualquer aumento adicional no valor da V_g .

Uma vez que o HEMT atingirá seus limites de operação, neste caso, a I_d passa a ser controlada por outros parâmetros físicos como a resistência de saída do dispositivo (Bergamim, 2022).

Figura 8 – Gráfico da corrente de dreno em função da tensão de porta onde são indicados a região de corte, a região de saturação e a região de triodo.

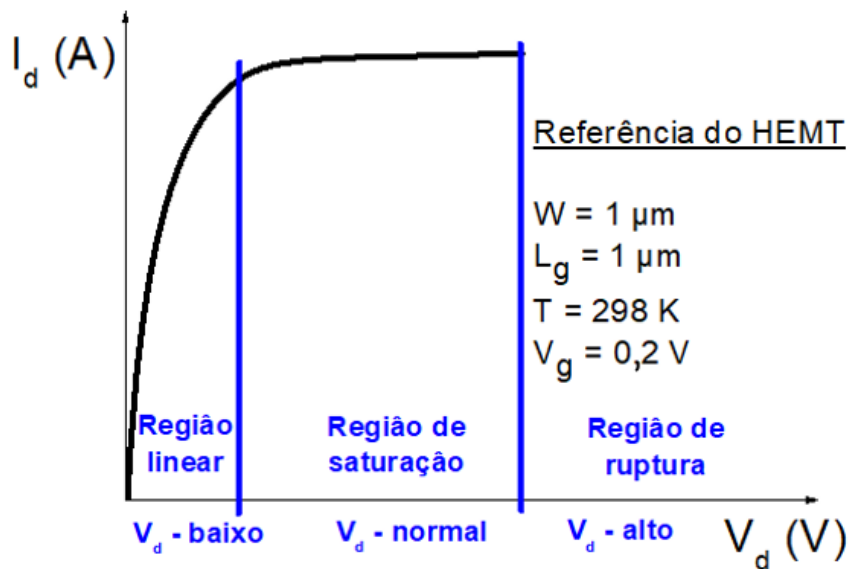


Fonte: Autor.

Conforme a mesma analogia das curvas ($I_d \times V_g$), a curva ($I_d \times V_d$) igualmente mostra o comportamento da corrente de dreno em função da tensão de dreno, mantendo constante V_g . Assim, quando uma tensão de dreno é aplicada a um HEMT, a corrente de dreno começa a fluir pelo dispositivo. Estas curvas exibem as características do HEMT em diferentes regimes de operação como mostrado na Figura 9. Por exemplo, quando V_d é baixa, I_d e V_d são linearmente proporcionais e o HEMT opera numa região linear ou de baixo campo. À medida em que V_d é aumentada o dispositivo entra na região de saturação, onde I_d e V_d deixam de ser linearmente proporcionais e a I_d atinge um valor máximo para a V_d aplicada. Nesta região de saturação, o dispositivo oferece melhor desempenho devido à maior corrente de dreno, menor distorção, maior velocidade de comutação e maior confiabilidade.

Além destas regiões, as curvas podem ainda apresentar uma terceira região, que é a região de ruptura, onde ocorre um aumento acentuado na I_d quando V_d é alta. Essa região é geralmente indesejável e deve ser evitada, pois pode causar danos permanentes ao dispositivo, acompanhado por uma queda abrupta em I_d (Bergamim, 2022).

Figura 9 – Gráfico da corrente de dreno em função da tensão de dreno onde são indicadas as regiões linear, de saturação e de Ruptura.



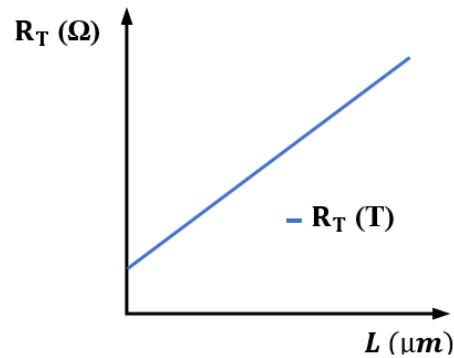
Fonte: Autor.

Assim sendo, pode-se dizer que variar tanto V_g como V_d implica em variar as diferentes regiões de operação do transistor.

2.2.4.2 Resistência série (R_{SD})

A resistência série (R_{SD}) é o parâmetro que descreve a resistência elétrica ao longo do caminho percorrido pela corrente por estar em série com as regiões de fonte e dreno. Ela surge devido às características físicas dos materiais utilizados na construção dos componentes eletrônicos e dos próprios condutores elétricos. É diretamente proporcional ao comprimento do caminho percorrido pela corrente elétrica conhecido como comprimento do canal (L), conforme a Figura 10, e inversamente proporcional à área da seção transversal (A) desse caminho. Assim sendo, quanto maior a resistência série, maior a queda de tensão ao longo do caminho da corrente causando perdas de energia, dissipação de calor e limitações na corrente máxima que pode fluir através do circuito, provocando uma diminuição na eficiência geral do dispositivo (Kaushik, 2020; Aminbeidokhti, 2016).

Figura 10 – Gráfico da Resistencia total em função do comprimento do canal.



Fonte: Autor.

Vale frisar que a resistência total, R_T , é o resultado da soma da resistência série R_{SD} e a resistência do canal R_{Ch} (Equação 2), desconsiderando a resistência do canal, uma vez que se trata de uma situação em que a resistência série é significativamente maior que a resistência do canal, além da respectiva variação da resistência do canal ser mínima o suficiente para ser desconsiderada devido as condições de operação, o que permite focar na resistência série, que é frequentemente dominante e de maior interesse para certas análises e otimizações, obtém-se a Equação 3.

$$R_T = R_{SD} + R_{Ch} \quad (2)$$

$$R_T = R_{SD} = \frac{V_d}{I_d} \quad (3)$$

A partir dos conceitos de eletricidade básica, sabe-se que segundo a lei de Ohm, a tensão aplicada em um ramo resulta do produto da intensidade de corrente que passa por tal ramo a respectiva resistência.

Ao desprezar a resistência do canal, conforme a segunda lei de Ohm, ao quantificar a resistência do canal, é comum utilizar o conceito de resistividade (ρ), que é a resistência específica de um material, conforme a equação 4. A resistividade é determinada pelas propriedades físicas do material, como sua condutividade elétrica e a mobilidade dos portadores de carga.

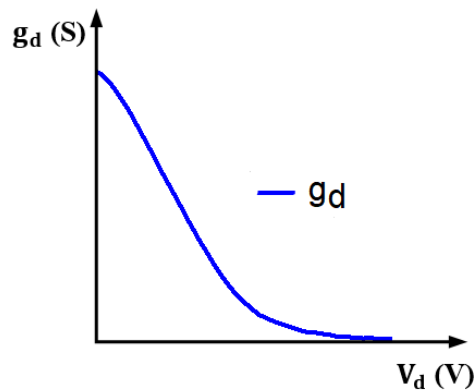
$$R_{Ch} = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

2.2.4.3 Condutância de saída (g_d)

Pode-se dizer que a condutância de saída (g_d), (Figura 11), é inversamente proporcional à resistência conforme a equação 5, uma vez que ela descreve a facilidade com que a corrente flui pelo canal do dispositivo. Ela representa a relação entre a corrente de dreno e a tensão de dreno. A condutância de saída é frequentemente expressa em Siemens (S), está relacionada às características físicas e ao projeto do dispositivo e é, geralmente, influenciada por fatores como estrutura interna do dispositivo, geometria do canal de condução, dopagem do material semicondutor e parâmetros de fabricação (Aminbeidokhti *et al.*, 2022; Bergamim, 2022; Santos, 2010).

$$g_d = \frac{\partial I_d}{\partial V_d} = \frac{1}{\frac{\partial V_d}{\partial I_d}} \quad (5)$$

Figura 11 – Gráfico da condutância de saída (g_d) em função da tensão de dreno (V_d).



Fonte: Autor.

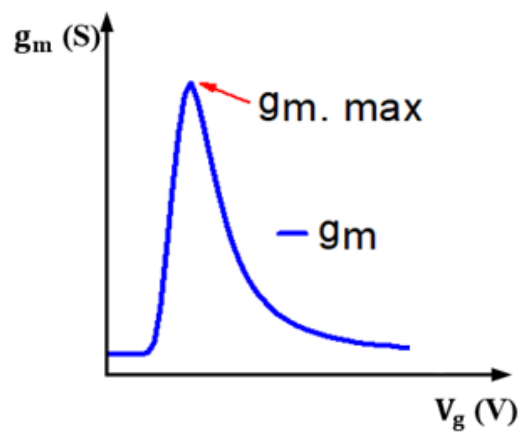
2.2.4.4 Transcondutância (g_m)

Como mostra a equação 6, a transcondutância (g_m) apresentada na Figura 12, é uma grandeza que caracteriza a variação da corrente de dreno em função da tensão de porta. Ela é de extrema importância, principalmente, para a obtenção da mobilidade de efeito de campo e da tensão de limiar (Aminbeidokhti, 2016; Bergamim, 2022; Santos, 2010).

Importa salientar que o valor máximo da transcondutância de um dispositivo HEMT é também dependente da largura do canal, do comprimento do canal e da capacitância da porta (Aminbeidokhti *et al.*, 2022; Bergamim, 2022; Santos, 2010).

$$g_m = \frac{\partial I_d}{\partial V_g} \quad (6)$$

Figura 12 – Gráfico da transcondutância (g_m) em função da tensão de porta (V_d).



Fonte: Autor.

2.2.4.5 Tensão de limiar (V_T)

A tensão de limiar (V_T) é a tensão mínima para a formação de um canal de inversão de portadores entre fonte e dreno. Este parâmetro é de grande relevância, uma vez que determina o ponto a partir do qual se dá início ao fluxo de corrente para a operação do transistor (ver na Figura 8). A tensão de limiar é de grande importância, pois, através dela é possível avaliar a eficiência energética. Esta tensão de limiar é influenciada pelo processo de fabricação dos dispositivos tal como a dopagem do semiconductor usado para fabricar o transistor e a geometria do transistor (Mano *et al.*, 2020).

A tensão de limiar é um parâmetro crucial que influencia o comportamento de transistores de efeito de campo. Ao compreender a tensão de limiar e os fatores que a determinam, é possível projetar e utilizar transistores de forma mais eficaz em diversos tipos de circuitos eletrônicos.

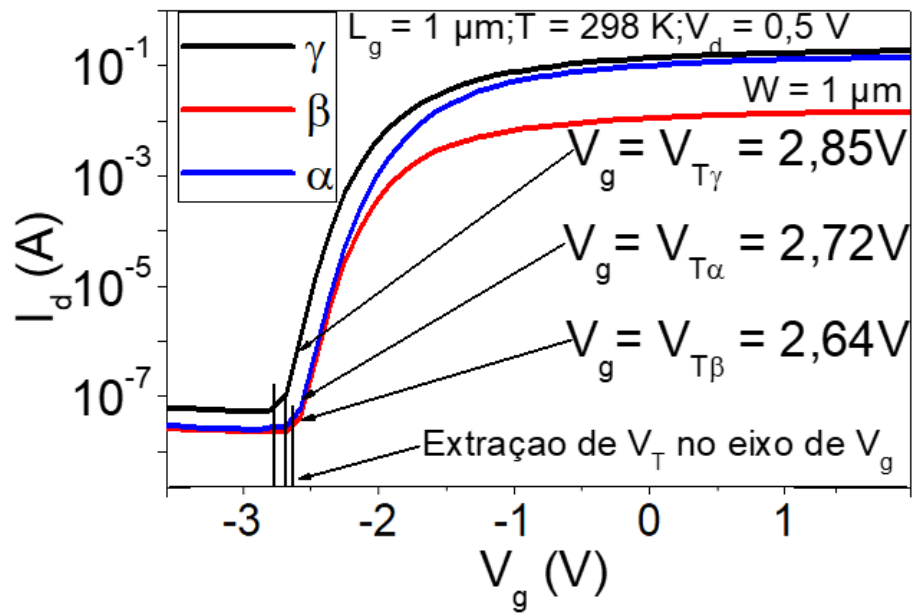
Dependendo do modelo do transistor pode-se escolher um método para a obter a tensão de limiar. Um dos métodos muito usados é método da extrapolação conforme a equação 7 que indica o acionamento da corrente de dreno através do máximo da transcondutância, onde V_g é a tensão de porta, $g(máx)$ é a transcondutância máxima, I_d é a corrente de dreno e V_d é a tensão de dreno. Pode ser utilizado também o método de aproximação da corrente de dreno, em que se obtém V_T na curva da corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$), considerando $V_T = V_g$ em um determinado I_d mostrado na equação 8, onde W é a largura do canal (Bergamim, 2022; Santos, 2010).

$$V_T = V_{g(g_m(máx))} - \left(\frac{I_d(g_m(máx))}{g(máx)} \right) - V_d/2 \quad (7)$$

$$I_d = \frac{W}{L} 10^{-7} \quad (8)$$

Neste trabalho, foi aplicado inicialmente o método da extrapolação, substituindo os respectivos valores em cada parâmetro da equação 7 através de cálculos. Na intenção de comparar os resultados da tensão de limiar (V_T), aplicou-se, em seguida, o método da aproximação a partir da equação 8, conforme mostra o resultado experimental na Figura 13, onde observou-se resultados muitos próximos de $I_d = \frac{W}{L} 10^{-7}$.

Figura 13 – Resultado da extração da tensão de limiar pelo método de aproximação da corrente constante.



Fonte: Autor.

A Figura 13 apresenta uma amostra de resultado da extração da tensão de limiar através do método de aproximação (equação 8) dos três dispositivos em estudo denominados alfa (α), beta (β) e gama (γ) (as diferenças entre os dispositivos serão explicadas posteriormente em outro tópico). A extração foi feita nos dois métodos em todos os dispositivos usados, considerando a variação dos parâmetros em análise.

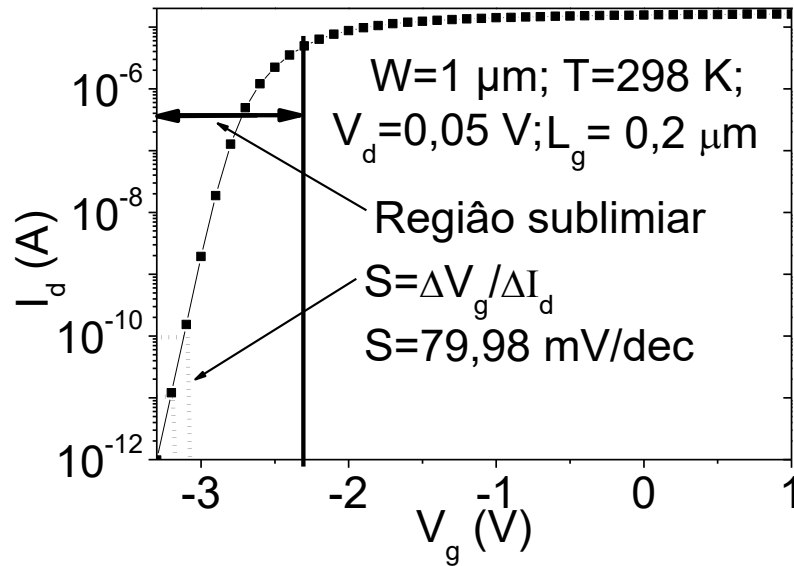
2.2.4.6 Inclinação sublimiar (S)

A inclinação sublimiar (S) descreve a relação entre a tensão de porta e a corrente de dreno de um dispositivo semiconductor operando abaixo do limiar de condução. Ela é uma medida da eficiência com que o dispositivo pode ser desligado quando V_g é reduzida. Neste trabalho, a inclinação sublimiar foi extraída pelo método gráfico conforme a equação 9, ou seja, a partir da curva $I_d \times V_g$, fez-se a plotagem da curva logarítmica da corrente de dreno em função da tensão de porta ($(\log I_d) \times V_g$) e em seguida identificou-se a região sublimiar na respectiva curva que é a região onde a corrente de dreno aumenta exponencialmente com a tensão de porta. A figura abaixo mostra um exemplo prático desta extração para um HEMT específico (Bergamim, 2022; Santos, 2010).

A inclinação sublimiar é normalmente expressa em termos de milivolts por década (mV/dec) e, pode-se dizer que, quanto menor (até o limite teórico de 60 mV/dec), mais acentuada é a transição entre a região de corte e a região de condução do dispositivo, resultando em melhor controle do fluxo de corrente e menor corrente de fuga quando o dispositivo está desligado (Bergamim, 2022; Santos, 2010).

$$S = \frac{dV_g}{d(\log I_d)} \quad (9)$$

Figura 14 – Resultado da extração da inclinação sublimiar pelo método gráfico.



Fonte: Autor.

2.2.4.7 Mobilidade

A mobilidade descreve a facilidade do deslocamento dos portadores dentro de um material ou um dispositivo sob efeito do campo elétrico, é expressa em unidades de centímetros quadrados por volt segundo (cm^2/Vs), e pode ser analisada conforme a equação 10. (Santos, 2010).

$$\mu_0 = S \frac{1}{1 - R_{SD} V_d S} \frac{L_g}{C_d W} \quad (10)$$

Onde C_d é a capacitância elétrica por unidade de área.

Este trabalho aborda o comportamento da mobilidade efetiva (μ_{eff}), mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}), e a mobilidade de baixo campo (μ_0) nos HEMTs de GaN em função da variação de diversos parâmetros como estrutura geométrica, temperatura, tensão de porta, tensão de dreno e alguns processos de fabricação. Cada tipo de mobilidade foi caracterizada no capítulo a seguir que aborda o estudo teórico da mobilidade nos dispositivos HEMTs.

3 ESTUDO TEÓRICO DA MOBILIDADE (μ) NOS DISPOSITIVOS HEMTs

A seguir, apresenta-se um estudo teórico sobre os métodos para calcular a mobilidade efetiva por aproximação gradual do canal (μ_{eff}) e mobilidade efetiva por efetiva por $g_{m,max}$ ($\mu_{eff/g_{m,max}}$), mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) e a mobilidade de baixo campo (μ_0).

Neste estudo, considera-se que a mobilidade efetiva (μ_{eff}) caracteriza a mobilidade dos portadores de carga em um material quando sujeito a um campo elétrico não uniforme, determina a condutividade elétrica do material e é influenciada por fatores como densidade de impurezas, estrutura do material e temperatura. A mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) é geralmente analisada quando o dispositivo é submetido a um campo elétrico uniforme e forte, oferecendo como resposta um campo elétrico externo muito intenso. E a mobilidade de baixo campo (μ_0), por sua vez ocorre em experimentos quando o HEMT recebe um campo elétrico fraco (Santos, 2010).

Para determinar as diferentes mobilidades dos portadores de carga, foram realizadas medições em condições de polarização variadas que foram especificadas durante a apresentação de resultados, permitindo a obtenção das mobilidades em diferentes regimes de campo elétrico, desde condições de baixo campo até campos elétricos altos, tanto uniformes quanto não uniformes.

3.1 Métodos de extração da mobilidade

Um parâmetro importante no estudo da mobilidade dos elétrons nos transistores em geral e, em particular, no HEMT de GaN é a resistência de canal, uma vez que no Nitreto de Gálio a largura de banda permite alta tensão de ruptura, alta velocidade de elétrons e alto nível de potência em altas temperaturas. Importa salientar que este valor alto para a tensão de ruptura permite um valor também alto para corrente e para frequências de corte, bem como para potências de saída (Ajayan; Nirmal, 2019).

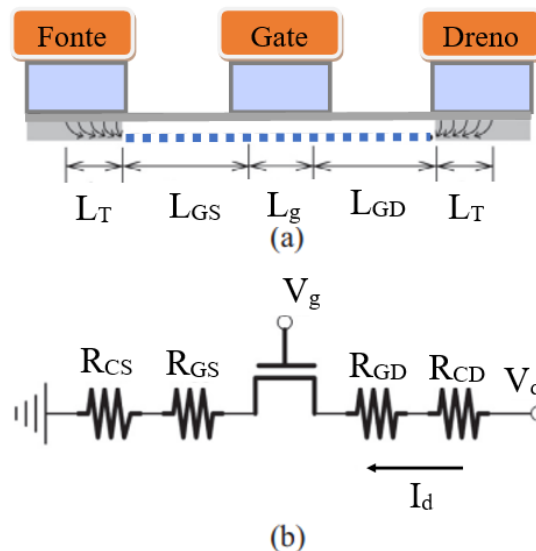
Esta heteroestrutura (AlGaIn/GaN) está habilitada a operar com densidades de potência extremamente altas de radiofrequências em potências superiores a 30 W/mm. (Medjdoub *et al.*, 2007).

Portanto, os HEMTs de GaN aplicados em dispositivos de alta potência oferecem a capacidade de controlar o fluxo de potência mantendo a sua dissipação de energia mais baixa possível. Outrossim, na construção dos transistores de GaN procura-se também superar desafios como a obtenção da baixa resistência de estados incluindo os contatos ôhmicos e a alta tensão de ruptura sem afetar as condições do dispositivo (Ajayan; Nirmal, 2019).

3.1.1 Mobilidade efetiva por aproximação gradual do canal (μ_{eff})

Este método pode ser denominado como método de aproximação gradual do canal, uma vez que ele se baseia em uma separação do 2DEG entre a fonte e o dreno em seções sob e fora da porta para utilizar a aproximação gradual do canal sob a porta. O método combina a equação para a seção 2DEG sob a porta com resistências de 2DEG fora da porta de uma maneira que permite a separação completa das resistências externas da porta, da mobilidade extraída do 2DEG sob a porta (Aminbeidokhti, 2016).

Figura 15 – Acima, a vista esquemática em corte transversal de um HEMT e abaixo o circuito equivalente mostrando as seções resistivas e a seção de efeito de campo sob a porta.



Fonte: Adaptado de Aminbeidokhti et al. (2022).

A Figura 15 mostra a abordagem que leva ao método de extração aqui estudada que se refere à seção transversal do HEMT e ao circuito equivalente. Sob a porta, o transistor é modelado fazendo com que a tensão da porta afete a mobilidade.

Fora da porta, o transistor é controlado pelas resistências porta-fonte R_{GS} e porta-dreno R_{GD} assumindo que as resistências dessas seções são constantes e independentes da tensão de porta. O conjunto final de componentes no circuito equivalente dessa região considera as resistências de contato fonte e dreno (R_{CS} e R_{CD}) proporcionais ao comprimento de transferência (L_T -comprimento onde se transfere a corrente do metal para o semiconductor). Este comprimento é menor do que o comprimento metal-semiconductor correspondente devido ao acúmulo de corrente no elétrodo do contato, L_{GS} é o comprimento entre a porta e a fonte e L_{GD} é o comprimento entre a porta e o dreno (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

A seguir, serão descritos os procedimentos para os cálculos da mobilidade (Aminbeidokhti, 2016).

Cálculo da resistência:

$$R = R_{Sh}n \quad (11)$$

onde: R é a resistência do resistor; R_{Sh} é a resistência de folha (resistência por unidade quadrada), que incorpora todos os parâmetros tecnológicos; n é o número efetivo de quadrados, que representa o impacto dos parâmetros do projeto geométrico (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

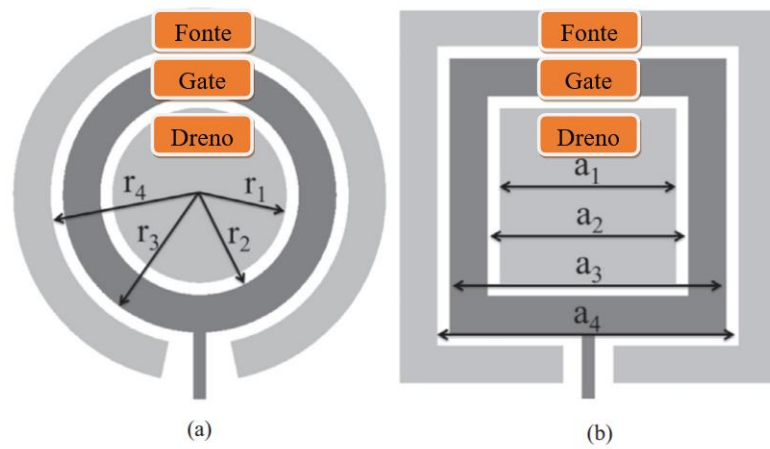
Para um resistor com comprimento do canal (L) e largura (W) definidas, o número efetivo de quadrados será:

$$n = \frac{L}{W} \quad (12)$$

O número efetivo de quadrados (n) é um parâmetro que pode variar em função da geometria do HEMT. Para cada caso, são fixadas e tabeladas (ver tabela 4) as equações para número efetivo de quadrados para HEMTs (circulares, quadrados e básicos), conforme aplicados às regiões de fonte (n_S), dreno (n_D), porta (n_G), e contato (n_C).

Os HEMTs são frequentemente projetados em geometria fechada utilizando formas circulares ou quadradas, permitindo um melhor controle das correntes de fuga devido à existência de 2DEG nas áreas que não são controladas pela porta. A Figura 16 ilustra as diferenças estruturais entre os HEMTs quadrados 16(a) e circulares 16(b), respectivamente. Neste estudo considera-se análise da mobilidade apenas para HEMTs simples (tabela 4).

Figura 16 – Vista superior de (a) HEMT circular e (b) HEMT quadrado.



Fonte: Adaptado de Aminbeidokhti *et al.* (2022).

O conjunto final de componentes no circuito equivalente fora da porta são as resistências de contato de fonte e dreno R_{CS} e R_{CD} . As resistências de contato em HEMTs são proporcionais ao comprimento de transferência ($L_T = \frac{R_C W}{R_{S-C}}$). O comprimento de transferência é menor do que o do contato metal-semicondutor correspondente devido ao acúmulo de corrente na borda do contato. Basicamente, o comprimento de transferência é aquele no qual a maior parte da corrente é transferida do metal para o semicondutor (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

A resistência de folha é constante na seção bidimensional e independe da tensão da porta. Esta resistência é rotulada por R_{S-0} . As resistências das seções porta-fonte (R_{GS}) e porta-dreno (R_{GD}) são dadas por:

$$\begin{aligned} R_{GS} &= (R_{S-0})n_S \\ R_{GD} &= (R_{S-0})n_D \end{aligned} \tag{13}$$

Tabela 4 – Número efetivo de quadrados para os HEMTs simples, circulares e quadrados.

Símbolo	Quantidade	HEMT simples	HEMT circular: r_1 – Raio de contato do dreno; r_2 – Raio interno do anel de porta; r_3 – Raio externo do anel de porta; r_4 – Raio interno do anel de fonte;	HEMT quadrado: a_1 – Comprimento do dreno; a_2 – Comprimento interno da porta; a_3 – Comprimento externo da porta; a_4 – Comprimento interno da fonte;
n_s	Número efetivo de quadrados entre porta e a fonte	$\frac{L_{GS}}{W}$	$\frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) \right)$	$\frac{L_{SG}}{2(a_3 + a_4)}$
n_D	Número efetivo de quadrados entre porta e o dreno	$\frac{L_{GD}}{W}$	$\frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right)$	$\frac{L_{DG}}{2(a_1 + a_2)}$
n_G	Número efetivo de quadrados para porta	$\frac{L_g}{W}$	$\frac{1}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) \right)$	$\frac{L_G}{2(a_2 + a_3)}$
n_C	Número efetivo de quadrados para contatos ôhmicos de fonte e dreno	$2 \frac{L_T}{W}$	$\frac{L_T}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_4} \right)$	$\frac{L_T}{4a_1} + \frac{L_T}{4a_4}$

Fonte: Aminbeidokhti *et al.* (2022).

Da mesma forma, a resistência de contato para os contatos de fonte e dreno (R_C)

$$R_C = R_{CS} + R_{CD} = (R_{S-C})n_C \quad (14)$$

Onde R_{S-C} é a resistência de folha sem os contatos.

A resistência de folha é variável na seção 2DEG sob a porta depende da tensão da porta. Esta resistência é rotulada por r_{S-U} , que é então multiplicada pelo número efetivo de quadrados da porta para obter a resistência variável do 2DEG sob a porta (r_G):

$$r_G = (r_{S-U})n_G \quad (15)$$

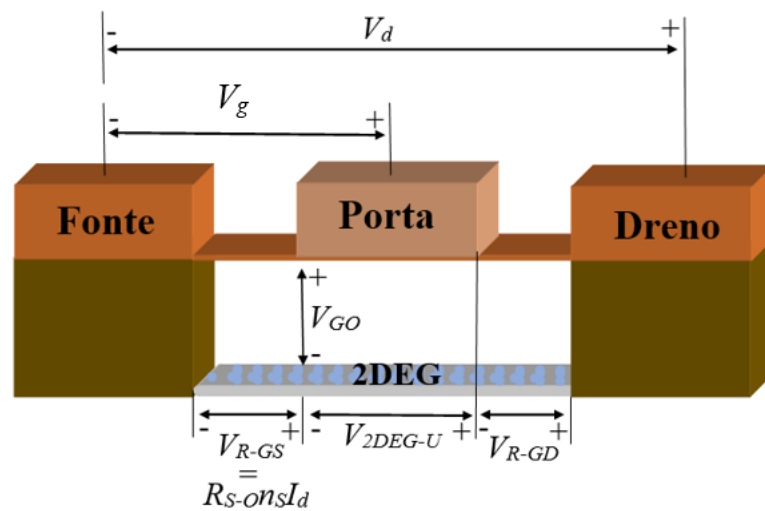
Para extrair a mobilidade, consideramos várias seções entre os contatos de fonte e dreno.

A tensão entre dreno e fonte (V_{DS}) é a soma das tensões nestas seções (Aminbeidokhti *et al.*, 2022):

$$V_d = V_{2DEG-U} + V_{R-GS} + V_{R-GD} + V_{R-C} = (r_G + R_{GS} + R_{GD} + R_C)I_d \quad (16)$$

Na equação 16, a V_{2DEG-U} é a tensão através do 2DEG sob a porta, V_{R-GS} e V_{R-GD} são as tensões através das seções resistivas porta-fonte e porta-dreno do 2DEG, respectivamente, como mostra a Figura 17 e, além disso, V_{R-C} é a tensão entre a resistência de contato da fonte e do dreno e I_d é a corrente de dreno que flui através da conexão em série das resistências.

Figura 17 – Demonstração da diferença de potencial na seção transversal do HEMT.



Fonte: Autor.

A resistência variável do 2DEG sob a porta r_G depende tanto da densidade de elétrons quanto da mobilidade eletrônica.

De acordo com a equação da corrente de dreno para um HEMT, temos:

$$I_d = \mu_n C_d \frac{W}{L} (V_{GO} - V_T) V_{2DEG-U} \quad (17)$$

Onde, $C_d = \frac{\epsilon_d}{t_d}$ é a capacitância elétrica por unidade de área, ϵ_d permissividade do SiO, t_d é a espessura do material entre o 2DEG e o metal da porta, V_T é a tensão de limiar e V_{GO} é a tensão entre o eletrodo da porta e o 2DEG. Na equação 17, $\frac{W}{L}$ pode ser substituído pelo número efetivo de quadrados n_G para aplicar em geometria fechada (Aminbeidokhti *et al.*, 2022):

$$I_d = \mu_n C_d \frac{1}{n_G} (V_{GO} - V_T) V_{2DEG-U} \quad (18)$$

A tensão entre o eletrodo de porta e o 2DEG na extremidade entre fonte e porta (V_{GO}) é igual à diferença entre a tensão porta-fonte aplicada (V_g) e a queda de tensão no segmento resistivo porta-fonte do 2DEG:

$$V_{GO} = V_g - (R_{S-0}) n_S I_d \quad (19)$$

A Figura 17 torna claro os parâmetros da equação 19. Na mesma Figura, observa-se também que a tensão variável da porta no 2DEG é a tensão V_{GO} . A tensão V_{GO} nas equações do HEMT padrão são equivalentes à tensão porta-fonte constante.

A resistência variável do 2DEG sob a porta, que depende da tensão pode ser expressa como (Aminbeidokhti *et al.*, 2022):

$$r_G = \frac{V_{2DEG-U}}{I_d} = \frac{n_G}{\mu_n C_d (V_g - R_{S-0} n_S I_d - V_T)} \quad (20)$$

Com isso, a equação para a tensão dreno-fonte aplicada torna-se:

$$V_d = ((R_{S-0}) n_S + (R_{S-0}) n_D + (2R_{S-C}) n_C) I_d + n_G \frac{I_d}{\mu_n C_d (V_g - R_{S-0} n_S I_d - V_T)} \quad (21)$$

O que leva a seguinte equação para a corrente de dreno:

$$I_d = \frac{V_d}{((R_{S-0})n_S + (R_{S-0})n_D + (R_{S-C})n_C) + \frac{n_G}{\mu_n C_d (V_g - (R_{S-0})n_S I_d - V_T)}} \quad (22)$$

Para calcular a mobilidade efetiva (μ_{eff}) deve-se medir a condutância de saída (g_d) com baixas tensões de dreno, onde a carga do canal entre a fonte e o dreno é bastante uniforme.

A condutância de saída pode ser obtida como a primeira derivada de I_d em relação a V_d na equação 22 (Aminbeidokhti *et al.*, 2022):

$$g_d = \frac{1}{((R_{S-0})n_S + (R_{S-0})n_D + (R_{S-C})n_C) + \frac{n_G}{\mu_{eff} C_d (V_g - (R_{S-0})n_S I_d - V_T)}} \quad (23)$$

Expressando a equação em termos de g_d , leva à equação final para a mobilidade efetiva:

$$\mu_{eff} = \frac{n_G}{C_d \left(\frac{1}{g_d} - ((R_{S-0})n_S + (R_{S-0})n_D + (R_{S-C})n_C) \right) (V_g - (R_{S-0})n_S I_d - V_T)} \quad (24)$$

3.1.2 Mobilidade de efeito de campo (μ_{FE})

Seguindo a mesma analogia do método anterior, a mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) é obtida a partir da transcondutância medida, ou seja, para calcular a mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) deve-se medir a transcondutância (g_m) considerando igualmente as medições a serem realizadas em baixas tensões de dreno ($V_d \leq 100$ mV), onde a carga do canal entre a fonte e o dreno é bastante uniforme. (Aminbeidokhti, 2016; Pradeep; Rawal, 2017).

A equação HEMT para a transcondutância pode ser obtida com a primeira derivada de I_d em relação a V_g na equação 22:

$$g_m = \frac{1}{\frac{n_G V_d}{\mu_{FE} C_d (V_d - ((R_{S-0})n_S + (R_{S-0})n_D + (R_{S-C})n_C) I_d)^2 + (R_{S-0})n_S}} \quad (25)$$

Neste caso, para a mobilidade de efeito de campo temos (Aminbeidokhti *et al.*, 2022):

$$\mu_{FE} = \frac{n_G V_d}{C_d \left(\frac{1}{g_m} - (R_{S-0})n_S \right) (V_d - ((R_{S-0})n_S + (R_{S-0})n_D + (R_{S-C})n_C) I_d)^2} \quad (26)$$

3.1.3 Mobilidade de baixo campo (μ_0)

Este método, permite a extração da mobilidade de baixo campo (μ_0) em transistor de efeito de campo através da aproximação linear do ponto de vista de modelagem, monitoramento de processo e compreensão de fenômenos físicos para corrente de dreno (I_d) versus tensão porta-fonte (V_g) (Pradeep; Rawal, 2017).

Assim como em outros métodos, são importantes os valores do comprimento do canal (L_g) e largura de porta (W) com o dispositivo polarizado em valores baixos de tensão dreno-fonte (V_d).

Partindo da equação 22 para corrente de dreno, esta equação despreza qualquer condução paralela entre fonte e dreno através da barreira/isolante (Pradeep; Rawal, 2017).

$$I_d \approx \mu_0 C_d \frac{W}{L_g} (V_d V_{GT} - I_d V_{GT} (R_S + R_D) - I_d R_S V_d) \quad (27)$$

$$V_{GT} = V_{GS} - V_T \text{ e } C_d = \frac{\epsilon_d}{(t_d + \Delta d)} \quad (28)$$

onde: Δd - é o deslocamento médio dos elétrons no dispositivo.

Para HEMTs de AlGaIn/GaN, $\Delta d \cong 0$, sendo desprezado devido à sua massa efetiva de elétrons relativamente alta. E V_{GT} , é a tensão de porta aplicada ao transistor que resulta na transcondutância máxima.

Aqui, apenas as medições no dispositivo de interesse são suficientes se o dispositivo for simétrico, ou seja, se a fonte e o dreno estiverem equidistantes da porta (*gate*) ou $L_{SG} = L_{DG}$. Uma versão mais precisa desse método pode ser aplicada aos dispositivos assimétricos com $L_{SG} \neq L_{DG}$ com a ajuda de medições adicionais como indicado na Figura 18.

Reorganizando os termos para obter o valor da resistência total R_T dreno-fonte (Pradeep; Rawal, 2017):

$$R_T = \frac{V_d}{I_d} = \left(\frac{L_g}{\mu_0 C_d W} \right) \frac{1}{V_{GT}} + R_S \left(1 + \frac{V_d}{V_{GT}} \right) + R_D \quad (29)$$

A partir da derivada das curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$) é possível obter a curva da transcondutância e o respectivo valor da transcondutância máxima conforme a Figura 12. Em seguida, esta mobilidade pode então ser calculada substituindo os parâmetros necessários na equação 32 (Santos, 2010).

$$\mu_{eff}/g_{m.max} = \frac{g_{m.max}}{C_d \frac{W}{L} V_d} \quad (32)$$

3.2 Análise comparativa dos métodos de extração de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff}/g_{m.max}$

Nos métodos para os cálculos da mobilidade efetiva (μ_{eff}) e mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) é considerada a aproximação gradual do canal, uma vez que em ambos se faz uma separação do 2DEG entre a fonte e o dreno em seções sob a porta, modelando o HEMT de forma que se permita observar a variação da mobilidade com tensão de porta, e fora da porta. Assim, modela-se o dispositivo pelas resistências porta-fonte R_{GS} e porta-dreno R_{GD} em que ambas as resistências não dependam da tensão da porta.

No método para extração da mobilidade de baixo campo (μ_0) nos HEMTs é utilizada a aproximação linear do ponto de vista de modelagem, através de uma análise do gráfico $(R_T - (R_S + R_D))^{-1}$ versus V_g e usando o somatório das resistências $(R_S + R_D)$ como parâmetro para obter o melhor ajuste linear possível na interceptação de V_g e V_T .

O método por $g_{m.max}$, se baseia na medição da transcondutância máxima ($g_{m.max}$) do transistor.

Segundo Aminbeidokhti *et al.* (2022), a obtenção da mobilidade em HEMTs de AlGaIn/GaN pode ser feita em dispositivos lineares, em HEMTs quadrados onde deve-se considerar os comprimentos de dreno, comprimento interno e externo da porta e comprimento interno da fonte, ou ainda em HEMTs circulares onde é indispensável considerar o raio de contato do dreno, os raios interno e externo do anel de porta e o raio interno do anel de fonte (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado um estudo sobre o comportamento dos dispositivos HEMTs de AlGaIn/GaN, por meio de caracterizações elétricas. Todos os dispositivos analisados neste trabalho foram fabricados (Peralagu, *et al.*, 2019) e caracterizados eletricamente no *Interuniversity Microelectronics Center* (Imec), que é um centro de pesquisa de referência na área de microeletrônica na cidade de Leuven-Bélgica.

Em seguida, fez-se uma avaliação dos parâmetros a serem extraídos para o cálculo da mobilidade efetiva (μ_{eff}), mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}), mobilidade de baixo campo (μ_0) e a mobilidade efetiva por $g_{m,max}$ ($\mu_{eff}/g_{m,max}$).

As medições foram feitas usando equipamentos da Keithley Instruments Inc., Modelo 2602 e modelo A-LFNA E4727A que funcionam aplicando tensões programadas em dispositivos fabricados de material semicondutor e se obtém alguns parâmetros desejados.

A partir das medições e caracterização, foram traçadas as curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$) e corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$) para os dispositivos estudados, denominado como dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ) cujo as suas respectivas características estão descritas no subcapítulo 4.1 a seguir.

Na primeira parte do estudo, fez-se a extração e o cálculo de diversos parâmetros em apenas um tipo de dispositivo (alfa), que permitiu avaliar os diferentes tipos de mobilidade de portadores em função da variação do comprimento do canal (L_g), largura do canal (W), temperatura (T), tensão de porta (V_g) e tensão de dreno (V_d). O estudo em função destes parâmetros variados fez-se apenas para um dispositivo (alfa).

Na segunda parte do estudo, foram mantidos constantes todos os parâmetros inicialmente variados e fez-se igualmente a avaliação dos diferentes tipos de mobilidade de portadores para os respectivos dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ) cujas principais diferenças estão no material de contato dreno-fonte, na estrutura ou material de porta e, ainda, na temperatura de recozimento térmico durante o processo de fabricação.

4.1 Caracterização dos dispositivos estudados

4.1.1 Descrição dos dispositivos

Estes dispositivos possuem camadas projetadas para otimizar as características elétricas e ópticas, o seu recozimento térmico é crucial para ativar as camadas dopadas, criar contatos ôhmicos de baixa resistência e garantir a sua funcionalidade adequada, permitindo um bom controle da operação. Deste modo, essas características garantem um HEMT de alta qualidade, com baixa resistência de contato, eficiência energética e confiabilidade, sendo adequado para aplicações que exigem alta velocidade e desempenho estável (Peralagu, *et al.*, 2019).

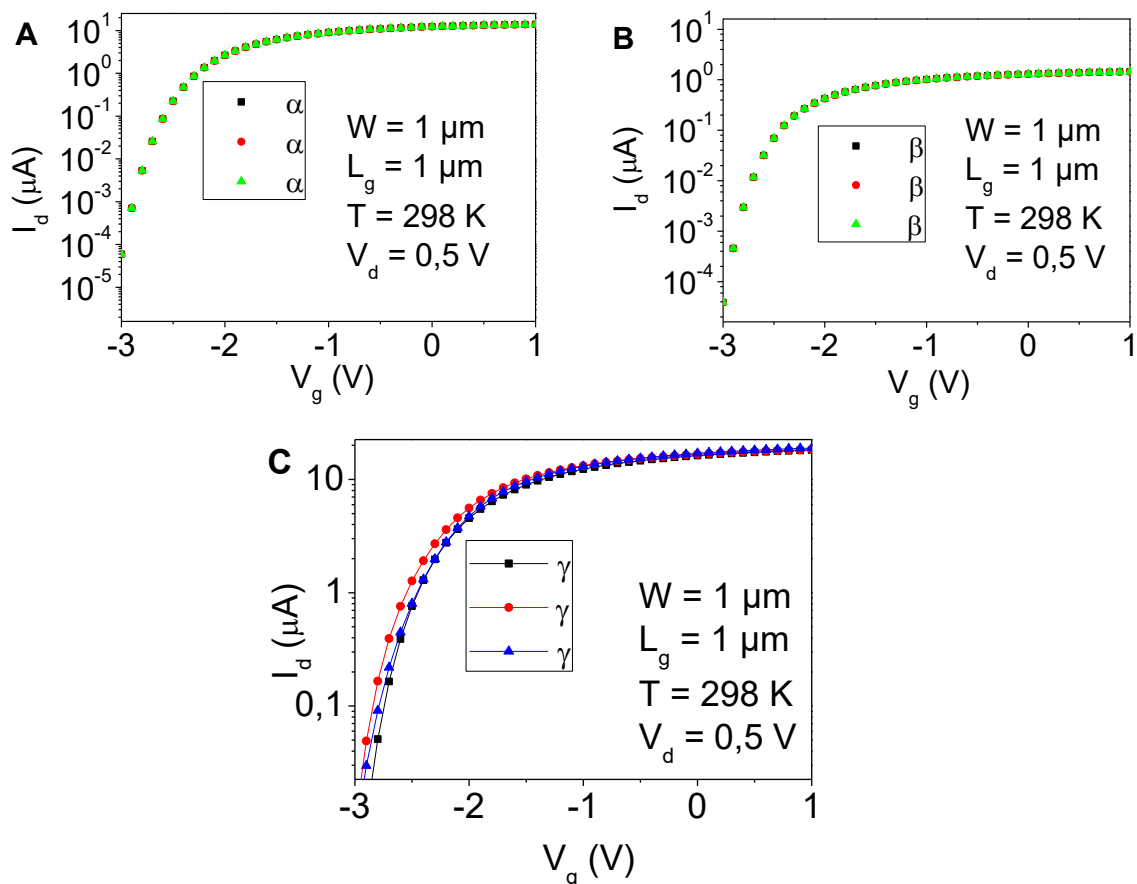
Apesar dos dispositivos possuírem características idênticas em termos de estrutura geométrica e em alguns processos de fabricação, abaixo apresenta-se uma descrição específica de cada dispositivo usado neste trabalho em relação ao material de porta (qualidade da interface), segundo os dados fornecidos pelo Imec:

- **Dispositivo α :** Possui 40 IMP TiN / 250AlCu / 60 ARC TiN que indica a sequência de camadas depositadas na construção do dispositivo. A primeira camada, TiN, é de nitreto de titânio implantada, seguida pela deposição de AlCu (liga de alumínio e cobre) com 250 μm . O seu Recozimento Ôhmico/Recozimento Ativo é realizado a uma temperatura de 525°C por 90 segundos e o Impacto da baixa temperatura foi escolhido estrategicamente para evitar a formação de defeitos no dispositivo durante o processo de recozimento (Peralagu, *et al.*, 2019).
- **Dispositivo β :** A técnica de recozimento pós-ativo refere-se a um processo específico de tratamento térmico após a implantação de íons no semicondutor. O Recozimento Ôhmico/Recozimento Ativo é realizado em duas etapas: primeiro, a uma temperatura de 700°C por 90 segundos, seguida de uma segunda etapa a 550°C por 90 segundos. Vale frisar que, neste dispositivo, o impacto da resistência de porta no HEMT é semelhante ao do polissilício (material amplamente utilizado na fabricação de dispositivos semicondutores como um material com resistividade controlada para formação de camadas de resistência). Isso implica que a resistência de porta do HEMT é cuidadosamente gerenciada e otimizada para obter um desempenho ideal (Peralagu, *et al.*, 2019).

- **Dispositivo γ :** Utiliza dois implantes ativos, que é uma técnica avançada de implantação de íons que permite a criação de camadas de dopagem altamente precisas no semiconductor. Isso resulta em regiões distintas com diferentes propriedades elétricas, permitindo um controle preciso do fluxo de corrente no HEMT. Essa técnica também contribui para a minimização de efeitos indesejados, como a resistência parasitária (Peralagu, *et al.*, 2019).

Inicialmente foram feitas medições e extraídas várias curvas $I_d \times V_g$ e $I_d \times V_d$ para cada dispositivo (α , β e γ). Tais curvas foram traçadas num mesmo gráfico para se obter uma média em cada dispositivo afim de garantir bons resultados. A figura 19 (A, B e C) apresenta um exemplo de extração da média para curvas $I_d \times V_g$ e nela observa-se a extrema aproximação entre pelo menos três curvas em cada dispositivos.

Figura 19 – Exemplo da extração da média para curvas $I_d \times V_g$ nos dispositivos α , β e γ .



Fonte: Autor.

4.1.2 Parâmetros medidos e calculados

Através do Imec, foi possível obter os dados e observou-se que cada dispositivo estudado possui comprimento porta-dreno (L_{GD}) igual a $1.75\mu m$, comprimento porta fonte (L_{GS}) de $1.5\mu m$, comprimento de transferência entre os contatos (L_T) de $0.25\mu m$, espessura do material entre o 2DEG e o metal da porta (t_d) de $140 \times 10^{-9} m$). Em seguida, traçou-se, inicialmente para cada aspecto em estudo, as respectivas curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$) e corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$) que permitiram obter os comportamentos da condutância de saída (g_d), transcondutância (g_m), resistência série de fonte-dreno (R_{SD}), corrente de dreno (I_d), tensão de limiar (V_T) e inclinação sublimiar (S). Estes dados foram devidamente analisados e serviram para os cálculos da mobilidade efetiva, (μ_{eff}), mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) e a mobilidade de baixo campo (μ_0) em função de cada variação. Em Albertin (2003), extraiu-se o valor da permissividade do SiO ($\epsilon_d = 3.9 \times 10^{-13} F/cm$) para o cálculo da capacitância elétrica por unidade de área.

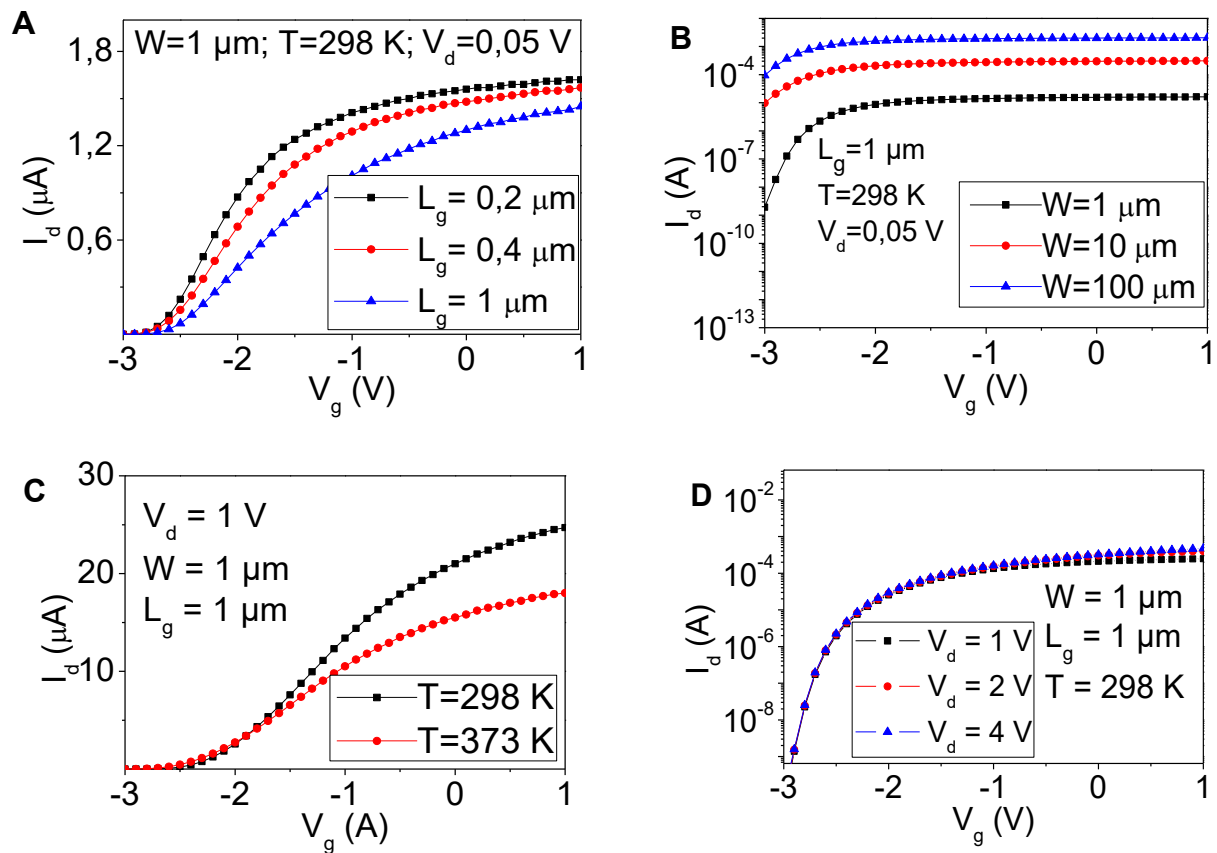
4.1.2.1 Curvas da corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$)

Os dados inicialmente extraídos nas Figuras 20 (A, B, C e D) mostram as curvas $I_d \times V_g$ tendo em conta a variação de parâmetros como o comprimento do canal, a largura do canal, a temperatura e a tensão de dreno. Destas curvas, observa-se que, quando o comprimento do canal (Figura 20 A) é aumentado, a resistência do canal também aumenta uma vez que canais mais longos oferecem maior resistência ao fluxo de corrente, e como consequência, ocorre a diminuição da intensidade da corrente de dreno. Para as curvas com variação de W (Figura 20 B) e V_d (Figura 20 D), observa-se que o aumento destes parâmetros torna maior o I_d , uma vez que ao contrário de L_g o W maior oferece menos R_{SD} à passagem de elétrons e o aumento de V_d resulta em um campo elétrico mais intenso no canal do dispositivo, permitindo que os portadores de carga se movam com mais facilidade.

Para o caso da T , a Figura 20 C mostra que o seu aumento pode provocar a diminuição da I_d , devido ao efeito de aumento da banda proibida e o aumento da resistividade térmica. Importa dizer que em casos extremos o aumento de T pode causar danos físicos no HEMT como o deslocamento dos átomos da estrutura do material, o que pode levar a uma diminuição permanente da corrente de saturação. Vale frisar que o aumento de I_d também está limitado pela densidade de portadores no canal (Doe *et al.*, 2020).

Quando V_g é aumentada, atrai a camada de gás de elétrons para mais perto da camada de semiconductor de porta, o que aumenta a densidade de elétrons na camada de gás de elétrons e como resultado, mais elétrons se movem para a camada do semiconductor (Hegazi *et al.*, 2019).

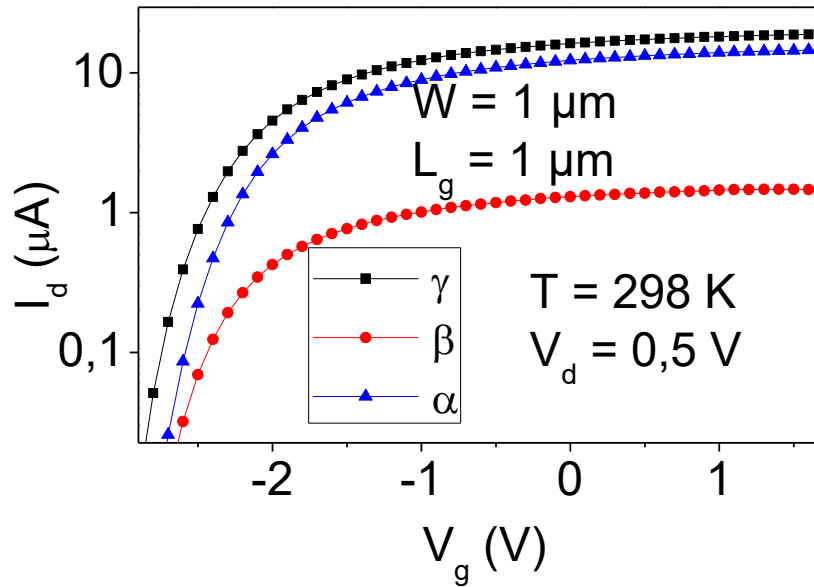
Figura 20 – Diferentes curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

Na Figura 21, são traçadas as curvas $I_d \times V_g$ para os diferentes dispositivos, nomeadamente α , β e γ descritos e caracterizados anteriormente, onde cada dispositivo se difere no material de contato dreno-fonte, na estrutura ou material de porta e na temperatura de recozimento ôhmico. Tais curvas mostram que a intensidade da corrente é maior no dispositivo γ , a seguir foi o dispositivo α e por último dispositivo β .

Figura 21 – Curvas de corrente de dreno versus tensão de porta ($I_d \times V_g$), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).

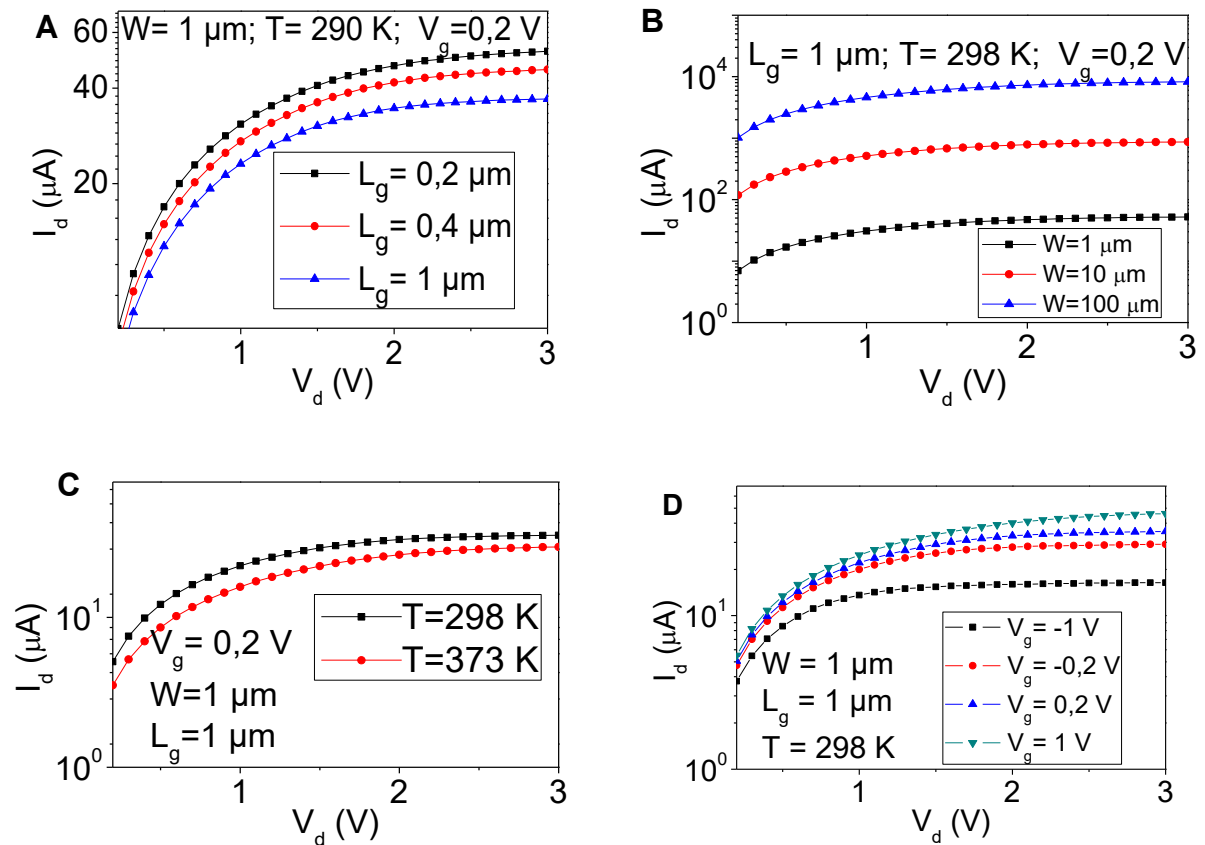


Fonte: Autor.

4.1.2.2 Curvas da corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$)

Nas Figuras 22 (A, B, C e D) e Figura 23 apresentam as curvas $I_d \times V_d$, e mostram-se com o comportamento de I_d , de forma semelhante às Figuras 20 (A, B, C e D) e Figura 21 respectivamente em função de cada parâmetro variado.

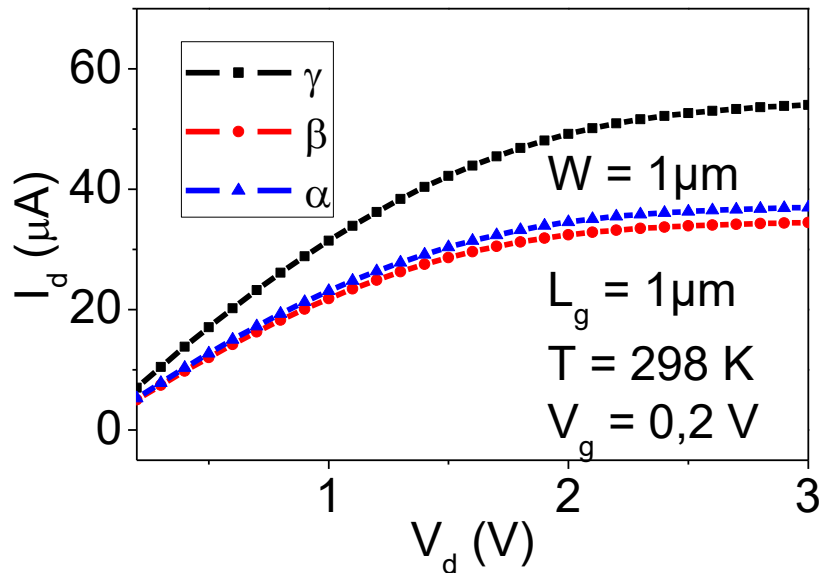
Figura 22 – Diferentes curvas de corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

Ao se obter I_d variando V_d é possível entender o comportamento do dispositivo em diferentes níveis de tensão de dreno, e em geral a I_d é maior à medida que V_d aumenta até a saturação, onde ela se estabiliza.

Figura 23 – Curvas de corrente de dreno versus tensão de dreno ($I_d \times V_d$), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.



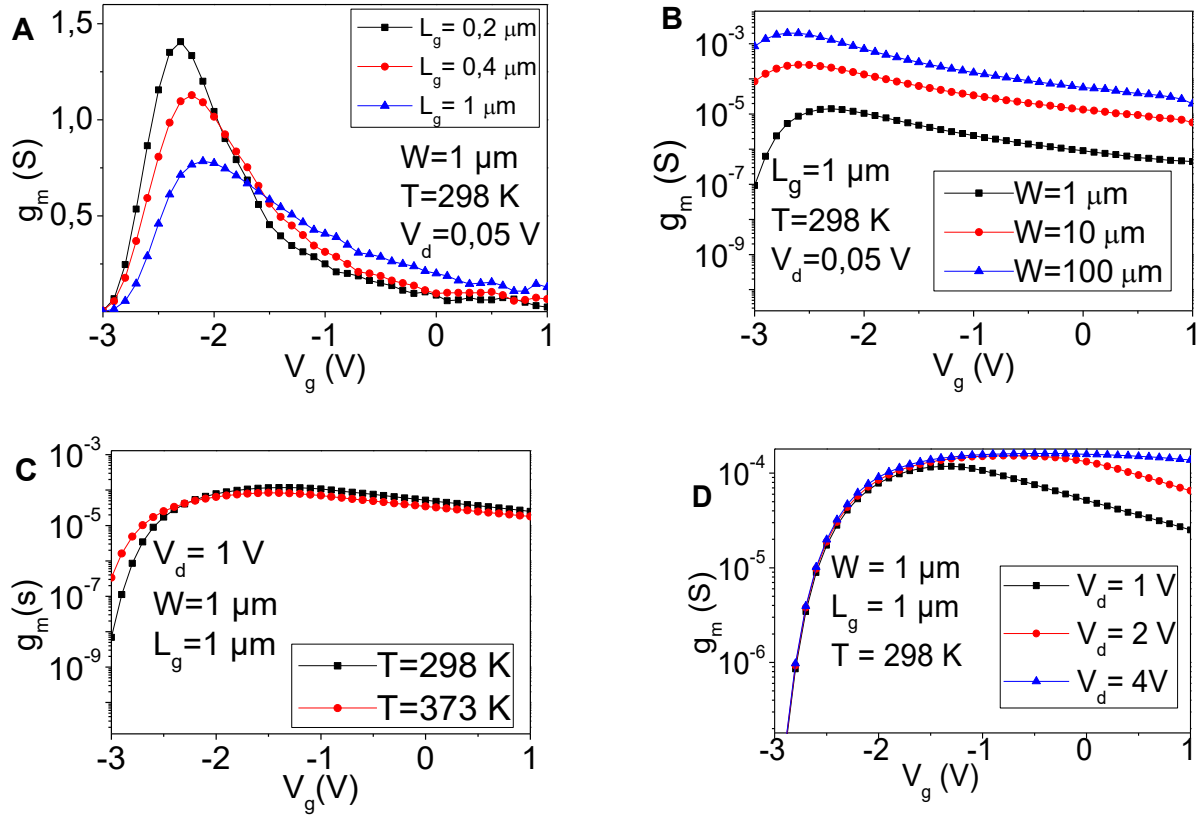
Fonte: Autor.

4.1.2.3 Curvas da transcondutância (g_m)

Levando em consideração as curvas $I_d \times V_g$, observa-se que a transcondutância máxima será maior, quanto maior for a largura do canal e a tensão de dreno, e será menor, com menor temperatura. Ou seja, transcondutância máxima apresenta um comportamento similar à intensidade da corrente de dreno conforme ilustram a Figura 24 (A, B, C e D) e a Figura 25. Isto ocorre porque o aumento do campo elétrico no canal do dispositivo causa um aumento correspondente da corrente de dreno, causado em uma densidade maior de portadores de carga móveis. Essa maior densidade de portadores de carga móveis, por sua vez, resulta em uma maior condutividade do canal e, conseqüentemente, em uma maior transcondutância.

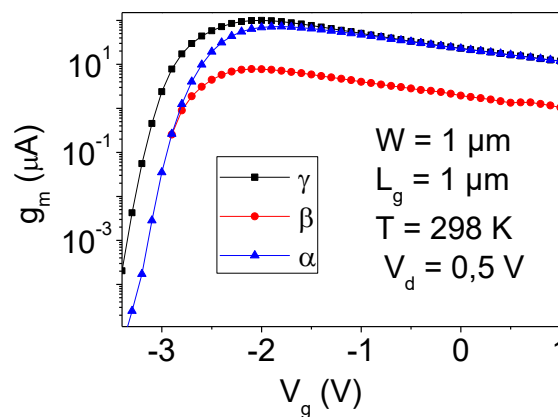
No entanto, é importante lembrar que, à medida que a corrente de dreno continua a aumentar, pode ocorrer o fenômeno de "espalhamento" no qual a transcondutância atinge um valor máximo e começa a se reduzir. Isso ocorre devido a efeitos como a limitação da mobilidade dos portadores de carga devido ao espalhamento (Reich; Howard, 2007).

Figura 24 – Curvas da transcondutância (g_m), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

Figura 25 – Curvas da transcondutância (g_m), tendo em conta a variação dos dispositivos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.

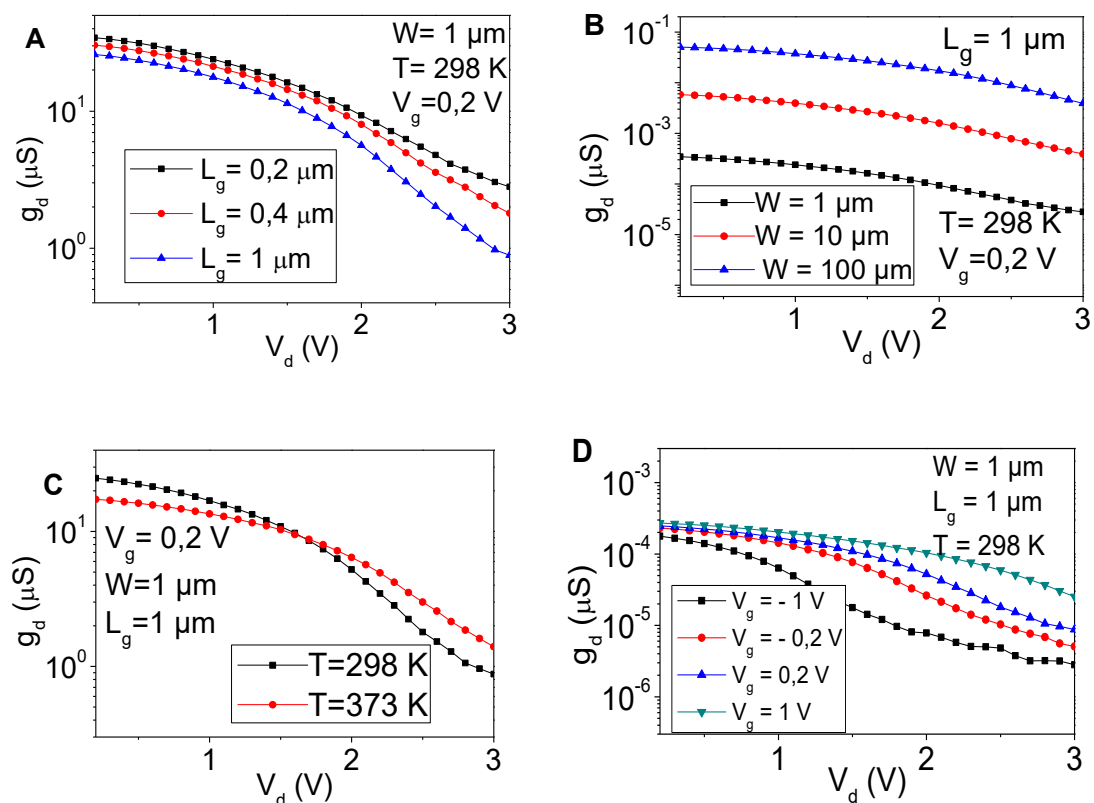


Fonte: Autor.

4.1.2.4 Curvas da condutância de saída (g_d)

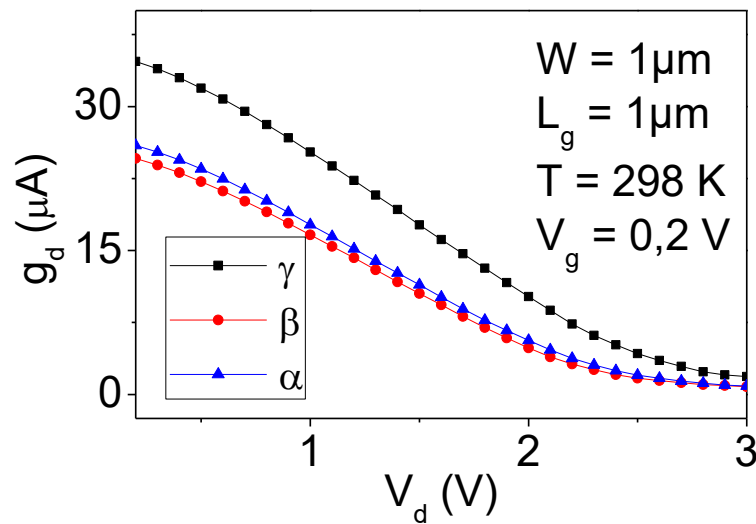
Analogamente às curvas da transcondutância e da corrente de dreno mostradas anteriormente, observou-se um comportamento semelhante para a condutância de saída na Figura 26 (A, B, C e D) que mostra as curvas da condutância de saída, tendo em conta a variação dos parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno. O mesmo comportamento é observado na Figura 27, que mostra as curvas da condutância de saída, frente aos dispositivos α , β e γ .

Figura 26 – Curvas da condutância de saída (g_d), tendo em conta a variação de parâmetros: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

Figura 27 – Curvas da condutância de saída (g_d), tendo em conta a variação dos dispositivos dos α , β e γ com diferenças no material de contato dreno-fonte, estrutura ou material de porta e temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação.



Fonte: Autor.

4.1.2.5 Análise da resistência serie (R_{SD}), inclinação sublimiar (S) e tensão limiar (V_T)

A tabela 5 apresenta o comportamento da R_{SD} , V_T e S em função dos aspetos em estudo neste trabalho.

Sobre R_{SD} , pode-se observar que ela tende a diminuir quanto maior forem os parâmetros que aumentam I_d . A variação de W na construção do HEMT exige bastante atenção com os possíveis efeitos como otimização das características relevantes do dispositivo, pois, R_{SD} é determinada principalmente pela resistência do material semiconductor na região do canal, e se W for muito alto, pode aumentar a capacitância de entrada e, consequentemente, ter efeitos na frequência de corte e no ganho do dispositivo (Shur, 2009; Sun *et al.*, 2022). Quanto a V_T , a tabela 5 mostra o seu comportamento em relação à I_d , e confirma que ela é dependente das propriedades físicas do dispositivo, como a largura da barreira de energia na resistência heterogênea e a densidade de portadores de carga na região do canal. Em relação à S , como já se sabe, é uma medida da sensibilidade do dispositivo em relação ao controle de V_g para mudar o I_d em uma década.

Tabela 5 – Resultados de R_{SD} , V_T e S em função de: comprimento do canal, largura do canal, temperatura, tensão de porta, tensão de dreno para o mesmo dispositivo (alfa) e de dispositivos com diferentes processos de fabricação (alfa, beta e gama).

Descrição do dispositivo	Aspectos variados	Dados dos parâmetros	Parâmetros calculados		
			R_{SD} $10^1[\Omega]$	V_T [V]	S [mV/dec]
<i>Mesmo dispositivo</i> α	L_g [μm]	0,2	3,1	-2,6	79,98
		0,4	3,3	-2,7	75,92
		1	3,8	-2,8	72,04
	W [μm]	1	3,1	-2,6	79,64
		10	0,17	-3,0	73,90
		100	0,03	-3,1	70,80
	T [K]	298	3,1	-2,6	79,92
		373	3,8	-2,9	79,95
	V_g [V]	-1	7,1	-2,7	85,93
		-0,2	5,0		85,92
		0,2	2,6		85,83
		1	2,1		82,95
	V_d [V]	1	2,6	-2,7	85,89
		2	1,9		95,73
		4	1,1		83,90
<i>diferentes dispositivos</i> α ; β e γ	α	Descrições especificadas na tabela 6	2,9	-2,7	77,87
	β		3,6	-2,6	79,11
	γ		0,8	-2,8	73,04

Fonte: Autor.

4.2 Cálculo de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função dos parâmetros variados

Nesta abordagem, são apresentados todos os resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$. Na mesma sequência do trabalho, as Figuras 28, 29, 30, 31 e 32, mostram estudos das mobilidades feitos em dispositivos alfa (α) em função dos parâmetros: comprimento do canal (L_g), largura do canal (W), temperatura (T), tensão de porta (V_g) e tensão de dreno (V_d) respectivamente. Os resultados podem ser usados para estimar o comportamento dos dispositivos beta (β) e gama (γ) quando expostos em condições similares.

Em seguida, mantendo constante os parâmetros inicialmente variados, fez-se o estudo da mobilidade na tabela 6 e na Figura 33, para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).

Como foi dito anteriormente, a determinação das diferentes mobilidades dos portadores de carga, foi feita levando em cada as respectivas polarizações para obtenção das mobilidades desde as condições de baixo campo até campos elétricos fortes tanto uniformes quanto não uniformes. Para a mobilidade efetiva (μ_{eff}) que foi estudada caracterizando o fluxo de elétrons em um material quando sujeito a um campo elétrico não uniforme, polarizando com a tensão de porta (V_g) entre -3,2V à 0V e a tensão de dreno (V_d) de 4V à 8V; O cálculo da mobilidade de efeito de campo (μ_{FE}) que é analisada quando o dispositivo é submetido à um campo elétrico uniforme forte, foi feito com polarizações de tensão de porta (V_g) entre -1V à -0.5V e tensão de dreno (V_d) de 8V à 10V; E no final, a mobilidade de baixo campo (μ_0), por sua vez ocorre em experimentos quando o HEMT recebe um campo elétrico fraco foi extraída em dispositivos polarizados com tensão de porta (V_g) de -0.5V à 0V e tensão de dreno (V_d) de 1V à 5V (Sze; Ng, 2007). Cada tipo de mobilidade tem uma polarização específica, refletindo as condições de campo elétrico aplicadas ao HEMT e influenciando diretamente sua condutividade e desempenho operacional.

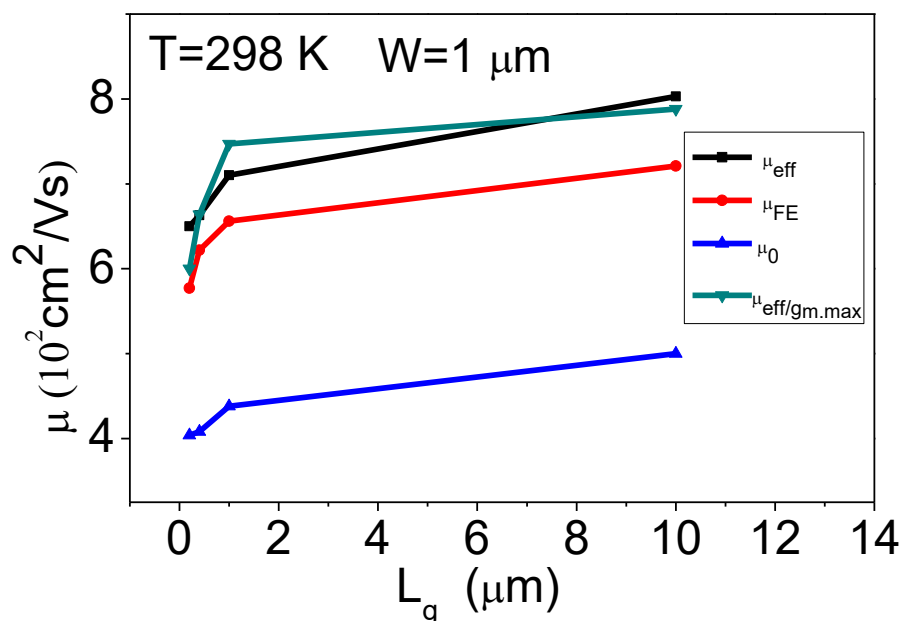
Durante a pesquisa foi possível extração, cálculo e análise de parâmetros tais como a corrente de dreno, resistência série, condutância de saída, transcondutância, tensão de limiar e inclinação sublimiar, bem como as estruturas geométricas de canal dos transistores, as tensões de polarização e as temperaturas de funcionamento. Sendo que, os outros parâmetros observados nas equações foram fornecidos pelo fabricante.

4.2.1 Comprimento do canal (L_g)

O comprimento do canal é um parâmetro importante que influencia bastante no desempenho do HEMT. Este refere-se à dimensão física do canal de condução no transistor quando uma tensão é aplicada, e o canal, propriamente, é uma região altamente dopada localizada entre as camadas de materiais semicondutores diferentes, conhecidas como heteroestruturas.

Geralmente, e como visto na tabela 5, quando se varia o comprimento do canal no dispositivo α , verifica-se que um canal mais longo resulta em uma maior resistência do canal, pode levar a um aumento na tensão de limiar, à diminuição da corrente de dreno (conforme a Figura 20 A) e, conseqüentemente, à diminuição da mobilidade eletrônica. Porém, para este estudo obteve-se um resultado diferente do esperado para o caso da mobilidade em função do comprimento do canal uma vez que o aumento do comprimento do canal resultou no aumento da mobilidade. Isto ocorre muitas vezes porque, sabe-se que a mobilidade pode também ser limitada pelo espalhamento que ocorre entre os elétrons e as impurezas no canal e em HEMTs com canais longos, é comum que seja menor o número de impurezas por unidade de comprimento, o que reduz a quantidade de espalhamento e aumenta a mobilidade conforme a Figura 28 (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

Figura 28 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{\text{eff/gm.max}}$ em função do comprimento do canal (L) para dispositivos alfa (α).



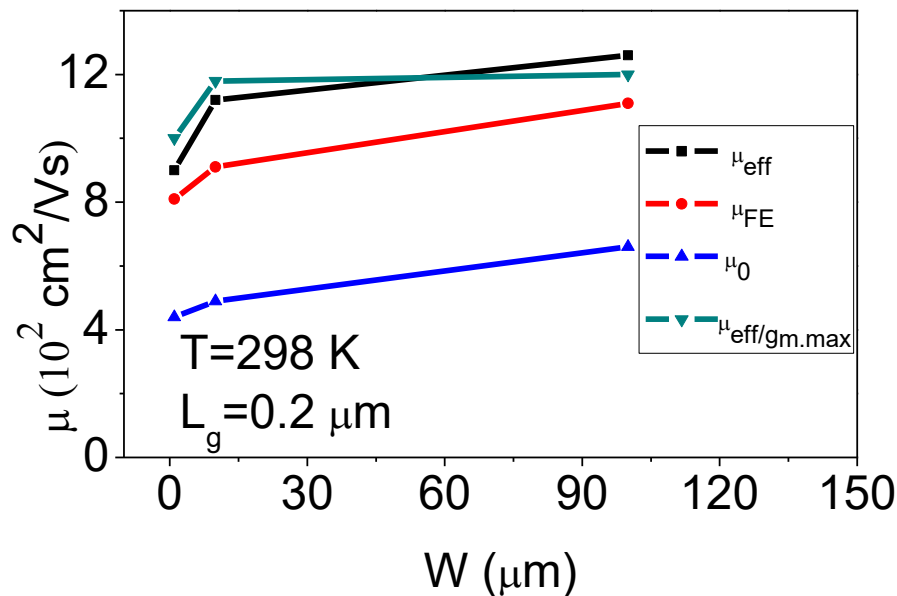
Fonte: Autor.

4.2.2 Largura do canal (W)

A largura do canal também desempenha um papel significativo nos HEMTs. Ela se refere à dimensão lateral do canal e está relacionada à quantidade de corrente que o dispositivo pode transportar, ou ainda à extensão física da região ativa em um transistor de efeito de campo.

A priori, pode-se dizer que se W for aumentado, a mobilidade dos portadores de carga diminui, uma vez que ocorre um aumento da dispersão devido ao espalhamento de superfície e volume. A dispersão é um processo que leva à perda de energia dos portadores de carga. Mas para este caso, por se tratar de um HEMT com canal largo comparado ao seu comprimento, espera-se o aumento das mobilidades, pois, canais mais largos podem reduzir a resistência do canal, o que pode reduzir o espalhamento e aumentar a mobilidade conforme a Figura 29 (Aminbeidokhti *et al.*, 2022).

Figura 29 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{\text{eff/gm.max}}$ em função da largura do canal (W) para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

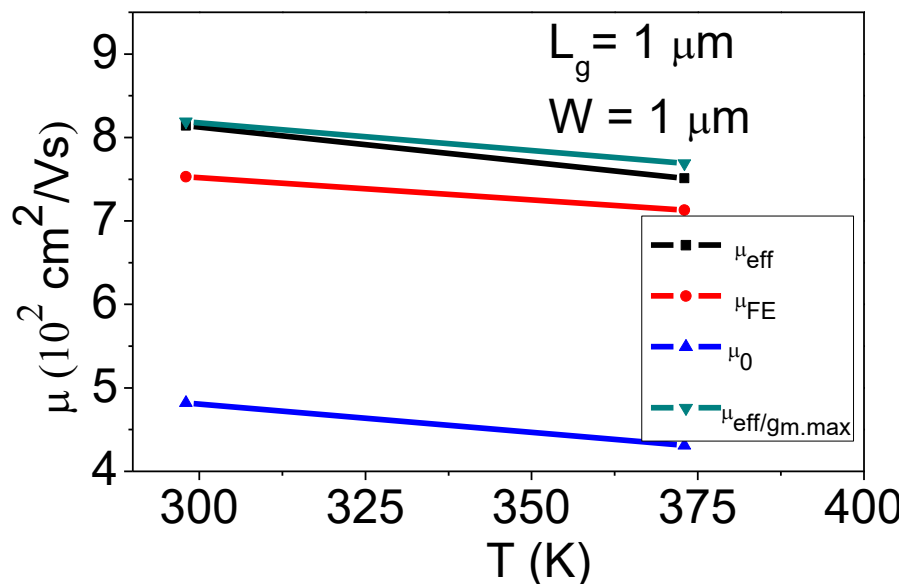
4.2.3 Temperatura (T)

Na Figura 30, observa-se que, quando a temperatura de um HEMT aumenta, μ_{eff} , μ_{FE} e μ_0 dentro do dispositivo tende a diminuir, uma vez que a mobilidade dos portadores de carga em um HEMT influencia na energia térmica disponível para esses portadores, e com aumento da temperatura, a energia térmica disponível para os portadores de carga aumenta e isso leva a um aumento no espalhamento dos portadores de carga.

Vale lembrar que a redução da mobilidade não é algo positivo, pois, pode afetar o desempenho do HEMT em aplicações de alta frequência.

O aumento da temperatura pode causar o aumento na resistência interna do dispositivo, o que reduz a capacidade de amplificar sinais de alta frequência e aumenta o ruído interno do dispositivo, tornando prejudicial a qualidade dos sinais. Outro sim, o aumento excessivo da temperatura pode também levar à degradação da heteroestrutura do dispositivo.

Figura 30 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{\text{eff/gm.max}}$ em função da temperatura (T) para dispositivos alfa (α).



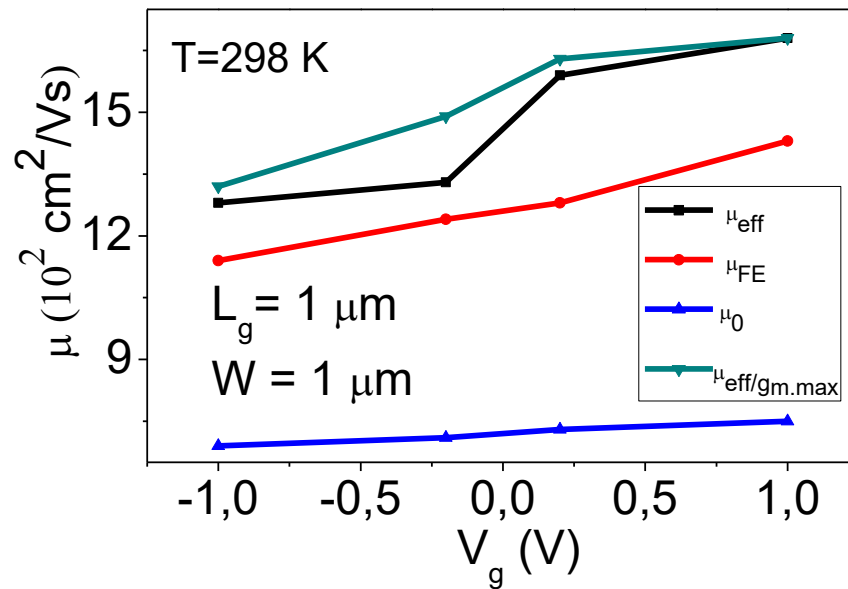
Fonte: Autor.

4.2.4 Tensão de porta (V_g)

A tensão de porta é geralmente usada para controlar a corrente elétrica que flui através do canal do dispositivo e o aumento dela pode levar ao aumento da mobilidade (Figura 31).

Outrossim, ao variar a tensão de porta, é possível também observar diferentes regimes de operação do HEMT como corte, saturação e triodo.

Figura 31 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{\text{eff/gm.max}}$ em função da tensão de porta (V_g) para dispositivos alfa (α).

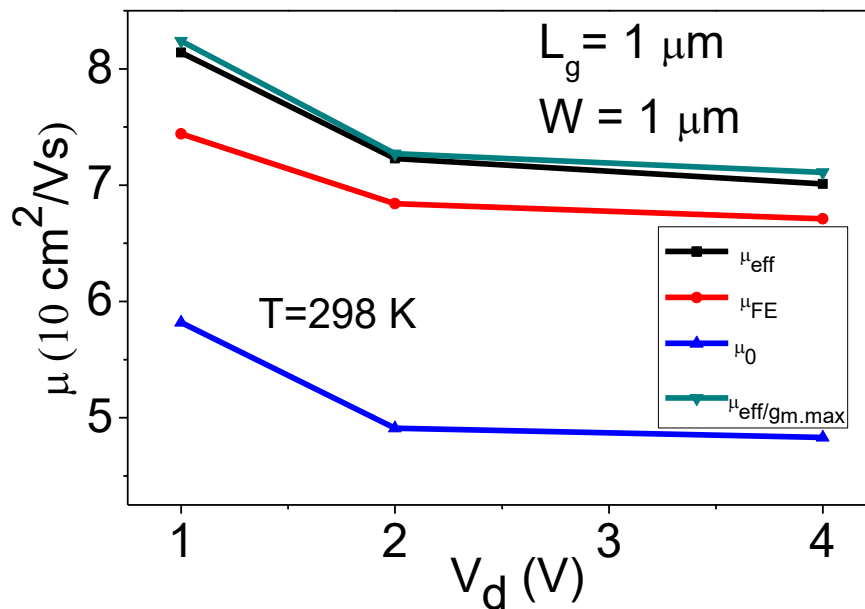


Fonte: Autor.

4.2.5 Tensão de dreno (V_d)

Quando a tensão do dreno é aumentada, a região de depleção na interface entre a camada de transporte e a camada de barreira no HEMT se estende na camada de transporte. Isso leva a um aumento na queda de tensão ao longo da camada de transporte, redução da transmissão do campo elétrico aplicado e aumento do espalhamento. Como resultado, a mobilidade dos portadores de carga pode diminuir como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Resultados dos cálculos de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{\text{eff/gm.max}}$ em função da tensão de dreno (V_d) para dispositivos alfa (α).



Fonte: Autor.

4.2.6 Diferentes tipos de dispositivos HEMTs

Além dos estudos acima, é importante considerar os processos de fabricação do HEMT. A partir dos primeiros resultados apresentados, fica claro que a tecnologia de fabricação (materiais e métodos) exerce um papel fundamental no desempenho do transistor.

Levar em consideração fatores como o material de contato dreno-fonte, a estrutura ou material de porta e a temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação, é de extrema importância para a produção de transistores de alta qualidade.

A tabela 6, mostra de forma mais objetiva as principais diferenças entre os dispositivos α , β e γ que diferem nas técnicas de implantação de íons, processos de recozimento, materiais de terminal de controle e sequências de camadas. A tabela 6 e a Figura 33 mostram que a mobilidade é maior em dispositivos γ , seguido dos dispositivos α e dos dispositivos β .

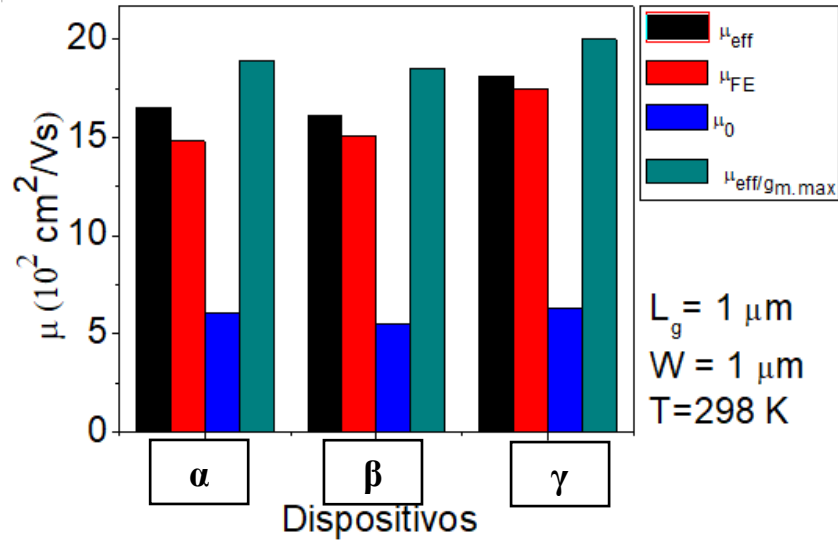
Cada dispositivo é projetado para obter um desempenho específico do HEMT como foi descrito anteriormente, levando em consideração fatores como dopagem, resistência de contato, integração de componentes e otimização elétrica (Peralagu *et al.*, 2019).

Tabela 6 – Resultados de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função do material de contato dreno-fonte, da estrutura ou material de porta e da temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).

H E M T	Características			μ_{eff}	$\mu_{eff/gm.max}$	μ_{FE}	μ_0
				$10^4 [\text{cm}^2/\text{Vs}]$			
	Divisões estruturas de porta	Recozimento ôhmico/ recozimento ativo	Comentário				
α	40 IMP TiN / 250AlCu / 60 ARC TiN (para otimizar as propriedades elétricas e óticas)	525 C 90s	Impacto da baixa temperatura no recozimento ôhmico	0,165	0,188	0,148	0,061
β	Recozimento pós- ativo (Tratamento térmico para ajustar a dopagem e a estrutura cristalina após a implantação de íons)	700C 90s 550C 90s (Duas etapas de recozimento ôhmico para participar como dopadas)	Semelhante ao poly-Si. Impacto sobre resistência de porta	0,161	0,183	0,151	0,055
γ	2 implantes ativos (Técnica avançada de implantação de íons para criar camadas de dopagem precisas)	NA (Não há um processo específico de tratamento térmico para criar contatos ôhmicos ou ativar o dispositivo)	Porta de metal	0,181	0,201	0,175	0,063

Fonte: Autor.

Figura 33 – Resultados de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$ em função do material de contato dreno-fonte, da estrutura ou material de porta e da temperatura de recozimento ôhmico durante o processo de fabricação para dispositivos alfa (α), beta (β) e gama (γ).



Fonte: Autor.

4.3 Análise comparativa dos resultados de μ_{eff} , μ_{FE} , μ_0 e $\mu_{eff/gm.max}$

Constatou-se nesta pesquisa que para todos os parâmetros variados, $\mu_{eff} > \mu_{FE} > \mu_0$ isto pode ter ocorrido devido as condições de operação como temperatura e voltagem, uma vez que a mobilidade efetiva tende a ser mais sensível às condições de operação do que a mobilidade de efeito de campo. Vale ressaltar que se trata de um material semiconductor que apresenta alta densidade de portadores de carga (como metais) e, nesses materiais, os elétrons ou lacunas são mais tolerantes para interagir uns com os outros, gerando assim uma mobilidade efetiva relativamente maior (Peralagu *et al.*, 2019). E μ_0 ficou menor, já que em campos elétricos baixos, os elétrons ficam menos sensíveis quando estão dispersos por impurezas, defeitos e outras imperfeições do material, o que limita sua mobilidade. Outrossim, em dispositivos com canal curto (HEMT de até $1 \mu\text{m}$), o campo elétrico aplicado na porta se estende para a região de dreno, o que aumenta a velocidade dos portadores e, conseqüentemente, a mobilidade efetiva (μ_{eff}). Esse efeito não é considerado nas mobilidades que assumem um campo elétrico uniforme ao longo do canal como a μ_{FE} e μ_0 . Estudos feitos por Aminbeidokhti *et al.* (2022), mostram um comportamento similar em relação a $\mu_{eff} > \mu_{FE}$ para alguns valores de tensão de porta (Baliga, 2018).

Verifica-se ainda que $\mu_{eff/gm.max} \geq \mu_{eff}$, sendo que o cálculo de μ_{eff} é um modelo menos simplificado e além de levar em consideração os efeitos físicos que podem influenciar a mobilidade dos portadores no canal, como o efeito de canal curto, a modulação da concentração de portadores, o espalhamento de portadores, a corrente de dreno e a temperatura, leva também em consideração as características específicas do dispositivo, como a estrutura do material e as dimensões do canal, a resistência constante de folha, a resistência dos contatos de folha, os números efetivos de quadrados para as regiões de contato ôhmico, dreno, fonte e porta (Baliga, 2018).

5 CONCLUSÕES DO TRABALHO E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos realizados sobre a mobilidade dos elétrons nos HEMTs (Transistores de Efeito de Campo de Alta Mobilidade Eletrônica), é possível concluir que a mobilidade dos elétrons nesses dispositivos é influenciada pelos parâmetros abordados que são o comprimento e largura do canal, temperatura, tensão de porta e tensão de dreno, além de técnicas utilizadas no processo de fabricação (implementação do metal de porta).

Foi possível observar que a mobilidade é um parâmetro bastante sensível à estrutura geométrica do canal do dispositivo. Pois, em relação ao comprimento do canal e a largura do canal, observou-se um aumento na mobilidade dos elétrons à medida que a largura e o comprimento do canal aumentam.

Por outro lado, a temperatura surge como um fator crítico que limita a mobilidade dos elétrons. O aumento da temperatura está associado a uma redução na mobilidade, o que sugere que o desempenho dos HEMTs pode ser comprometido em condições de alta temperatura.

Em relação a tensão do dreno, quando é aumentada, leva a um aumento na queda de tensão ao longo da camada de transporte e reduz a transmissão do campo elétrico aplicado. Como resultado, observa-se que a mobilidade dos portadores de carga pode diminuir.

No que diz respeito às técnicas de fabricação, elas desempenham um papel crucial na mobilidade ideal dos elétrons nos HEMTs. Diferentes abordagens podem influenciar significativamente na qualidade do dispositivo e, conseqüentemente, sua mobilidade eletrônica. Neste estudo, constatou-se maior mobilidade em dispositivos γ , desenvolvidos com 2 implantes ativos, com um processo específico de tratamento térmico para criar contatos ôhmico.

Em resumo, a compreensão das dependências da mobilidade dos elétrons em HEMTs é fundamental para o desenvolvimento de dispositivos com melhor desempenho e eficiência em aplicações eletrônicas. Esses estudos não apenas contribuem para avanços na tecnologia de transistores, mas também fornecem informações valiosas para a otimização contínua de projetos e fabricação desses dispositivos.

O estudo mostrou, ainda, que seria oportuna a elaboração de um arquivo de simulação, baseado nos dispositivos experimentais aqui abordados, a fim de avaliar e aprofundar os aspectos do comportamento da mobilidade em dispositivos HEMT, o que tornaria possível, de forma mais ampla, aferir a influência de elementos construtivos e elétricos no comportamento do dispositivo.

Outrossim, foi possível observar que a densidade de portadores é um tema que tomou bastante atenção na análise dos resultados do trabalho. Deste modo, pretender-se futuramente realizar um estudo sobre o nível de influência da densidade de portadores na mobilidade, considerando invariantes todos os aspetos estudados neste trabalho.

6 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento do trabalho foi possível elaborar as publicações que seguem referenciadas abaixo:

6.1 Artigos publicados em congressos internacionais e nacionais

- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; ANDRADE, M. G. C. **Electron mobility in AlGa_N/Ga_N High-Electron Mobility Transistors**. 2023. Trabalho apresentado no Workshop on Semiconductors and Micro and Nano Technology, 27., 2024, Campinas.
- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. Mobility Extraction Methods in AlGa_N/Ga_N HEMTs. *In: SYMPOSIUM ON MICROELECTRONICS TECHNOLOGY AND DEVICES*, 37., 2023, Rio de Janeiro. **Proceedings** [...]. [Piscataway]: IEEE, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10302530>. Acesso em: 22 jan. 2024.
- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. **Mobility Impact of Source-Drain Series Resistance on Carrier Mobility in High Electron Mobility Transistors (HEMTs)**. 2024. Trabalho apresentado no Joint International Eurosoi Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon, 10., 2024, Atenas.
- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. **Study of Electron Mobility in AlGa_N/Ga_N HEMTs**. 2024. Trabalho apresentado no Workshop on Semiconductors and Micro and Nano Technology, 28., 2024, São Paulo.

6.2 Artigos submetidos para publicação

- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. **Characterization of AlGa_N/Ga_N HEMTs with Different Manufacturing Characteristics**. 2024. Trabalho submetido e aprovado para apresentação no Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 38., 2024, João Pessoa.
- ✓ PANZO, E. C.; GRAZIANO JUNIOR, N.; SIMOEN, E.; ANDRADE, M. G. C. Investigation into the Impact of Source-Drain Series Resistance on Electrical Parameters of AlGa_N / Ga_N High Electron Mobility Transistors. **Solid-State Electronics**, [Oxford], [2024?]. Submetido para publicação.

REFERÊNCIAS

- AJAYAN, J.; NIRMAL, D. **Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- AKASAKA, T.; KOIDE, Y.; NAGAHAMA, S.; SUMIYA, M.; MAKINO, T.; TANIKAWA, T.; HONDA, Y.; AMANO, H. Growth of high quality GaN with very low concentration of impurities by MOCVD using a new nitrogen source. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tóquio, v. 59, n. 11, p. 110301, 2020.
- ALBERTIN, K. F. **Estudo e Fabricação de Capacitores MOS com camada isolante de SiO_xNy depositada por PECVD**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- AMINBEIDOKHTI, A. **Measurement and Analysis of Electron Mobility in GaN Power HEMTs**. 2016. Tese (Doutorado em Filosofia) - Griffith School of Engineering, Queensland, 2016.
- AMINBEIDOKHTI, A.; DIMITRIJEV, S.; HAN, J.; XU, X.; WANG, C.; QU, S.; MOGHADAM, H. A.; TANNER, P.; MASSOUBRE, D.; WALKER, G. A method for extraction of electron mobility in power HEMTs. **Superlattices and Microstructures Journal**, v. 85, p. 543-550. 2022.
- BALIGA, J. **Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.
- BERGAMIM, L. F. O. **Investigação de Parâmetros Elétricos, Analógicos e Ruído de Baixa Frequência em Transistores de Alta Mobilidade de Elétrons**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2022.
- COLINGE, J. P.; COLINGE, C. A. **Physics of Semiconductor Devices**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

DOE, A.; SMITH, J.; JONES, K. The Impact of Temperature on High Electron Mobility Transistors (HEMTs). **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 57, n. 12, p. 3456-3462, 2020.

HEGAZI, E. S.; EL-KADY, I. F.; ISMAIL, M. A. A Comprehensive Study of High Electron Mobility Transistors (HEMTs) for High-Speed and High-Power Applications. **IEEE Access**, New Jersey, v. 7, p. 116431-116452, 2019.

IM, K.; CHOI, J.; HWANG, Y.; AN, S. J.; ROH, J.; KANG, S.; LEE, J.; LEE, J. **1/f noise characteristics of AlGaN/GaN HEMTs with periodically carbon doped GaN buffer layer**. Amsterdam: Microelectronic Engineering, 2019.

KAUSHIK, P. K.; SINGH, S. K.; GUPTA, A.; BASU, A.; CHANG, E. Y. **Resistive Approach for Extraction of Bias-Dependent Parasitic Resistance, Mobility and Virtual Gate Length in GaN HEMT**. New Jersey: IEEE Silicon Nanoelectronics, 2020.

KAUSHIK. P. K., SINGH. S. K., GUPTA A., BASU. A., CHANG. E.Y. **Resistive approach for polarization dependent parasitic resistance extraction, mobility and virtual gate length in GaN HEMT**. New Jersey: IEEE Silicon Nanoelectronics, 2020.

KILCHYTSKA, V.; RUDENKO, T.; COLLAERT, N; ROOYACKERS, R. **Mobility characterization in FinFETs using split c-v technique**. Heidelberg: Materials Science Journal, 2005.

LAKHDHAR, H. **Reliability assessment of GaN HEMTs on Si substrate with ultra-short gate dedicated to power applications at frequency above 40 GHz**. Bordeaux: Université de Bordeaux, 2018.

MANO, M.; KIME, C.R. **Dispositivos e Circuitos Integrados: Análise e Projeto**. Porto Alegre: Bookman, 2020.

MEDJDOUB, F.; CARLIN, J.F.; GONSCHOREK, M.; FELTIN, E.; PY, M. A.; DUCATTEAU, D.; GAQUIÈRE, C.; GRANDJEAN, N.; KOHN, E. **Can InAlN/GaN be an alternative to high power / high temperature AlGaIn/GaN**. New Jersey: IEEE Transactions on Electron Devices, DOI: 10.1109/IEDM.2006.346935, 2007.

MENEGHESSO, G.; VERZELLESI, G.; PIEROBON, R.; RAMPAZZO, F.; CHINI, A.; MISHRA, U. K.; CANALI, C.; ZANONI, E. A new method for the extraction of the electron mobility in HEMTs. **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 49, n. 10, p. 1770-1776, 2002.

MILLMAN, JACOB; HALKIAS, CHRISTOS C. **Microeletrônica**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MIMURA, T. The early history of the high electron mobility transistor (HEMT). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, New Jersey, v. 50, n. 3, p. 780 782, 2002.

MOHAPATRA, M.; PANDA, A. K. Design and Simulation of AlGaAs/InGaAs/GaAs based Pseudomorphic HEMT using SILVACO ATLAS. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA SCIENCE AND BUSINESS ANALYTICS*, 2., 2018, Changsha. **Proceedings** [...]. [Piscataway]: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8588887>. Acesso em: 3 jan. 2024.

PERALAGU, U.; ALIAN, A.; PUTCHA, V.; KHALED, A.; RODRIGUEZ, R.; SIBAJAHERNANDEZ, A.; CHANG, S.; SIMOEN, E.; ZHAO, S. E.; DE JAEGER, B.; FLEETWOOD, D. M.; WAMBACQ, P.; ZHAO, M.; PARVAIS, B.; WALDRON, N.; COLLAERT, N. CMOS-compatible GaN-based devices on 200mm-Si for RF applications: Integration and Performance. *In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRON DEVICES MEETING*, 65., 2019, San Francisco. **Proceedings** [...]. [Piscataway]: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8993582>. Acesso em: 16 mar. 2023.

PRADEEP, D.; RAWAL, D. S. Comparison of Two DC Extraction Methods for Mobility and Parasitic Resistances in a HEMT. **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 64, n. 4, 2017.

REICH, HOWARD J. **Dispositivos eletrônicos de alta frequência**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2007.

SANTOS, C. D. G. **Estudo da Mobilidade em Dispositivos SOI Planares e de Múltiplas Portas**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SCHALLER, R. R. Moore's law: Past, present, and future. **IEEE Spectrum**, New Jersey, v. 55, n. 6, p. 52-59, 2018.

SEDRA, A.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. Oxford: Oxford University Press, 1971.

SHI, L.; LIU, M.; DONG, N.; LIN, X. Dual-metal-gate AlGaIn/GaN HEMTs for Power Application. *In: IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, 14., 2018, Qingdao. **Proceedings** [...]. [Piscataway]: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8565730>. Acesso em: 23 set. 2023.

SHUR, M. S. **High Electron Mobility Transistors: Fundamentals, Device Fabrication, and Applications**. Singapura: World Scientific Publishing Co Inc, 2009.

SUN, J.; JENA, D.; XING, H. 2D GaN HEMTs: Recent Progress and Future Challenges. **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 69, n. 6, p. 917-925, jun. 2022.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Impresso ISBN: 9780471143239, ISBN on-line: 9780470068328 | DOI: 10.1002/0470068329, 2007.

TAKAKURA, K.; PUTCHA, V.; SIMON, E.; ALIAN, A.; PERALAGU, U.; WALDRON N.; PARVAIS B.; COLLAERT N. Low-Frequency Noise Investigation of GaN/AlGaIn Metal–Oxide–Semiconductor High-Electron-Mobility Field-Effect Transistor with Different Gate Length and Orientation. **IEEE Transactions on Electron Devices**, New Jersey, v. 67, n. 8, p. 3062-3068, 2020.

ZHANG, Y., LIU, X., WANG, X., ZHANG, W. High-mobility two-dimensional electron gas in AlN/GaN heterostructures with polarization-induced doping. Washington: **ACS-Publications**, v. 117, n. 2, p. 022104, 2020.